

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

BÙI PHẠM ĐỨC TUỜNG

**ỨNG DỤNG BỀ CHỨA CHẤT LỎNG CÓ THÀNH MỎNG
TRONG VIỆC KHÁNG CHẤN VÀ ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG
CÔNG TRÌNH**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT**

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 09/2020

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

BÙI PHẠM ĐỨC TƯỜNG

**ỨNG DỤNG BỂ CHỨA CHẤT LỎNG CÓ THÀNH MỎNG
TRONG VIỆC KHÁNG CHẤN VÀ ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG
CÔNG TRÌNH**

NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT

Hướng dẫn khoa học:

- 1. TS. PHAN ĐỨC HUYNH**
- 2. PGS.TS LƯƠNG VĂN HẢI**

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 09/2020

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 19 tháng 09 năm 2020

(Ký tên và ghi rõ họ tên)

Bùi Phạm Đức Tường

LỜI CẢM ƠN

Đầu tiên, tác giả muốn gửi lời cảm ơn chân thành đến tất cả các Thầy Cô đã nhiệt tình giảng dạy và tạo điều kiện nghiên cứu trong thời gian tác giả học tập ở chương trình đào tạo Nghiên Cứu Sinh của Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Thành Phố Hồ Chí Minh. Đây là một trong những cơ hội quý báu nhất mà tác giả từng có được.

Tác giả mong muốn bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến TS. Phan Đức Huỳnh và PGS.TS. Lương Văn Hải là hai Thầy đã trực tiếp hướng dẫn và đi cùng tác giả trên chặng đường vừa qua để tác giả hoàn thành được Luận án này. Hai Thầy đã tạo điều kiện tốt nhất và nhanh chóng nhất giúp đỡ tác giả. Và trên hết hai Thầy đã truyền thụ một tinh thần hăng say làm việc để tác giả có thể tiếp tục cố gắng cho những nghiên cứu trong tương lai. Tác giả cũng xin được ghi nhận sự giúp đỡ của Th.S. Nguyễn Văn Đoàn đã đóng góp nhiều ý kiến sâu sắc, bổ ích cho tác giả. Ngoài ra, tác giả gửi lời tri ân đến những thành viên của Lab Mô Phỏng Động Đất thuộc Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM trong những ngày cùng làm việc.

Tác giả muốn dành cho Cha Mẹ mình lòng kính trọng thiết tha vì những gì Cha Mẹ đã hy sinh dành cho các con. Những lời dạy bảo của Cha Mẹ đã làm hành trang cho tác giả bước vào cuộc sống với quyết tâm cao nhất để đi đến ngày hôm nay.

Và cuối cùng, tác giả muốn gửi lời cảm ơn đến Người Bạn Đòi của mình. Mẹ của Sydney là người đã luôn động viên tác giả cố gắng không ngừng nghỉ trong từng giai đoạn làm luận án đặc biệt trong những lúc gặp nhiều khó khăn nhất.

Nhưng do kiến thức còn hạn chế cho nên chắc chắn không tránh khỏi những sai sót hay khiếm khuyết. Cho nên tác giả mong muốn nhận được lời góp ý chân thành của tất cả Thầy Cô hay độc giả để luận án này có thể được hoàn thiện hơn

Bùi Phạm Đức Tường

TÓM TẮT

Bể nước mái đóng vai trò như thiết bị giảm chấn chất lỏng-Tuned Liquid Damper (TLD) được nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn khá nhiều trong các thập niên gần đây, vì thiết bị có những ưu điểm như dễ chế tạo, dễ lắp đặt, giá thành rẻ, không cần bảo trì nhiều, tốn ít không gian và ứng dụng được cho hầu hết các loại công trình với quy mô khác nhau kể cả đối với các công trình đã được đưa vào sử dụng nhưng chưa trang bị TLD. Đây là thiết bị dạng bị động hoạt động dựa trên nguyên tắc điều chỉnh chất lỏng trong bể chứa để chịu dao động của kết cấu. Thiết bị có nhiều đặc điểm phù hợp với khả năng ứng dụng tại Việt Nam.

Trước đây các TLD thường được giả thiết là tuyệt đối cứng do thể tích nước đủ nhỏ, ngày nay các TLD ngày càng lớn nên giả thiết này cần phải xem xét lại nhằm tránh xảy ra hư hỏng hoặc thiết bị không hoạt động như thiết kế. Để phân tích ảnh hưởng của vấn đề thành bể mềm cũng như sự tương tác giữa sóng chất lỏng-kết cấu (Fluid Structure Interaction-FSI), phương pháp số được thiết lập cho cả hai miền rắn-lỏng. Luận Án chỉ ra mối quan hệ giữa độ dày thành bể với tần số riêng bể chứa, sau đó thực hiện phân tích các đặc trưng riêng và đáp ứng dao động của sóng chất lỏng. Ngoài ra, một phương pháp số mới được đề xuất gần đây Finite Volume Method/Finite Element Method-FVM/FEM được sử dụng để giải phương trình điều kiện biên tại mặt tương tác. Kết quả phân tích được đối chiếu với các Tiêu Chuẩn Xây Dựng phổ biến trên thế giới và các nghiên cứu đã thực hiện bởi các tác giả khác.

Thiết bị giảm chấn chất lỏng đa tần số (Multi-TLD) được chứng tỏ là có hiệu quả hơn thiết bị đơn tần số 1-TLD. Luận án đề xuất quy trình thiết kế MTLTLD gồm hai bước: (1) thiết kế MTLTLD bằng phương pháp khối lượng thu gọn, (2) kiểm tra sự làm việc của hệ kết cấu-MTLTLD bằng FVM/FEM. FVM/FEM có ưu điểm giúp phân tích đáp ứng dao động của hệ kết cấu chuẩn xác hơn vì có xét FSI nhưng nhược điểm là tốn nhiều tài nguyên tính toán, nên cần phương pháp khối lượng thu gọn thiết kế cơ sở trước. Việc phân tích TLD với thành bể mềm có xét FSI là một trong những điểm mới của luận án. Khi thành bể đủ mềm sẽ làm thay đổi tần số tự nhiên của bể chứa cũng như áp suất động của sóng chất lỏng tác dụng lên thành bể. Trong khi đó, thiết

bị này hoạt động dựa vào tần số nên nếu tần số thay đổi sẽ dẫn đến thiết bị mất hiệu quả, ngoài ra trong thực tế áp lực động của sóng có thể gây phá hoại thành bể do quá trình thiết kế thường giả thiết bể chứa tuyệt đối cứng và bỏ qua FSI.

Bên cạnh đó, thí nghiệm kiểm tra khả năng giảm chấn của TLD/MTLD được tiến hành trên bàn lắc tự chế tạo phục vụ cho luận án tại Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM. Kết quả thí nghiệm được so sánh với phương pháp số cho thấy hiệu quả giảm chấn của MTLD và tính hợp lý của quy trình thiết kế thiết bị được đề xuất bên trên.

ABSTRACT

A tuned liquid damper (TLD) constitutes a tank filled with liquid that relies on the sloshing of that liquid to dissipate vibration energy. This device boasts many advantages, including its low cost, ease of installation and infrequent need for maintenance. TLDs can be applied to almost any structure, for example, high-rise buildings, towers, wind turbine and chimneys, including an existing structure.

In previous research on TLDs, the effect of the liquid pressure acting on the tank walls was ignored by assuming rigid tank walls, thereby neglecting the fluid-structure interaction (FSI) phenomenon. However, this could lead to errors in designing TLDs and the failure of the water tanks serving as TLDs. In this study, the effect of FSI on the specific characteristics of the tank, as well as the effect on the dynamic response of fluid containers, are taken into account incorporating wall flexibility. For this purpose, a numerical method was developed to model the structure as well as the liquid and investigated the thickness of the tank wall to describe the relations of rigid and flexible tank. Besides that, the Finite Volume/Finite Element (FVM/FEM) method is proposed, by using finite volume and finite element approaches to represent fluid and solid domains, respectively. In this model, the fluid and solid domains are discretized independently and the interaction between the two domains are provided by the staggered iterations at the interface. The results from FVM/FEM are compared to the Design Code and previous study of another researcher.

The multiple TLD (MTLD), which consists of a number of TLD with natural frequencies distributed over certain range around the natural frequency of the structure is also investigated by simulation of the MTLD-structure interaction. MTLD is insensitive to the tuning condition. This dissertation focuses on proposing the solution and process of designing MTLD in practice with two steps: first, this damper is designed by lumped-mass method then second, it is checked by FVM/FEM. By this method, the response of liquid sloshing, as well as the structure, are more accurate because the FSI is considered. This phenomenon is important and could not be

ignored by making assumption of a rigid tank wall. When a tank wall is thin enough, FSI phenomenon affects remarkably to the characteristic of the TLD. In this case, the damper is inactivated during the earthquake. This should be noticed in designing TLD.

The shaking table is designed and created at the Faculty of Civil Engineering of HCMC University of Technology and Education for researching purposes. It can create the base displacement as harmonic loading or ground motion to investigate the top displacement of the structure with and without MTLD. There is a fairly reasonable agreement between the FVM/FEM model predictions and experimental results confirming the functionality of the FVM/FEM method as a reliable tool in capturing the TLD-structure interaction.

CÁC KẾT QUẢ ĐÃ CÔNG BỐ

Bài Báo Quốc Tế ISI/Scopus

1. **B. P. D. Tuong** and P. D. Huynh, "Experimental Test and Numerical Analysis of a Structure Equipped with a Multi-Tuned Liquid Damper Subjected to Dynamic Loading," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 20, p. 2050075, 2020
2. **B. P. D. Tuong**, P. D. Huynh, T.-T. Bui, and V. Sarhosis, "Numerical Analysis of the Dynamic Responses of Multistory Structures Equipped with Tuned Liquid Dampers Considering Fluid-Structure Interactions," *The Open Construction and Building Technology Journal*, vol. 13, 2019

Hội nghị Khoa Học Quốc Tế

3. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, Doan N.V, (11/2018) "Effectiveness Of Multi Tuned Liquid Dampers In Theory And Experiment Considering Fluid – Structure Interaction", *Tuyển tập báo cáo Hội Nghị Khoa Học Quốc Tế, Kỷ Niệm 55 năm thành lập Viện Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng*
4. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D (08/2016) "Seismic resistance for high-rise buildings using water tanks considering the liquid - tank wall interaction", *ICCM 2016, UC Berkeley, USA*

Bài Báo Trong Nước

5. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, (01/2019) "Dynamic analysis of liquid storage tank under seismic considering fluid – structure interaction", *Tạp chí xây dựng – Số 1/2019*
6. **Tuong B.P.D**, "Phân tích khả năng kháng chấn của thiết bị giảm chấn chất lỏng bằng lý thuyết và thực nghiệm", *Tạp chí xây dựng – Số 2/2017*
7. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, Hai L.V, Doan N.V, Chinh L.V "Khảo sát kháng chấn của hệ kết cấu khung – bể chứa nước trên bàn rung tự chế tạo khi dao động tự do", *Tạp Chí Xây Dựng – Số 9/2016*
8. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, Hai L.V "Điều khiển kết cấu chịu tải trọng điều hòa bằng các bể chứa chất lỏng làm việc đồng thời", *Tạp chí Xây Dựng – Số 10/2015*

Hội Nghị Khoa Học Trong Nước

9. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, Duong N.T, Hai L.V, (04/2019) “Phân tích khả năng giảm chấn kết cấu của thiết bị MTLĐ bằng lý thuyết MTMD & Thí nghiệm kiểm tra”, *Tuyển tập báo cáo Hội Nghị Cơ Học Toàn Quốc 2019, Tiểu ban Động Lực Học và Điều Khiển*.

10. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, Khoi N.Đ, Hai L.V, (04/2019) “Điều khiển dao động kết cấu bằng bể nước mái như thiết bị kháng chấn đa tần trong môi trường đa tương tác”, *Tuyển tập báo cáo Hội Nghị Cơ Học Toàn Quốc 2019, Tiểu ban Động Lực Học và Điều Khiển*.

11. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, Doan N.V, (12/2017) “Khả năng kháng chấn của hệ bể chứa đa tần số trong phân tích thực nghiệm trên bàn rung”, *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Cơ học Toàn quốc lần thứ X, Hà Nội – Học Viện Kỹ Thuật Quân Sự 8-9/12/2017*

12. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, Hai L.V, (10/2015) “Điều khiển kết cấu chịu tải trọng động bằng các bể chứa chất lỏng làm việc đồng thời”, *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học và công nghệ lần thứ 14 Khoa Xây Dựng – ĐH Bách Khoa Tp.HCM 30/10/2015*

13. **Tuong B.P.D**, Huynh P.D, (11/2015) “Điều khiển kết cấu chịu tác động của tải trọng điều hòa, động đất bằng bể chứa chất lỏng” Tr.838, Vol 1, *Tuyển tập báo cáo Hội nghị cơ khí toàn quốc – ĐH Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM 06/11/2015*

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN	ii
TÓM TẮT	iii
CÁC KẾT QUẢ ĐÃ CÔNG BỐ	vii
MỤC LỤC	ix
HÌNH ẢNH VÀ BẢNG BIỂU	xiii
DANH SÁCH CÁC TỪ VIẾT TẮT	xiii
CHƯƠNG 1	1
GIỚI THIỆU TỔNG QUAN	1
1.1 Giới thiệu về thiết bị giảm chấn bằng chất lỏng	1
1.2 Nghiên cứu đã thực hiện với TLD và bể chứa thành mềm.....	5
1.2.1 Ứng dụng thực tiễn của TLD trong các công trình cao tầng.....	5
1.2.2 Các nghiên cứu đã thực hiện đối với TLD	8
1.2.3 Tương tác của sóng chất lỏng – thành bể rắn.....	13
1.2.4 TLD có xét đến tương tác đa trường.....	19
1.3 Mục tiêu của Luận án	22
1.4 Tính mới của Luận án.....	23
1.5 Phạm vi nghiên cứu	23
1.6 Tóm tắt Luận án	23
CHƯƠNG 2	25
ĐẶC TRƯNG VÀ KHẢ NĂNG ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG CỦA THIẾT BỊ GIẢM CHẤN ĐA TẦN	25
2.1 Giới thiệu	25
2.2 Các thông số đặc trưng quan trọng của TLD.....	26
2.2.1 Tần số dao động riêng của bể chứa chất lỏng	26
2.2.2 Biên độ dao động của sóng chất lỏng	33
2.2.3 Áp suất thành bể và lực cắt đáy bể	35
2.3 Phân tích hiệu quả giảm chấn mô hình MTMD tương đương MTLĐ.....	37

2.3.1	Nguyên lý hoạt động của MTMD	38
2.3.2	Phương pháp điều khiển dao động.....	39
2.3.3	Kết cấu dao động tự do và tỉ số cản	41
2.3.4	Ứng dụng MTMD cho hệ MDOF chịu tải trọng động	42
2.3.5	Ví dụ áp dụng.....	45
2.3.6	Nhận xét và kết luận.....	51
2.4	Phương pháp khối lượng thu gọn quy đổi MTLD như MTMD	51
2.4.1.	Phương pháp khối lượng thu gọn	52
2.4.2.	Đặc trưng cản của sóng chất lỏng trong bể chứa chữ nhật	53
2.4.3.	Ứng dụng SAP2000 trong phương pháp quy đổi MTLD như MTMD ...	53
2.4.3.1.	Các tham số quan trọng khi thiết kế MTLD	54
2.4.3.2.	Ảnh hưởng của tỉ số khối lượng MTLD	54
2.4.3.3.	Ảnh hưởng của dải tần số hoạt động MTLD	54
2.4.3.4.	Ứng dụng MTLD trong điều khiển dao động kết cấu	55
2.5	Tóm tắt chương 2	60
CHƯƠNG 3		62
BỂ CHỨA CHỊU TẢI TRỌNG ĐỘNG CÓ XÉT TƯƠNG TÁC CHẤT LỎNG -		
THÀNH BỂ.....		62
3.1	Tổng quan và tầm quan trọng của sự tương tác chất lỏng – thành bể.....	63
3.2	Phương pháp giải tích phân tích tần số tự nhiên của bể chứa thành mềm	66
3.3	Tính toán bể chứa thành mềm theo các Tiêu Chuẩn Xây Dựng phổ biến	71
3.3.1	Thiết kế bể chứa theo tiêu chuẩn ACI 350.3-06.....	71
3.3.2	Thiết kế bể chứa theo tiêu chuẩn IS 1893 - 2002	73
3.3.3	Thiết kế bể chứa chịu tải trọng động theo EUROCODE 8 – Part 4.....	75
3.3.4	Ví dụ áp dụng.....	77
3.4	Ứng dụng FEM phân tích dao động bể chứa có xét FSI	81
3.4.1	Giới thiệu.....	81
3.4.2	FEM mô phỏng miền kết cấu có xét FSI.....	82
3.4.3	Ma trận trường cặp đôi của hệ chất lỏng-thành bể	83
3.4.4	FEM mô phỏng miền chất lỏng có xét FSI	86

3.4.5	Đặc trưng cản của sóng chất lỏng	90
3.4.6	Ví dụ phân tích dao động bể chứa có xét FSI	91
3.4.6.1	Tần số tự nhiên bể khi xét FSI.....	91
3.4.6.2	Đáp ứng dao động miền chất lỏng khi xét FSI.....	93
3.4.6.3	Đáp ứng dao động miền kết cấu thành bể khi xét FSI.....	95
3.4.6.4	Nhận xét.....	96
3.5	FVM/FEM trong phân tích bể chứa chất lỏng chịu động đất	97
3.5.1	Tần số tự nhiên bể chứa	97
3.5.2	Áp lực động của sóng chất lỏng lên thành bể.....	100
3.6	Tóm tắt chương 3	103
CHƯƠNG 4		106
THIẾT KẾ THIẾT BỊ GIẢM CHẤN TLD CÓ XÉT TƯƠNG TÁC CHẤT LỎNG – THÀNH BỂ.....		106
4.1	Giới thiệu chung	106
4.2	Các nghiên cứu về giảm chấn kết cấu sử dụng TLD có xét FSI.....	107
4.3	FVM/FEM phân tích dao động kết cấu với MTLD	109
4.3.1	FVM phân tích miền chất lỏng có xét FSI	111
4.3.2	FEM phân tích kết cấu cần điều khiển dao động.....	113
4.3.3	Giải quyết phương trình điều kiện biên tại mặt tương tác	115
4.4	Quy trình thiết kế MTLD.....	118
4.4.1	Lựa chọn khối lượng MTLD	119
4.4.2	Lựa chọn dải tần số hoạt động của MTLD.....	119
4.4.3	Hệ số cản C của kết cấu khung.....	119
4.5	Ứng dụng FVM/FEM phân tích khả năng giảm chấn của MTLD.....	121
4.5.1	Khung dao động tự do.....	124
4.5.2	MTLD điều khiển dao động khung khi chịu tải trọng điều hoà.....	125
4.5.3	MTLD điều khiển dao động khung khi chịu tải trọng nền kích thích ...	127
4.5.4	Nhận xét và kết luận.....	130
4.6	Ảnh hưởng của thành bể mềm khi xét FSI đến hiệu quả TLD	130
4.6.1	Khung chịu tải điều hòa	132

4.6.2	Khung chịu động đất Elcentro	134
4.7	Tóm tắt chương 4	136
CHƯƠNG 5		138
THÍ NGHIỆM ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG KẾT CẤU TRÊN BÀN LẮC TỰ CHẾ TẠO		138
5.1	Phương pháp thí nghiệm	138
5.2	Cơ sở lý thuyết chế tạo bàn lắc (shaking table)	139
5.3	Thiết lập mô hình thí nghiệm	142
5.4	Tiến hành thí nghiệm và kết quả	145
5.4.1	Phân tích tần số dao động riêng	145
5.4.2	Hiệu quả MTLD khi khung dao động tự do	146
5.4.3	Hiệu quả MTLD khi khung dao động điều hòa	149
5.4.4	Hiệu quả MTLD khi khung chịu dao động nền kích thích	151
5.5	Tóm tắt chương 5	153
CHƯƠNG 6		155
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO		155
6.1	Kết Luận	155
6.2	Kiến nghị	156
PHỤ LỤC		157
A.	Lập trình Matlab hệ MDOF với MTMD	157
A.1	Phân tích dao động MDOF với MTMD trên miền tần số	157
A.2	MDOF với MTMD chịu tải điều hòa	158
A.3	MDOF với MTMD chịu động đất El Centro	160
B.	Chương trình điều khiển dao động bàn lắc	164
B.1	Giao diện và thông số đầu vào	164
B.1	Kết quả phân tích, thông số đầu ra	165
TÀI LIỆU THAM KHẢO		168

DANH SÁCH CÁC TỪ VIẾT TẮT

Các Chữ Viết Tắt

ACI	American Concrete Institute: Viện Bê Tông Hoa Kỳ
ALE	Arbitrary Lagrangian Euler
BEM	Boundary Element Method: Phương pháp phần tử biên
EC	Euro Code: Tiêu chuẩn thiết kế Châu Âu
IS	Indian Standard: Tiêu chuẩn thiết kế Ấn Độ
DOF	Degree of Freedom: Bậc tự do
FSI	Fluid-Structure Interaction: Tương tác hai miền kết cấu-chất lỏng
FEM	Finite Element Method: Phương pháp phần tử hữu hạn
FVM	Finite Volume Method: Phương pháp thể tích hữu hạn
FVM/FEM	Finite Volume Method/ Finite Element Method
MTLD	Multi Tuned Liquid Damper: Thiết bị giảm chấn chất lỏng đa tần
MTMD	Multi Tuned Mass Damper: Thiết bị giảm chấn khối lượng đa tần
MDOF	Multi Degree of Freedom: hệ nhiều bậc tự do
TLD	Tuned Liquid Damper: Thiết bị giảm chấn chất lỏng
TLCD	Tuned Liquid Column Damper: Thiết bị giảm chấn cột chất lỏng
TMD	Tuned Mass Damper: Thiết bị giảm chấn khối lượng
RTHS	Real Time Hybrid Simulation
SDOF	Single Degree of Freedom: hệ một bậc tự do
SPH	Smoothed-Particle Hydrodynamics
SRSS	Square Root of the Sum of the Squares
STLD	Single Tuned Liquid Damper

Ký Tự La Mã

L	Chiều dài bể chứa ($L=2a$)
B	Chiều rộng bể chứa
C	Ma trận cản

C_f	Ma trận cản của chất lỏng tính theo Rayleigh
e_x, e_y, e_z	Véc tơ đơn vị các phương x, y, z
E_c	Module đàn hồi của bê tông
f_{tank}	Tần số riêng cơ bản của bể chứa chất lỏng
F_D	Lực cản
F_I	Lực quán tính
F_S	<i>Lực do độ cứng</i>
g	Gia tốc trọng trường
H_0	Cao độ khối lượng xung cứng mô hình Housner
H_1	Cao độ khối lượng xung đối lưu mô hình Housner
h_f	Chiều cao chất lỏng
h_w	Chiều cao bể chứa
h_L, h_R	Chiều cao sóng ở thành bể trái và phải của bể chứa
$\mathbf{K}$	Ma trận độ cứng
k	Độ cứng quy đổi của lò xo trong mô hình tương đương
$\mathbf{M}$	Ma trận khối lượng
M_0	Khối lượng xung cứng
M_1	Khối lượng xung đối lưu
M	Khối lượng chất lỏng
m_s	Khối lượng kết cấu cần điều khiển dao động
$\mathbf{N}$	Ma trận hàm dạng
n	Hàm dạng thứ n của sóng chất lỏng
$\mathbf{n}$	vecto đơn vị theo mặt ướt của bể
P	Áp suất động của sóng chất lỏng
p_w	Áp suất động của sóng chất lỏng lên thành bể
p_b	Áp suất động của sóng chất lỏng tại đáy bể

Q	Ma trận trường cặp đôi
t_w	Độ dày thành bể
u, v, w	Các thành phần vận tốc sóng theo hướng x, y và z
$\ddot{u}$	Gia tốc của kết cấu cần điều khiển dao động
$\ddot{u}_g$	Gia tốc của đất nền
$X(t)$	Chuyển vị nền
x-y-z	Tọa độ địa phương
X-Y-Z	Tọa độ tổng thể

Ký Tự Hy Lạp

ϕ	Hàm thế vận tốc dao động sóng chất lỏng
ρ_l, ρ_w	Khối lượng riêng chất lỏng và khối lượng riêng của thành bể
η	Chuyển vị của sóng ở mặt thoáng
ξ	Tỷ số cản
ξ_s	Tỷ số cản của kết cấu
ξ_f	Tỷ số cản của chất lỏng bên trong bể
Ω	Tần số kích thích dao động nền theo phương ngang
τ_d	Chu kỳ dao động có cản
ω	Tần số dao động vòng của sóng chất lỏng
ω_s	Tần số dao động vòng của kết cấu cần điều khiển dao động
ν	Hệ số Poisson
ν_f	Hệ số nhớt động học chất lỏng ($=0.8926\text{e-}6 \text{ m/s}^2$)
$\varphi, \varphi_{pre}, \varphi_{new}$	Vecto lực tại mặt tương tác ở bước thời gian hiện tại, trước và sau
ε^*	Giá trị điều kiện hội tụ
ε_{toler}	Giá trị mục tiêu hội tụ

DANH SÁCH CÁC HÌNH ẢNH

Hình 1. 1 Tòa nhà One Rincon Hill với bể nước mái là TLD.....	1
Hình 1. 2 Nguyên lý hoạt động của TLD.....	2
Hình 1. 3 Dao động của sóng bên trong TLD	2
Hình 1. 4 TLD (a) với các vách ngăn (b)	3
Hình 1. 5 Công trình The Vista cao 100 tầng với 6-TLD.....	4
Hình 1. 6 TLD dùng trên tàu biển.....	5
Hình 1. 7 TLD dùng trên phi thuyền	5
Hình 1. 8 Thiết bị MCC Aqua Damper ở tòa nhà Gold Tower	6
Hình 1. 9 Thiết bị TLD ở Shin Yokohama Tower	6
Hình 1. 10 Thiết bị TLCD trong công trình khách sạn Cosima, Tokyo	7
Hình 1. 11 Tòa nhà Comcast với TLD có 1.1 triệu lít nước	8
Hình 1. 12 Tòa nhà Gama với mô hình TLD thí nghiệm.....	8
Hình 1. 13 Quy trình mô phỏng Real-time hybrid simulation	11
Hình 1. 14 Cầu Bãi Cháy với hệ MTLD.....	13
Hình 1. 15 Mô hình tương tác rắn lỏng khi thành bể đàn hồi	14
Hình 1. 16 Chất lỏng trong bể gồm: xung cứng và xung đối lưu	14
Hình 1. 17 Khung 9 tầng có xét tương tác đa trường	20
Hình 2. 1 Nguyên lý hoạt động của TLD tương tự TMD.....	25
Hình 2. 2 Sóng chất lỏng dao động trong bể.....	27
Hình 2. 3 Quan hệ chiều cao chất lỏng và tần số riêng của bể.....	31
Hình 2. 4 Mode dao động cơ bản của bể chứa $T0.59 \times 0.03$	32
Hình 2. 5 Bể chứa chất lỏng 7.776 m^3 (thông thủy $18\text{m} \times 48\text{m} \times 9\text{m}$)	32
Hình 2. 6 Tần số bể chứa chất lỏng 7.776 m^3	33
Hình 2. 7 Chiều cao sóng tại tần số cộng hưởng $f=1.11\text{Hz}$ với $h_{\text{water}} = 5\text{cm}$	35
Hình 2. 8 Lực cắt đáy tác dụng lên bể $F=P_0+P_n$	36
Hình 2. 9 Áp suất chất lỏng tại tần số cộng hưởng $f=1.1\text{Hz}$ với $h_f=5\text{cm}$	37
Hình 2. 10 Hệ N-DOF có sử dụng n-TLD	38
Hình 2. 11 Hệ 1-DOF với n-TMD đặt song song	39
Hình 2. 12 Sơ đồ tính MTLD tương tự MTMD.....	39
Hình 2. 13 Phân bố tần số trong hệ MTLD.....	40
Hình 2. 14 Dao động tự do có cản ít.....	42
Hình 2. 15 Đáp ứng tần số của hệ 1DOF	47
Hình 2. 16 Đáp ứng tần số của hệ 5DOF	47
Hình 2. 17 Đáp ứng tần số của hệ 10DOF.....	47
Hình 2. 18 Gia tốc nền dao động điều hòa.....	48
Hình 2. 19 Đáp ứng chuyển vị đỉnh hệ SDOF khi không có và có TMD	48
Hình 2. 20 Đáp ứng chuyển vị đỉnh hệ 5DOF khi không có và có 1-TMD	49
Hình 2. 21 Đáp ứng chuyển vị đỉnh hệ 10DOF khi không có và có 1-TMD	49
Hình 2. 22 Hệ 5DOF sử dụng MTMD	49
Hình 2. 23 Động đất Elcentro 1940.....	50

Hình 2. 24 Khả năng giảm chấn của MTMD khi kết cấu chịu động đất.....	50
Hình 2. 25 Mô hình quy đổi bể chứa chất lỏng thành hệ m-c-k	52
Hình 2. 26 Mô hình quy đổi TLD thành TMD dùng phân tích trong SAP2000.....	54
Hình 2. 27 Khung thép thí nghiệm.....	55
Hình 2. 28 Khung và MTLĐ trong SAP2000.....	55
Hình 2. 29 Khai báo tải dao động điều hoà trong SAP2000.....	57
Hình 2. 30 Phản ứng động của khung thép chịu tải điều hoà với 0,1,3,5TLD	57
Hình 2. 31 Chuyển vị đỉnh khung giữa SAP2000 và thí nghiệm.....	58
Hình 2. 32 Phổ gia tốc nền tạo ra từ bàn lắc	59
Hình 2. 33 Hiệu quả giảm chấn MTLĐ bằng SAP2000 đối chiếu thí nghiệm.....	60
Hình 3. 1 Mặt tương tác chất lỏng – thành bể.....	62
Hình 3. 2 Hư hỏng bể chứa do hiện tượng FSI	64
Hình 3. 3 Mô hình chất điểm tập trung tương đương của bể chứa.....	65
Hình 3. 4 Hệ toạ độ Cartesian mô tả phương trình dao động sóng.....	67
Hình 3. 5 Phân biệt tương tác FSI một và hai chiều.....	71
Hình 3. 6 Các thành phần lực tác dụng vào thành bể.....	72
Hình 3. 7 Áp lực xung cứng tác dụng lên thành bể.....	73
Hình 3. 8 Áp lực xung đối lưu tác dụng lên thành bể.....	73
Hình 3. 9 Sơ đồ tóm tắt quy trình tính toán theo IS1893:2002.....	74
Hình 3. 10 Áp lực xung cứng không thứ nguyên dọc chiều cao EC8 – Part 4	75
Hình 3. 11 Áp lực xung đối lưu không thứ nguyên dọc chiều cao EC8 – Part 4.....	76
Hình 3. 12 Sơ đồ tóm tắt quy trình tính toán theo EC8 – Part 4	77
Hình 3. 13 Tính áp lực sóng lên bể BTCT chịu động đất.....	77
Hình 3. 14 Áp lực động của nước theo ACI 350.3-06.....	78
Hình 3. 15 Biểu đồ hệ số áp lực của xung cứng và đối lưu lên thành bể.....	78
Hình 3. 16 Biểu đồ hệ số áp lực của xung cứng và đối lưu tại đáy bể.....	78
Hình 3. 17 Biểu đồ áp lực xung cứng, đối lưu, quán tính lên thành bể.....	79
Hình 3. 18 Biểu đồ áp lực xung cứng và đối lưu, quán tính tại đáy bể.....	79
Hình 3. 19 Áp lực động của sóng chất lỏng theo IS 1893:2002	79
Hình 3. 20 Đồ thị áp lực nước động phân bố theo EC 8: Part 4.....	80
Hình 3. 21 So sánh áp lực động chất lỏng theo các Tiêu Chuẩn thiết kế bể chứa.....	80
Hình 3. 22 Rời rạc hóa bể chứa chất lỏng có xét FSI.....	81
Hình 3. 23 Hệ n-DOF dao động theo phương y	82
Hình 3. 24 Phần tử tiếp xúc trên biên chất lỏng-thành bể	84
Hình 3. 25 Quan hệ giữa hệ số tương quan và tần số tự nhiên	92
Hình 3. 26 Mô phỏng bể chất lỏng $6m \times 1m \times 0.5m \times t_w$ với ANSYS.....	93
Hình 3. 27 Phân tích đáp ứng biên độ sóng trên miền tần số	93
Hình 3. 28 Đáp ứng biên độ lớn nhất của sóng khi thành bể dày.....	94
Hình 3. 29 Ảnh hưởng độ dày thành bể đến biên độ dao động sóng	94
Hình 3. 30 Nội lực trong bể do dao động sóng chất lỏng gây ra.....	95
Hình 3. 31 Ảnh hưởng của bể dày đến độ lớn mô men thành bể trái.....	95
Hình 3. 32 Ảnh hưởng của bể dày đến độ lớn mô men thành bể phải	96
Hình 3. 33 Ảnh hưởng của việc xét tương tác FSI đến tần số riêng của bể	100

Hình 3. 34 Ảnh hưởng FSI đến p_w tác dụng lên thành bể.....	101
Hình 3. 35 So sánh kết quả áp lực lên thành bể với Hashemi (2013) [73].....	101
Hình 3. 36 Ảnh hưởng độ dày thành bể đến áp lực động khi có xét FSI.....	102
Hình 3. 37 Áp lực động của sóng lên bể thành mềm có xét FSI.....	103
Hình 3. 38 Áp lực động của sóng lên bể thành cứng có xét FSI.....	103
Hình 4. 1 TLD kích thước $1.6 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}^3$ với thành bể thép dày 1mm.....	107
Hình 4. 2 Thiết lập thí nghiệm với khung ba tầng có MTLD.....	108
Hình 4. 3 Lưu đồ mô phỏng sự làm việc đồng thời của hai miền rắn-lỏng.....	110
Hình 4. 4 Quy trình phân tích kết cấu sử dụng TLD bằng RTHS.....	111
Hình 4. 5 Phần tử thể tích điều khiển.....	112
Hình 4. 6 Hệ số tỷ lượng thể tích C của bể chứa $T0.2 \times 0.3 \text{ m}$	113
Hình 4. 7 Sự truyền lực tại mặt tương tác rắn-lỏng.....	116
Hình 4. 8 Quy trình phân tích FSI-2 chiều bằng FVM/FEM.....	117
Hình 4. 9 Quan hệ tần số - tỷ số cản trong cản Reyleigh.....	120
Hình 4. 10 Quy trình thiết kế MTLD.....	121
Hình 4. 11 Phân tích phản ứng động khung thép sử dụng MTLD giảm chấn.....	122
Hình 4. 12 Hệ bể chứa $0.15 \text{ m} \times 0.10 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}$ ($D \times R \times C$).....	123
Hình 4. 13 Kết quả tần số khung 1 tầng theo ANSYS.....	124
Hình 4. 14 Sự tắt dần dao động khung khi không sử dụng TLD.....	125
Hình 4. 15 So sánh sự tắt dần dao động với 0-TLD giữa ANSYS và thí nghiệm.....	125
Hình 4. 16 Chuyển vị đỉnh khung khi cộng hưởng với 0-TLD.....	125
Hình 4. 17 Hiệu quả giảm chấn MTLD khi khung chịu dao động nền điều hòa.....	126
Hình 4. 18 Dao động sóng khi sử dụng 5TLD tại 3.3s và 15.2s.....	127
Hình 4. 19 Dữ liệu dao động nền kích thích trên bàn lắc.....	127
Hình 4. 20 Hiệu quả giảm chấn MTLD khi khung chịu dao động nền kích thích.....	128
Hình 4. 21 Sóng chất lỏng ở 4.5s và 17.2s khi chịu dao động nền kích thích.....	129
Hình 4. 22 Hiệu quả giảm chấn của MTLD khi phân tích bằng FVM/FEM.....	129
Hình 4. 23 Khung phẳng sử dụng bể nước mái như thiết bị TLD.....	131
Hình 4. 24 Chuyển vị đỉnh khung 8 tầng khi không có TLD.....	132
Hình 4. 25 Chuyển vị đỉnh khung 8 tầng khi có TLD với thành bể cứng.....	133
Hình 4. 26 Chuyển vị đỉnh khung 8 tầng khi có TLD với thành bể mềm.....	134
Hình 4. 27 Hiệu quả giảm chấn TLD thành cứng khi khung chịu động đất.....	135
Hình 4. 28 Hiệu quả giảm chấn TLD thành mềm khi khung chịu động đất.....	135
Hình 4. 29 Momen khung với TLD có độ dày khác nhau.....	136
Hình 5. 1 Bàn lắc tự chế tạo.....	139
Hình 5. 2 Nguyên lý hoạt động của động cơ tay quay con trượt với (1): trục khuỷu, (2) thanh truyền, (3) con trượt mang bàn lắc.....	140
Hình 5. 3 Các bộ phận chính của bàn lắc.....	141
Hình 5. 4 Chi tiết cơ khí lắp đặt thiết bị.....	141
Hình 5. 5 Khung thép được thí nghiệm giảm chấn bằng MTLD.....	142
Hình 5. 6 Thiết lập thí nghiệm với (a) cảm biến chuyển vị, (b) cảm biến gia tốc và (c) hộp biến tần.....	143

Hình 5. 7 Kích thước hình học và chiều chuyển động khung thí nghiệm	144
Hình 5. 8 Giao diện chương trình điều khiển bàn lắc.....	144
Hình 5. 9 Khung thép thí nghiệm và tần số khung từ SAP2000.....	145
Hình 5. 10 Chuyển vị đỉnh khung dao động tự do so sánh ANSYS	146
Hình 5. 11 Dao động tắt dần khi khung dao động tự do với MTLD	147
Hình 5. 12 Dao động tắt dần với MTLD và quả nặng tương đương.....	148
Hình 5. 13 Hiệu quả MTLD khi khung chịu dao động nền điều hoà	150
Hình 5. 14 Khung dao động điều hoà với quả nặng tương đương MTLD	151
Hình 5. 15 Thí nghiệm khung với 0-TLD chịu dao động nền kích thích	152
Hình 5. 16 Thí nghiệm khung với MTLD chịu dao động nền kích thích	152

DANH SÁCH CÁC BẢNG

Bảng 2.1 Sự phụ thuộc của tần số riêng bể chứa vào chiều cao chất lỏng.....	30
Bảng 2. 2 Tần số riêng bể chứa với các lưới phần tử khác nhau	31
Bảng 2. 3 Tối ưu kết quả cho hệ 1-DOF	45
Bảng 2. 4 Tối ưu kết quả cho hệ 5-DOF	46
Bảng 2. 5 Tối ưu kết quả cho hệ 10-DOF	46
Bảng 2. 6 Tần số các TLD và dải băng tần tương ứng	56
Bảng 2. 7 Đặc trưng quy đổi của TLD để mô phỏng số.....	56
Bảng 3. 1 Tần số tự nhiên các bể chứa chất lỏng không xét FSI.....	91
Bảng 3. 2 Quan hệ tần số riêng của bể với hệ số ứng xử.....	92
Bảng 3. 3 So sánh độ chính xác của FEM khi phân tích tần số bể chứa	93
Bảng 3. 4 Ảnh hưởng của độ dày thành bể đến tần số riêng của bể.....	97
Bảng 3. 5 Tần số và hàm dạng bể chứa khi có xét và không xét FSI	98
Bảng 4. 1 Đặc trưng của khung thép 1 tầng và MTLĐ sử dụng	122
Bảng 4. 2 Tần số tự nhiên khung thép và MTLĐ được thiết kế	123
Bảng 4. 3 Các thông số đặc trưng riêng của MTLĐ.....	124
Bảng 4. 4 Đặc trưng riêng khung 8 tầng và TLD sử dụng	131
Bảng 4. 5 Tần số tự nhiên của khung 8 tầng	132
Bảng 5. 1 Chi tiết MTLĐ sử dụng thí nghiệm.....	147

CHƯƠNG 1

GIỚI THIỆU TỔNG QUAN

Trong những thập niên qua, các chuyên gia điều khiển dao động kết cấu đã có nhiều phát triển trong việc nghiên cứu tìm hiểu thiết bị kháng chấn dạng bị động như thiết bị cách chấn đáy, thiết bị kháng chấn bằng khối lượng-Tuned Mass Damper (TMD), thiết bị kháng chấn bằng chất lỏng-Tuned Liquid Damper (TLD) v.v... Bể chứa chất lỏng làm việc như thiết bị kháng chấn có nhiều ưu điểm như: chi phí thấp, dễ chế tạo, dễ lắp đặt, dễ bảo trì, tốn ít không gian, ứng dụng được cho các công trình đã xây dựng mà chưa có thiết bị kháng chấn. Đặc biệt là có thể kết hợp sử dụng thiết bị TLD làm bể nước sinh hoạt lẫn phòng cháy chữa cháy như tòa nhà One Rincon Hill cao 60 tầng ở San Francisco, Hoa Kỳ sử dụng bể nước sinh hoạt 189.250 lít nước như thiết bị giảm chấn Hình 1. 1.



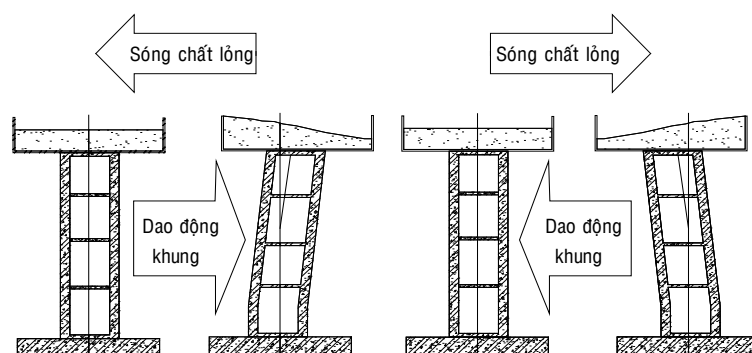
Hình 1. 1 Tòa nhà One Rincon Hill với bể nước mái là TLD

1.1 Giới thiệu về thiết bị giảm chấn bằng chất lỏng

Điều khiển dao động nhà cao tầng được quan tâm ở các nước trên thế giới cũng như ở Việt Nam những năm qua vì số lượng công trình cao tầng ngày một tăng. Nếu trước đây các thiết kế chỉ quan tâm việc tăng cường độ bê tông hay thép để thỏa yêu cầu chịu lực thì xu thế trong những thập niên vừa qua, kỹ sư sử dụng vật liệu nhẹ hơn, mảnh hơn để công trình cao hơn. Tuy nhiên do nhẹ và cao hơn nên dẫn đến sự

“nhạy cảm” của nhà cao tầng với tải trọng động và thiết bị giảm chấn ra đời. Từ đây mở ra lĩnh vực nghiên cứu mới đáp ứng mục tiêu điều khiển dao động kết cấu.

Các thiết bị giảm chấn hiện nay có rất nhiều loại như thiết bị cách chấn đáy, thiết bị giảm chấn chủ động, bị động, bán chủ động v.v... Thiết bị kháng chấn bằng chất lỏng là thiết bị dạng bị động vì không cần sử dụng thêm năng lượng hay vật điều khiển gì để kích hoạt sự làm việc của thiết bị [1]. TLD làm việc dựa trên nguyên lý dao động của sóng chất lỏng ngược pha với hướng dao động kích thích của nền, hiệu quả của thiết bị phát huy khi sóng chất lỏng đạt đến dao động cực đại do hiện tượng cộng hưởng của sóng bên trong TLD và công trình bên dưới như Hình 1. 2.



Hình 1. 2 Nguyên lý hoạt động của TLD

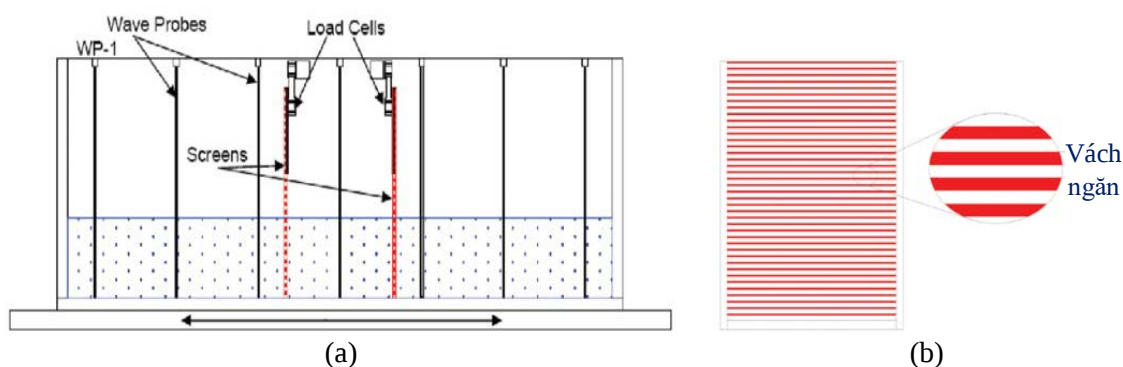
Khi đó sóng chất lỏng bên trong TLD sẽ dao động như ở Hình 1. 3. Thông qua cơ chế này, năng lượng do ngoại lực bên ngoài truyền vào trong bể sẽ tiêu tán bằng cách hình thành áp lực sóng trong bể.



Hình 1. 3 Dao động của sóng bên trong TLD

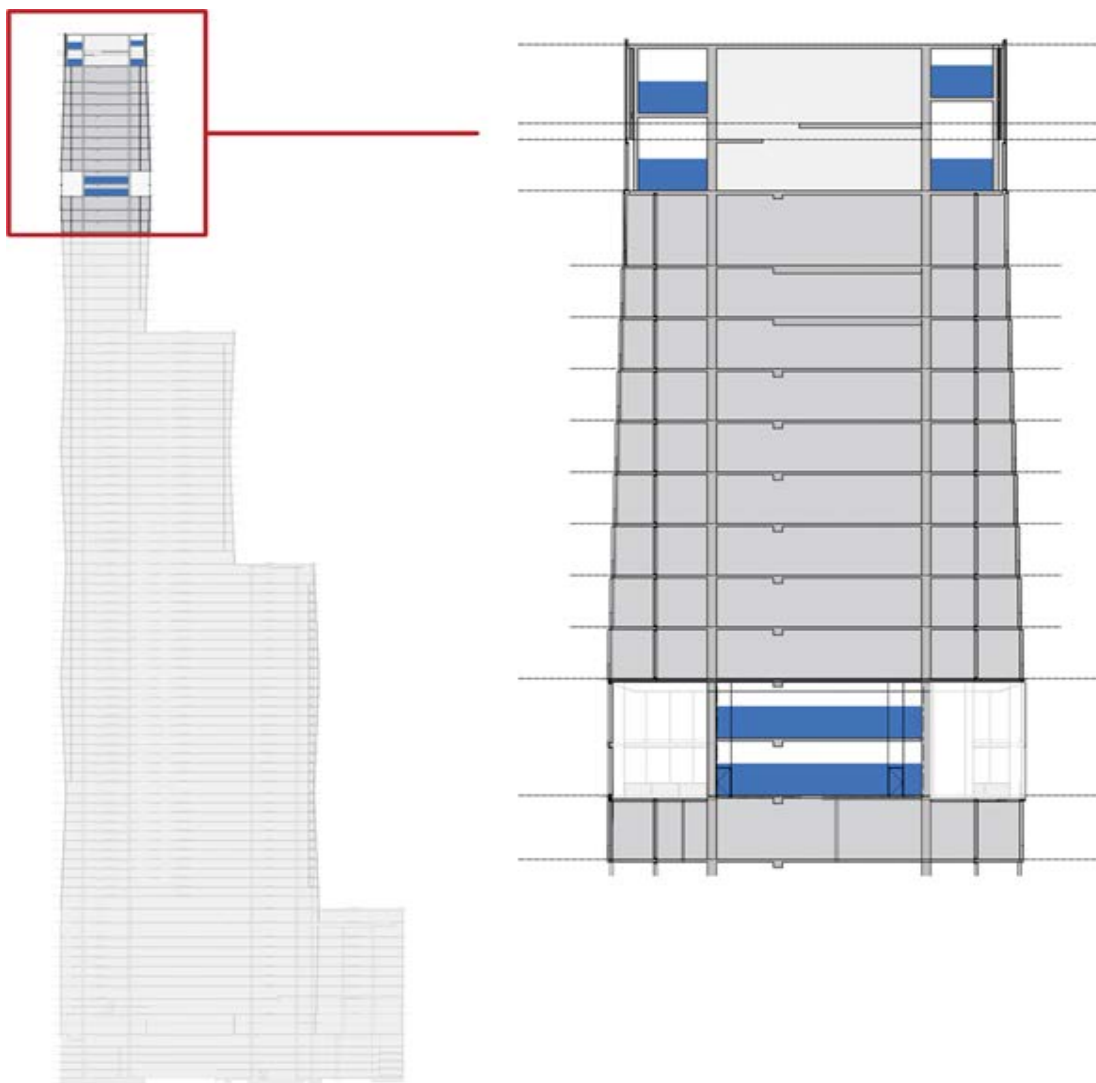
Không những vậy sự tiêu tán năng lượng kích thích vào trong kết cấu còn thông qua các cơ chế khác như: tiêu tán năng lượng do tính nhớt của chất lỏng, tiêu tán năng

lượng do sóng vỡ, do tương tác chất lỏng-thành bể Fluid-Structure Interaction (FSI), do chuyển động của sóng ở mặt thoáng, do độ nhám đáy bể và do cả dạng hình học của bể. Thiết bị TLD có thể được phân ra làm hai loại chính: một loại dùng mực nước nông và loại còn lại dùng mực nước sâu. Khi chiều cao chất lỏng h chia cho bề rộng bể $2a$ theo phương kích thích của ngoại lực nhỏ hơn 0.15 ($h/2a \leq 0,15$) thì xem như nước nông và ngược lại [2]. TLD có mực nước nông tiêu tán năng lượng thông qua lực cản nhớt sinh ra trong lòng chất lỏng và do cơ chế chuyển động của sóng chất lỏng ở bề mặt. Đối với TLD có mực nước sâu để có thể giảm dao động như hình thì các vách ngăn hoặc màn ngăn như ở Hình 1. 4 thường được sử dụng [3-6].



Hình 1. 4 TLD (a) với các vách ngăn (b)

Một trong những công trình đầu tiên sử dụng TLD để giảm chấn là tòa nhà Nagasaki Airport Tower cao 42m ở Nhật Bản được xây dựng năm 1987, sử dụng 25 TLD nặng xấp xỉ 1 tấn có tần số dao động riêng 1.07 Hz [7]. Ngày nay có rất nhiều công trình trên thế giới sử dụng TLD để điều khiển dao động khi công trình chịu tác dụng của tải trọng gió hoặc động đất, trong đó có thể kể đến hai tòa nhà Comcast Centre cao 58 tầng, Comcast Technology Centre cao 59 tầng cùng ở Philadelphia, Hoa Kỳ; tòa nhà Gama (Cemindo) cao 69 tầng và 4 hầm ở Jakarta, Indonesia. Công trình cao nhất thế giới hiện nay có sử dụng thiết bị TLD để giảm chấn là tòa nhà The Vista ở thành phố Chicago, Hoa Kỳ, dự kiến được hoàn thành vào năm 2020 như Hình 1. 5 với 6 TLD và tổng lượng nước trong bể lên đến 1500 tấn. Theo các số liệu được công bố thì TLD giúp giảm 24% dao động do gió gây ra ở tòa nhà The Vista.

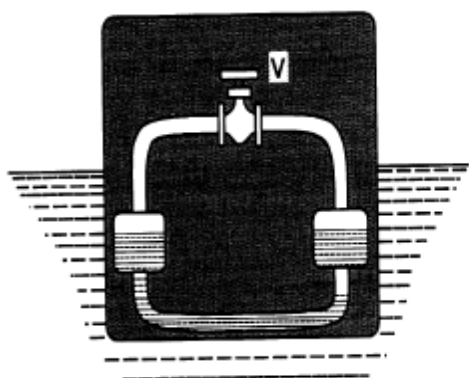


Hình 1. 5 Công trình *The Vista* cao 100 tầng với 6-TLD

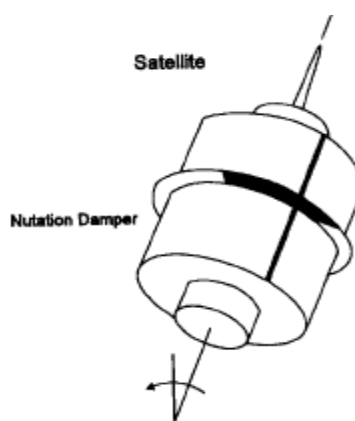
Các TLD có kích thước lớn như trên cần được thiết kế không chỉ nhằm mục đích giảm chấn mà còn phải thiết kế như bể chứa chất lỏng chịu tải trọng động có xét đến độ mềm của thành bể vì khi thiết bị làm việc, áp lực thủy động của sóng chất lỏng đủ lớn sẽ gây biến dạng thành bể và làm thành bể dao động. Điều này đặc biệt nguy hiểm khi sóng và thành bể cộng hưởng với nhau làm dao động cả hai miền rắn-lỏng đạt giá trị cực đại dẫn đến sự mất ổn định và phá hoại TLD. Ngoài ra, các đặc trưng riêng của bể chứa chất lỏng đặc biệt tần số dao động tự nhiên sẽ bị thay đổi do sự tương tác giữa sóng chất lỏng và kết cấu bể [8], khi đó TLD không còn làm việc đúng như thiết kế ban đầu và mất tác dụng điều khiển dao động [9]. Việc phân tích hiện tượng tương tác chất lỏng – thành bể trong TLD là một trong những nét mới của luận án này.

1.2 Nghiên cứu đã thực hiện với TLD và bể chứa thành mềm

TLD được đề xuất sử dụng từ những năm 1800, ứng dụng cho việc không chế dao động của tàu thuyền trong đó sử dụng hai bồn chứa nước liên thông nhau và tần số dao động của hai bồn này gần với tần số dao động cơ bản của thuyền (Hình 1. 6) hoặc tàu không gian (Hình 1. 7). Còn trong ứng dụng cho kết cấu dân dụng thì TLD được đề xuất từ thập niên 80 của thế kỷ trước, đến ngày nay TLD đã trở thành thiết bị kháng chấn phổ biến được ứng dụng ở nhiều nơi trên thế giới [1, 10].



Hình 1. 6 TLD dùng trên tàu biển



Hình 1. 7 TLD dùng trên phi thuyền

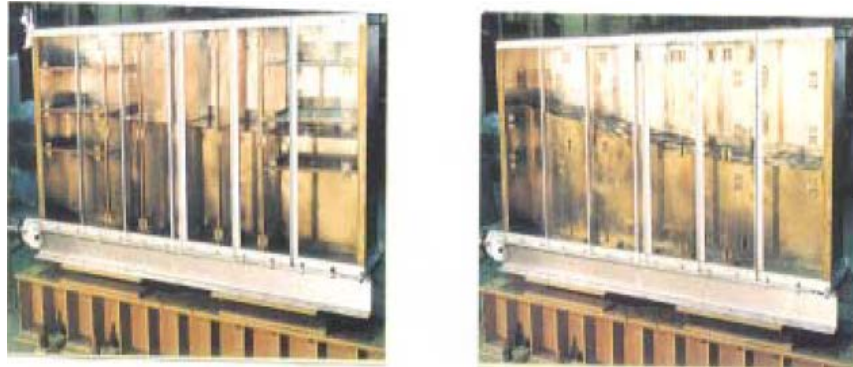
Thêm vào đó, các bể chứa chất lỏng cũng như sóng dao động trong bể cũng đã được nghiên cứu rất sớm, vào những năm 30 của thế kỷ trước, ảnh hưởng của sóng bề mặt được khảo sát tương đối nhiều trong các bể chứa nước hay các con đập, kênh dẫn nước dưới tác dụng của lực động đất. Trong phần này, luận án trình bày các nghiên cứu về bể chứa chất lỏng chịu tải trọng động nói chung và bể chứa đóng vai trò như thiết bị kháng chấn chất lỏng nói riêng, cụ thể:

- Ứng dụng TLD trong các công trình cao tầng
- Các nghiên cứu đã thực hiện đối với TLD
- Tương tác của Sóng Chất Lỏng – Thành Bể bên trong bể chứa chất lỏng
- Khả năng điều khiển dao động của TLD có xét tương tác đa trường

1.2.1 Ứng dụng thực tiễn của TLD trong các công trình cao tầng

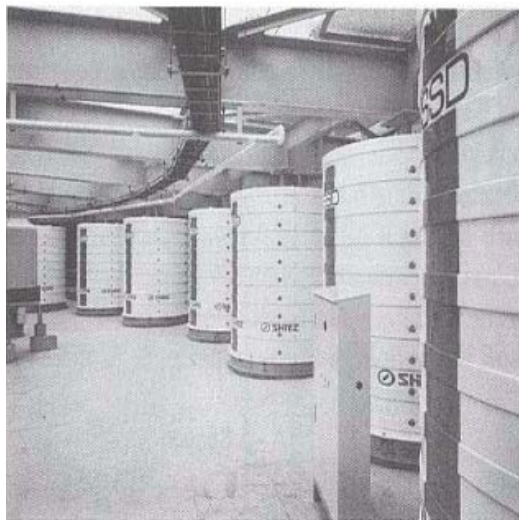
Các công trình có sử dụng TLD như thiết bị giảm chấn đã được xây dựng rất sớm ở Nhật Bản [11], ví dụ điển hình là tòa nhà Gold Tower thành phố Utsunomiya sử dụng TLD có tên MCC Aqua Damper (Hình 1. 8) là bể chứa nước dạng khối với các

màn ngăn bằng thép được bố trí dọc theo dòng chảy chất lỏng bên trong bể. Cụ thể Gold Tower dùng 16-TLD nặng 9.6 tấn có tần số 0.42 Hz ở tầng mái (cao độ 136 m) với tổng khối lượng chất lỏng xấp xỉ 1% khối lượng của toàn bộ công trình. Sau khi ứng dụng thiết bị kháng chấn trên vào công trình thì phản ứng của kết cấu trước tác dụng của tải trọng động giảm khoảng 50-60% so với khi không sử dụng thiết bị TLD.



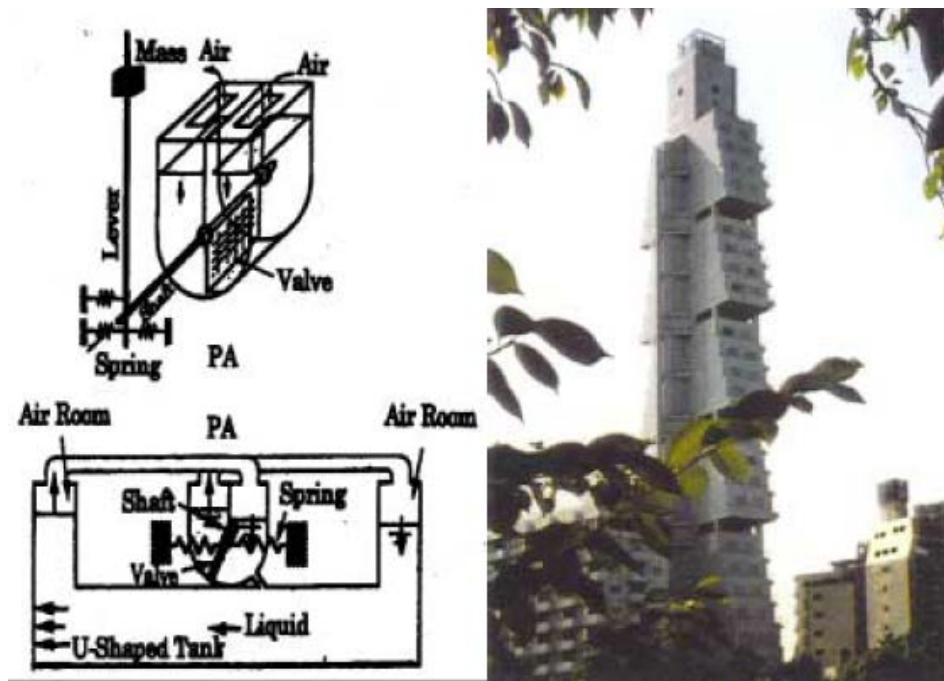
Hình 1. 8 Thiết bị MCC Aqua Damper ở tòa nhà Gold Tower

TLD còn được ứng dụng ở khách sạn Shin Yokohama-Nhật Bản với chín bể chứa chất lỏng đường kính 2 m và chiều cao mỗi TLD 22 cm (Hình 1. 9), giúp công trình giảm 50-70% phản ứng động khi vận tốc gió 20 m/s và nhiều hơn nữa nếu tốc độ gió lớn hơn. Gia tốc công trình không sử dụng TLD là 0.01 m/s^2 còn khi có TLD là 0.006 m/s^2 . Thiết bị này còn được sử dụng ở tháp điều khiển không lưu Tokyo International Airport Tower cao 77.6 m nặng $3.237 \times 10^6 \text{ kg}$ với 1404 TLD kích thước $60.0 \times 12.5 \text{ (cm}^2\text{)}$ [12], và tháp phát thanh Mount Wellington thành phố Hobart, Úc [13].



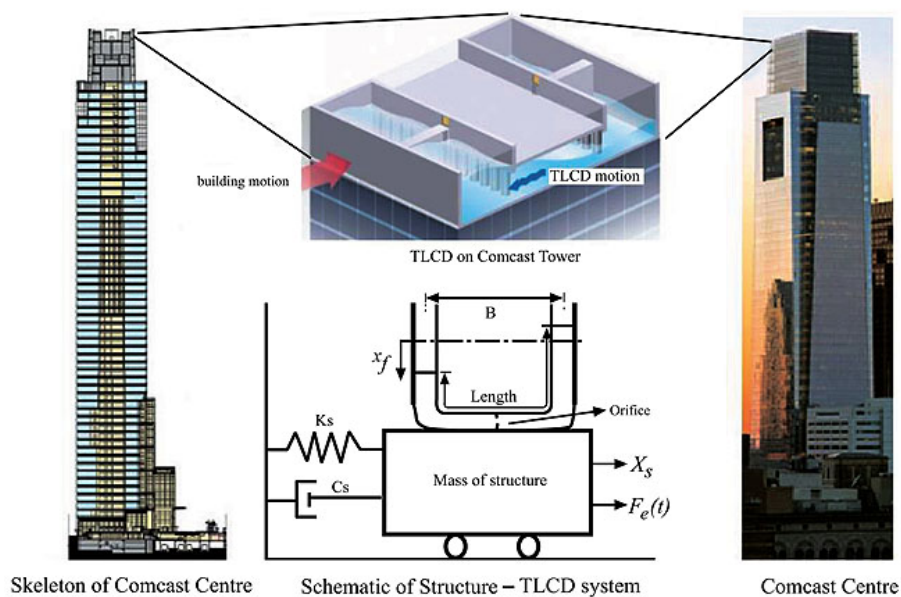
Hình 1. 9 Thiết bị TLD ở Shin Yokohama Tower

Ngoài ra còn rất nhiều công trình khác sử dụng thiết bị kháng chấn chất lỏng dạng cột chất lỏng Tuned Liquid Column Damper (TLCD) như khách sạn Cosima ở Tokyo là công trình thép 26 tầng (106.2m). Công trình có chiều cao so với chiều rộng lớn vì vậy nhạy cảm với gió động và các kỹ sư thiết kế sử dụng thiết bị TLCD 58 tấn có tên là MOVICS (Hình 1. 10) để kháng gió cho công trình. Kết quả đo được gia tốc đỉnh giảm 50-70% nhờ thiết bị này [10].



Hình 1. 10 Thiết bị TLCD trong công trình khách sạn Cosima, Tokyo

Ở Bắc Mỹ, nơi thường xuyên có động đất thì tòa nhà Comcast Building (Hình 1. 11) tại bang Pennsylvania cao 305 m hoàn thành năm 2008 có sử dụng bể nước mái lớn đến 300.000 gallons (1.135.600 lít) được dùng như thiết bị giảm chấn. Kích thước rất lớn của bể nước này đòi hỏi việc nghiên cứu tính toán cẩn thận cho kết cấu thành bể khi sóng chất lỏng dao động trong quá trình làm việc của TLD. Tổng mức đầu tư cho hệ thống giảm chấn này vào khoảng 2 triệu USD [14].



Hình 1. 11 *Toà nhà Comcast với TLD có 1.1 triệu lít nước*

Ngày nay TLD đã phổ biến và được ứng dụng ở nhiều nơi trên thế giới kể cả ở những nước đang phát triển như Indonesia với toà nhà Gama ở Jakarta chiều cao 310 m (69 tầng) như Hình 1. 12 đã hoàn thành và đưa vào sử dụng năm 2016.



Hình 1. 12 *Toà nhà Gama với mô hình TLD thí nghiệm*

1.2.2 Các nghiên cứu đã thực hiện đối với TLD

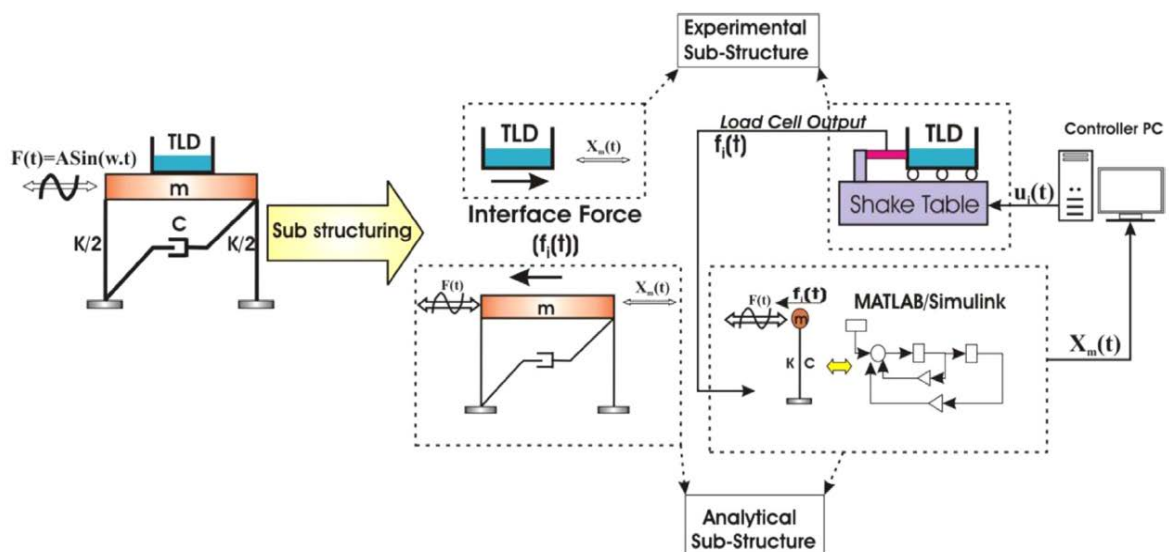
TLD có khả năng ứng dụng cho hầu hết các loại công trình với các quy mô khác nhau bằng cách điều khiển tần số tự nhiên của bể chứa chất lỏng bằng tần số của công trình cần điều khiển. Do đó thiết bị này trong những thập niên qua được đầu tư nghiên cứu rất nhiều nhằm đáp ứng cho nhu cầu xây dựng công trình ngày càng cao

tầng của các thành phố đông dân cư [1]. Một trong những nghiên cứu đầu tiên về dao động sóng bên trong TLD được Shimizu và cộng sự (1987) thực hiện, bằng cách thiết lập phương trình cơ bản mô tả phản ứng phi tuyến sóng bên trong bể chứa chữ nhật dưới tác dụng tải trọng ngang bằng lý thuyết sóng nước nông kết hợp hàm thế chất lỏng. Các tác giả sử dụng phương pháp Runge-Kutta-Gill để giải phương trình vi phân theo thời gian nhằm mô tả cộng hưởng dao động sóng bên trong bể kết hợp đối chiếu thí nghiệm [15]. Sau đó, từ lý thuyết sóng nước nông của Shimizu (1987), Sun và cộng sự (1989) phát triển mô hình toán mô tả cơ chế hoạt động sóng chất lỏng trong bể chữ nhật. Ngoài ra, các tác giả cải tiến bằng cách giới thiệu một mô hình bán thí nghiệm cho TLD dựa trên lực ma sát biên dạng cắt [16]. Cùng nhóm tác giả trong một nghiên cứu khác, mô hình bán thí nghiệm trên đã được kiểm chứng bằng cách sử dụng bàn lắc kết hợp lời giải số, kết quả chỉ ra sự tương đồng khi biên độ dao động của bàn lắc là nhỏ (10 mm) [17]. Trong các thí nghiệm trên không có sự xuất hiện sóng vỡ cho các bể chứa kích thước 590 mm, 335 mm với chiều cao mực nước là 30 mm. Fujino và cộng sự (1992) đã sử dụng mô hình của Sun (1992) để mô phỏng sự làm việc của hệ một bậc tự do-Single Degree of Freedom (SDOF) khi có và không sử dụng TLD trên miền tần số, kết quả cho thấy sự đồng nhất với thí nghiệm kiểm tra. Trong nghiên cứu, hiện tượng sóng vỡ được bỏ qua [18]. Để kể đến ảnh hưởng của hiện tượng sóng vỡ, Sun và cộng sự (1994) cải tiến tiếp mô hình toán bằng cách đưa vào phương trình mô tả dao động sóng (xét sóng vỡ) hai hệ số được xác định từ thí nghiệm, một là hệ số giảm chấn chất lỏng C_{da} và hệ số còn lại là pha vận tốc sóng $C_{\dot{\eta}}$ [19]. Mô hình toán được kiểm chứng bằng thí nghiệm và được xác nhận rằng sự ứng xử của sóng chất lỏng là có thể tiên lượng được, ngay cả trong trường hợp xuất hiện sóng vỡ. Sau đó, Sun và cộng sự (1995) dựa trên nguyên lý hoạt động tương tự của TLD và thiết bị giảm chấn khối lượng Tuned Mass Damper-TMD kinh điển (Hình 1. 2) theo đó thì độ cứng quy đổi, lực cản quy đổi và tần số quy đổi của TLD được lấy để làm thông số đầu vào nhằm phân tích TMD từ các dữ liệu thí nghiệm của các bể chứa chữ nhật, tròn và cầu chịu kích thích điều hòa [20]. Trong nghiên cứu này, các tác giả nhấn mạnh đến tỷ số cản hiệu quả β_a khi lực kích thích dao động nền là

bé. Tiếp theo, Sun và cộng sự (1995) đề xuất mô hình làm việc mới của TLD có xét đến liên kết khớp giữa bể chứa chất lỏng và kết cấu bên dưới khi chịu kích thích dao động lớn [21], mở ra hướng nghiên cứu mới cho các tác giả Xue và cộng sự (1999), Samanta (2010) hoặc Chang và cộng sự (2018) sau này [22-24]. Cũng theo hướng quy đổi TLD thành TMD, Yu (1997) đề xuất một mô hình nhằm mô phỏng sự làm việc của TLD tương đương TMD trong trường hợp xét dao động sóng TLD phi tuyến [25]. Mô hình này có thể mô tả ứng xử TLD dưới hầu hết các biên độ lực kích thích khác nhau. Sau đó, Reed và cộng sự (1998) kiểm chứng lại mô hình của Yu (1997) bằng cách tập trung vào biên độ kích thích lớn đến 40mm, bằng phương pháp số và thí nghiệm [26]. Các tác giả sử dụng phương pháp số lựa chọn ngẫu nhiên (random-choice) để giải phương trình phi tuyến sóng nước nông. Trong thí nghiệm kiểm tra, tập trung vào lực của sóng chất lỏng, chiều cao sóng mặt và sự tiêu tán năng lượng. Thí nghiệm tiến hành với bể 590 mm x 335 mm (DxR) và chiều cao nước 30 mm, chịu kích thích với biên độ 10mm, 20mm và 40mm. Nhưng trong phương pháp số, [26] chỉ công bố kết quả biên độ kích thích 20mm, vì kết quả này mới cho thấy sự tương thích tốt giữa lý thuyết và thí nghiệm. Nghiên cứu chỉ ra rằng khi biên độ kích thích dao động tăng thì tần số phản ứng của sóng bên trong TLD cũng tăng theo.

Banerji và cộng sự (2000) sử dụng mô hình của Sun và cộng sự (1992) [17] mô phỏng hệ SDOF có đáy TLD liên kết cứng với kết cấu cần điều khiển dao động, hệ chịu các kích thích nền khác nhau. Các tác giả khảo sát đặc trưng TLD, bao gồm tỷ số của tần số chất lỏng và tần số cơ bản kết cấu, tỷ số khối lượng TLD so với kết cấu và tỷ số chiều sâu mực chất lỏng so với chiều rộng bể, đó là các thông số quan trọng ảnh hưởng sự làm việc TLD, sau đó nghiên cứu còn đề xuất các bước để thiết kế TLD giảm chấn cho hệ kết cấu [27]. Tiếp theo, Samanta và Barneji (2006) [28] ứng dụng mô hình toán phát triển bởi Lu (2002) [29] để mô phỏng ứng xử của hệ TLD-kết cấu chịu dao động nền với biên độ lớn, kết quả đạt được tốt hơn ở mô hình của Sun và cộng sự (1992). Banerji và cộng sự (2010) tiếp tục thí nghiệm kiểm chứng kết quả mô phỏng số và chỉ ra mô hình của Sun (1992) không thể xác định chính xác phản ứng kết cấu – TLD làm việc đồng thời [30].

Hướng nghiên cứu gần đây thường được sử dụng để phân tích TLD là phương pháp bán thực nghiệm theo thời gian thực Real Time Hybrid Simulation - RTHS. Theo đó, Lee và cộng sự (2007) ứng dụng RTHS khảo sát hoạt động của TLD. Các thông số vật lý của sóng chất lỏng được đo từ thí nghiệm để lấy dữ liệu áp lực, chiều cao sóng theo thời gian; sau đó mô phỏng kết cấu cần điều khiển trên máy tính như là kết cấu phụ để phân tích với ngoại lực tác dụng lên kết cấu phụ gồm dao động nền và áp lực sóng đo được từ thí nghiệm [31]. Theo hướng này, Malekgashemi và cộng sự (2011, 2015) sử dụng RTHS kiểm tra hệ kết cấu-TLD kết hợp quan trắc trên bàn lắc đánh giá hiệu quả TLD hình chữ nhật. Toàn bộ cơ hệ được thiết lập để chịu dao động nền điều hòa với ba tải trọng động đất khác nhau. Nghiên cứu phân tích ảnh hưởng của các thông số tỷ lệ khối lượng, tỷ lệ tần số và tỷ số cản để đánh giá độ chính xác của ba mô hình toán mà Sun (1992) [17], Yu (1999) [32] và Xin (2009) [33] đã thiết lập bằng phương pháp RTHS [34, 35]. Các kết quả chỉ ra rằng TLD có hiệu quả cao nhất khi tỷ lệ tần số trong khoảng từ 1 đến 1.2 với tỷ lệ khối lượng 3%. Gần đây, Ashasi và cộng sự (2017) đã mô phỏng ứng xử động của kết cấu và bể chứa chất lỏng làm việc đồng thời bằng RTHS có sử dụng tổng hợp nhiều thông số để khảo sát ảnh hưởng của TLD. Đáp ứng chuyển động TLD được hình thành thông qua thí nghiệm cùng lúc với kết cấu được mô phỏng trên máy tính, sau đó thu thập dữ liệu tương tác TLD-kết cấu trong thời gian thực. Lưu đồ của RTHS tóm tắt như Hình 1. 13 [36].



Hình 1. 13 Quy trình mô phỏng Real-time hybrid simulation

Bên cạnh đó, để nâng cao tính ổn định và khả năng giảm chấn của TLD, Fujino (1993) đã sử dụng hệ bể chứa chất lỏng đa tần số-Multiple Tuned Liquid Damper (MTLD) với bể trung tâm có tần số bằng tần số tự nhiên của kết cấu, các bể còn lại có tần số nằm trong dải băng tần từ $0.8 \leq f_{TLD}/f_s \leq 1.2$ [37]. Sau đó, các thí nghiệm được tiến hành trên bàn lắc để kiểm tra sự làm việc thực tế của MTLD. Trong thực tế ứng dụng, toà nhà Shin Yokohama được xây dựng năm 1995 ở Hình 1. 9 bên trên đã được lắp thiết bị kháng chấn dạng này. Hướng nghiên cứu này sẽ được phân tích nhiều hơn trong Chương 2 của luận án. Bên cạnh việc sử dụng MTLD để tăng tính ổn định cũng như khả năng giảm chấn thì phương pháp sử dụng các vách ngăn bên trong TLD để tăng cường khả năng tiêu tán năng lượng cũng thường được sử dụng. Tait và cộng sự (2005) đã sử dụng cả mô hình dòng chảy tuyến tính và phi tuyến để xác định ứng xử của TLD được trang bị vách ngăn, khi công trình có sử dụng TLD chịu tải gió và động đất. Sau đó được kiểm chứng bằng thí nghiệm [3]. Các thí nghiệm được thực hiện trên bàn lắc với khả năng tác động TLD theo hai phương độc lập. Kết quả tìm được chỉ ra rằng phản ứng của TLD hai chiều (2D) có thể phân tích như hai bể TLD-1D độc lập, vì thế TLD-2D có thể được ứng dụng để điều khiển dao động của kết cấu trong hai phương dao động chính. Tait (2008) giới thiệu mô hình cơ học phi tuyến tương đương của TLD có bao gồm yếu tố tiêu tán năng lượng được tạo bởi các vách ngăn, và thí nghiệm kiểm chứng [38]. Quá trình thiết kế cơ sở cho kích thước ban đầu của TLD và hình dạng vách ngăn cũng được đưa vào xem xét. Love, Tait và cộng sự (2011) đã công bố nghiên cứu về bể chứa chất lỏng làm việc như TLD có sử dụng các vật cản nằm cố định bên trong bể nhằm giúp cho sóng dao động bên trong bể chứa đạt được biên độ cũng như tần số mong muốn [39]. Tuy nhiên việc đặt các vật cản này thường gây ra khối lượng cộng thêm cho bể, nên một phương pháp giải mới sử dụng giả thuyết hàm thế dòng chảy, các tác giả phát triển mô hình cơ hệ tuyến tính tương đương kết hợp phương pháp Runge-Kutta cho mô hình phi tuyến, phương pháp này có thể kể đến sự tham gia làm việc của vật cản trong TLD.

Ở Việt Nam hiện nay vấn đề kháng chấn chưa được đầu tư nghiên cứu xứng đáng với tiềm năng, đặc biệt là sử dụng bể chứa nước sinh hoạt đóng vai trò như TLD

là một hướng mở rất tốt. Trong thời gian qua, các đề tài về TLD đã thu hút được rất nhiều quan tâm của chuyên gia và giới học thuật. Ứng dụng của thiết bị này cho công trình cầu đã có, nhưng nhà dân dụng thì chưa. Công trình cầu đã sử dụng TLD là Cầu Bãi Cháy (2003-2006) trong đó mô trụ chính của cầu sử dụng 344-TLD (Hình 1. 14) với chiều cao chất lỏng 80 mm giúp giảm 58% gia tốc dao động và 14% chuyển vị đỉnh của mô trụ cầu [40]. Trong nghiên cứu, một trong những công bố đầu tiên về TLD là của Thắng và cộng sự (2005). Ngoài ra còn có nghiên cứu của về bể trụ tròn chịu tác dụng của tải trọng động, hay gần đây có các công bố của Phước và cộng sự (2018, 2019) xem xét khả năng giảm chấn của MTLD với các vách ngăn và giải quyết bài toán bằng FEM khi công trình chịu tải trọng động [41, 42]. Tại Hà Nội, có các nghiên cứu của các tác giả Khang và cộng sự về sự làm việc của MTLD để điều khiển dao động kết cấu [43].

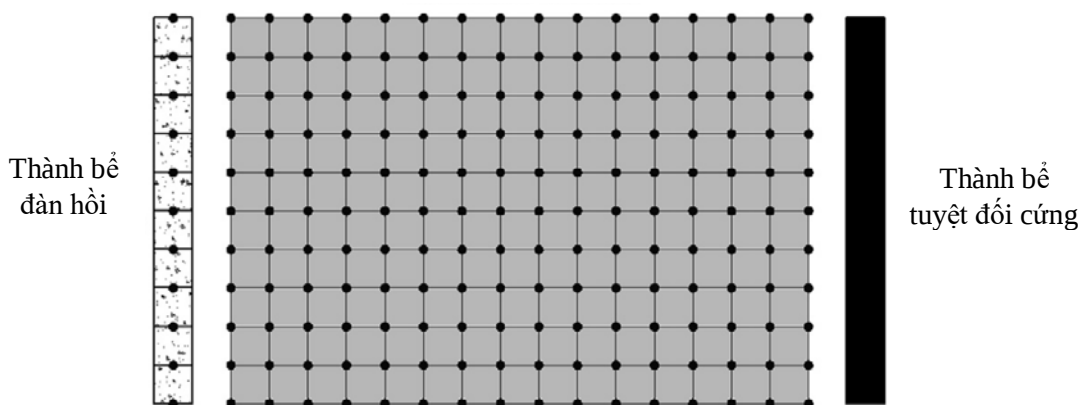


Hình 1. 14 Cầu Bãi Cháy với hệ MTLD

1.2.3 Tương tác của sóng chất lỏng-thành bể rắn

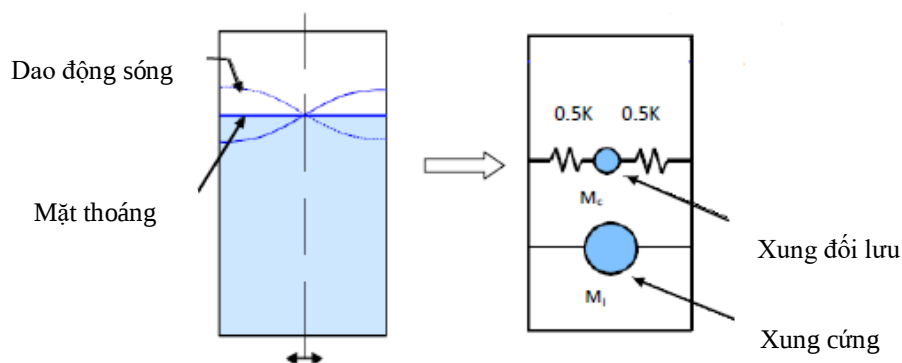
Một trong những điểm mới của luận án này là xem xét khả năng giảm chấn của kết cấu có sử dụng TLD khi xét đến sự đàn hồi thành bể thông qua tương tác giữa sóng chất lỏng và thành bể chứa-Fluid Structure Interaction (FSI), đây cũng là hướng nghiên cứu gần đây nhiều chuyên gia trong lĩnh vực điều khiển dao động [44]. FSI đối với thành bể mềm sẽ ảnh hưởng rất lớn đến khả năng làm việc TLD cũng như các đặc trưng riêng, áp lực động của sóng chất lỏng bên trong bể. Các nghiên cứu về sóng

chất lỏng dao động đã được nghiên cứu từ thế kỷ 18 cho các dòng chảy trên biên cứng tuy nhiên việc phân tích sự tương tác giữa chất lỏng với biên thành mềm chỉ mới hình thành vào những năm 50 của thế kỷ trước, chỉ đến gần đây với sự phát triển của phương pháp số và khả năng tính toán của máy tính thì vấn đề dao động sóng bên trong bể có xét FSI với sự phi tuyến ^{Phần tử chất lỏng hữu hạn} được xem xét một cách thấu đáo hơn [45].



Hình 1. 15 Mô hình tương tác rắn lỏng khi thành bể đàn hồi

Housner (1963) đã phân tích áp lực thủy động trong bể chứa khí bể chịu gia tốc nền với chất lỏng được giả thiết là không nén được và không nhớt [46]. Theo đó, áp lực chất lỏng được hình thành bởi lực động đất được giả thiết phân tách ra thành hai phần xung cứng M_1 (impulsive mass) và phần xung đối lưu M_0 (convective mass) như Hình 1. 16 bên dưới, và giả thiết trên thường được biết đến như phương pháp khối lượng thu gọn trong bể chứa chất lỏng của Housner.



Hình 1. 16 Chất lỏng trong bể gồm: xung cứng và xung đối lưu

Dựa vào giả thiết như trên, các biểu thức đơn giản hóa đã được đề xuất tính toán một cách gần đúng các thành phần áp suất chất lỏng bằng phương pháp khối lượng thu gọn. Khối lượng thu gọn trong trường hợp xung đối lưu M_0 , được liên kết vào thành bể thông qua các lò xo; khối lượng thu gọn trong thành phần xung cứng M_1 được liên kết cứng vào trong thành bể. Hầu hết các tiêu chuẩn và quy chuẩn hiện hành như ACI 350.3-06 [47], EC8: Part 4 [48], IS 1893:2002 [49] đều dùng mô hình này với một số các hiệu chỉnh. Một trong những nghiên cứu đầu tiên về ảnh hưởng của thành bể mềm lên sự phân phối áp suất chất lỏng và áp lực tương ứng tác dụng lên kết cấu bằng phương pháp giải tích cho hệ SDOF với các hàm dạng khác nhau đã được tiến hành bởi Yang (1976). Trong nghiên cứu này, hệ phương trình dao động trường cặp đôi mô tả tương tác rắn-lỏng được rút ra bằng cách áp dụng phương pháp Rayleigh - Ritz, từ đó thành bể chứa chất lỏng được phân tích khi bể chịu tải trọng dao động nền với giả thiết nền bên dưới bể là tuyệt đối cứng [50]. Minowa (1980,1984) khảo sát ảnh hưởng của độ mềm thành bể và áp suất động lực chất lỏng tác dụng lên thành bể. Thêm vào đó, các thí nghiệm được tiến hành để mô tả đặc trưng động lực học của bể chứa chữ nhật [51, 52].

Haroun và các cộng sự (1983, 1985) giới thiệu phương pháp giải tích chi tiết cho bể chứa chất lỏng chữ nhật chịu các loại tải trọng điển hình. Áp suất động lực chất lỏng được xác định bằng phương pháp tiếp cận hàm thế vận tốc cổ điển và ứng xử của thành bể là tuyệt đối cứng [53, 54]. Trong đó, [53] trình bày một chuỗi các thí nghiệm để kiểm tra cả lực dao động lẫn môi trường xung quanh bể chứa. Ba bể chất lỏng với kích thước thực được thí nghiệm để xác định tần số dao động tự nhiên và hàm dạng dao động, ngoài ra phương pháp giải tích phân tích bể chứa thành mềm chịu tải trọng động trên nền đá cứng được trình bày [54]. Sau đó, chính Haroun và Tayel (1985) ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn-FEM phân tích phản ứng động lực học cho bể chất lỏng thành mềm chịu tải trọng động đất [55]. Haroun và Abou-Izzeddine (1992) thực hiện các nghiên cứu về thông số ảnh hưởng đến bể chứa có xét FSI khi bể chứa chịu động đất có xét động đất theo phương đứng [56].

Kim và cộng sự (1996) phát triển phương pháp giải tích để tính toán phản ứng của bể chứa 2D có một phần chất lỏng, chịu tải trọng kích thích [57]. Kết quả giải tích được so sánh với lời giải số BEM/FEM và cho sự tương thích cao. Và cũng chính nhóm tác giả này đã phát triển mô hình 3D bể chứa chất lỏng chữ nhật xét FSI và có kiểm tra đối chiếu thí nghiệm [58]. Lời giải ở [57, 58] đơn giản và tiện lợi trong việc ứng dụng thực tiễn thiết kế nhưng ảnh hưởng của thành bể mềm chưa được xem xét một cách thấu đáo. Cùng thời điểm với Kim và cộng sự (1996), Babu và Bhattacharyya (1996) thiết lập FEM mô tả bể chứa hình chòm cầu chịu gia tốc nền kích thích và xét FSI thông qua chuyển vị của sóng chất lỏng ở bề mặt bể và áp suất hình thành do sóng [59]. Sau đó ứng xử động của chuyển vị thành bể tại biên tương tác được tính toán bởi Xing và cộng sự (1997) bằng cách sử dụng kết hợp BEM/FEM cho phân tích dao động thành bể-sóng chất lỏng [60].

Dogangun và cộng sự (1996) khảo sát phản ứng của sóng chất lỏng trong bể chứa chịu tải trọng động đất bằng phương pháp giải tích, và FEM được ứng dụng để phân tích kết cấu với máy tính lập trình SAPIV [61]. Chất lỏng được giả thiết là đàn hồi tuyến tính, không nhớt, và có thể nén được. FEM dựa trên chuyển vị nút được sử dụng để xét đến ảnh hưởng của chất lỏng. Tiếp theo, Dogangun (2004) cho thấy hiệu quả của phương pháp tiếp cận Lagrangian trong việc thiết kế bể chứa chất lỏng chịu tải trọng động đất và ảnh hưởng của thành bể mềm lên ứng xử động của bể được khảo sát. Kết quả chỉ ra rằng đối với bể thành cứng thì BEM/FEM cho kết quả tương đồng với Tiêu Chuẩn Thiết Kế Eurocode 8-EC8 và Housner (1963) [62].

Chen và Kianoush (2005) khảo sát ảnh hưởng của thành bể mềm lên ứng xử động lực học của bể chứa chất lỏng chữ nhật. Để phân tích ứng xử động của bể chứa trên miền thời gian, nghiên cứu đã sử dụng ba loại bể thấp, trung bình và cao cho các vùng động đất khác nhau [63]. Trong nghiên cứu này thì thành bể được xem như mềm, phương pháp khối lượng thu gọn không thể ứng dụng được cho mô hình thực để mô phỏng bể chứa bê tông. Nghiên cứu của Chen và Kianoush (2005) sử dụng phương pháp Newmark- β để tính áp suất động lực học chất lỏng trong bể chứa chất lỏng có xét đến ảnh hưởng của độ mềm thành bể. Tuy nhiên, dao động sóng chất lỏng

ở mặt thoáng bị bỏ qua [63]. Sau đó, Kianoush và Chen (2006) đã tiến hành khảo sát ứng xử động lực học của bể chứa chữ nhật chịu tải trọng động đất trong bài toán không gian 2D [64]. Tầm quan trọng của thành phần động theo phương đứng khi bể chịu tải trọng động đất đã được xét đến trong nghiên cứu này. Nghiên cứu cũng đề xuất phương pháp mới phân tích bể chứa 2D chịu tải trọng động đất trong đó có kể đến cả hai thành phần xung cứng và xung đối lưu trên miền thời gian. Và các tác giả đã phân tích ứng xử bể chứa 2D dưới tác dụng của tải trọng thẳng đứng [64]. Xing (2007) nghiên cứu ứng xử động lực học của hệ tương tác bể chứa thành mỏng - chất lỏng [65]. Sau đó, Livouglu (2008) đánh giá tương tác bể chứa-chất lỏng-móng chịu tác dụng của tải trọng động đất bằng phương pháp phân tích đơn giản và ít mất thời gian tính toán. Trong nghiên cứu này, hiệu ứng tương tác sử dụng là mô hình hai khối lượng thu gọn của Housner cho chất lỏng và mô hình cone cho hệ đất nền bên dưới móng. Kết quả chỉ ra rằng, chuyển vị và lực cắt đáy bể sẽ càng giảm xuống khi đất nền càng mềm đi [66]. Chen và Kianoush (2009) tiếp tục phát triển phương pháp mới bằng cách xem thành bể mềm như kết cấu dầm console có 1 bậc tự do và khảo sát 5 mode dao động đầu tiên của dầm với việc chú trọng điều kiện biên tương tác giữa sóng chất lỏng với thành bể nhằm mục đích tìm biên dạng của dầm console cũng như dao động sóng trên bề mặt thông qua áp lực của sóng và chiều cao sóng chất lỏng [67]. Gần đây, Kianoush và Ghaemmaghami (2009-2011) khảo sát ứng xử của bể chứa chất lỏng chữ nhật dưới tác dụng của tải trọng động đất trong không gian 2 chiều và kết luận độ cứng thành bể cũng như đặc trưng cản của chất lỏng đóng vai trò quan trọng trong phản ứng động lực học của hệ kết cấu [68-71]. Thêm vào đó, các tác giả cũng đánh giá lại ảnh hưởng của tương tác đất nền lên ứng xử động lực học của hệ bể chứa [68]. Moslemi và Kianoush (2012) đã khảo sát các thông số ảnh hưởng đến áp suất chất lỏng lên thành bể mềm như chiều cao sóng, độ mềm thành bể, tỷ số độ dày thành bể, gia tốc dao động đất nền, kể cả độ cứng liên kết giữa bể chứa và nền đất [72]. Kết quả tính toán được so sánh với tiêu chuẩn ACI 350.3-06 theo đó một số kiến nghị được đề xuất trong nghiên cứu nhằm cải thiện độ chính xác trong việc thiết kế bể chứa chất lỏng chịu tác dụng bởi tải trọng động đất.

Ghaemmaghami (2010) đã phân tích bể chất lỏng có thành mềm cho cả hai loại bể cao lẫn thấp chịu tải động đất và có xét FSI khi dao động trong đó nhấn mạnh đặc trưng của sóng chất lỏng [69]. Trong nghiên cứu này, tác giả phân chia chất lỏng bao gồm hàm dạng của xung cứng và hàm dạng của xung đối lưu là riêng biệt để xem xét sự làm việc. Cuối cùng áp lực lên các loại bể cao và thấp được tính toán để so sánh trong trường hợp bể chứa chất lỏng có thành mềm và thành tuyệt đối cứng [70]. Sau đó, để xác định một cách đơn giản phản ứng động lực học và biến dạng của bể chứa chất lỏng hình chữ nhật trong mô hình 3D, Hashemi và cộng sự (2013) trình bày phương pháp giải tích, với thành bể là đàn hồi, và chất lỏng thì không nén được. Từ đó, mô hình cơ học được phát triển để mô phỏng ứng xử động của hệ bể chứa-sóng chất lỏng [73]. Tiếp theo, chính Hashemi (2013) đề xuất phương pháp giải tích để mô phỏng đáp ứng động lực học của một bể chứa 3D có bốn vách bể đàn hồi, bể này chịu tải trọng động đất theo phương ngang. Sự tương tác chất lỏng – thành bể ảnh hưởng đến ứng xử động của bể chứa kết hợp với thành bể mềm được kể vào tính toán. Phương pháp tính toán dựa vào mô hình Rayleigh – Ritz bằng cách sử dụng mode dao động của phần tử tám đàn hồi với điều kiện biên thích hợp. Hàm lượng giác thoả mãn điều kiện biên của bể chứa chất lỏng cũng như là sự đàn hồi của thành bể được ứng dụng để xác định các mode dao động. Phương pháp giải tích đơn giản và cho kết quả khá chính xác khi đối chiếu với các nghiên cứu đi trước cũng như các Tiêu Chuẩn Xây Dựng phổ biến [74]. Pajand (2018) và cộng sự dùng phương pháp số để khảo sát dao động tự do của bể hình chữ nhật có chứa chất lỏng nén được và sau đó phương trình gần đúng được giới thiệu để tính toán tần số dao động tự nhiên của bể và áp suất chất lỏng tương ứng cho hệ bể chứa được đề cập bên trên [75].

Các phân tích trong luận án này nhằm chỉ ra ảnh hưởng của thành bể mềm có xét FSI đến các đặc trưng riêng của bể chứa chất lỏng bằng phương pháp FVM/FEM, cụ thể tại chương 3 sẽ phân tích lại bể chứa chất lỏng chịu động đất đã được thực hiện bởi Hashemi và cộng sự (2013) thông qua việc tính toán áp lực động của sóng tác dụng lên thành bể cũng như tần số riêng bể chứa [67, 68]. Kết quả luận án không những được đối chiếu với các nghiên cứu đi trước mà còn so sánh với các Tiêu Chuẩn

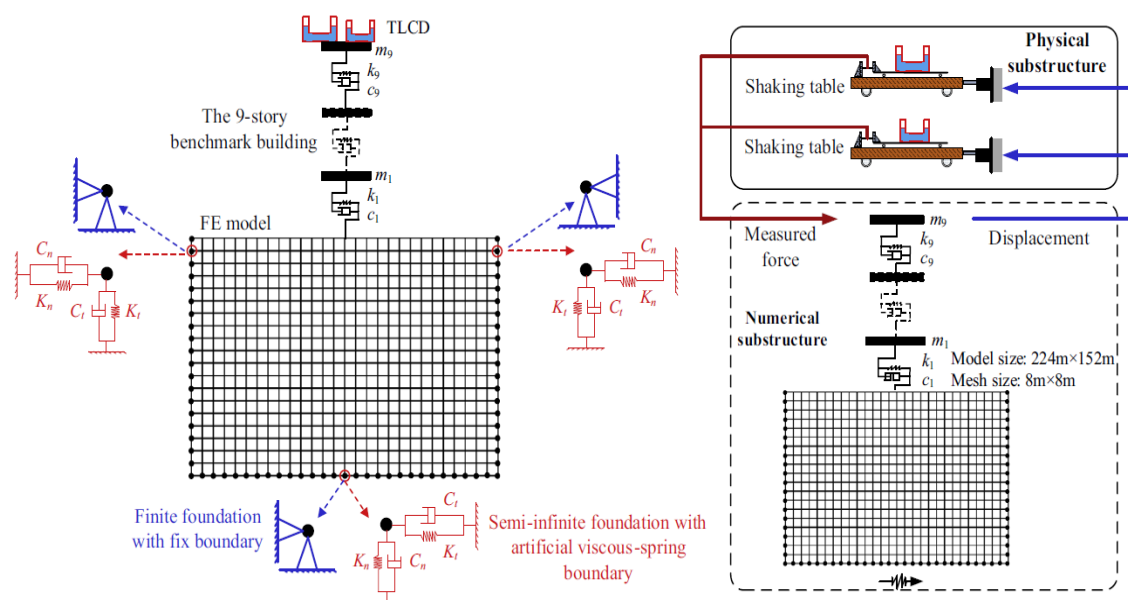
thiết kế bể thành mềm chịu tải động đất như ACI [47], Eurocode [48] hay IS [76]. Mục đích việc phân tích trên là để làm nền tảng cho tính toán ứng xử động của MTLĐ tại chương 4.

1.2.4 TLD có xét đến tương tác đa trường

Các nghiên cứu của các tác giả đi trước hầu hết đều giả thiết TLD có thành tuyệt đối cứng nhằm đơn giản trong việc tính toán. Tuy nhiên, các công trình ngày càng cao tăng đòi hỏi TLD ngày càng lớn dẫn đến giả thiết thành bể cứng tuyệt đối cứng không còn đúng đắn nữa [14]. Một trong những nghiên cứu hoàn chỉnh đầu tiên về khả năng điều khiển dao động của TLD có xét đến tương tác giữa sóng chất lỏng và thành bể chứa hình trụ tròn là của Zheng và các cộng sự (2003). Trong nghiên cứu này, các tác giả đã khảo sát sự biến dạng của thành bể do sóng chất lỏng gây ra bằng phương pháp Arbitrary Lagrange-Eulerian ALE, kết quả phân tích có so sánh với một số các phương pháp tính toán đơn giản của nghiên cứu đi trước [77].

Những năm gần đây, với sự hỗ trợ ngày càng mạnh mẽ của các phần mềm nghiên cứu, ANSYS hoặc ABAQUS có thể mô phỏng gần như đầy đủ sự làm việc trong không gian ba chiều của công trình có sử dụng TLD. Đặc biệt đối với các bài toán tương tác đa trường, việc phân tích ứng xử động của hệ kết cấu-TLD-thành bể đất nền chỉ có thể giải quyết nhờ vào các phần mềm mạnh. Theo đó, Gradsincak (2009) đã ứng dụng FEM với sự trợ giúp của ANSYS để mô phỏng hệ một bậc tự do sử dụng TLD chịu các loại tải trọng động khác nhau có xét đến FSI [78]. Nghiên cứu chỉ ra rằng bằng cách điều khiển độ dày và kích thước thành bể thì TLD có thể được ứng dụng cho công trình với nhiều dạng tải trọng khác nhau. Tuy nhiên, độ bền của thành bể cần phải được nghiên cứu xem xét cẩn thận trong quá trình sử dụng, ngoài ra cần phải tính toán ngăn ngừa trường hợp thiết bị bị mất hiệu quả do biến dạng thành bể gây ra. Ghaemmaghami và các cộng sự (2015) [79] đã phân tích khả năng giảm chấn của tua bin gió có sử dụng TLD có xét đến FSI bằng phương pháp FVM-FEM trên phần mềm ANSYS. Kết quả cho thấy TLD giúp giảm 50-65% dao động của turbine gió và tỷ số khối lượng hiệu quả nhất vào khoảng 3.13%. Ngoài ra, còn có Eswaran (2017) công bố công trình nhiều tầng sử dụng TLD để điều khiển dao

động kết cấu khi chịu tải trọng gió cũng như động đất, phương pháp số được sử dụng để mô phỏng bằng cách tận dụng giải thuật FSI kết hợp với thí nghiệm đánh giá. Tác giả đã tách rời hai phần kết cấu khung và bể chứa chất lỏng thành hai miền riêng biệt, sau đó tính toán dao động khung theo thời gian bằng giải thuật Runge – Kutta bậc 4 còn dao động của sóng chất lỏng theo thời gian được phân tích bằng phương pháp sai phân hữu hạn dựa trên giải thuật biến đổi σ (σ - transformed) [80]. Cùng lúc này, Zhu (2017) có các công bố về việc sử dụng RTHS để mô phỏng nguyên dạng kết cấu 9 tầng có MTLD điều khiển dao động trong đó kể đến sự tương tác kết cấu và đất nền bên dưới nhằm xem xét ảnh hưởng của đất nền đến hiệu quả làm việc của MTLD như Hình 1. 17. Ngoài ra còn xét đến ảnh hưởng của kích thước TLD đến khả năng điều khiển dao động kết cấu [81, 82].



Hình 1. 17 Khung 9 tầng có xét tương tác đa trường

Với các kết cấu dạng tháp-trụ, Yue và các cộng sự (2018) nghiên cứu sự giảm chấn cho các trụ biến áp composite lớn, loại 1100kV, công trình sử dụng TLD vành khuyên (annular TLD) để tính toán, mô phỏng trụ biến áp chịu các tải trọng động đất Chichi hay Kocaeli bằng ABAQUS có xét FSI và cho thấy công trình có thể giảm từ 25-33% chuyển vị đỉnh lớn nhất [83]. Gần đây, Buckley (2018) còn công bố nghiên cứu về phân tích tua bin gió được điều khiển dao động bằng TLD có xét tương tác đa trường kết cấu-TLD-đất nền bên dưới, và được đối chiếu với mô hình thu nhỏ trong

phòng thí nghiệm bằng lý thuyết quy đổi, kết quả chỉ ra sự đồng nhất cao giữa lý thuyết so sánh thí nghiệm [84]. Ngoài ra, với kết cấu tháp-trụ còn có nghiên cứu của Roy và cộng sự (2016) về khả năng điều khiển dao động thủy lôi đài với TLD, RTHS được sử dụng làm phương pháp nghiên cứu và kết quả đã chỉ ra TLD giúp giảm đến 60.5% chuyển vị đỉnh lớn nhất của dao động điều hòa và 25.74% đối với động đất Elcentro [85]. Điều này cho thấy sự thu hút của rất nhiều nhà nghiên cứu đối với hướng phân tích tương tác đa trường nói chung và tương tác của TLD nói riêng.

Tóm lại, thông qua việc tóm tắt các nghiên cứu đi trước, tác giả có một vài nhận xét như sau để từ đó đi đến hướng nghiên cứu thực hiện trong luận án này:

- Các nghiên cứu về thiết bị TLD nói chung đều cho thấy đây là một công cụ hiệu quả giúp giảm dao động cho công trình, hầu hết các thông số đặc trưng của bể chứa chất lỏng đã được khảo sát bằng nhiều phương pháp giải tích, FEM, phần tử biên nhúng BEM hay BEM-FEM kết hợp. Tuy nhiên mối quan hệ giữa thành bể mềm khi xét FSI và các thông số đặc trưng của TLD vẫn còn cần phải được phân tích thêm.
- Ứng dụng TLD nói chung và MTLĐ nói riêng trong việc nâng cao hiệu quả giảm chấn kết cấu và phân tích ứng xử động bên trong bể chứa cho hệ thống giảm chấn này cần có quy trình để tối ưu được hình dạng, vị trí, số lượng bể. Các phương pháp quy đổi TLD thành TMD là không ít tuy nhiên chỉ dừng ở mức độ ứng xử sóng chất lỏng là tuyến tính. Độ chính xác của phương pháp quy đổi so với các phương pháp chính xác hơn có xét đến FSI kết hợp thí nghiệm kiểm tra vẫn chưa được nghiên cứu nhiều.
- Phân tích FSI đối với bể chứa chất lỏng chỉ được khảo sát gần đây và hầu hết là cho các bể chứa chất lỏng ngầm hoặc thủy lôi đài chứ chưa đánh giá được vai trò của hiệu ứng này trong việc phân tích khả năng điều khiển dao động của TLD. Thành bể mềm có xét FSI ảnh hưởng rất lớn đến hiệu quả làm việc của TLD thông qua tần số tự nhiên của bể lẫn áp lực nước tác dụng lên thành bể. Thêm vào đó, các Tiêu Chuẩn xây dựng phổ biến trên thế giới chưa chỉ ra

được tầm quan trọng của đặc trưng động lực học bể chứa nói chung và TLD nói riêng.

- Trước đây, tương tác chất lỏng-thành bể được xét đến chỉ ở mức độ một chiều tức là sóng chất lỏng dao động gây ra biến dạng thành, chưa xét biến dạng thành tiếp tục đàn hồi lại tác động ngược vào chất lỏng áp lực và hiện tượng này liên tục lặp đi lặp lại có thể làm cho cộng hưởng xảy ra dẫn đến phá hoại TLD. Thêm vào đó, hầu như chưa có nghiên cứu nào về TLD/MTLD có xét đến tương tác kết cấu-chất lỏng-thành bể.
- Cuối cùng là việc nghiên cứu bằng thí nghiệm khả năng giảm chấn của dạng thiết bị này còn rất hạn chế ở Việt Nam nói chung và khu vực miền Nam nói riêng. Đây là một trong những điều kiện tiên quyết để có thể ứng dụng TLD/MTLD vào thực tiễn vì vậy việc thí nghiệm cần nhiều sự đầu tư hơn nữa.

1.3 Mục tiêu của Luận án

Nghiên cứu bể chứa chất lỏng có thành mỏng, ứng dụng trong điều khiển dao động kết cấu có xét tương tác hai miền rắn-lỏng, luận án tập trung giải quyết các vấn đề cụ thể sau đây:

- Phân tích ảnh hưởng của thành bể từ dày (cứng) tới mỏng (mềm) khi có xét FSI đến đặc trưng riêng và áp lực động của sóng lên thành bể khi bể chứa chất lỏng chịu tải trọng động đất.
- Ứng dụng phương pháp FVM/FEM trong đó FVM mô phỏng miền chất lỏng kết hợp FEM mô phỏng miền kết cấu để phân tích phản ứng động của công trình có sử dụng TLD/MTLD làm thiết bị giảm chấn. Phương pháp có ưu điểm không chỉ phân tích được đáp ứng của kết cấu theo thời gian mà còn phân tích được đáp ứng dao động của sóng bên trong bể chứa.
- Khảo sát khả năng điều khiển dao động của TLD/MTLD có xét tương tác đa trường đặc biệt trong trường hợp thành bể đủ mỏng (mềm) dẫn đến thiết bị làm việc không đúng theo thiết kế.
- Thí nghiệm trên bàn lắc khảo sát đáp ứng dao động của kết cấu khi có sử dụng và không sử dụng TLD. Kết quả thí nghiệm được so sánh với mô phỏng số.

- Đề xuất quy trình thiết kế TLD/MTLD để tiết kiệm tài nguyên tính toán.

1.4 Tính mới của Luận án

- Khẳng định sự ảnh hưởng đáng kể của vấn đề thành bể mềm khi xét FSI đến tần số dao động tự nhiên của bể chứa và áp lực sóng chất lỏng tác dụng lên thành bể. Đây là điểm cần lưu ý đối với kỹ sư thiết kế bể chứa chất lỏng nói chung và thiết kế TLD nói riêng.
- Đề xuất quy trình thiết kế-kiểm tra MTLD có xét FSI điều khiển dao động kết cấu bằng cách áp dụng phương pháp khối lượng thu gọn để thiết kế sơ bộ nhằm lựa chọn số lượng TLD, dải băng tần hoạt động, chiều cao nước, kích thước bể chứa sau đó kiểm tra lại thiết kế bằng phương pháp FVM/FEM.
- Thí nghiệm kiểm tra khả năng của TLD/MTLD trong việc điều khiển dao động kết cấu bằng bàn lắc tự chế tạo.

1.5 Phạm vi nghiên cứu

- Luận án chỉ xét kết cấu làm việc trong giai đoạn đàn hồi.
- Tất cả các bài toán tương tác rắn lỏng trong nghiên cứu này đều sử dụng giả thiết chất lỏng lý tưởng với mật độ chất lỏng là không đổi, chất lỏng không nén được và không thay đổi tính chất vật lý trong suốt quá trình phân tích.

1.6 Tóm tắt Luận án

Luận án chia làm 6 chương trình bày lần lượt các vấn đề như sau:

Chương 1 giới thiệu TLD và các nghiên cứu đã thực hiện trước đây. Sau đó trình bày mục đích cũng như hướng nghiên cứu trong luận án.

Chương 2 trình bày phương pháp giải tích tính toán thông số đặc trưng bể chứa chất lỏng như tần số dao động riêng, chiều cao sóng, áp suất chất lỏng tác dụng lên thành bể. Sau đó xem MTLD như thiết bị giảm chấn khối lượng Multi Tuned Mass Damper-MTMD nhằm mục đích phân tích đơn giản và lựa chọn nhanh chóng hệ thiết bị (chọn tỷ số khối lượng thiết bị với kết cấu, số lượng bể chứa, băng tần số ...). Cũng trong chương này, phương pháp quy đổi MTLD thành MTMD của Sun và cộng sự (1995) [20] kết hợp đề xuất của Novo và cộng sự (2014) [86] được áp dụng để mô

phỏng toàn bộ cơ hệ bằng SAP2000, kết quả cho thấy khả năng giảm chấn của MTLD là đáng kể.

Chương 3 phân tích tầm quan trọng của việc xét FSI đặc biệt đối với thành bể mềm khi bể chứa chất lỏng dao động. Phân tích bể chứa chịu động đất bằng nhiều tiêu chuẩn thiết kế khác nhau (ACI, Eurocode, Indian Standard) có xét yếu tố thành bể mềm, từ đó đưa ra một vài nhận xét đóng góp để các tiêu chuẩn thiết kế bể chứa chất lỏng nói chung và thiết kế TLD nói riêng có thể hoàn thiện hơn. Tất cả các thông số quan trọng của bể chứa và áp lực động của sóng được tính toán bằng phương pháp số, kết hợp so sánh với nghiên cứu của các tác giả khác.

Chương 4 phân tích khả năng giảm chấn công trình chịu tải trọng động xét tương tác đa trường trong trường hợp có sử dụng và không sử dụng MTLD để giảm chấn. Thêm vào đó, khảo sát TLD trong khung thép 8 tầng có xét FSI đặc biệt khi thành bể mỏng (làm thay đổi đặc trưng của TLD) làm thiết bị mất khả năng làm việc.

Chương 5 thí nghiệm trên bàn lắc đáp ứng dao động của khung thép dưới tác dụng của tải trọng động khi có sử dụng và không sử dụng MTLD cũng như khả năng tắt dần dao động khi khung dao động tự do. Các kết quả thí nghiệm bao gồm tỉ số cản và đáp ứng chuyển vị đỉnh khung được đối chiếu với kết quả của phương pháp số.

Chương 6 tóm tắt các kết luận rút ra được từ luận án và một số hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai.

CHƯƠNG 2

ĐẶC TRƯNG VÀ KHẢ NĂNG ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG CỦA THIẾT BỊ GIẢM CHẤN ĐA TẦN

2.1 Giới thiệu

Nguyên lý làm việc của TLD hoàn toàn tương tự như thiết bị giảm chấn con lắc ngược TMD kinh điển như trình bày ở Hình 2. 1, tuy nhiên TLD có thêm dao động sóng chất lỏng ở bề mặt sẽ trở nên phi tuyến khi biên độ lực kích thích đủ lớn; khi đó sóng chất lỏng đạt đến cường độ nhất định thì hiện tượng sóng vỡ xảy ra. Đây là điều khác biệt duy nhất giữa hai thiết bị này, tuy nhiên TLD có các ưu điểm khác so với TMD như đã trình bày ở chương 1. Đã có nhiều nghiên cứu trước đây đề xuất giải pháp quy đổi TLD thành TMD [20, 32, 86-88], trong đó phương pháp khối lượng thu gọn quy đổi TLD thành TMD tương đương của Novo và cộng sự (2014) là một trong những cách thường được sử dụng [86], và đây cũng là phương pháp dùng trong chương 2 này.



Hình 2. 1 Nguyên lý hoạt động của TLD tương tự TMD

Trong chương này, kết cấu chính được điều khiển dao động bằng hệ bể chứa chất lỏng đa tần số (sau đây gọi tắt là hệ đa tần), trong đó mỗi bể có chiều cao nước khác nhau nên có tần số khác nhau và được quy đổi như một khối lượng con lắc ngược TMD. Việc quy đổi tương đương này nhằm mục đích dễ dàng phân tích hiệu quả của

thiết bị bằng kỹ thuật phân tích TMD kinh điển. Bên cạnh đó, quy trình thiết kế TMD nhanh và đơn giản nhờ bỏ qua sự phi tuyến của sóng chất lỏng, giúp dễ dàng lựa chọn các thông số quan trọng nhất khi thiết kế TLD. Các thông số đó là tần số dao động riêng, tỷ số khối lượng, tỷ số giảm chấn, chuyển vị đỉnh khung, số lượng bể chứa phù hợp tương ứng với dải băng tần làm việc của thiết bị. Các phân tích được thực hiện bao gồm đáp ứng dao động kết cấu trên miền tần số, đáp ứng dao động điều hòa và động đất. Kết quả cho thấy nếu kết cấu sử dụng càng nhiều bể chất lỏng sẽ càng giúp giảm dao động, đặc biệt sự làm việc của hệ bể đa tần còn giúp cho thiết bị làm việc ổn định, tránh các hiện tượng không mong muốn như sóng vỡ hoặc trễ pha. Đây cũng là cơ sở cho việc phân tích kết cấu có xét tương tác hai miền rắn-lỏng ở chương 4; kết quả tính toán, phân tích sẽ được đối chiếu với các thí nghiệm trong chương 5.

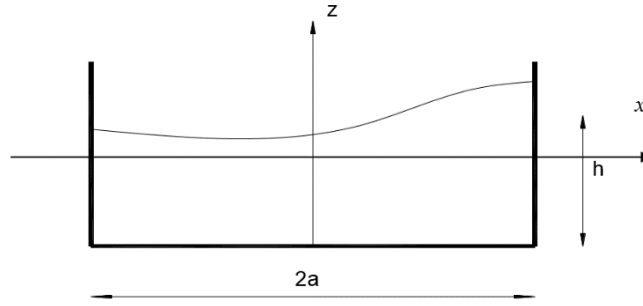
Nội dung chương 2 trình bày ba vấn đề chính là: (1) phân tích các đặc trưng riêng của bể chứa chất lỏng nói chung và MTLD nói riêng để có thể quy đổi thành MTMD tương đương, các thông số đặc trưng sau khi được tính toán bằng công thức giải tích sẽ so sánh với kết quả từ FEM với phần mềm hỗ trợ ANSYS và đối chiếu thí nghiệm trên bàn lắc; (2) code lập trình Matlab được ứng dụng để phân tích hệ nhiều bậc tự do Multi Degree of Freedom-MDOF sử dụng MTMD trong việc điều khiển dao động kết cấu và (3) phương pháp quy đổi MTLD thành MTMD tương ứng để mô phỏng số với sự hỗ trợ của SAP2000 tính toán đáp ứng dao động của kết cấu nhằm đánh giá khả năng giảm chấn và so sánh thí nghiệm.

2.2 Các thông số đặc trưng quan trọng của TLD

Ba đặc trưng quan trọng nhất liên quan đến sự làm việc của TLD là: tần số dao động tự nhiên f_{TLD} , biên độ (chiều cao) của sóng η và áp lực động của sóng chất lỏng tác dụng lên thành bể p_w . Việc phân tích ba đặc trưng này là cơ sở cho việc thiết kế thiết bị [20, 37, 89, 90].

2.2.1 Tần số dao động riêng của bể chứa chất lỏng

Tần số tự nhiên của bể f_{tank} (hoặc f_{TLD} khi bể chứa đóng vai trò TLD) là thông số quan trọng nhất cần phân tích vì tất cả các thông số động lực học khác đều được tính dựa trên f_{tank} . Xét bể chứa chất lỏng như Hình 2. 2.



Hình 2. 2 Sóng chất lỏng dao động trong bể

Theo [46], trong trường hợp khi dao động của sóng chất lỏng có dạng tuyến tính. Chuyển động chất lỏng có thể vận tốc ϕ thỏa mãn phương trình Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

Trong đó ϕ là hàm thế vận tốc theo tọa độ (x, z) và thời gian t . Nghiệm phương trình trên được tìm bằng cách kết hợp các điều kiện biên. Giả thiết hàm thế ϕ có dạng:

$$\phi(x, z, t) = X(x)Z(z)e^{-i\omega t} \quad (2.2)$$

Với $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ là tần số góc của sóng dao động, f và T lần lượt là tần số tự nhiên và chu kỳ tự nhiên của sóng. Thế (2.1) vào (2.2) có:

$$\frac{\partial^2 X}{X} = -\frac{\partial^2 Z}{Z} = -k^2 \quad (2.3)$$

Giả thiết X, Z có dạng:

$$X(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \quad (2.4)$$

$$Z(z) = Ce^{ikz} + De^{-ikz} \quad (2.5)$$

Các thông số A, B, C, D được xác định từ các điều kiện biên (ở đáy bể, thành bể và mặt thoáng) như sau:

▪ **Điều kiện biên ở đáy bể**

$$\omega = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z = -h) \quad (2.6)$$

Thế (2.5) và (2.6) vào (2.3) thu được $Z(z)$ như sau:

$$Z(z) = 2Ce^{-kh} \cosh(k(z+h)) \quad (2.7)$$

▪ **Điều kiện biên ở mặt thoáng chất lỏng**

Tại $Z = \eta(x, t)$ bề đứng yên không có dao động sóng vì vậy tồn tại hai điều kiện biên:

a. Điều kiện biên động lực học:

$$p = p_o = 0 \quad \text{tại } z = \eta \quad (2.8)$$

b. Điều kiện biên động học:

$$\frac{D\eta}{Dt} \equiv \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = \omega \quad (2.9)$$

với p_o là áp suất ở mặt thoáng chất lỏng.

Phương trình Bernoulli biểu diễn cho hàm thế ϕ có dạng như sau:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right)^2 + \frac{p}{\rho} + g\eta = \text{const} \quad (2.10)$$

Trong đó g là gia tốc trọng trường, ρ là trọng lượng riêng. Từ phương trình trên kết hợp với điều kiện sóng chất lỏng xem như dao động tuyến tính, có thể bỏ qua các đạo hàm bậc cao để có η bằng:

$$\eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=\eta} \equiv -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=0} \quad (2.11)$$

Mặt khác, bỏ qua đạo hàm bậc 2 trong (2.9), dẫn đến:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.12)$$

Loại bỏ η bằng cách kết hợp hai phương trình (2.11) và (2.12) thu được:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (z=0) \quad (2.13)$$

Kết hợp đồng thời (2.2) (2.4), và (2.7) thế vào (2.13) được phương trình:

$$\omega^2 = gk \times \tanh(kh) \quad (2.14)$$

Giả thiết rằng η có dạng:

$$\eta = \frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) \quad (2.15)$$

Thế (2.2), (2.4) và (2.7) vào (2.11) sau đó so sánh (2.15) với (2.11) thu được:

$$B = 0$$

$$2ACe^{-kh} = \frac{-gh}{2\omega} \frac{1}{\cosh(kh)} \quad (2.16)$$

Do vậy hàm thế vận tốc có thể được viết lại như sau:

$$\phi(x, z, t) = \frac{-gh}{2\omega} \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.17)$$

Thế (2.10) vào (2.17) phương trình áp suất theo thời gian được viết lại là:

$$p(x, z, t) = -\rho g \left(z - \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \eta \right) \quad (2.18)$$

▪ Điều kiện biên ở thành bể

Trong chương 2 này chỉ xét bể có dạng tuyệt đối cứng nên xem như biến dạng cũng như chuyển vị của thành bể bằng zero, vì vậy:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (x = \pm a) \quad (2.19)$$

Bởi vì thành bể nằm trên phương đứng, dao động sóng chất lỏng có thể xem như là hàm chùng chất của sóng hiện thời cùng với sóng nghịch của nó (là sóng có dao động nghịch pha và ngược hướng). (2.15) khi đó trở thành:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{H}{2} (\sin(kx + \omega t) - \sin(kx - \omega t)) \\ &= H \cos(kx) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Trong trường hợp bể chứa có cơ chế chuyển động nền theo phương ngang, chỉ có hàm dạng sóng không đối xứng bị kích thích. Khi đó (2.20) viết lại là:

$$\eta = H \cos(kx) \sin(\omega t) \quad (2.21)$$

Tương ứng có hàm thế vận tốc ϕ theo thời gian:

$$\phi(x, z, t) = \frac{gh}{2\omega} \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (2.22)$$

Để thỏa mãn điều kiện biên ở thành bể thì đạo hàm theo x của (2.22) phải bằng zero:

$$\cos(kx) = 0 \quad (x = \pm a) \quad (2.23)$$

vậy:

$$k = \frac{2n-1}{2a} \pi \quad (2.24)$$

với k là số bước sóng và có thể diễn đạt bằng phương trình

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.25)$$

Thế (2.25) vào (2.14) thu được phương trình tính tần số riêng cho bài toán bể chứa chất lỏng có thành xem như tuyệt đối cứng là:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2n-1}{2a} \pi g \tanh\left(\frac{2n-1}{2a} \pi h\right)} \quad (2.26)$$

trong đó n là số các mode khác nhau của dao động sóng chất lỏng. Khi $n = 1$ tần số dao động cơ bản đầu tiên theo (2.26) là :

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \quad (2.27)$$

Ví dụ 2.1a. Bể chứa chất lỏng có kích thước $0.2m \times 0.3m$ với các chiều cao nước khác nhau được phân tích nhằm tìm tần số dao động tự nhiên f_{TLD} và phân tích ứng xử của sóng chất lỏng khi bể chịu dao động nền $x = A \cdot \sin(2\pi f_{TLD} \cdot t)$

Từ (2.27) tần số dao động riêng của bể chứa chất lỏng là:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi \times 9.81}{0.3} \tanh\left(\frac{\pi h}{0.3}\right)}$$

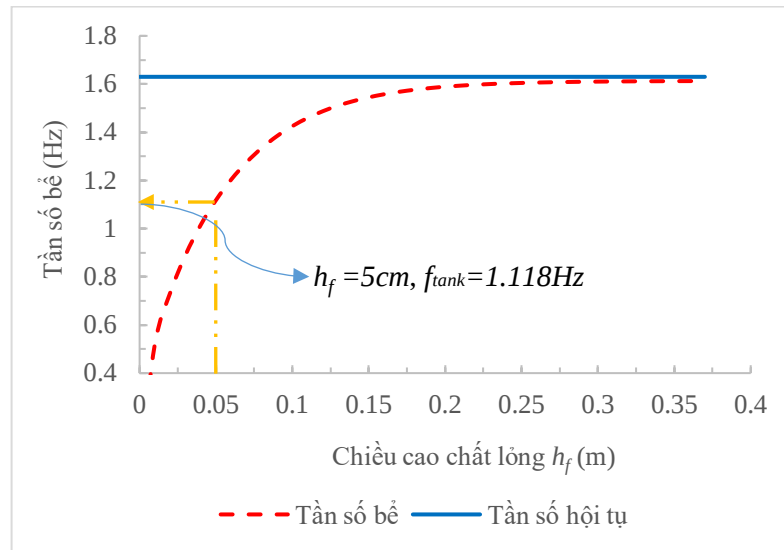
Cho chiều cao chất lỏng h thay đổi từ 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm và 6 cm thì tần số bể chứa f_{tank} thu được lần lượt như ở Bảng 2.1.

Bảng 2.1 Sự phụ thuộc của tần số riêng bể chứa vào chiều cao chất lỏng

Bể chứa chất lỏng 0.2x0.3xh (DxRxh)					
h (m)	0.02	0.03	0.04	0.05*	0.06
f_{tank} (Hz)	0.733	0.890	1.015	1.118	1.204

Từ (2.27) có thể rút ra nhận xét tần số dao động riêng bể chứa một phần chất lỏng sẽ hội tụ về một giá trị cho dù chiều cao h tăng đến ∞ như ở Hình 2. 3. Chính từ nhận xét này trong thực tế thiết kế, kỹ sư không nên điều chỉnh tần số TLD bằng cách giữ nguyên $2a$ và tăng h_f , khi đó thể tích nước tăng đáng kể sẽ ảnh hưởng đến tỷ số khối lượng của TLD và kết cấu. Để có thể tăng tần số nhưng vẫn giữ nguyên thể tích chất

lỏng các kỹ sư có thể sử dụng nhiều bể chứa chất lỏng nhỏ, đây chính là một trong nhiều nguyên nhân dẫn đến việc sử dụng MTLD thay vì 1-TLD.



Hình 2. 3 Quan hệ chiều cao chất lỏng và tần số riêng của bể

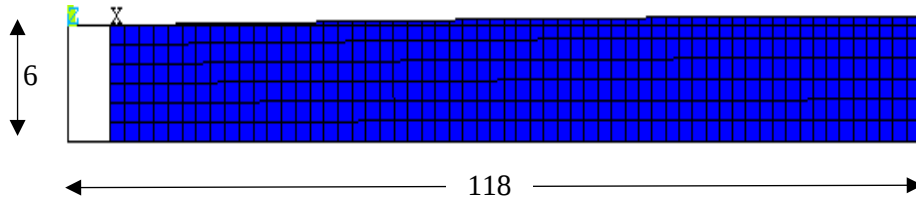
Ví dụ 2.1b. Xét bể chứa chất lỏng của Sun và cộng sự [17] kích thước 0.59m x 0.03m ký hiệu T0.59x0.03 trong đó 0.59 m là phương dao động sóng và 0.03 m là chiều cao của mực nước. Theo (2.27) thì f_{tank} tính bằng giải tích là

$$f_{\text{tank}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi \times 9.81}{0.59} \tanh\left(\frac{\pi \times 0.03}{0.59}\right)} = 0.4578(\text{Hz})$$

Ngoài ra, để tính f_{tank} bằng FEM, mô phỏng 2D với phần tử chất lỏng Fluid 79 của ANSYS được sử dụng để thực hiện cho bài toán phân tích f_{tank} với nhiều kích thước ô lưới phần tử khác nhau. Chi tiết độ chính xác của f_{tank} ở Bảng 2. 2 và Hình 2. 4:

Bảng 2. 2 Tần số riêng bể chứa với các lưới phần tử khác nhau

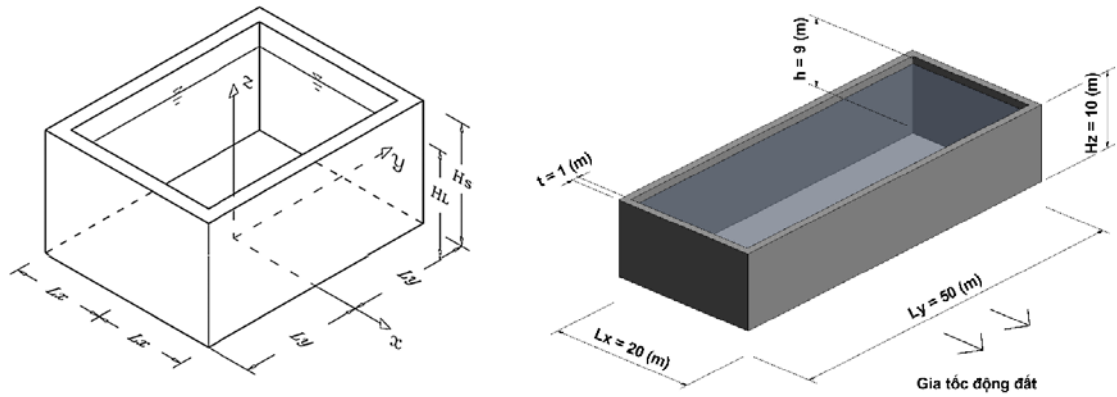
Lưới phần tử ($n \times m$)	FEM				Giải tích
	6 x 2	6 x 3	59 x 3	118 x 6	
Tần số (Hz)	0.6012	0.5529	0.4603	0.4578	0.4578
Sai số (%)	31.32	20.77	1.13	0.00	0.00%



Hình 2. 4 Mode dao động cơ bản của bể chứa T0.59x0.03

Từ ví dụ này có thể thấy rằng, FEM với sự chia lưới đủ nhỏ thì kết quả phân tích f_{tank} của bể chứa 2D sẽ chính xác như lời giải giải tích. Đối với mô hình 3D, để thấy rõ hơn khả năng của ANSYS, một bể chứa chất lỏng có thể tích lên đến 7.776 m^3 nước như Hình 2.4 được phân tích.

Ví dụ 2.2: Bể chứa chất lỏng có kích thước như hình vẽ.



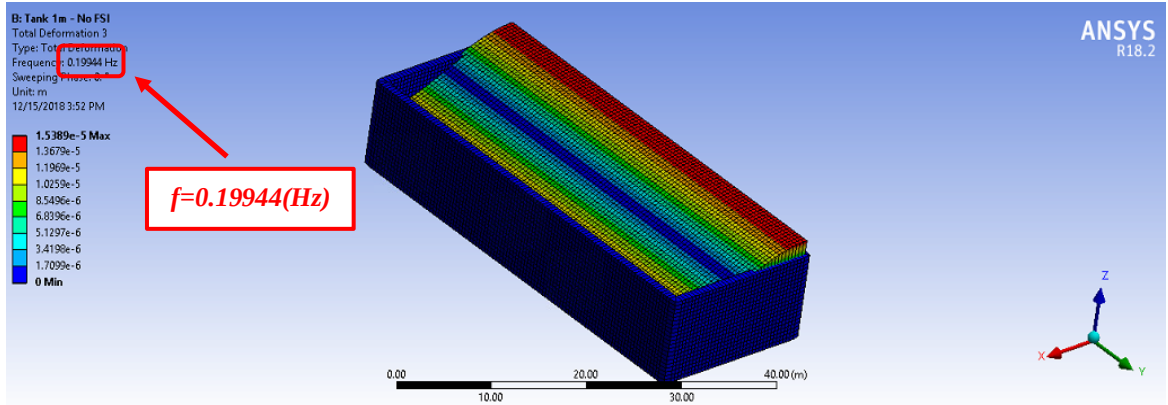
Hình 2. 5 Bể chứa chất lỏng 7.776 m^3 (thông thuỷ $18\text{m} \times 48\text{m} \times 9\text{m}$)

- Chiều dài $L_y = 50(\text{m})$, chiều rộng $L_x = 20(\text{m})$, chiều cao $H_z = 10(\text{m})$, bề dày thành bể $t_w = 1(\text{m})$, chiều cao mực nước $h_f = 9(\text{m})$
- Bê tông dung trọng $\gamma = 2400(\text{kg}/\text{m}^3)$, module đàn hồi $E = 2.1 \times 10^{10} (\text{N}/\text{m}^2)$, hệ số poisson $\nu = 0.17$, tỷ số cản $\xi = 3\%$

Khi đó tần số dao động riêng của bể tính theo phương pháp giải tích từ (2.27) là:

$$f_{\text{tank}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi \times 9.81}{18.0} \tanh\left(\frac{\pi \times 9.0}{18.0}\right)} = 0.199(\text{Hz})$$

Kết quả tính toán từ giải tích được so sánh với kết quả có được từ mô phỏng ANSYS như Hình 2. 6.



Hình 2. 6 Tần số bể chứa chất lỏng 7.776 m³

Từ các kết quả phân tích trên cho thấy FEM cho kết quả tính toán f_{tank} hoàn toàn chính xác so với lời giải giải tích ở cả mô hình 2D lẫn 3D.

2.2.2 Biên độ dao động của sóng chất lỏng

Để khảo sát biên độ dao động của sóng bề mặt, cho một ngoại lực kích thích đủ lớn để mặt thoáng chất lỏng dao động. Giả sử bể chứa bị kích thích bởi một xung lực điều hòa $X(t) = X_0 \sin \omega t$ với X_0 là biên độ dao động và ω là tần số kích thích, phương trình Laplace $\nabla^2 \phi = 0$ cho bể chứa 2D được viết lại thành:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.28)$$

Nghiệm của (2.28) được tìm từ bốn điều kiện biên ở thành bể và mặt thoáng lúc này đã khác so với khi khảo sát tần số dao động tự nhiên, các điều kiện biên lần lượt là:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{x=\pm L/2} = 0, \quad (2.29)$$

$$g\eta - \frac{\partial \phi}{\partial t} + \ddot{X}(t)x = 0, \text{ tại } z = \eta(x, t) \text{ (điều kiện biên động lực học)} \quad (2.30)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \text{ tại } z = \eta(x, t) \text{ (điều kiện biên động học)} \quad (2.31)$$

Kết hợp hai điều kiện biên ở mặt thoáng chất lỏng (2.30) và (2.31) thu được:

$$g \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \ddot{X} x \quad (2.32)$$

Giải hệ các phương trình từ (2.28) đến (2.32) thu được hàm thế vận tốc có dạng:

$$\phi = -X_o \omega \cos \omega t \quad (2.33)$$

Trong khi đó tọa độ x có thể biểu diễn theo chuỗi Fourier như sau:

$$x = \frac{4L}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \sin((2n+1) \frac{\pi x}{L}) \quad (2.34)$$

Thế (2.34) vào (2.33) thu được:

$$\phi = -X_o \omega \cos \omega t \times \left\{ x + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin((2n+1) \frac{\pi x}{L}) \cosh((2n+1) \frac{\pi(z+h)}{L})}{\pi^2 (2n+1)^2 \cosh((2n+1) \frac{\pi h}{L})} \frac{4L}{\omega_n^2 - \omega^2} \right\} \quad (2.35)$$

với $\omega_n^2 = (2n+1) \frac{\pi g}{L} \tanh((2n+1) \frac{\pi h}{L})$ là bình phương tần số vòng của miền chất lỏng.

Thay (2.35) vào (2.21) được phương trình mô tả biên độ dao động của sóng dưới tác dụng của ngoại lực dạng hàm sin như sau:

$$\eta = \omega^2 \frac{X_o}{g} \sin \omega t \times \left\{ x - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n 4L}{\pi^2 (2n+1)^2} \frac{\omega^2}{\omega_n^2 - \omega^2} \sin((2n+1) \frac{\pi x}{L}) \right\} \quad (2.36)$$

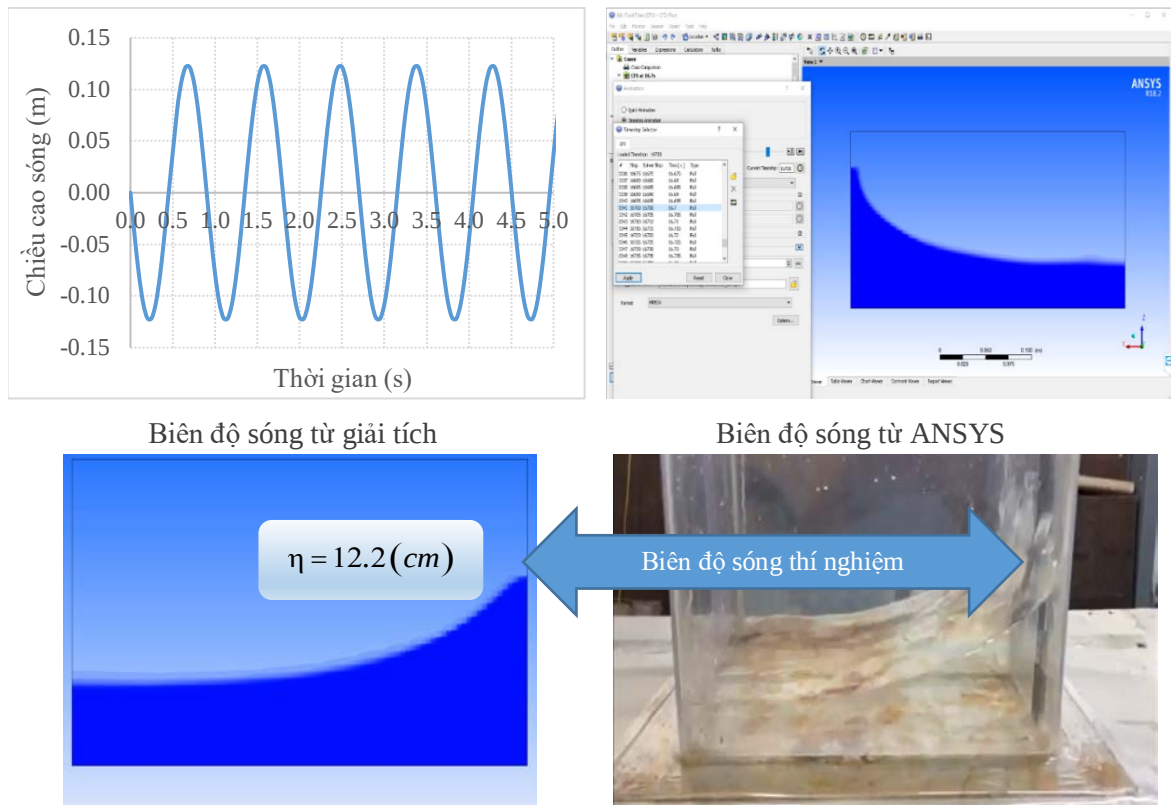
Để đơn giản nhưng vẫn đạt được độ chính xác cần thiết, chỉ cần xét mode dao động cơ bản của TLD tức là khi $n=0$, khi đó tại phía thành bể trên mặt thoáng $x=L/2$ biên độ dao động sóng chất lỏng được viết lại như sau:

$$\eta(x = L/2) = \omega^2 \frac{X_o}{g} \sin \omega t \times \left\{ x - \frac{4L}{\pi^2} \frac{\omega^2}{\omega_n^2 - \omega^2} \right\} \quad (2.37)$$

Phương trình (2.37) được dùng để tính toán một số ví dụ cho bể chứa chất lỏng chịu tải dao động điều hoà, kết quả được so sánh với FEM và kiểm tra bằng thí nghiệm cho bể chịu tải trọng động trên bàn lắc.

Ví dụ 3a: Trở lại bể chứa ở ví dụ 2 với kích thước **0.2m x 0.3m** và chiều cao chất lỏng $h=5 \text{ cm}$ (*) như ở Bảng 2.1, chịu kích thích dao động nền điều hoà $X(t) = X_o \sin \omega t = 3 \times \sin(2\pi \cdot 1.11 \times t) \text{ (mm)}$. Tính chiều cao η của sóng chất lỏng.

Từ (2.37) tính biên độ dao động sóng η , kết quả thể hiện ở Hình 2.5, trong đó chiều cao sóng theo giải tích lớn nhất $\eta=12.2 \text{ cm}$, theo ANSYS là 12.2 cm tại thời điểm 16.7 s, hình dạng dao động thể hiện tính chất phi tuyến của sóng chất lỏng.



Hình 2. 7 Chiều cao sóng tại tần số cộng hưởng $f=1.11\text{Hz}$ với $h_{\text{water}} = 5\text{cm}$

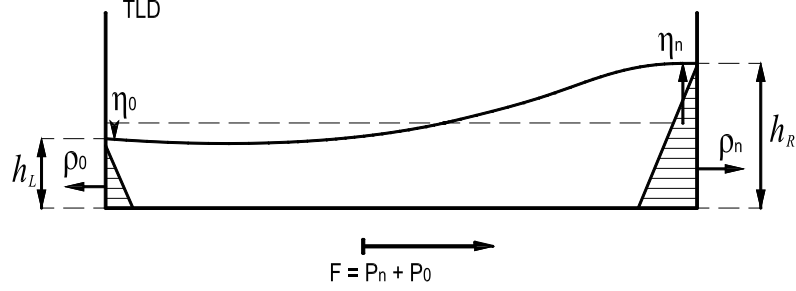
Từ kết quả mô phỏng số đối chiếu với lời giải giải tích và thí nghiệm kiểm tra biên độ cực đại của sóng chất lỏng, Hình 2. 7 đã chỉ ra sự đồng nhất giữa các phương pháp cũng như độ chính xác cơ bản của thiết bị thí nghiệm.

2.2.3 Áp suất thành bể và lực cắt đáy bể

TLD khi hoạt động sẽ hình thành sóng ở mặt thoáng, gây ra áp lực lên thành bể. Khi biên độ sóng bé thì gần như áp lực chất lỏng lên thành bể là áp lực tĩnh, bỏ qua thành phần động. Khi chiều cao sóng đạt đến một biên độ và tần số nhất định thì có thể dẫn đến hiện tượng sóng vỡ. Ngoại lực kích thích chính là nguyên nhân gây ra áp suất động tác dụng lên thành bể cùng với áp lực tĩnh luôn luôn tồn tại. Áp suất tác dụng lên thành bể được xác định như là phản lực của thành bể, nó được tạo ra bởi cơ chế dao động của sóng ở mặt thoáng như Hình 2. 8. Sóng bề mặt chất lỏng bao gồm một sóng đơn và một nhóm các sóng đối xứng dạng sin. Áp suất của chất lỏng ở tại một vị trí bất kỳ nào đó (bỏ qua áp suất tĩnh $\rho g z$) là:

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$= \rho \frac{X_0 \omega^2}{\omega^2} X_0 \omega^2 \sin(\omega t) \left\{ x + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n \sin((2n+1) \frac{\pi x}{L}) \cosh((2n+1) \frac{\pi(z+h)}{L})}{\pi^2 (2n+1)^2 \cosh((2n+1) \frac{\pi h}{L})} \times \frac{4L\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \right\} \quad (2.38)$$



Hình 2. 8 Lực cắt đáy tác dụng lên bể $F=P_0+P_n$

Áp suất chất lỏng ở một vị trí bất kỳ trên thành bể, chẳng hạn tại $x=L/2$ (giữa bể) là:

$$p_w = \rho X_0 \omega^2 \sin \omega t \left\{ \frac{L}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\cosh \left((2n+1) \frac{\pi(z+h)}{L} \right)}{\pi^2 (2n+1)^2 \cosh \left((2n+1) \frac{\pi h}{L} \right)} \frac{4L\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \right\} \quad (2.39)$$

Áp suất chất lỏng ở đáy bể, $z=-h$ là:

$$p_b = \rho X_0 \omega^2 \sin \omega t \left\{ x + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\sin \left((2n+1) \frac{\pi x}{L} \right)}{\pi^2 (2n+1)^2 \cosh \left((2n+1) \frac{\pi h}{L} \right)} \frac{4L\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \right\} \quad (2.40)$$

Tổng áp suất chất lỏng tác dụng lên đáy bể và thành bể được mô tả bằng tích phân trên toàn bộ diện tích thành, $y \in \pm l/2$ và $z \in [-h, 0]$

$$F_x = 2 \int_{-h}^0 dz \int_{-l/2}^{l/2} p_w dy$$

$$= m_f X_0 \omega^2 \sin(\omega t) \left\{ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{8 \tanh \left((2n+1) \frac{\pi h}{L} \right)}{(h/L) \pi^3 (2n+1)^3} \frac{\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \right\} \quad (2.41)$$

Với $m_f = \rho L l h$ là khối lượng thể tích tổng cộng. Thế (2.37) vào phương trình (2.41)

lực cắt đáy bể có thể viết đơn giản là:

$$F_x = -\frac{1}{2} \rho g \left((h+\eta)^2 - (h-\eta)^2 \right) \quad (2.42)$$

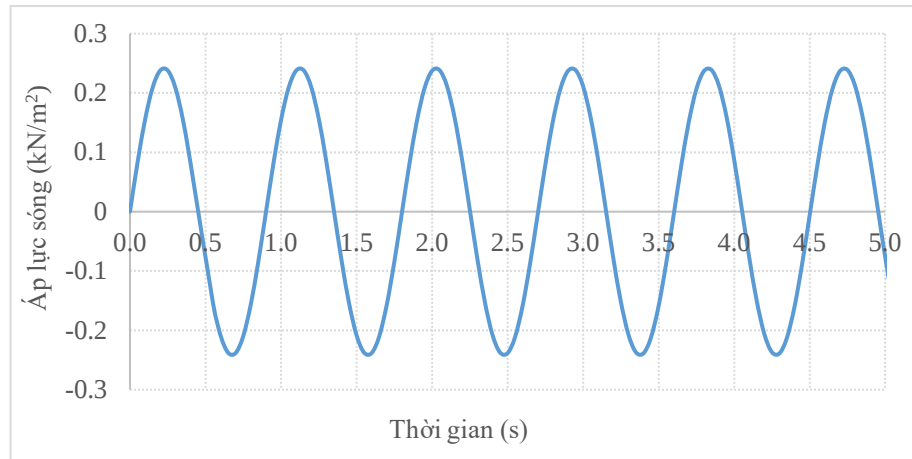
Ví dụ 3b: Xét bể chứa chất lỏng $0.2m \times 0.3m$ có chiều cao chất lỏng h_f , chịu kích thích bởi dao động điều hoà $X(t) = X_o \sin \omega t = 3 \times \sin \omega t$ (mm). Tính áp suất chất lỏng lên thành bể p_w .

Từ (2.39) áp suất chất lỏng được viết lại là:

$$p_w = \rho X_o \omega^2 \sin \omega t \left\{ \frac{L}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\cosh \left((2n+1) \frac{\pi(z+h)}{L} \right)}{\pi^2 (2n+1)^2 \cosh \left((2n+1) \frac{\pi h}{L} \right)} \frac{4L\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \right\}$$

Với mode cơ bản $n = 0$ thì:
$$p_w = \rho X_o \omega^2 \sin \omega t \left\{ \frac{L}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\cosh \left(\frac{\pi(z+h)}{L} \right)}{\pi^2 \cosh \frac{\pi h}{L}} \frac{4L\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \right\}$$

Tại $x=L/2$ và $z=-h$ áp suất tác dụng lên đáy bể được thể hiện ở Hình 2. 9 là:



Hình 2. 9 Áp suất chất lỏng tại tần số cộng hưởng $f=1.1Hz$ với $h_f=5cm$

Giá trị p_w tác dụng lên thành bể ở Hình 2. 9 được tính bằng phương pháp giải tích dựa trên giả thiết ứng xử của sóng là tuyến tính, tuy nhiên trong thực tế khi chiều cao sóng đạt đến biên độ nhất định thì chất lỏng phản ứng phi tuyến, phương pháp giải tích sẽ không phù hợp nữa [25]. Vì vậy p_w sẽ được xem xét thêm ở chương 3, trong trường hợp ứng xử của sóng là phi tuyến và có kể đến sự đàn hồi của thành bể.

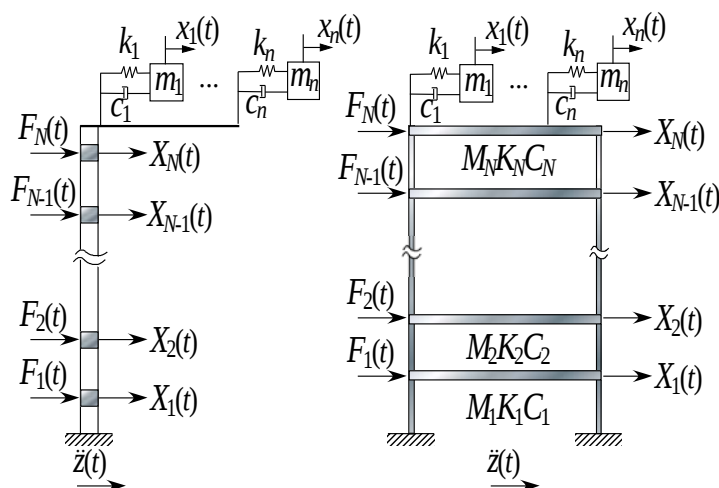
2.3 Phân tích hiệu quả của thiết bị giảm chấn đa tần

Xuất phát từ nhận xét nguyên lý hoạt động của thiết bị TLD tương tự như TMD, mục 2.3 trình bày về TMD nói chung và MTMD nói riêng. Ở đây nhấn mạnh

đến hiệu quả của hệ thiết bị đa tần số f_{MTMD} , hoàn toàn khác với thiết bị nhiều bể chứa (con lắc ngược) nhưng chỉ có một tần số duy nhất f_{TMD} [37, 41, 43, 89, 91-105]. Cơ hệ được phân tích nhằm khảo sát hiệu quả và so sánh sự làm việc của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng động khi có và không có sử dụng thiết bị giảm chấn. Trong mục này trình bày về các thông số quan trọng khi thiết kế TLD/TMD đó là tần số dao động riêng, tỷ số cản, biên độ dao động, tỉ số khối lượng, số lượng tối ưu cho các bể chứa tương ứng với dải băng tần làm việc. Kết quả cho thấy khi sử dụng hiệu quả số lượng TLD/TMD sẽ giúp kết cấu giảm đáng kể dao động.

2.3.1 Nguyên lý hoạt động của MTMD

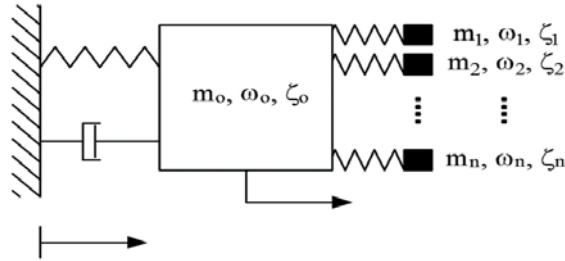
Các nghiên cứu trước đây dừng lại ở việc xét 1-DOF điều khiển dao động bởi 1-TMD, 1-DOF với MTMD hoặc MDOF với 1-TMD. Phần này phân tích bài toán tổng quát bằng cách khảo sát MDOF với MTMD (Hình 2. 10).



Hình 2. 10 Hệ N-DOF có sử dụng n-TLD

Các nghiên cứu gần đây cho thấy thiết bị điều khiển dạng bị động có xu hướng được sử dụng nhiều hơn các thiết bị dạng chủ động vì thiết bị bị động không cần sử dụng năng lượng bên ngoài kích hoạt để làm việc trong khi thiết bị chủ động thì ngược lại. MTMD khởi nguồn dựa trên nền tảng của nghiên cứu giảm chấn khối lượng đa tần số theo Igusa và Xu (1992). Các tác giả đề xuất hệ gồm một số lượng hữu hạn các giảm chấn khối lượng MTMD có tần số tự nhiên phân bố theo một dải băng tần xung quanh tần số tự nhiên cơ sở của kết cấu [105]. Hiệu quả của MTMD đã được đánh

giá tại nghiên cứu của Yamaguchi và cộng sự (1993) [104]. Bên cạnh đó, các công thức dùng cho thiết kế MTMD được đề xuất bởi Abe và Fujino (1994) [103]. Các nghiên cứu này khẳng định hệ nhiều TMD đặt song song có hiệu quả hơn 1-TMD thông thường khi sử dụng để điều khiển dao động cho kết cấu (Hình 2. 11).

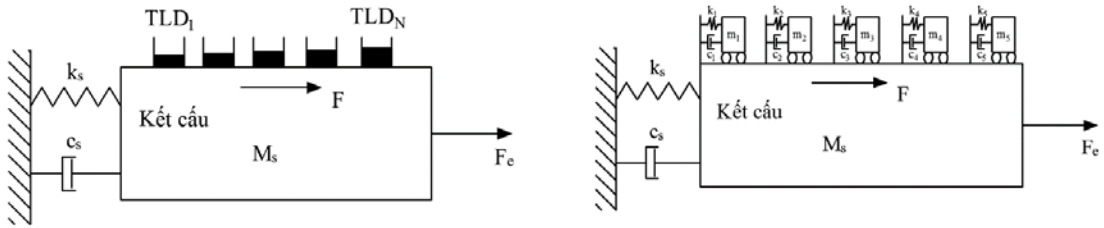


Hình 2. 11 Hệ 1-DOF với n-TMD đặt song song

Thông qua phân tích khả năng giảm chấn của MTMD, sẽ có cơ sở để thiết kế thiết bị giảm chấn chất lỏng đa tần MTLD. Ví dụ ở cuối mục này trình bày các thông số ảnh hưởng đến sự làm việc hiệu quả của thiết bị giảm chấn đa tần nói chung.

2.3.2 Phương pháp điều khiển dao động của MTLD

Thiết bị giảm chấn chất lỏng đa tần, MTLD là tập hợp nhiều bể chất lỏng đơn tần TLD có mực nước khác nhau cùng tham gia vào quá trình điều khiển tần số của kết cấu. Tuy nhiên tổ hợp các bể này có tần số riêng phân bố xoay quanh tần số riêng của hệ. Hình 2. 12 bên dưới biểu diễn mô hình toán được xây dựng đối với hệ MTLD.



Hình 2. 12 Sơ đồ tính MTLD tương tự MTMD

Tần số tự nhiên của 1-TLD là:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)} \quad (2.43)$$

với dải tần số $F = f_1, f_2, f_3, \dots, f_s, \dots, f_N$ tương ứng là các tần số riêng (theo thứ tự tăng dần) được tạo ra nhờ tập hợp các bể chứa đơn, khi kết cấu chịu dao động kích thích cộng hưởng đúng bằng tần số riêng f_s , hệ MTLD hoạt động với sự đóng góp tần số

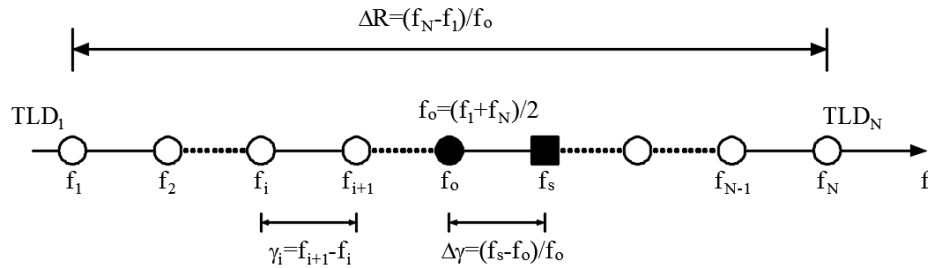
thông qua dao động sóng bề mặt trên các đơn vị bề thành phần, khắc chế dao động cộng hưởng của hệ kết cấu, mà mục tiêu là chuyển vị đỉnh của chúng. Như vậy vấn đề đặt ra là miền F xác định như thế nào là hiệu quả nhất. Sự phân bố tần số của hệ MTLĐ có thể được đặc trưng bởi ba thông số: tần số trung tâm f_o , bề rộng dải băng tần ΔR , và khoảng tần số β_i . Hình 2. 13 biểu diễn dải tần số phân bố trong hệ MTLĐ.

$$f_o = \frac{f_N + f_1}{2} \quad (2.44)$$

$$\Delta R = \frac{f_N - f_1}{f_o} \quad (2.45)$$

$$\beta_i = f_{i+1} - f_i = (f_N - f_1) / (N - 1) \quad (2.46)$$

Trong đó f_i là tần số tự nhiên của TLD thứ i ; f_1 và f_N tương ứng là tần số riêng nhỏ nhất và lớn nhất trong tập hợp N bề chứa TLD. Vì lý do, MTLĐ có 1 tần số trung tâm là f_o nên số lượng bề N thường chọn là số lẻ.



Hình 2. 13 Phân bố tần số trong hệ MTLĐ

Bên cạnh đó, tính chất đặc biệt thể hiện sự khác nhau giữa 1-TLD và MTLĐ là hệ số điều chỉnh $\Delta\gamma$. Theo đó, thay vì điều chỉnh tần số dao động sóng của hệ cản khối lượng đúng bằng tần số riêng của kết cấu, chỉ cần điều chỉnh tần số của N số lượng TLD tham gia giảm chấn có độ gần nhất định đối với tần số cộng hưởng để hệ cản vẫn phát huy tác dụng. Tuy nhiên, cách làm trên không làm giảm đi hiệu quả giảm chấn của hệ, mà còn vượt tầm hiệu quả so với khi chỉ sử dụng đơn bề 1-TLD.

$$\Delta\gamma = \frac{f_s - f_o}{f_o} \quad (2.47)$$

Các nghiên cứu trước đây chỉ ra giá trị tối ưu MTLD đạt được khi $\Delta R = 0 \div 0.2$, tỷ lệ khối lượng $\mu = m_f / m_s = 1-5\%$ (khối lượng nước/khối lượng kết cấu) [20, 102-107].

2.3.3 Kết cấu dao động tự do và tỷ số cản

Phương trình chuyển động của hệ khung (không có lực kích thích):

$$m_s \ddot{x} + c_s \dot{x} + k_s x = 0 \quad (2.48)$$

Nghiệm của phương trình (2.48) có dạng:

$$x(t) = C e^{st} \quad (2.49)$$

Thế nghiệm vào phương trình (2.48), đặt $\omega_s^2 = k_s / m_s$, thu được:

$$s^2 + \frac{c_s}{m_s} s + \omega_s^2 = 0 \quad (2.50)$$

(2.50) là phương trình đặc trưng, nghiệm s của phương trình tùy thuộc vào hệ số cản c_s và nghiệm này có thể được biểu diễn dưới dạng phức. Công thức Euler: $e^{\pm i\omega_s t} = \cos \omega_s t \pm i \sin \omega_s t$. Đối với hệ khung dao động tự do có cản $c_s \neq 0$ (thường là các hệ thuộc loại cản ít $c_s < c_{cr} = 2m\omega_s$), khi đó nghiệm phương trình (2.50) có dạng:

$$s_{1,2} = -\frac{c_s}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c_s}{2m_s}\right)^2 - \omega_s^2} \quad (2.51)$$

Trong trường hợp này, thay vì sử dụng hệ số cản c_s , người ta thường sử dụng hệ số thay thế gọi là tỷ số cản $\xi_s = \frac{c_s}{c_{cr}} = \frac{c_s}{2m_s\omega_s}$. Thế vào phương trình (2.51), thu được:

$$s = -\xi_s \omega_s \pm \sqrt{(\xi_s \omega_s)^2 - \omega_s^2} = -\xi_s \omega_s \pm i\omega_D \quad (2.52)$$

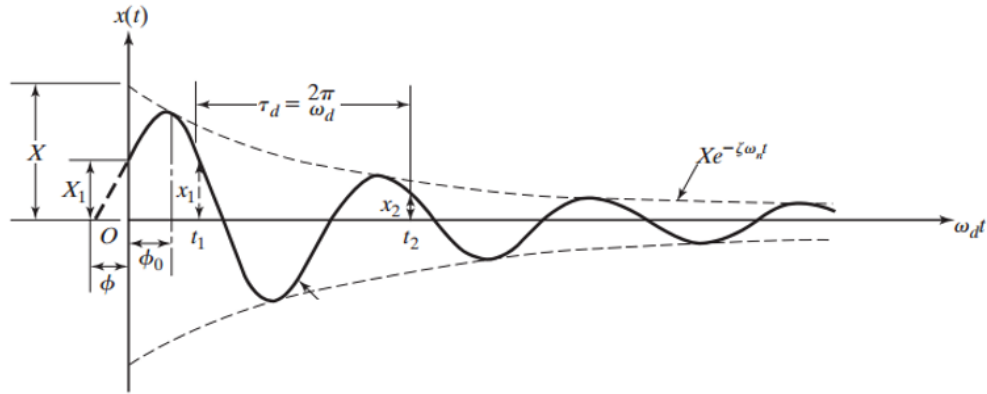
Với $\omega_D = \omega_s \sqrt{1 - \xi_s^2}$ là tần số dao động có cản. Trong thực tế các kết cấu có $\xi < 20\%$ nên $\omega_D \approx \omega_s$ (với giá trị $\xi_s = 0.2$ thì $\omega_D = 0.98\omega_s$). Phương trình chuyển động của dao động tự do của khung cản ít:

$$x(t) = C_1 e^{(-\xi_s \omega_s + i\omega_D)t} + C_2 e^{(-\xi_s \omega_s - i\omega_D)t} \quad (2.53)$$

hay:

$$x(t) = e^{-\xi_s \omega_s t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) = X e^{-\xi_s \omega_s t} \cos(\omega_D t - \phi) \quad (2.54)$$

Hình 2. 14 biểu diễn dao động tắt dần phương trình (2.54), theo Rao (2011) [[108](#)].



Hình 2. 14 Dao động tự do có cản ít

Dao động của hệ khung giảm dần theo thời gian do thành phần $e^{-\xi \omega_s t}$, từ đó ta có định nghĩa hệ số độ giảm loga trong mỗi chu kỳ dao động:

$$\delta = \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (2.55)$$

Sau đó, xác định tỷ số cản ξ_s thông qua biểu thức liên hệ với độ giảm Loga:

$$\xi_s = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (2.56)$$

Công thức (2.56) thường dùng xác định tỷ số cản kết cấu ξ_s bằng thực nghiệm, đây cũng là công thức được áp dụng tính toán tại chương 5 phần thí nghiệm.

2.3.4 Ứng dụng MTMD cho hệ MDOF chịu tải trọng động

Phương trình dao động của khung với TLD được gắn ở đỉnh chịu chuyển vị nền theo phương ngang có thể được viết lại là:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}_b + \mathbf{P}_t \quad (2.57)$$

Trong đó $\mathbf{X} = \{X_1 \ X_2 \ \dots \ X_N\}$ = vecto chuyển vị với X_i chuyển vị tại tầng thứ i , $\mathbf{F}_b$ là lực cắt đáy của TLD và $\mathbf{P}_t$ = vecto lực kích thích. Ma trận hệ số trong phương trình (2.57) là khối lượng, cản và độ cứng được xác định như sau

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & M_2 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & M_N \end{bmatrix} = M_0 \bar{\mathbf{M}} \quad (2.58)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 & \dots & \dots \\ -C_2 & C_2 + C_3 & -C_3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & C_N \end{bmatrix} = C_0 \bar{\mathbf{C}} \quad (2.59)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & \dots & \dots \\ -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & K_N \end{bmatrix} = K_0 \bar{\mathbf{K}} \quad (2.60)$$

Trong đó $\bar{\mathbf{M}}$ $\bar{\mathbf{C}}$ $\bar{\mathbf{K}}$ là các ma trận trực chuẩn. Vec tơ xác định lực kích động nền:

$$\mathbf{P}(t) = -M_0 \bar{\mathbf{M}} \mathbf{1} \ddot{z}_0(t) \quad (2.61)$$

Với $\bar{\mathbf{M}} \mathbf{1} = [\mathbf{1}]_{(N \times 1)}$ là vec tơ đơn vị.

$\mathbf{F}_b(t)$ tác dụng tại đỉnh sàn, được hình thành từ dao động sóng chất lỏng truyền sang kết cấu khi TLD được gắn cố định vào cơ hệ và được xác định theo nghiên cứu của Banerji (2000, 2011) [27, 109] như sau:

$$\mathbf{F}_b(t) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & F_b(t) \end{bmatrix} = f_{b0} \bar{\mathbf{F}}_b \bar{f}_b(t) \quad (2.62)$$

Trong đó : $\bar{\mathbf{F}}_b = [0 \quad \dots \quad 0 \quad 1]^T_{(N \times 1)}$

Lực cắt đáy của TLD được xác định từ (2.62) có $f_{b0} = g \cdot m$, với m là khối lượng TLD và $\bar{f}_b(t) = 0.5(\bar{h}_R^2 - \bar{h}_L^2)$. Trong đó $\bar{h}_R$ và $\bar{h}_L$ lần lượt là chiều cao sóng chất lỏng ở thành phải và trái bể chứa, xác định theo quy trình của Banerji và cộng sự (2000). Ngoài ra, tỷ số khối lượng μ xác định bằng công thức:

$$\mu = \frac{m}{\sum_{i=1}^N M_i} = \frac{m}{NM_0} \quad (2.63)$$

N là số bậc tự do (số tầng) của cơ hệ.

Giá trị phản hồi chuẩn cho kết cấu chính $X_{0,st}$ được xác định bởi công thức :

$$X_{0,st} = \frac{M_0 \ddot{z}_0}{K_0} \quad (2.64)$$

Nếu lựa chọn:

$$\ddot{z}_0 = \frac{\mu Ng}{\lambda_a} \quad (2.65)$$

Với λ_a là hệ số gia tốc, thay $X_{0,st}$ vào (2.57):

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{X}} + 2\xi_0\omega_0\bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{X}} + \omega_0^2\bar{\mathbf{K}}\mathbf{X} = \omega_0^2\lambda_a X_{0,st}\bar{\mathbf{F}}_b\bar{f}_b(t) - \omega_0^2 X_{0,st}\bar{\mathbf{M}}\mathbf{1}\ddot{z}(t) \quad (2.66)$$

Chia $\mathbf{X}$, $\dot{\mathbf{X}}$, $\ddot{\mathbf{X}}$ cho $X_{0,st}$ rút ra được phương trình dao động chuẩn như sau:

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\bar{\mathbf{X}}} + 2\xi_0\omega_0\bar{\mathbf{C}}\dot{\bar{\mathbf{X}}} + \omega_0^2\bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{X}} = \omega_0^2 [\lambda_a\bar{\mathbf{F}}_b\bar{f}_b(t) - \bar{\mathbf{M}}\mathbf{1}\ddot{z}(t)] \quad (2.67)$$

Phương trình (2.67) có thể giải bằng phương pháp Newmark để có giá trị phản ứng thực. Nhằm thuận tiện cho việc mô phỏng và trình bày kết quả, một vài định nghĩa và giả thiết được xác lập:

- Bỏ qua tác động của tải trọng gió và động đất lên cơ hệ $m_i - c_i - k_i (i = 1, 2, 3...n)$ trong đó n là số lượng bể chứa trong MTLĐ. Điều này có nghĩa là tải trọng động chỉ tác dụng lên trên kết cấu chính $M_i - C_i - K_i (i = 1, 2, 3...N)$. Với N là số tầng (bậc tự do) của công trình
- Kết cấu chính có tải trọng đối xứng và khối lượng được phân bố đều ($M_1 = M_2 = M_3 = \dots = M_N = M_0$), độ cứng ($K_1 = K_2 = K_3 = \dots = K_N = K_0$) và hệ số cản ($C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_N = C_0$).
- Các bể chứa chất lỏng được mô phỏng như các quả nặng với khối lượng ($m_1 = m_2 = m_3 = \dots = m_N = m$), tỷ số cản ($\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \dots = \xi_N = \xi$) và độ cứng khác nhau ($k_j, j = 1, 2, \dots, n$).
- Hệ số $\xi_0 = C_0 / (2M_0\omega_0) = 0.01$ hay 1% với $\omega_0 = \sqrt{K_0 / M_0}$.

Kết quả tối ưu có liên quan đến các thông số như sau:

- Dải tần số chuẩn hóa của TMD được xác định là:

$$\Delta_\omega = \frac{\omega_n - \omega_1}{\omega_{n1}} \quad (2.68)$$

Trong đó ω_{n1} là tần số dao động vòng tự nhiên đầu tiên của kết cấu.

- Tần số chuẩn hóa thứ nhất và thứ j của TMD được miêu tả như sau:

$$\begin{aligned}\frac{\omega_1}{\omega_{n1}} &= \frac{\omega_c}{\omega_{n1}} - \frac{\Delta\omega}{2} \\ \frac{\omega_j}{\omega_{n1}} &= \frac{(j-1)\Delta\omega}{n-1} + \frac{\omega_1}{\omega_{n1}}\end{aligned}\quad (2.69)$$

Trong đó ω_c là tần số trung bình MTMD. Quan hệ giữa tỷ số cản ξ và độ cứng của kết cấu chính và TMD là:

$$r_j^c = \frac{c_j}{C_0} = \frac{2m\xi\omega_j}{2M_0\xi_0\omega_0} = r_m \frac{\xi}{\xi_0} \frac{\omega_j}{\omega_0} \quad (2.70)$$

$$r_j^k = \frac{k_j}{K_0} = r_m \left(\frac{\omega_j}{\omega_0} \right)^2 \quad (2.71)$$

Trong đó r_m là hệ số khối lượng và được cố định 1%:

$$r_m = 0.01N / n \quad (2.72)$$

2.3.5 Ví dụ áp dụng điều khiển dao động với MTMD

a. Phân tích bài toán trên miền tần số

Phần này được lập trình Matlab bằng cách cho công trình chịu tải điều hòa và xem xét đáp ứng chuyển vị đỉnh khung khi có và không sử dụng thiết bị giảm chấn. Đầu tiên, phương trình dao động của cơ hệ được giải quyết với 1-TMD để có thông số tối ưu cho tần số trung tâm và hệ số cản của TMD. Sau đó, giải bài toán với hệ n-TMD có tần số trung tâm bằng với tần số của hệ cản TMD vừa giải quyết ở trên. Bảng tần số và hệ số cản của trường hợp n-TMD được miêu tả từ những giá trị nhỏ nhất của biên độ dao động của tần số phản ứng. Bảng 2. 3, Bảng 2. 4 và Bảng 2. 5 bên dưới chỉ ra các kết quả thu được từ bài toán cho hệ 1-DOF, 5-DOF và 10-DOF.

Bảng 2. 3 *Tối ưu kết quả cho hệ 1-DOF*

n	$\frac{\omega_c}{\omega_{n1}}$	$\Delta\omega$	ξ
1	0.989	0	0.061
5	0.989	0.12	0.023
11	0.989	0.137	0.022
21	0.989	0.145	0.021
31	0.989	0.147	0.021

Bảng 2. 4 Tối ưu kết quả cho hệ 5-DOF

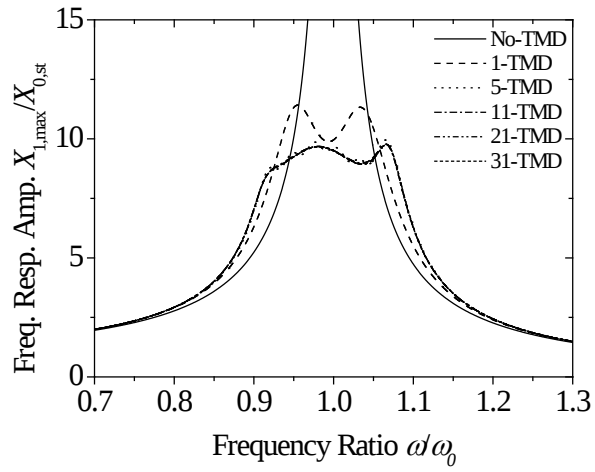
n	$\frac{\omega_c}{\omega_{n1}}$	$\Delta\omega$	ξ
1	0.978	0	0.079
5	0.978	0.15	0.032
11	0.978	0.172	0.03
21	0.978	0.18	0.03
31	0.978	0.183	0.03

Bảng 2. 5 Tối ưu kết quả cho hệ 10-DOF

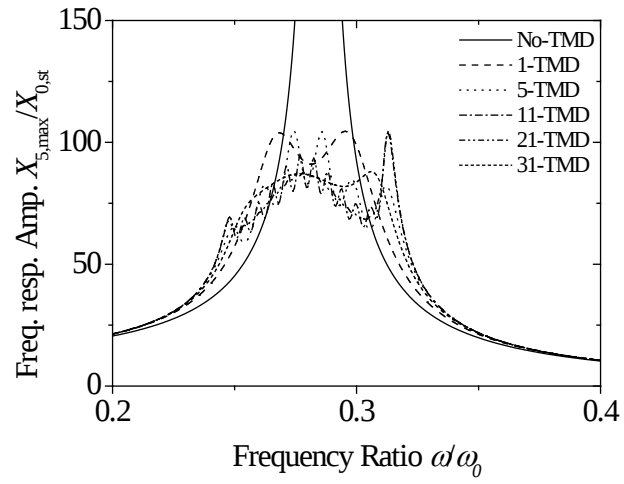
n	$\frac{\omega_c}{\omega_{n1}}$	$\Delta\omega$	ξ
1	0.973	0	0.079
5	0.973	0.175	0.014
11	0.973	0.193	0.010
21	0.973	0.215	0.010
31	0.973	0.218	0.010

Hình 2. 15 chỉ ra sự đáp ứng tần số khi có và không sử dụng TMD để điều khiển dao động. Trong hình này, $X_{0,st}$ là chuyển vị tĩnh và được xác định bằng cách $X_{0,st} = F_0 / K_0$, trong đó F_0 là biên độ lực. Kết quả chỉ ra rằng TMD có thể làm tắt dần dao động công trình khi chịu tải trọng ngang. Khi số lượng bể chứa chất lỏng MTLD tăng lên, thì sự đáp ứng dao động giảm dần xuống.

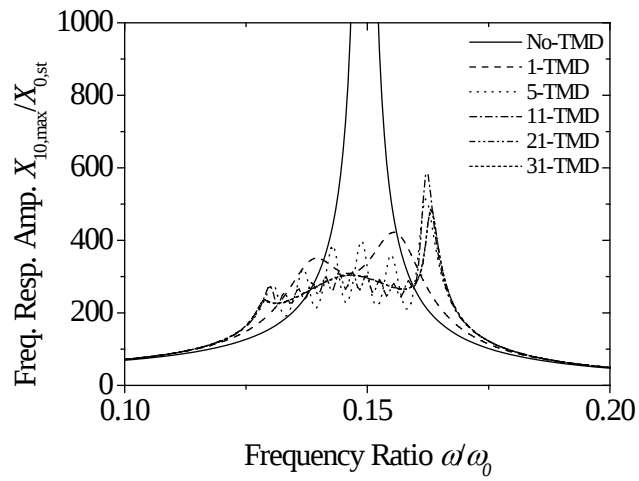
Hình 2. 16 và Hình 2. 17 cho thấy kết quả điều khiển chuyển vị đỉnh của công trình có biên độ giảm đáng kể. Khi tần số của khung bằng tần số lực kích thích thì công trình bị cộng hưởng, chuyển vị đỉnh đạt cực đại, khi có 1TMD với $f_{TMD} = f_{khung}$ thì hiện tượng cộng hưởng không còn xảy ra như ở Hình 2. 15, Hình 2. 16, Hình 2. 17. Và với càng nhiều TMD thì chuyển vị đỉnh là càng bé, đến một số lượng hữu hạn TMD thì đường phản ứng chuyển vị đỉnh cực đại sẽ nằm ngang.



Hình 2. 15 Đáp ứng tần số của hệ 1DOF



Hình 2. 16 Đáp ứng tần số của hệ 5DOF



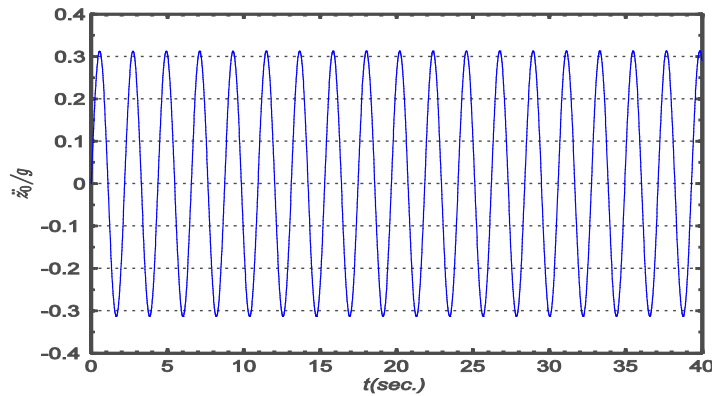
Hình 2. 17 Đáp ứng tần số của hệ 10DOF

b. Phân tích kết cấu chịu tải điều hòa trên miền thời gian

Đáp ứng trên miền thời gian được thực hiện cho các trường hợp điều khiển chuyển động nền điều hòa được đặc trưng bởi tần số và biên độ gia tốc kích thích. Việc phân tích dao động nền khi công trình có sử dụng MTMD chịu tải điều hòa, sẽ cho phép hiểu biết trực quan phản ứng của hệ kết cấu – MTMD khi nền chịu một tần số kích thích duy nhất. Để nghiên cứu, chuyển động nền điều hòa xác định như sau:

$$\ddot{z}(t) = \ddot{z}_0 \sin \omega t \quad (2.73)$$

Trong đó $\ddot{z}_0 = 0.3129g$. Giá trị 0.3129 là gia tốc cực đại trong trận động đất Elcentro 1940. Đồ thị của phương trình (2.73) được vẽ lại

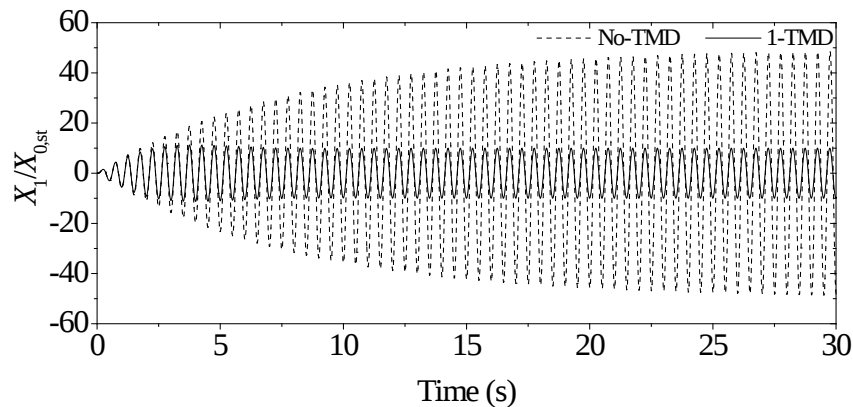


Hình 2. 18 Gia tốc nền dao động điều hòa

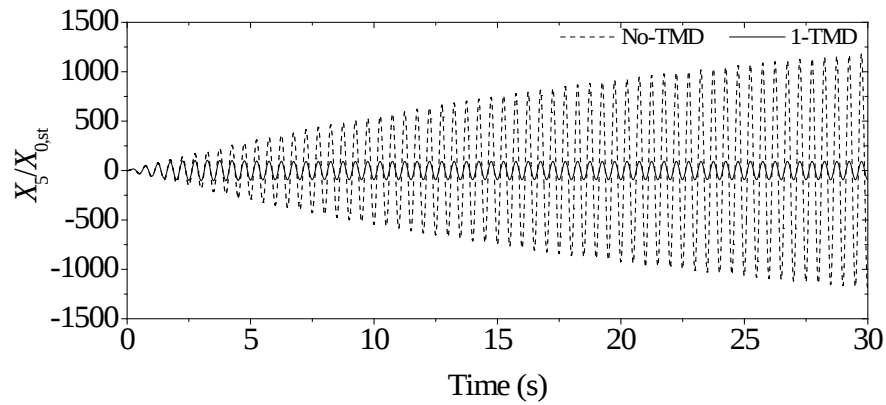
Từ phương trình (2.65), hệ số gia tốc tìm được bằng cách:

$$\lambda_a = \frac{\mu N}{0.3129} \quad (2.74)$$

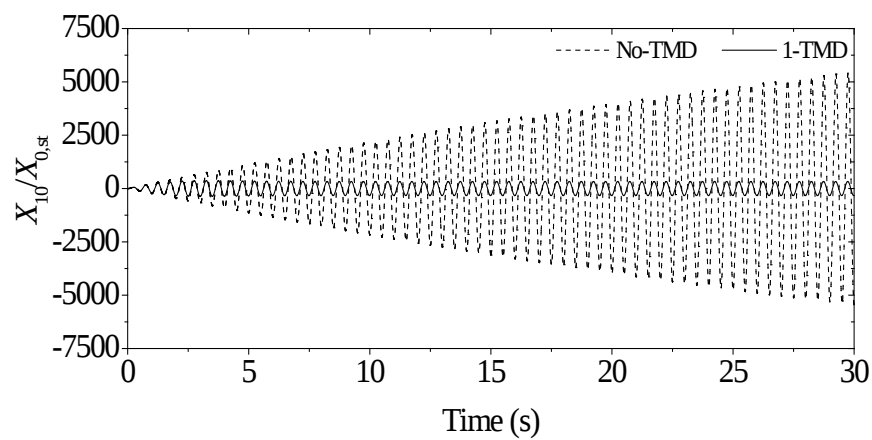
Kết quả được chỉ ra ở đồ thị Hình 2. 19, Hình 2. 20, Hình 2. 21 cho đáp ứng chuyển vị đỉnh. MTMD chứng tỏ phát huy rất tốt khả năng điều khiển dao động điều hòa.



Hình 2. 19 Đáp ứng chuyển vị đỉnh hệ SDOF khi không có và có TMD

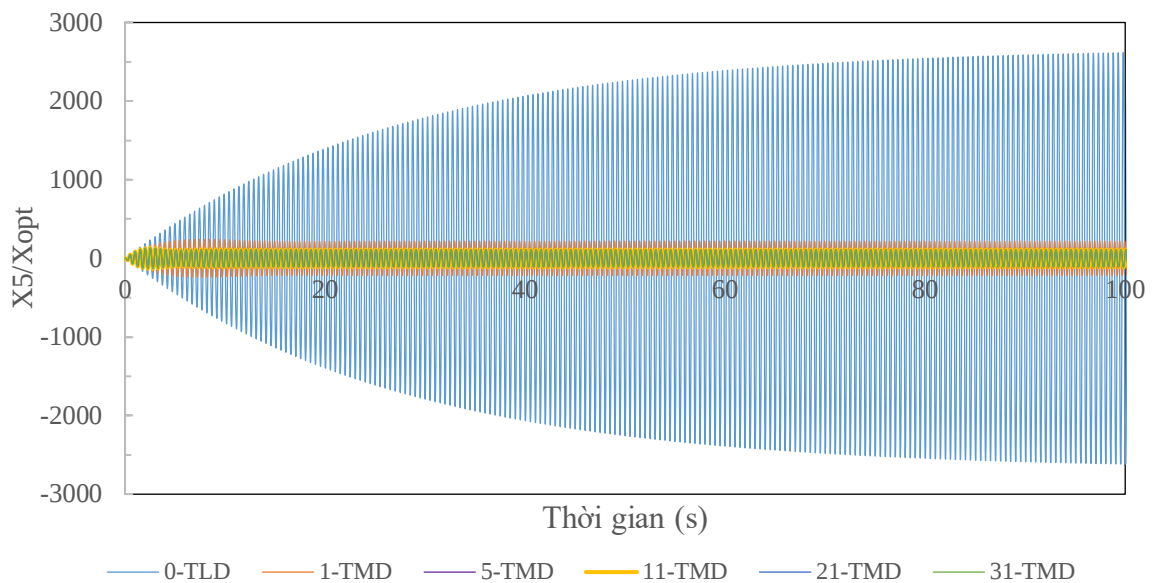


Hình 2. 20 Đáp ứng chuyển vị đỉnh hệ 5DOF khi không có và có 1-TMD



Hình 2. 21 Đáp ứng chuyển vị đỉnh hệ 10DOF khi không có và có 1-TMD

Hình 2. 22 trình bày khả năng điều khiển dao động hệ 5DOF sử dụng MTMD.

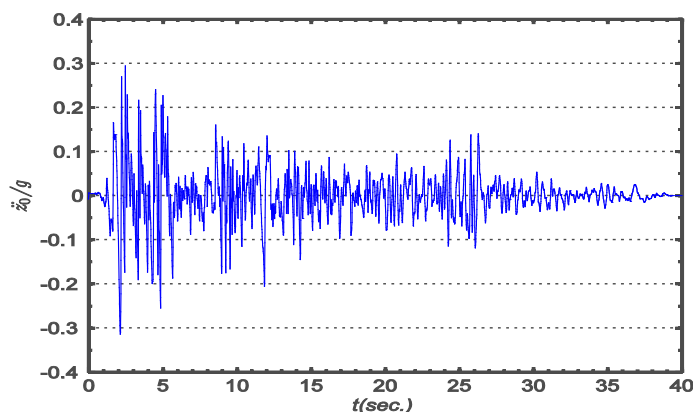


Hình 2. 22 Hệ 5DOF sử dụng MTMD

Kết quả cho thấy kết cấu càng sử dụng nhiều TMD thì giảm chấn càng hiệu quả, tuy nhiên 11-21-31TMD không chênh lệch nhiều, nên có thể xem 11 TMD là tối ưu.

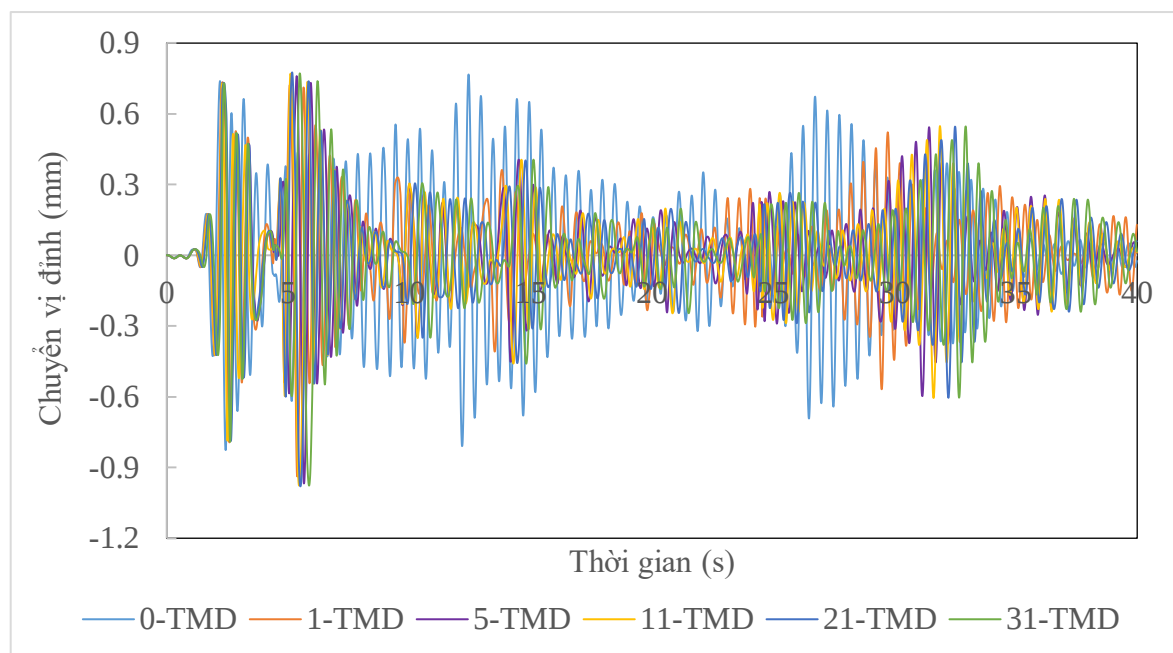
c. Kết cấu chịu tải trọng động đất

Để đánh giá hiệu quả TMD trong điều khiển dao động kết cấu dưới tác dụng của động đất thì dữ liệu thực của các trận động đất được xem xét và dữ liệu động đất Elcentro 1940 được lựa chọn. Tín hiệu động đất thể hiện trong Hình 2. 23.



Hình 2. 23 Động đất Elcentro 1940

Dữ liệu động đất Elcentro được sử dụng để xem xét khả năng giảm chấn của hệ có 1-DOF, lần lượt phân tích cho cơ hệ khi không và khi có sử dụng MTMD lần lượt với số lượng 1, 5, 11, 21, 31 TMD. Kết quả được thể hiện ở Hình 2. 24 bên dưới.



Hình 2. 24 Khả năng giảm chấn của MTMD khi kết cấu chịu động đất

Đồ thị ở Hình 2. 24 chỉ ra rằng dao động khung khi có MTMD được giảm đáng kể so với khi không sử dụng thiết bị, đặc biệt sau 7 giây. Càng nhiều bể chứa chất lỏng thì chuyển vị đỉnh càng giảm thêm. 11 TMD được xem là số lượng tối ưu.

2.3.6 Nhận xét và kết luận

Mục 2.3 cho thấy hiệu quả điều khiển dao động của MTMD là đáng kể, và do nguyên lý hoạt động của MTMD tương tự MTLD nên để lựa chọn các thông số để phát huy khả năng giảm chấn của MTLD thì kỹ sư thiết kế có thể dựa vào MTMD.

Khi phân tích đáp ứng trên miền tần số, Hình 2. 15 cho thấy nếu không sử dụng TMD thì chuyển vị đỉnh tiến đến trạng thái dao động bình ổn (steady state) với $\omega \approx \omega_0$. Tuy nhiên, nếu được điều khiển bởi 1-TMD thì xuất hiện hai giá trị cực đại chuyển vị đỉnh, và nếu sử dụng nhiều TMD hơn thì đường đáp ứng trên miền tần số có độ dốc giảm dần và tiến đến nằm ngang như ở Hình 2. 16 và Hình 2. 17.

Tương tự đối với phân tích đáp ứng trên miền thời gian; Hình 2. 19, Hình 2. 20, Hình 2. 21 và Hình 2. 22 cho thấy TMD điều khiển dao động kết cấu rất tốt và càng nhiều TMD thì điều khiển dao động càng hiệu quả. Hình 2. 24 cho thấy với dao động nền kích thích, MTMD điều khiển dao động tốt và hiệu quả giảm chấn phát huy sau 7s. Khi số TMD > 11 thì hiệu quả thay đổi không đáng kể.

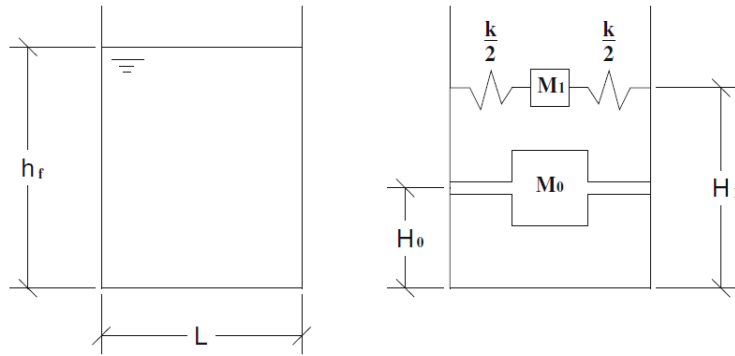
2.4 Phương pháp khối lượng thu gọn quy đổi MTLD như MTMD

Do giới hạn của khả năng lập trình nên cơ hệ cần điều khiển như mục 2.3 là hệ có số lượng hữu hạn DOF, ngoài ra mục 2.3 xem độ cứng các tầng, khối lượng các tầng là tương đương nhằm đơn giản hóa việc lập trình, điều này khó sử dụng trong thực tế thiết kế. Vì vậy các bài toán như trên chỉ dùng trong nghiên cứu. Để áp dụng thiết kế thực tế, mục 2.4 trình bày đề xuất quy đổi MTLD thành MTMD kết hợp sử dụng phần mềm thương mại trên thị trường, với độ chính xác chấp nhận được để phân tích, đánh giá khả năng giảm chấn MTLD.

Novo và cộng sự (2014) đề xuất phương pháp quy đổi TLD thành TMD để ứng dụng mô phỏng với SAP2000. Cơ sở để quy đổi dựa trên 3 yếu tố chính: khối lượng hữu hiệu quy đổi giữa TLD-TMD, độ cứng quy đổi của TLD-TMD, và tỷ số cản quy đổi của hai loại thiết bị này [86].

2.4.1. Phương pháp khối lượng thu gọn cho bể chứa chất lỏng

Phương pháp này được đề xuất bởi Housner (1963) trong đó thành bể chứa được giả thiết tuyệt đối cứng [46]. Áp lực động do sóng chất lỏng dao động được chia làm hai phần: (1) thành phần xung cứng và (2) thành phần xung đối lưu do sóng bề mặt chất lỏng gây ra. Áp lực xung cứng tỷ lệ thuận với gia tốc dao động của bể chứa, nhưng ngược hướng. Áp lực của xung đối lưu thì liên quan đến chiều cao sóng chất lỏng và tần số dao động sóng. Vì vậy cả hai thành phần của áp lực động có thể được mô phỏng bằng hai khối lượng tương đương. Hình 2. 25 mô tả sự quy đổi theo phương pháp khối lượng thu gọn, trong đó M_0 đặc trưng cho khối lượng xung cứng và liên kết cứng vào thành bể tại cao độ H_0 , M_1 đặc trưng cho thành phần đối lưu liên kết với bể qua lò xo có độ cứng k tại cao độ H_1 .



Hình 2. 25 Mô hình quy đổi bể chứa chất lỏng thành hệ m-c-k

Đối với bể chữ nhật, phương pháp quy đổi như Hình 2. 25 đã được công bố bởi Jin và cộng sự (2007). Trong đó, TLD được thiết kế cho dàn khoan dầu ngoài khơi chịu tác dụng của tải động đất được mô phỏng số và đối chiếu với thí nghiệm [87]:

$$M_0 = \frac{\tanh(1.7 \times (L/2)/h_f)}{1.7 \times (L/2)/h_f} \times m_f \quad (2.75)$$

$$M_1 = \frac{0.83 \times \tanh(1.6 \times h_f/(L/2))}{1.6 \times h_f/(L/2)} m_f \quad (2.76)$$

Và:

$$H_0 = 0.38 \times h_f \times \left[1 + \alpha \left(\frac{m_f}{m_0} - 1 \right) \right] \quad (2.77)$$

$$H_1 = h_f \times \left[1 - 0.33 \times \frac{m_f}{M_1} \left(\frac{L/2}{h_f} \right)^2 + 0.63 \times \beta \times \frac{(L/2)}{h_f} \times \sqrt{0.28 \times \left(\frac{m_f \times L/2}{M_1 \times h_f} \right) - 1} \right] \quad (2.78)$$

Trong đó:

$$k = \frac{3 \cdot g \cdot M_1^2 \cdot h_f}{m_f \cdot L^2} \quad (2.79)$$

Với m_f là tổng khối lượng nước trong bể, $\beta = 2.0$ và $\alpha = 1.33$ lần lượt là hệ số do mô men uốn và áp lực thủy động tác dụng lên chân bể, h_f là chiều cao chất lỏng.

2.4.2. Đặc trưng cản của sóng chất lỏng

Sức cản trên bề mặt sóng được nghiên cứu bởi Miles và cộng sự [110]; Jin và cộng sự [87], các nghiên cứu trên đề xuất tỷ số cản của chất lỏng bên trong TLD là ξ_f có thể được hiệu chỉnh bởi hệ số $1 + 2h/b + S$, trong đó b là bề rộng của bể chứa chất lỏng. Với hệ số này, sự tiêu tán năng lượng do độ ma sát của chất lỏng với thành bể và sự xáo trộn, ô nhiễm của nước ở bề mặt bể cũng được kể vào tính toán. Sự ma sát giữa chất lỏng và thành bể chứa tương tự như chất lỏng ở đáy bể, S là hệ số kể đến sự ô nhiễm ở bề mặt bể, trong nghiên cứu này thì $S=1$ được sử dụng, theo đề xuất của Fujino (1992) [18]. Khi đó, tỷ số cản của chất lỏng trong bể được tính như sau:

$$\xi_f = \sqrt{\frac{v_f \omega_f}{2}} \cdot \left[1 + \left(2 \frac{h_f}{b} \right) + S \right] \cdot \frac{L}{h_f \sqrt{g \cdot h_f}} \quad (2.80)$$

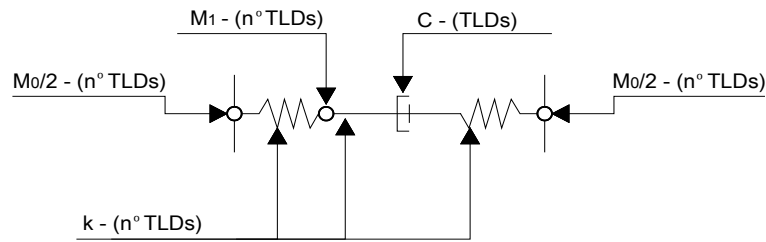
Với ω_f là tần số vòng của TLD.

2.4.3. Ứng dụng SAP2000 trong phương pháp quy đổi MTLD như MTMD

Dựa theo phương pháp khối lượng thu gọn trình bày bên trên, một đề xuất như Hình 2. 26 bởi Novo và cộng sự (2014) nhằm đơn giản hóa trong phân tích đáp ứng dao động của kết cấu [86]. Phương pháp này có thể dùng mô phỏng kết cấu và MTLD làm việc đồng thời trên nền tảng FEM với SAP2000, việc này rất có ý nghĩa trong thực tế thiết kế. Sự quy đổi MTLD thành MTMD dựa trên các giả thiết như sau:

- 1) Một liên kết dạng lò xo đặc trưng cho sự cản được định nghĩa nhằm mục đích mô phỏng tính chất cản tương đương cho một bể chứa chất lỏng TLD.
- 2) Mỗi lò xo liên kết với hệ kết cấu thông qua phần tử thanh độ cứng k theo (2.79)

- 3) Khối lượng thu gọn được sắp xếp với phần khối lượng tĩnh M_0 nằm ở phía đầu-cuối mô hình tương đương còn khối lượng động M_1 nằm ở trung tâm.



Hình 2. 26 Mô hình quy đổi TLD thành TMD dùng phân tích trong SAP2000

Ngoài nghiên cứu của Novo và cộng sự (2014), còn có các công trình của Soliman và cộng sự (2012, 2016), ứng dụng FEM quy đổi TLD thành TMD với sự hỗ trợ của SAP2000 phân tích khả năng của thiết bị để điều khiển dao động kết cấu [111, 112].

2.4.3.1. Các tham số quan trọng khi thiết kế MTLD

Theo các nghiên cứu đi trước thì phản ứng cực đại của công trình sẽ được giảm đáng kể nếu tối ưu hóa các thông số cho TLD. Tương tự như vậy, tỷ số khối lượng, tỷ số tần số tự nhiên giữa TLD-kết cấu và tỷ số cản của sóng chất lỏng là những tham số cần kiểm soát khi thiết kế TLD. Số lượng TLD được xem như tối ưu khi thỏa mãn đồng thời hai điều kiện sau: (1) nếu tăng thêm TLD mà hiệu quả giảm chấn của thiết bị không đổi hoặc thay đổi nhưng không đáng kể và (2) khối lượng của thiết bị không làm thay đổi đặc trưng riêng của toàn bộ hệ kết cấu.

2.4.3.2. Ảnh hưởng của tỉ số khối lượng MTLD

Tỷ số của khối lượng chất lỏng m_f và khối lượng kết cấu m_s từ 1-5%.

$$m_f / m_s = 1 - 5\% \quad (2.81)$$

2.4.3.3. Ảnh hưởng của dải tần số hoạt động MTLD

Để lựa chọn được dải tần số MTLD giúp kết cấu giảm dao động nhiều nhất thì đầu tiên, cần chọn được tần số dao động tự nhiên f_0 của TLD trung tâm sao cho bằng (hoặc gần như bằng) với tần số dao động tự nhiên của công trình bên dưới f_s :

$$f_0 / f_s = 1 \quad (2.82)$$

Sau đó để có dải tần số phù hợp với số lượng bể chứa đóng vai trò như thiết bị giảm chấn đa tần, phương pháp xem MTLD như MTMD ở chương 2 được áp dụng, bằng

cách thử và sai, bài toán phân tích quá độ được giải lặp đến khi chuyển vị đỉnh của kết cấu là nhỏ nhất và hội tụ. Trong mục 2.3.2 của luận án chỉ ra rằng băng tần số MTLD với $\Delta R = 0 \div 0.2$ là dải băng tần hiệu quả của thiết bị.

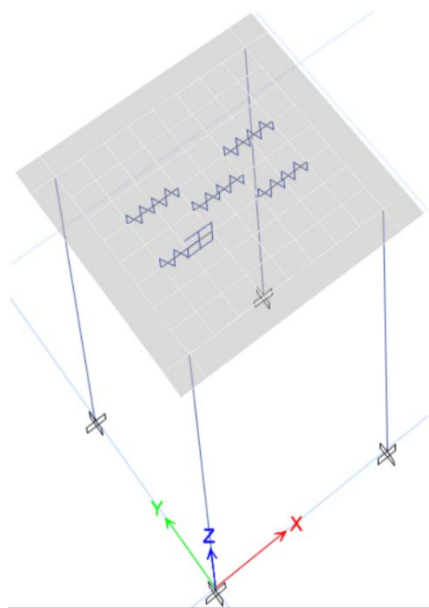
$$0.8 \leq f_{MTLD} / f_s \leq 1.2 \quad (2.83)$$

Điều này cũng phù hợp với các kết luận ở các nghiên cứu đi trước [37, 103, 104].

2.4.3.4. Ứng dụng MTLD trong điều khiển dao động kết cấu

Để thiết kế MTLD bằng cách quy đổi tương đương như MTMD, khung thép chịu tải trọng động được mô phỏng số với SAP2000 có kiểm chứng bằng thí nghiệm nhằm mục đích đánh giá mức độ chính xác của phương pháp quy đổi.

Ví dụ: Khung thép chiều cao 1.1 m với sàn dày 5.0 mm kích thước 0.65x0.65 (mxm) như Hình 2. 27, được chịu tải điều hoà và dao động nền kích thích nền. Sử dụng công thức quy đổi trong mục 2.4.1 kết hợp mô hình tính toán ở Hình 2. 26 để phân tích chuyển vị đỉnh khung trong trường hợp có và không sử dụng MTLD.



Hình 2. 27 Khung thép thí nghiệm **Hình 2. 28** Khung và MTLD trong SAP2000

Bộ đôi phương trình (2.81) và (2.83) giúp chọn ra số lượng, khối lượng bể chứa đóng vai trò là thiết bị giảm chấn. Bằng phương pháp thử và sai kết hợp sử dụng quy trình thiết kế TLD của Banerji (2000) [27] và các phương trình (2.43) (2.44)

(2.45) và (2.46) để có Bảng 2. 6; và từ (2.75) (2.76) (2.77) (2.78) và (2.79) có được Bảng 2. 7 với MTLD bao gồm các bể chứa 0.1x0.15m với h_f cụ thể như sau:

Bảng 2. 6 Tần số các TLD và dải băng tần tương ứng

MTLD	f_1 (Hz)	f_N (Hz)	f_0 (Hz)	ΔR	β_i	$\Delta\gamma$	h_f bên trong TLD
1	2.085	2.085	2.085	0.000	N/A	0.03	$h_1 = 2\text{cm}$
2	1.999	2.085	2.042	0.042	0.086	0.05	$h_1 = 1.8\text{cm}$ $h_2 = 2\text{cm}$
3	1.999	2.085	2.042	0.042	0.043	0.05	$h_1 = 1.8\text{cm}$ $h_2 = 2.2\text{cm}$ $h_3 = 2\text{cm}$
4	1.999	2.043	2.021	0.022	0.015	0.06	$h_1 = 1.8\text{cm}$, $h_2 = 2.2\text{cm}$ $h_3 = 2\text{cm}$, $h_4 = 1.9\text{cm}$
5	1.999	2.125	2.062	0.061	0.031	0.04	$h_1 = 1.8\text{cm}$, $h_2 = 2.2\text{cm}$, $h_3 = 2\text{cm}$, $h_4 = 1.9\text{cm}$, $h_5 = 2.1\text{cm}$

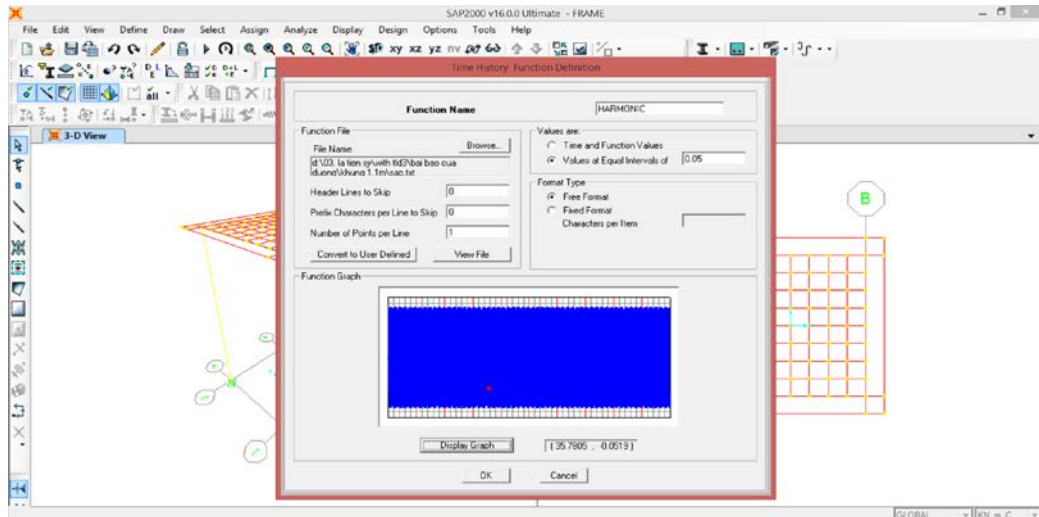
Bảng 2. 7 Đặc trưng quy đổi của TLD để mô phỏng số

STT	M_0 (kg)	M_1 (kg)	$k/2$ (N/m)	Tỷ số cản ξ_f	Vị trí TLD
1	0.02806	0.20222	4.01140	0.01173	Bể 1
2	0.03817	0.2281	5.10433	0.00993	Bể 2
3	0.03463	0.21978	4.7386	0.01046	Bể trung tâm
4	0.04188	0.23612	5.46944	0.00945	Bể 3
5	0.03126	0.21115	4.37377	0.01106	Bể 4

Tổng khối lượng khung thép là 22.3 kg bao gồm hệ bể chứa. Khi khung chịu tải trọng động, sử dụng MTLD để điều khiển dao động với 1-3-5 bể để thấy được khả năng giảm chấn thiết bị. Kết quả mô phỏng số được so sánh với kết quả thí nghiệm.

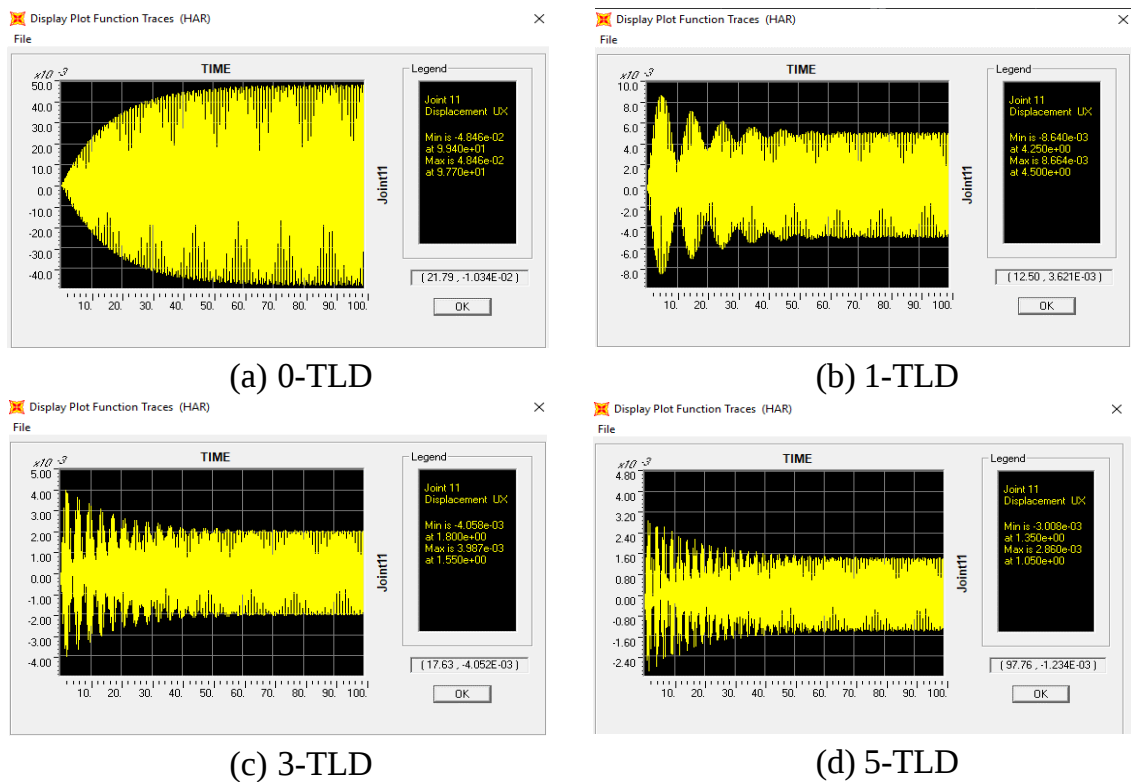
▪ **Khung thép chịu dao động điều hoà**

Khung dao động điều hoà với chuyển vị nền $x = A_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t)$ trong đó $A_0 = 0.5\text{mm}$. Dữ liệu nền được đưa vào SAP2000 để phân tích khung được giảm chấn bởi MTLD quy đổi thành MTMD tương đương như Hình 2. 29.



Hình 2. 29 Khai báo tải dao động điều hoà trong SAP2000

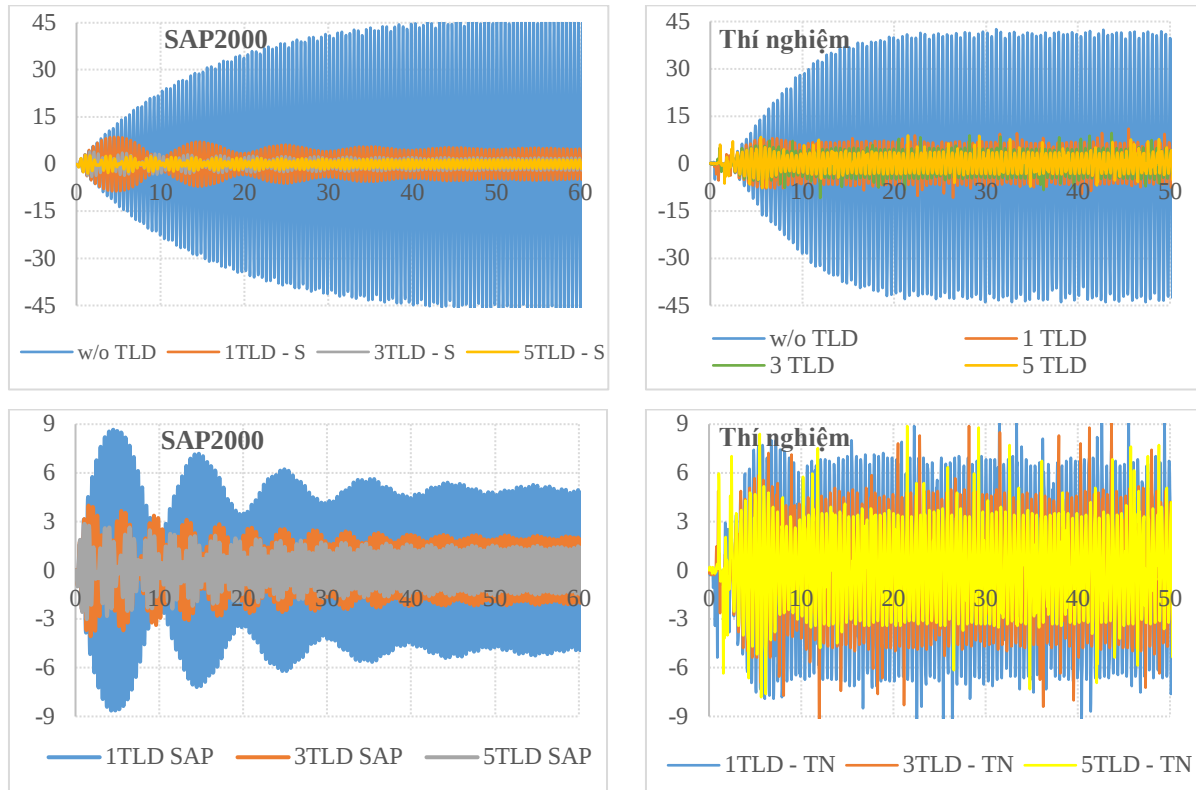
Kết quả chuyển vị đỉnh khung tương ứng với các trường hợp không sử dụng TLD và 1, 3, 5 TLD được thể hiện như Hình 2. 30.



Hình 2. 30 Phản ứng động của khung thép chịu tải điều hòa với 0,1,3,5TLD

Từ đồ thị Hình 2. 30 cho thấy khả năng giảm chấn của thiết bị lên đến 95% trong trường hợp sử dụng 5TLD và 92% khi sử dụng 3 TLD. Vì chuyển vị đỉnh khung hội

tự nên có thể kết luận: số lượng bể tối ưu là 5. Kết quả ở Hình 2. 30 được vẽ lại, đối chiếu với thí nghiệm trên bàn lắc và cho thấy sự đồng nhất giữa mô phỏng và thí nghiệm như ở Hình 2. 31, điều này chứng tỏ sự hợp lý của phương pháp quy đổi.

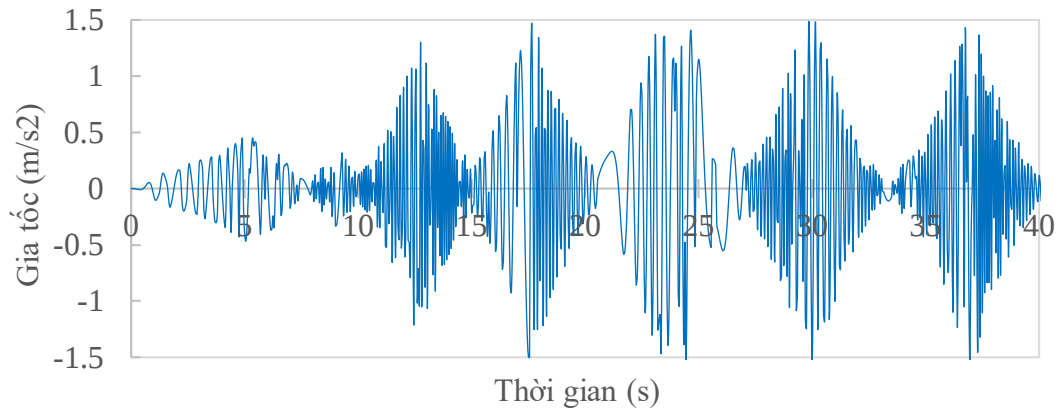


Hình 2. 31 Chuyển vị đỉnh khung giữa SAP2000 và thí nghiệm

Từ đồ thị Hình 2. 31 có thể thấy hiệu quả giảm chấn MTLD là đáng kể, thiết bị giúp công trình giảm chuyển vị đỉnh từ 45.0 mm xuống còn 8.0 mm, 3.0 mm và 2.0 mm trong trường hợp sử dụng 1, 3, 5 TLD để điều khiển dao động. Kết luận về hiệu quả giảm chấn này phù hợp với công bố của Bhattacharjee và cộng sự (2013) [113].

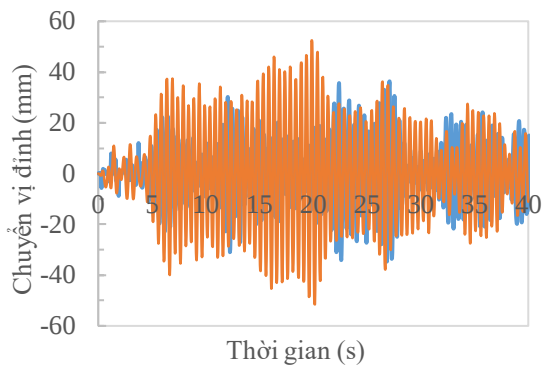
▪ Khung thép chịu dao động nền kích thích

Để khảo sát khung thép dưới tác dụng kích thích dao động nền, phổ gia tốc như Hình 2. 32 được tạo ra và tác động lên khung thép. Nguyên nhân của việc tạo gia tốc này là khi dao động, kết cấu sẽ đạt đến chuyển vị đỉnh cực đại tương đương ở trường hợp khung chịu tải điều hòa khi cộng hưởng xảy ra (chuyển vị đỉnh 45 mm). Ngoài ra phổ gia tốc nền này được lựa chọn để phù hợp với khả năng tạo dao động của bàn lắc tự chế tạo sẽ được trình bày cụ thể hơn trong Chương 5.

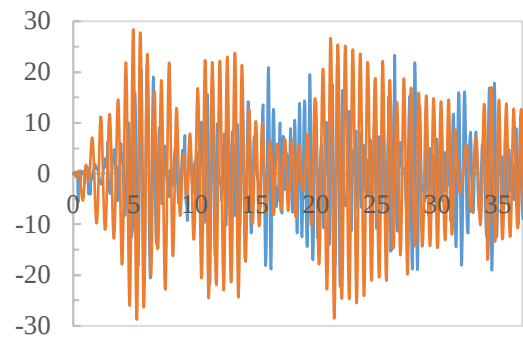


Hình 2. 32 Phổ gia tốc nền tạo ra từ bàn lắc

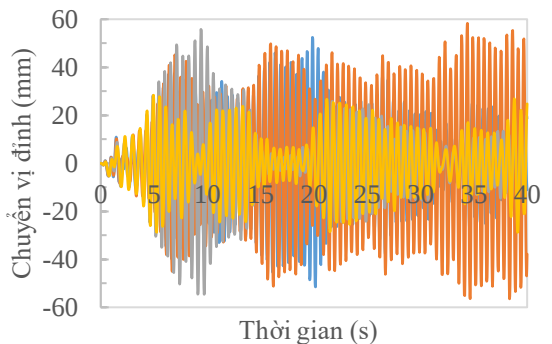
Khi đó, chuyển vị đỉnh của công trình được phân tích bằng SAP2000 và đối chiếu với thí nghiệm trong trường hợp không và có sử dụng 1-3-5TLD để giảm chấn cho kết quả ở Hình 2. 33.



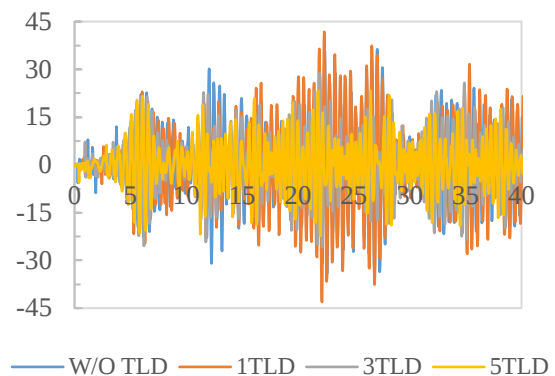
(a) Chuyển vị đỉnh khung khi không sử dụng TLD



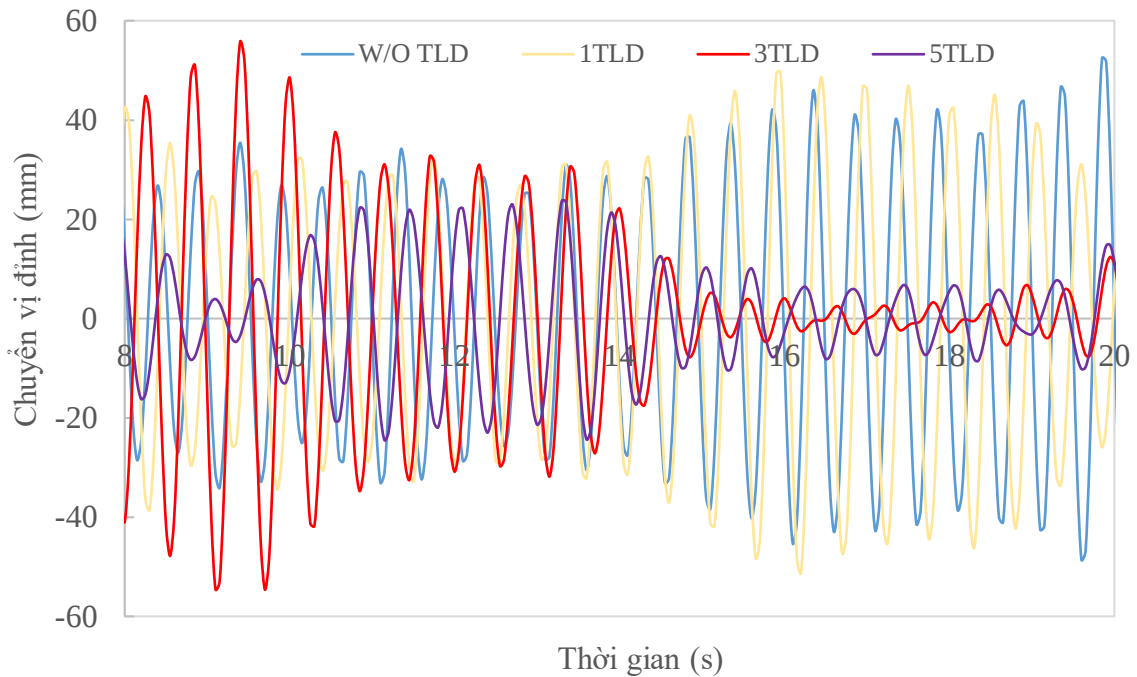
(b) Chuyển vị đỉnh khung với 5-TLD giữa thí nghiệm và SAP2000



(c) Hiệu quả kháng chấn khung chịu dao động nền với SAP2000



(d) Thí nghiệm khung chịu dao động nền khi sử dụng MTLD trên bàn lắc



(e) Hiệu quả giảm chấn MTLD từ giây thứ 8 đến 20 với SAP2000

Hình 2. 33 Hiệu quả giảm chấn MTLD bằng SAP2000 đối chiếu thí nghiệm

Kết quả ở Hình 2. 33 cho thấy chuyển vị đỉnh khung giảm đi một cách đáng kể lên đến 45% (từ 45 mm xuống còn 23 mm) và có sự tương đồng giữa thí nghiệm so với mô phỏng số đặc biệt là giá trị chuyển vị đỉnh lớn nhất của hai phương pháp. Do đó, có thể khẳng định phương pháp quy đổi trình bày ở đây đủ để áp dụng trong thực tế thiết kế, giúp lựa chọn nhanh, dễ dàng các thông số đặc trưng, hình dạng, số lượng bể chứa chất lỏng đóng vai trò như thiết bị giảm chấn MTLD.

2.5 Tóm tắt chương 2

Tất cả các đặc trưng quan trọng của bể chứa chất lỏng đã được khảo sát, đặc biệt nhấn mạnh đến tần số dao động riêng của bể chứa f_{tank} , chiều cao của sóng chất lỏng khi dao động η và áp lực của sóng tác dụng lên thành bể p_w . Tất cả các thông số được tính toán thông qua ví dụ cụ thể với lời giải giải tích kết hợp đối chiếu FEM trên nền tảng ANSYS và so sánh với nghiên cứu đi trước cho thấy sự phù hợp.

MTLD được quy đổi thành MTMD nhằm mục đích đơn giản hóa trong thiết kế thiết bị giảm dao động kết cấu khi cơ hệ chịu tải điều hoà và dao động nền kích thích. Kết quả từ đồ thị Hình 2. 31 và Hình 2. 33 cho thấy khả năng điều khiển rất tốt

của thiết bị khi tỷ số khối lượng TLD bằng 1-5% khối lượng kết cấu và dải tần số nằm trong khoảng $\Delta R = 0 - 0.2$. Việc quy đổi này là hoàn toàn hợp lý khi so sánh kết quả dao động trên bàn lắc, đặc biệt đối với dao động điều hoà, chuyển vị đỉnh kết cấu giữa thí nghiệm và mô phỏng số cho thấy sự đồng nhất cao.

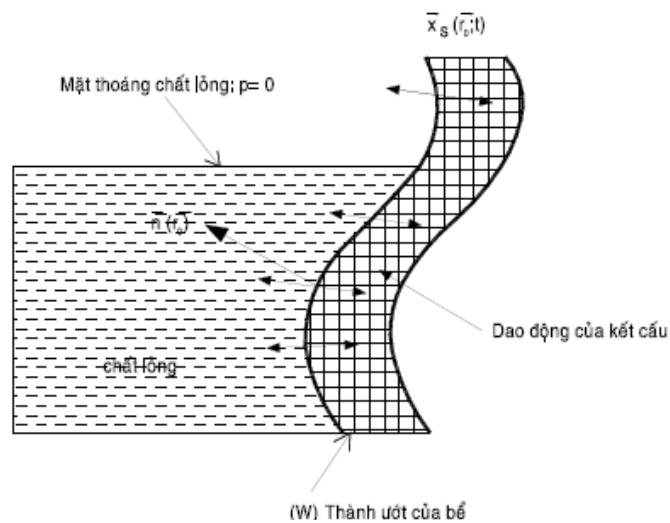
Đối với dao động nền kích thích, chuyển vị đỉnh khung tuy chưa cho giá trị như nhau tại mỗi thời điểm Δt nhưng chuyển vị đỉnh cực đại xấp xỉ nhau. Bằng phương pháp trình bày ở mục 2.4, kỹ sư có thể thiết kế đơn giản MTLTD, việc này rất có ý nghĩa vì giúp tiết kiệm nhiều thời gian so với việc mô phỏng đầy đủ chất lỏng bên trong bể. Nguyên nhân là vì khi kể đến chất lỏng, số lượng ẩn và mức độ phức tạp của sóng phi tuyến tại mặt thoáng sẽ mất rất nhiều chi phí tính toán. Điều này sẽ được chỉ ra trong chương 4.

Tóm lại, phương pháp khối lượng thu gọn thiết kế MTLTD được đề xuất bên trên là đơn giản, dễ áp dụng bằng cách thay đổi chiều cao mực nước h_f trong bể. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp là không xét được sự tương tác giữa dao động của sóng chất lỏng và thành bể đàn hồi mà dựa trên giả thiết thành bể tuyệt đối cứng.

CHƯƠNG 3

BỂ CHỨA CHỊU TẢI TRỌNG ĐỘNG CÓ XÉT TƯƠNG TÁC CHẤT LỎNG - THÀNH BỂ

Trong chương này, các thông số cơ bản của bể chứa nói chung và TLD nói riêng một lần nữa được phân tích nhưng có xét đến FSI (Hình 3. 1). Kết quả chỉ ra sự khác nhau không nhỏ giữa giả thiết thành bể tuyệt đối cứng và thành bể mềm như khẳng định của Kim và cộng sự (1996, 1998) hoặc Mitra (2008) [57, 58, 114]. Phương pháp giải tích được diễn giải đơn giản để thấy được sự khác nhau này. Sau đó, FEM được dùng để thiết lập bài toán trường cặp đôi (coupling) của sóng chất lỏng và thành bể mềm, mức độ chính xác tương đương phương pháp giải tích, tuy nhiên đối với bài toán phức tạp, ba chiều và ứng xử sóng phi tuyến thì chỉ FEM là có thể đáp ứng được.



Hình 3. 1 Mặt tương tác chất lỏng – thành bể

Lý do của việc xét FSI cho TLD là vì các công trình ngày càng cao tầng, bể nước mái đóng vai trò như thiết bị giảm chấn có thể tích ngày càng lớn, thông thường khối lượng thiết bị chiếm từ 1-5% tổng khối lượng công trình. Tòa nhà Comcast, Hoa Kỳ, TLD có thể tích lên đến 1.1 triệu lít nước hoặc ở tòa nhà The Vista Tower, Chicago, Hoa Kỳ cao 101 tầng với 6-TLD có đến 1.5 triệu lít nước. Đối với các TLD ngày càng lớn như vậy thì FSI không thể bỏ qua. Ngoài ra, điểm quan trọng khi xét FSI là

f_{tank} có thể thay đổi do vấn đề thành bể mềm, dẫn đến tần số TLD không còn bằng tần số kết cấu cần điều khiển, khi đó thiết bị sẽ mất tác dụng giảm chấn.

Mặc dù, trên thế giới, các Tiêu Chuẩn phổ biến như ACI của Hoa Kỳ, Eurocode của Châu Âu hoặc India Standard - IS của Ấn Độ đã có hướng dẫn về việc thiết kế bể chứa chất lỏng, kể cả bể thành mềm, nhưng FSI cho bể mềm vẫn chưa được xem xét một cách thấu đáo, đặc biệt là vấn đề f_{tank} bị ảnh hưởng bởi t_w ; các Tiêu Chuẩn chủ yếu tập trung đến độ lớn áp lực sóng p_w tác dụng lên thành bể. Đối với các nghiên cứu trước đây thì một số tác giả như Ghaemmaghami, Kianoush và cộng sự (2009, 2010) [69-72] hoặc Hashemi và cộng sự (2013) [73, 74] đã có những phương pháp tính toán đơn giản nhưng đủ tin cậy. Tuy hai nhóm tác giả đều tập trung vào sự thay đổi áp lực sóng chất lỏng lên thành bể mềm nhưng chưa phân tích nhiều về sự thay đổi f_{tank} . Trong khi đó f_{tank} trong bể thành mềm lại ít được xét đến khi thiết kế bể chứa chất lỏng [8, 115-117]. Sự phân biệt thành bể cứng hay mềm là quan trọng trong việc thiết kế bể chứa chất lỏng nói chung và TLD nói riêng, trong chương này, tác giả đề xuất một tham số để phân biệt bể cứng & mềm. Sau đó, thành bể mềm của TLD sẽ được làm rõ hơn trong chương 4.

Tóm lại, chương 3 phân tích ứng xử động của sóng chất lỏng bên trong bể có xét FSI. Phương pháp giải tích và FEM thiết lập phương trình dao động của hai miền rắn-lỏng và điều kiện biên tương tác để chỉ ra sự khác nhau giữa thành bể mềm và thành bể tuyệt đối cứng. Sự khác nhau này được biểu diễn bởi ma trận trường cặp đôi ở biên tương tác hai miền rắn-lỏng. Để minh họa cho lý thuyết, ví dụ cụ thể về bể chứa chịu động đất được thiết kế bằng nhiều Tiêu Chuẩn Xây Dựng khác nhau và mô phỏng số. Kết quả đối chiếu với các nghiên cứu đi trước. Trong khi đó, tại Việt Nam hiện nay chỉ có Tiêu Chuẩn về thi công và nghiệm thu bể chứa TCVN 5641:2012 và bể thành mỏng thể tích nhỏ TCVN 10800:2015.

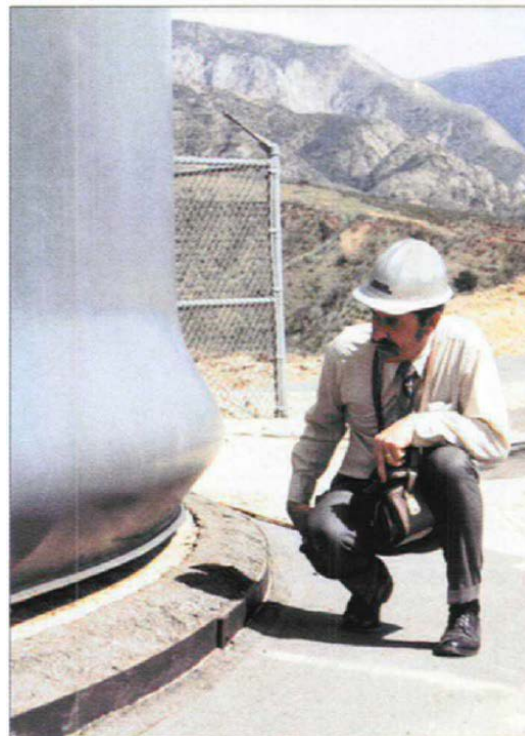
3.1 Tầm quan trọng của FSI với thành bể mềm

Trước đây khi các kỹ sư thiết kế bể chứa chất lỏng hoặc TLD đều giả thiết thành bể tuyệt đối cứng nhằm bỏ qua sự phức tạp của điều kiện biên tương tác trong bể chứa khi dao động [118-120]. Tuy nhiên, với sự tiến bộ của khả năng tính toán

cũng như các hư hỏng bể chứa do giả thuyết này gây ra (Hình 3. 2) nên gần đây sự đàn hồi của thành bể mềm có xét FSI đã được quan tâm và kể đến trong tính toán. Mặc dù các Tiêu Chuẩn Xây Dựng phổ biến trên thế giới đã kể đến áp lực sóng lên thành bể mềm, nhưng mức độ còn đơn giản và chưa chỉ ra hết được hết tầm quan trọng của FSI [121]. TLD có xét FSI là một trong những nét mới của nghiên cứu tại luận án này.



(a) Phá hoại đỉnh và đáy bể do tải trọng động của sóng chất lỏng



(b) Hiệu ứng “chân voi” gây biến dạng đáy bể

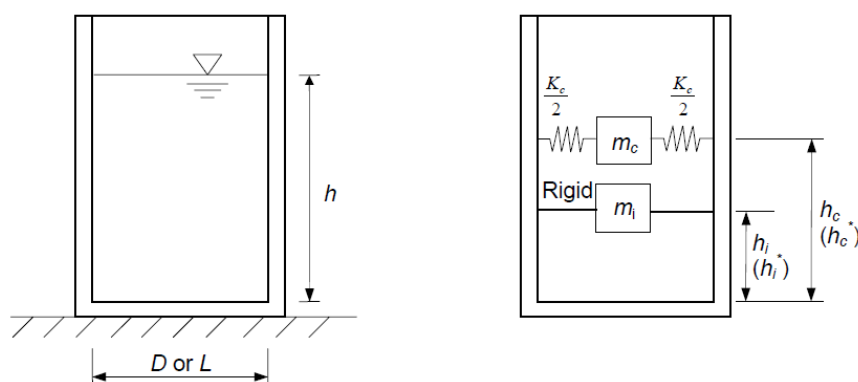
Hình 3. 2 Hư hỏng bể chứa do hiện tượng FSI

Nguyên nhân của hiện tượng hư hỏng bể ở Hình 3. 2 là do khi bể dao động hình thành sóng chất lỏng, sóng dao động gây ra sự va đập vào thành bể, thành bể biến dạng sẽ tác động ngược lại chất lỏng, sóng chất lỏng tiếp tục va đập vào thành bể chứa. Chu trình lặp lại liên tục và nếu hiện tượng cộng hưởng xảy ra, tần số dao động của sóng bằng tần số riêng của thành bể thì áp suất chất lỏng lên thành bể đạt đến cực đại, gây ra một số hiện tượng tổn hại cho kết cấu bể như “phình chân voi” ở đáy bể, biến dạng “hình kim cương” hoặc nứt thành bể. Tuy nhiên để xây dựng được mô hình toán cho hiện tượng tương tác này thì các nhà nghiên cứu gặp không ít khó khăn trong việc

giải quyết điều kiện biên của bài toán, vì sau mỗi bước thời gian, các thông số đặc trưng của chất lỏng và kết cấu được tính lại liên tục cho cả hai miền rắn (kết cấu) lẫn miền ướt (chất lỏng) làm vấn đề phức tạp lên nhiều lần đặc biệt khi muốn lấy được kết quả chính xác. Thời gian gần đây FSI được quan tâm nhiều hơn với sự hỗ trợ của các công cụ mô phỏng mạnh như ABAQUS [122, 123] hoặc ADINA [117, 120, 124, 125] đặc biệt là ANSYS [126-132].

Các hiện tượng hư hỏng xuất hiện trong bể chứa chất lỏng liên quan rất nhiều đến các thông số cơ bản như f_{tank} , p_w , lực cắt thành bể, mô men nội lực, năng lượng tiêu tán trong sóng v.v... Ngoài ra, ứng xử động của chất lỏng trong bể phụ thuộc vào tương tác giữa chất lỏng và thành bể cũng như bể chứa và kết cấu bên dưới dọc theo vùng biên tiếp xúc [62]. Mặt khác, độ mềm của kết cấu cần điều khiển dao động, đặc trưng chất lỏng, và thông số nền móng bên dưới là những đại lượng cần phải xem xét trong việc phân tích dao động của sóng [56, 66, 68]. Các nghiên cứu này đã chỉ ra, p_w trong bể chứa thành mềm có thể lớn hơn rất nhiều so với trong bể chứa thành cứng khi có xét FSI.

Các Tiêu Chuẩn Xây Dựng trên thế giới về thiết kế bể chất lỏng chịu động đất đều dựa mô hình của Housner (1963). Housner đã phát triển một phương pháp giải tích kinh điển đó là xem áp suất động lực chất lỏng phân ra thành hai phần: (1) xung cứng (impulsive) và (2) xung đối lưu (convective), bằng cách sử dụng mô hình chất điểm tập trung (Hình 3. 3) [46].



Hình 3. 3 Mô hình chất điểm tập trung tương đương của bể chứa

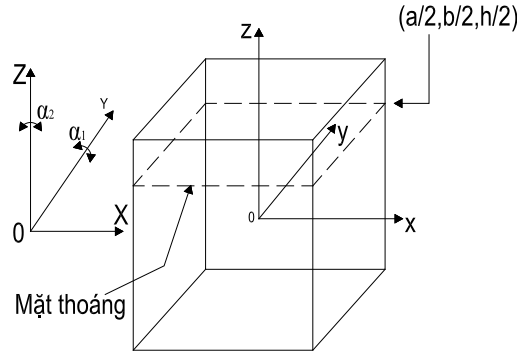
Ghaemmaghami và cộng sự (2010) [69-71] ứng dụng FEM để giải quyết bài toán bể chứa chất lỏng chịu động đất Elcentro có xét đến cả hai thành phần xung cứng và xung đối lưu cho bể chứa có dạng cao lần thấp. Kết quả nghiên cứu cho thấy FSI ảnh hưởng đáng kể đến phản ứng động lực học chất lỏng. Và gia tốc theo phương đứng ảnh hưởng nhỏ hơn rất nhiều so với phương ngang khi động đất xảy ra. Hashemi và cộng sự (2013) đã trình bày phương pháp giải tích đơn giản nhưng hiệu quả để tính toán phản ứng động lực học của bể chất lỏng dưới tác dụng của động đất, trong đó có xét FSI. Bài toán bể chứa chất lỏng chữ nhật, mô hình 3D, đã được thực hiện bằng cách áp dụng phương pháp Rayleigh – Ritz với hàm dạng dao động của tám đàn hồi chữ nhật với điều kiện biên thích hợp. Trong công bố trên, một mô hình cơ học đã được phát triển, kể đến sự biến dạng của thành bể, các tham số cơ bản của mô hình được tính toán từ các biểu đồ, và đáp ứng động đất lớn nhất có thể được xác định bằng phương pháp phổ phản ứng khi thiết kế bể [73, 74].

Chương 3 chỉ ra mối quan hệ giữa t_w và f_{tank} , sau đó tính toán các đặc trưng bể chứa nói chung và TLD nói riêng với thành bể mềm. Bể chứa chất lỏng chịu động đất Elcentro được thiết kế với các Tiêu Chuẩn phổ biến hiện nay như ACI 350.3-06 [47], EC8: Part 4 [48] và IS 1893:2002 [49]. Kết quả tính toán được kiểm tra bằng ANSYS, ngoài ra còn so sánh với các nghiên cứu đi trước. Kết luận rút ra là khi kể đến FSI, f_{tank} thay đổi thì p_w thay đổi, dẫn đến sự thay đổi các thành phần giá trị khác như biến dạng thành, lực cắt đáy bể, mô men thành bể, năng lượng tiêu tán trong bể v.v... có thể gây ra hư hỏng bể chứa hoặc mất tác dụng của TLD [14].

3.2 Phương pháp giải tích phân tích dao động bể chứa có xét FSI

Thông thường, các phương trình sai phân cơ bản và các điều kiện biên của chất lỏng đều được mô tả trên hệ tọa độ Cartesian như Hình 3. 4. Giả thiết chất lỏng không nhớt, không xoáy và không nén được, vận tốc sóng chất lỏng có thể tính từ đạo hàm của hàm thế vận tốc sóng ϕ . Thành phần x, y, z của các trường vận tốc u, v, w được tính từ đạo hàm số của hàm thế:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}; v = \frac{\partial \phi}{\partial y}; w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3.1)$$



Hình 3. 4 Hệ tọa độ Cartesian mô tả phương trình dao động sóng

Phương trình vi phân cơ bản của ϕ phải được thỏa mãn tại tất cả vị trí trong miền chất lỏng đó là điều kiện chất lỏng không nén được, tương ứng với:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Rightarrow \nabla^2 \phi = 0 \quad (3.2)$$

Đối với dòng chảy thể không có dao động xoáy nước, phương trình động lực học chất lỏng của dao động sóng có thể đưa về dạng không ổn định của phương trình Bernoulli:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho_l} + gz + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) = f(t) \quad (3.3)$$

Trong đó P là áp suất chất lỏng, ρ_l là khối lượng riêng chất lỏng, g là gia tốc trọng trường theo phương z và $f(t)$ là hằng số tích phân. Vận tốc u, v, w của phần tử khối chất lỏng nhỏ nên có thể bỏ qua, khi ấy phương trình dao động (3.3) của sóng là tuyến tính. Bởi vì chỉ đạo hàm của hàm thế vận tốc ϕ có ý nghĩa vật lý, cho nên các hằng số và kể cả hàm theo thời gian t có thể thêm vào để xác định ϕ bất cứ khi nào [70].

Cho nên $f(t)$ tại (3.3) triệt tiêu và (3.3) được viết lại như sau:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho_l} + gz = 0 \quad (3.4)$$

Nghiệm của (3.2) phải thỏa mãn điều kiện biên ở thành bể và trên mặt thoáng chất lỏng. (3.4) chỉ ra một điều kiện biên ở mặt thoáng, đó là điều kiện biên động lực học. Mặt thoáng dao động tự do và áp lực sóng ở mặt thoáng bằng zero ($P=0$). Do đó, đối với chất lỏng nằm trên mặt thoáng, phương trình Bernoulli không ổn định được viết lại thành:

$$\frac{\partial \phi(x, y, z, t)}{\partial t} + g\delta(x, y, t) = 0 \quad \text{tại cao độ } z=h/2 \quad (3.5)$$

Phương trình (3.5) chính là điều kiện biên động lực học tại mặt thoáng. Còn điều kiện biên động học thiết lập để liên hệ chuyển vị sóng chất lỏng trên bề mặt δ theo phương thẳng đứng của vận tốc chất lỏng trên mặt thoáng. Khi sóng tuyến tính, điều kiện này đơn giản hoá thành:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{tại } z=h/2 \quad (3.6)$$

(3.5) và (3.6) có thể được kết hợp vào trong cùng một điều kiện được viết lại theo ϕ (hoặc δ) bằng cách đạo hàm (3.5) theo t , đạo hàm (3.6) theo z sau đó kết hợp hai phương trình bằng cách khử δ (hoặc ϕ). Kết quả thu được:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{tại } z=h/2 \quad (3.7)$$

Phương trình (3.7) chỉ ra rằng f_{tank} có liên quan trực tiếp đến trường trọng lực. Ngoài ra, vì độ nhớt và ứng suất nhớt được giả thiết bỏ qua, nên chỉ có một điều kiện duy nhất áp đặt vào thành bể chứa đó là vận tốc pháp tuyến của chất lỏng trên mặt phẳng thành bể bằng vận tốc pháp tuyến của chính bản thân thành bể (điều kiện biên này dễ dàng nhận thấy ở Hình 3. 1). Nhưng cũng cần lưu ý thêm rằng các lời giải trên sẽ cho phép chất lỏng trượt lên trên thành bể.

Đối với bể chất lỏng có thành tuyệt đối cứng, điều kiện biên tại thành bể sẽ là vận tốc pháp tuyến của chất lỏng bằng vận tốc của nền. Điều kiện này dẫn đến lời giải duy nhất cho vấn đề giá trị trên biên tiếp xúc. Khi ấy thì giá trị biên có thể được giải bằng cách sử dụng hàm dạng có khả năng mô tả được biến dạng thành bể. Theo Ghaemmaghami (2010) [70], nếu hàm chuyển vị nền là $X(t) = -iX_0 \exp(i\omega t)$, thì vận tốc thành bể $v = w = 0$; $u = iX_0\Omega e^{i\Omega t}$, điều kiện biên phía thành ướt sẽ là:

$$n \nabla \phi = iX_0\Omega e^{i\Omega t} \quad (3.8)$$

Trong đó n là vec tơ pháp tuyến biên thành ướt nên $n \nabla \phi$ đơn giản thành $\frac{\partial \phi}{\partial x}$.

Đối với bể chất lỏng có thành mềm (trong thực tế thì thành bể có độ cứng hữu hạn nên thành bể mềm và có dao động), vận tốc tổng cộng của thành bể chính là tổng của vận tốc đất nền và vận tốc tỷ đối của chất lỏng với thành bể (do tính chất đàn hồi của thành bể gây ra dao động). chuyển vị của thành bể mềm cần phải có một phương pháp khác để phát triển hàm thế vận tốc. Sự biến dạng một cách điều hoà do áp lực sóng của thành bể mềm có thể được mô tả bằng phương trình sau:

$$U(z, t) = u(z)e^{i\omega t} \quad (3.9)$$

Điều kiện biên dọc theo thành bể cần phải được thoả mãn bởi hàm thế sau đây:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial U(z, t)}{\partial t} = i\omega u(z)e^{i\omega t} \quad (3.10)$$

Để xét ảnh hưởng của thành bể mềm đến đặc trưng động lực học bể chứa chất lỏng, sự khai triển hàm thế bên dưới như một giải pháp cho hàm thế vận tốc được đề xuất nhằm thoả mãn phương trình Laplace và điều kiện biên ở đáy bể:

$$\phi(x, z, t) = e^{i\omega t} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cosh(\varepsilon_n (x + a/2)) + B_n \sinh(\varepsilon_n (x + a/2)) \cos(\varepsilon_n (z + h/2)) \right) \right\} \quad (3.11)$$

Trong đó ε_n được mô tả theo phương trình:

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad \varepsilon_n h \tan \varepsilon_n h = -\omega^2 \frac{h}{g} \quad (\text{ứng xử động lực của xung đối lưu}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\blacksquare \quad \cos(\varepsilon_n h) = 0 \quad (\text{ứng xử động lực của xung cứng}) \quad (3.13)$$

Phương trình mô tả cơ chế dao động của thành bể cứng viết lại như sau:

$$\frac{\partial^4 U}{\partial z^4} + \frac{\rho_w t_w}{EI} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -\frac{\rho_f}{EI} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.14)$$

Trong đó ρ_w là khối lượng riêng thành bể. Thay (3.9), (3.10) vào (3.14) thu được hệ:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - \frac{\rho_w t_w}{EI} u = -\frac{\rho_f}{EI} i\omega \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\varepsilon_n (z + h/2)) \right\} \text{ tại } x = -a/2 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - \frac{\rho_w t_w}{EI} u = -\frac{\rho_f}{EI} i\omega \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cosh(a\varepsilon_n) + B_n \sinh(a\varepsilon_n) \cos\left(\varepsilon_n \left(z + \frac{h}{2}\right)\right) \right\} \text{ tại } x = +a/2 \quad (3.16)$$

Lời giải tổng quát cho hệ phương trình trên là:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(z,t) = C_1 \cosh(\lambda_1 z) + C_2 \sinh(\lambda_1 z) + C_3 \cos(\lambda_1 z) + C_4 \sin(\lambda_1 z) \\ -\frac{\rho_f}{EI} (i\omega) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\varepsilon_n^4 - \lambda_1^4} \cos\left(\varepsilon_n \left(z + \frac{h}{2}\right)\right) \\ u(z,t) = D_1 \cosh(\lambda_1 z) + D_2 \sinh(\lambda_1 z) + D_3 \cos(\lambda_1 z) + D_4 \sin(\lambda_1 z) \\ -\frac{\rho_f}{EI} (i\omega) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n \cosh\left(\varepsilon_n \left(z + \frac{h}{2}\right)\right) + B_n \sinh(\varepsilon_n h)}{\varepsilon_n^4 - \lambda_1^4} \cos\left(\varepsilon_n \left(z + \frac{h}{2}\right)\right) \end{array} \right. \quad \text{tại } x = -a/2$$

(3.17)

Trong đó:

$$\lambda_1^4 = \frac{\rho_w h \omega^2}{EI} \quad (3.18)$$

Nếu bể chứa liên kết cứng với kết cấu bên dưới thì điều kiện biên ngoài ra còn có:

$$u(-h/2) = u'(-h/2) = u''(h/2) = u'''(h/2) = 0 \quad (3.19)$$

Kết quả là, hằng số tích phân C_j và D_j ($j = 1$ tới 4) viết lại theo A_n và B_n bằng cách áp dụng các điều kiện biên. Giả sử chất lỏng luôn tiếp xúc thành bể suốt quá trình dao động thì (3.10) phải luôn thoả mãn với $x = \pm a/2$. Kết quả của điều kiện biên này sẽ dẫn đến hệ hai phương trình hai ẩn số là A_n và B_n .

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\mu n}(\omega) & \beta_{\mu n}(\omega) \\ \alpha_{\mu n}^*(\omega) & \beta_{\mu n}^*(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_n \\ B_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

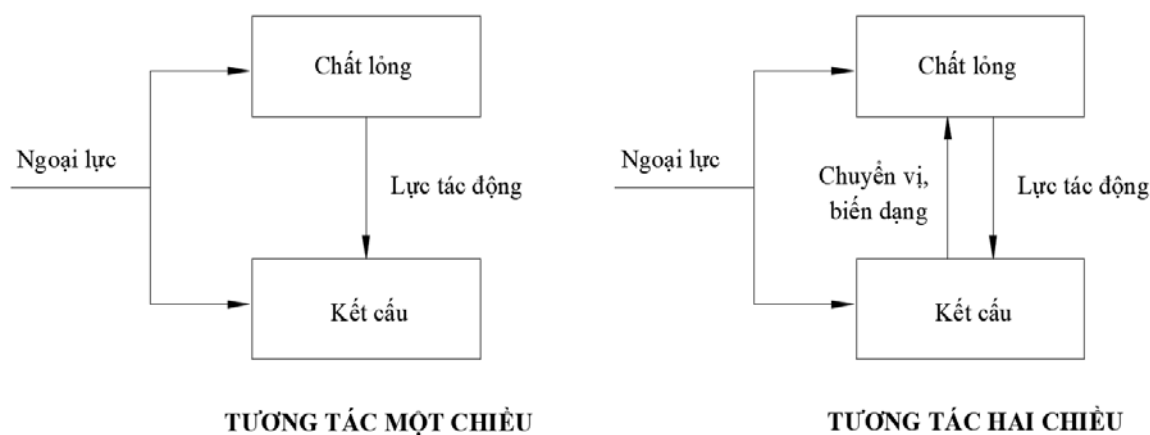
Việc phân tích chi tiết các hằng số trên được trình bày Ibrahim (2005) tại [133]. Cho lời giải không tầm thường thì định thức ở (3.20) phải bằng zero, hay:

$$\det \begin{bmatrix} \alpha_{\mu n}(\omega) & \beta_{\mu n}(\omega) \\ \alpha_{\mu n}^*(\omega) & \beta_{\mu n}^*(\omega) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.21)$$

Sau khi giải (3.21), viết lại U như phương trình dao động của thành bể trong quá trình tương tác rắn-lỏng. Và đó cũng chính là điều kiện ban đầu để tính toán tất cả các thông số đặc trưng riêng của bể chứa chất lỏng như $f_{\text{tần}}$, p_w , lực cắt đáy bể hay mô men thành bể tương tự như đã thực hiện ở chương 2 đối với bể tuyệt đối cứng.

3.3 Thiết kế bể chứa thành mềm theo Tiêu Chuẩn Xây Dựng

Mục này trình bày thiết kế bể chứa thành mềm theo các Tiêu Chuẩn phổ biến, tuy nhiên các Tiêu Chuẩn này chỉ xét FSI một chiều. Sự khác nhau giữa FSI một và hai chiều thể hiện ở Hình 3. 5, khi thành bể biến dạng lớn hoặc cộng hưởng chất lỏng-thành bể xảy ra thì FSI hai chiều sẽ có ý nghĩa quan trọng [8, 117, 124, 134-137].



Hình 3. 5 Phân biệt tương tác FSI một và hai chiều

Trong luận án này thì FSI hai chiều được sử dụng để tăng mức độ chính xác trong việc phân tích đáp ứng dao động của bể chứa và chất lỏng bên trong.

3.3.1 Thiết kế bể chứa theo tiêu chuẩn ACI 350.3-06

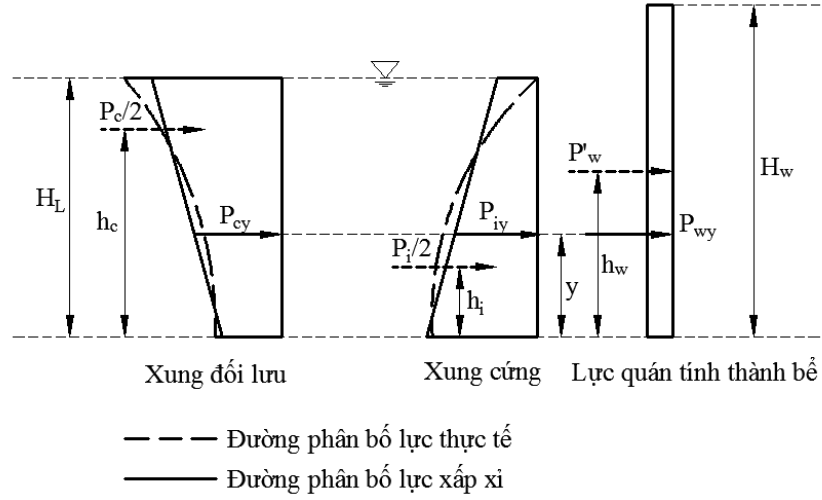
Tiêu chuẩn ACI 350 là phần mở rộng của ACI 318 (Tiêu Chuẩn về bê tông cốt thép Hoa Kỳ) chương 21 “Các điều khoản đặc biệt về thiết kế chống động đất”. ACI 350.3 dùng thiết kế bể chất lỏng chịu động đất với tiết diện chữ nhật và tròn, sử dụng kết cấu bê tông cốt thép hoặc kết cấu bê tông ứng lực trước. Điều đáng lưu ý của ACI 350 là thay vì giả sử bể tuyệt đối cứng để gia tốc của bể bằng gia tốc nền ở tất cả các vị trí trên thành bể, ACI 350 đánh giá phản ứng của bể thông qua tần số riêng.

Tóm tắt cơ sở lý thuyết

Giả thiết bể chứa chịu động đất theo phương cạnh ngắn (Lx). Khi đó sóng chất lỏng sẽ gây ra áp lực lên thành bể theo phương cạnh dài, áp lực này gồm:

- Lực quán tính của bản thân thành bể P_w'
- Lực xung cứng P_i
- Lực xung đối lưu P_c

Theo tiêu chuẩn ACI 350 mục 3.5, hình 3.5.1 (a)(b), các áp lực tác dụng lên thành bể:



Hình 3. 6 Các thành phần lực tác dụng vào thành bể

Tổng lực tập trung thành phần động của sóng tác dụng lên thành bể ở cao độ y :

$$P_y = \sqrt{(P_{iy} + P_{wy})^2 + P_{cy}^2 + (p_{vy}B)^2} \quad (3.22)$$

Trong đó:

- Lực quán tính bản thân của thành bể: $P_{wy} = \left(\frac{C_i I}{R_i} \right) (\varepsilon \gamma_c B t_w)$

- Lực xung cứng:
$$P_{iy} = \frac{\frac{P_i}{2} \left[4H_L - 6h_i - (6H_L - 12h_i) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2}$$

- Lực xung đối lưu:
$$P_{cy} = \frac{\frac{P_c}{2} \left[4H_L - 6h_c - (6H_L - 12h_c) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2}$$

- Áp lực động khi kể đến gia tốc phương dọc $p_{vy} = \ddot{u}_v q_{hy}$

Từ đó tính được áp lực phân bố theo chiều dài bể: (1) áp lực do lực quán tính

$p_{wy} = P_{wy}/B$ và (2) áp lực do lực xô ngang của nước vào thành bể $p_{iy} = P_{iy}/B$, (3)

áp lực đối lưu của nước $p_{cy} = P_{cy}/B$, tổng áp lực động của nước tại cao độ y là:

$$p_y = \sqrt{\left(\frac{P_{iy} + P_{wy}}{B} \right)^2 + \left(\frac{P_{cy}}{B} \right)^2 + \left(\frac{p_{vy}B}{B} \right)^2} = \frac{\sqrt{(P_{iy} + P_{wy})^2 + P_{cy}^2 + (p_{vy}B)^2}}{B} \quad (3.23)$$

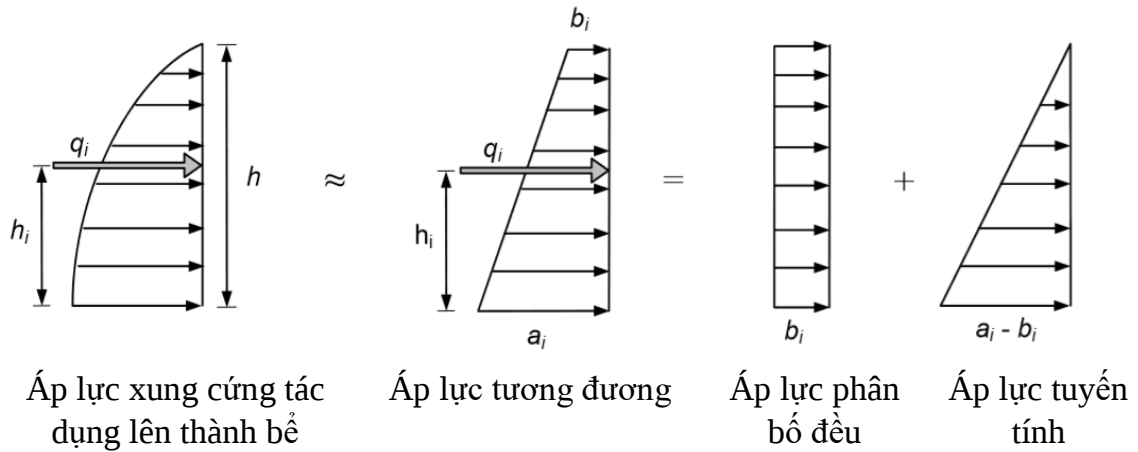
3.3.2 Thiết kế bể chứa theo tiêu chuẩn IS 1893 - 2002

Tiêu chuẩn IS 1893 - 2002 thiết kế bể chất lỏng chịu tải trọng động đất được ban hành bởi Viện tiêu chuẩn Ấn Độ. Quy trình thiết kế bể được tóm tắt ở Hình 3. 9.

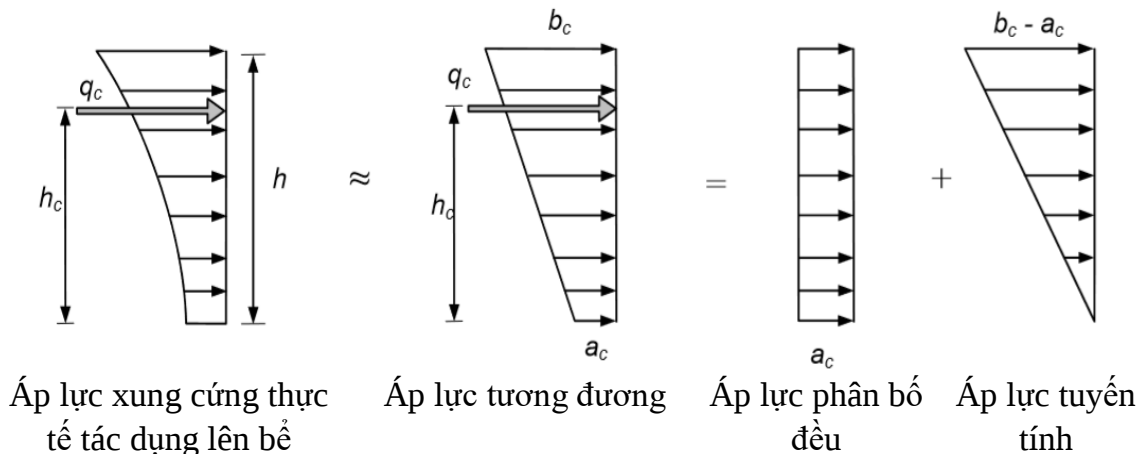
Cơ sở lý thuyết

Trường hợp xét bể chịu động đất gây ra áp lực nước bao gồm các thành phần sau:

- Áp lực xung cứng tác dụng lên thành bể (p_{iw})
- Áp lực do lực quán tính gây ra (p_{ww})
- Áp lực đối lưu tác dụng lên thành bể (p_{cw})
- Áp lực tác dụng theo phương dọc thành bể (p_v)



Hình 3. 7 Áp lực xung cứng tác dụng lên thành bể



Hình 3. 8 Áp lực xung đối lưu tác dụng lên thành bể

Giá trị lớn nhất áp lực động lên bể bằng tổng căn bình phương thành phần áp lực:

$$p = \sqrt{(p_{iw} + p_{ww})^2 + p_{cw}^2 + p_v^2} \quad (3.24)$$

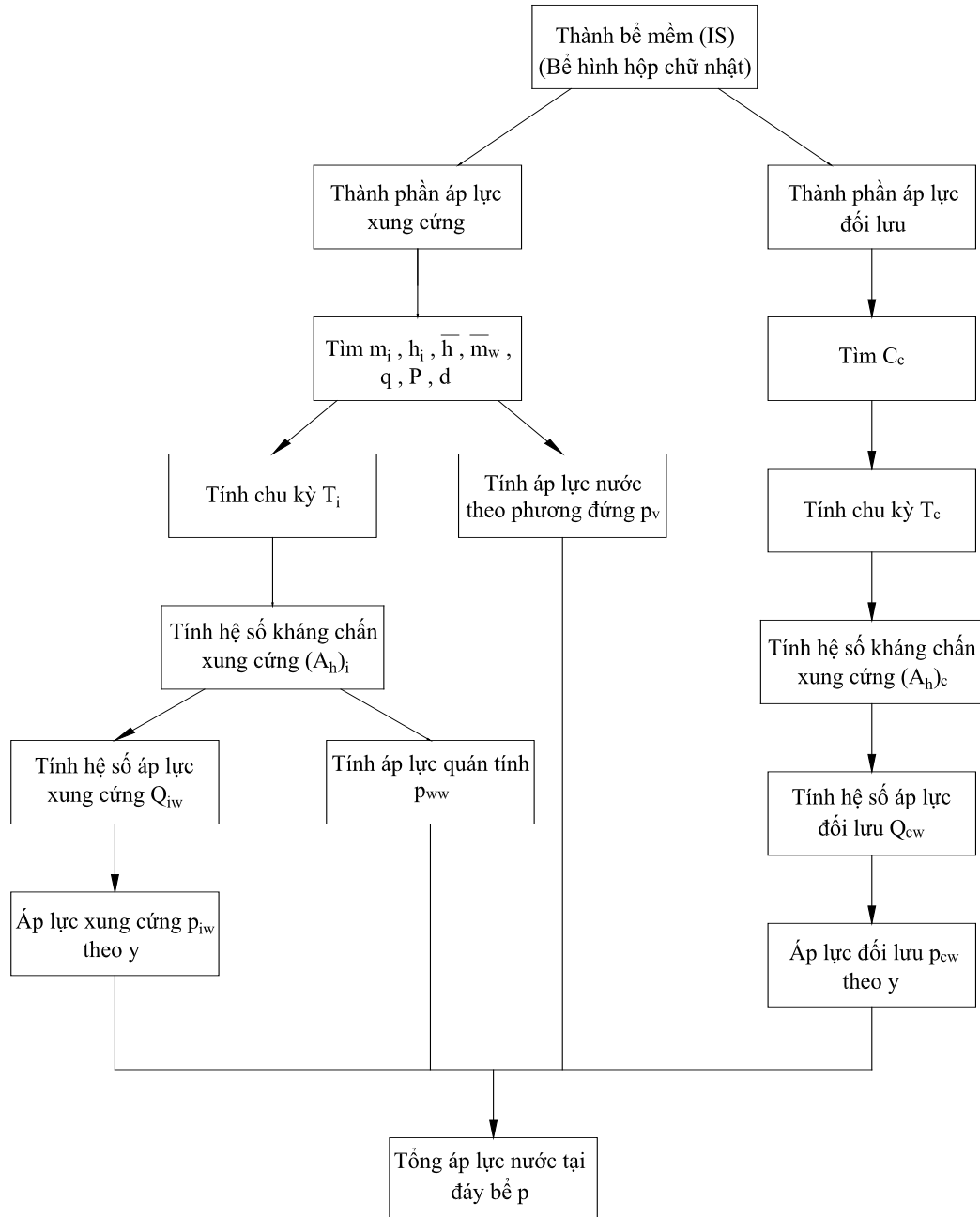
Trong đó:

$$p_{iw} = Q_{iw}(y)(A_h)_i \rho gh$$

$$p_{ww} = (A_h)_i t \rho_m g$$

$$p_{cw} = Q_{cw}(y)(A_h)_c \rho gL$$

$$p_v = (A_v) \left[\rho gh \left(1 - \frac{y}{h} \right) \right]$$



Hình 3. 9 Sơ đồ tóm tắt quy trình tính toán theo IS1893:2002

3.3.3 Thiết kế bể chứa theo tiêu chuẩn EC8: Part 4

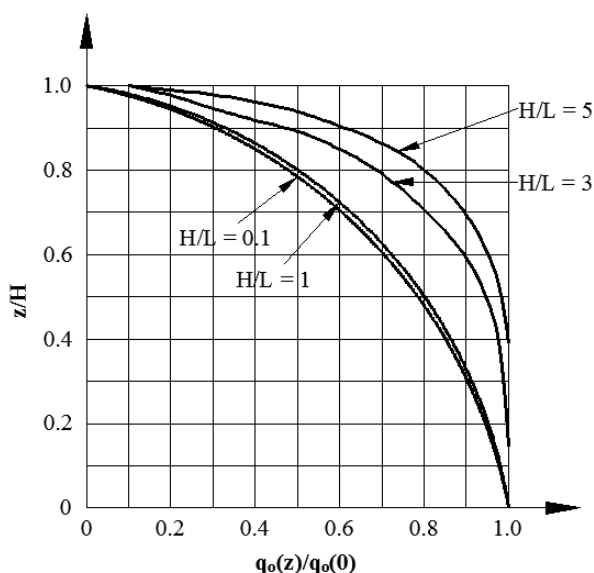
Tiêu chuẩn EC8: Part 4 “Thiết kế công trình chịu động đất” là một trong mười tiêu chuẩn thiết kế kết cấu công trình của Châu Âu, phần 4 của EC8 cung cấp các phương pháp đánh giá chi tiết và các quy định kiểm tra đối với bể chứa chất lỏng. Ở Tiêu Chuẩn này, để đơn giản ứng xử của bể chứa dưới ảnh hưởng của động đất thì các mô hình tính toán được đưa về dạng tương đương để thuận tiện thiết kế.

Cơ sở lý thuyết

Khảo sát bể chữ nhật chịu động đất, thành bể vuông góc với gia tốc động đất sẽ chịu áp lực nước. Áp lực này gồm hai thành phần là xung cứng và xung đối lưu:

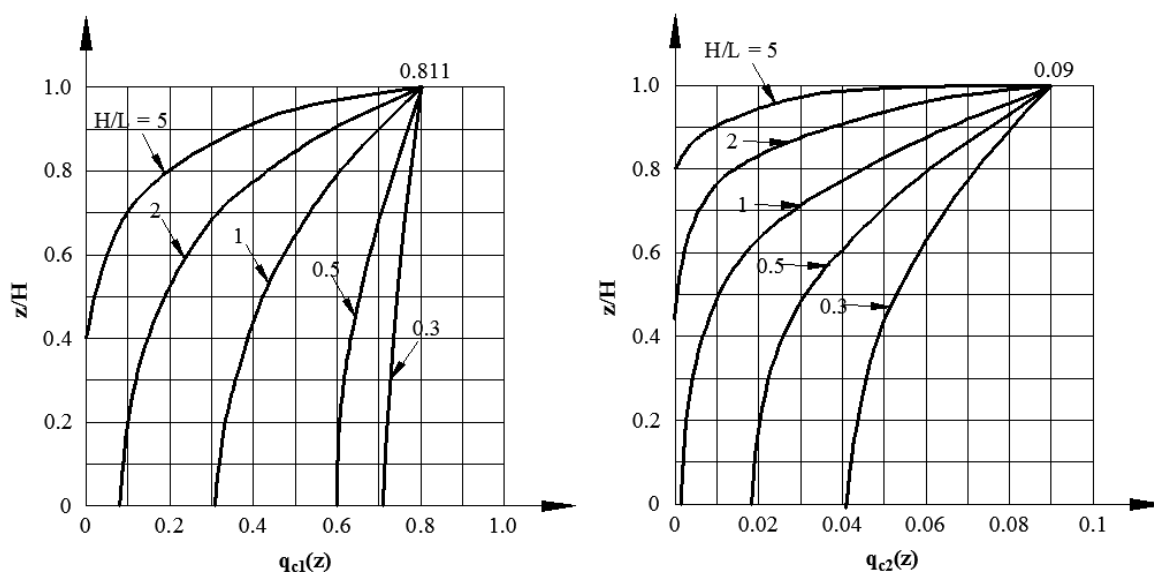
$$p(z,t) = p_i(z,t) + p_c(z,t) = (1) + (2) \quad (3.25)$$

Trong đó: (1) = $p_i(z,t) = q_o(z) \times \rho \times L \times A_g(t)$ là thành phần xung gồm lực quán tính, và $q_o(z)$ là hàm mô tả áp lực sóng theo chiều cao, biểu diễn bằng đồ thị Hình 3. 10. Giá trị lớn nhất của áp lực xung ($z = 0$) là $q_o(0)$ phụ thuộc tỷ số chiều cao bể và mực nước trong bể.



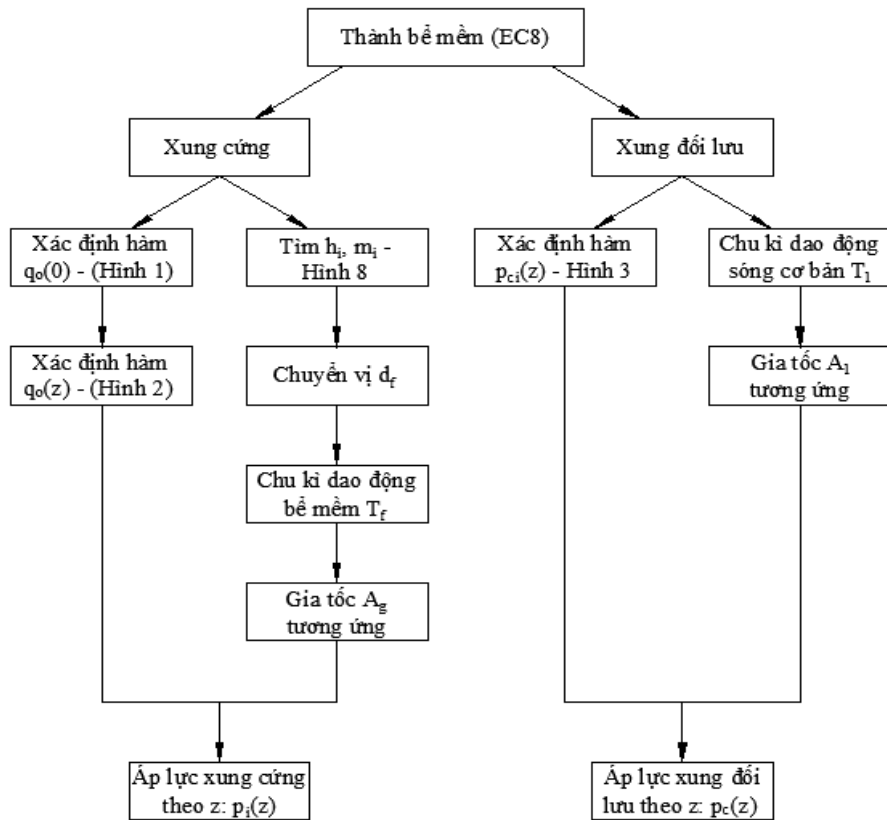
Hình 3. 10 Áp lực xung cứng không thứ nguyên dọc chiều cao EC8 – Part 4

Và: (2) = $p_{c1}(z,t) = q_{c1}(z) \rho L A_1(t)$ là thành phần áp lực đối lưu tính bằng tổng giá trị độ lớn của các mode thành phần, tuy nhiên sự đóng góp của dạng cơ bản là lớn nhất, trong đó $q_{c1}(z)$ là hàm biểu diễn áp lực đối lưu cùng với dạng dao động $q_{c2}(z)$.



Hình 3. 11 Áp lực xung đối lưu không thứ nguyên dọc chiều cao EC8 – Part 4

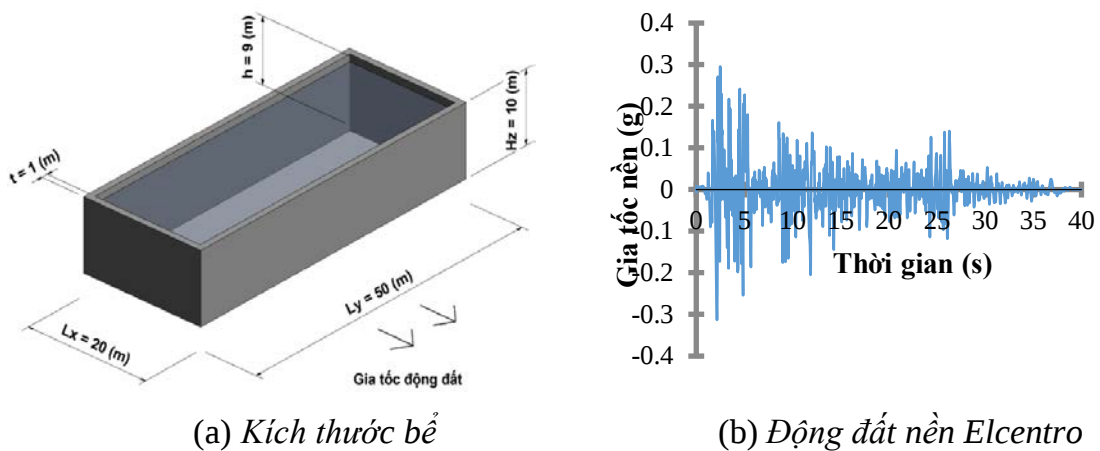
Đối với thành bể mềm, độ mềm gây ra sự gia tăng áp lực xung cứng đáng kể, trong khi áp lực đối lưu không đổi. Cách gần đúng xem xét sự làm việc của thành bể mềm là dùng phân bố áp lực thẳng đứng như thành bể cứng, gia tốc $A_g(t)$ thay bằng gia tốc phản ứng của thiết bị dao động có tần số và tỷ số cản của dạng xung thứ nhất bể chất lỏng. Chu kỳ dao động này tính gần đúng $T_f = 2\pi\sqrt{\frac{d_f}{g}}$ trong đó d_f là chuyển vị ngang của thành bể tại cao độ đặt tâm khối lượng xung khi bể chịu tải trọng phân bố đều với độ lớn $\frac{m_i g}{4BH}$ (m_i : khối lượng dạng xung cộng với khối lượng thành bể). Quy trình tính toán tóm tắt theo Tiêu Chuẩn EC8: Part 4 được thể hiện ở Hình 3. 12.



Hình 3. 12 Sơ đồ tóm tắt quy trình tính toán theo EC8 – Part 4

3.3.4 Ví dụ áp dụng

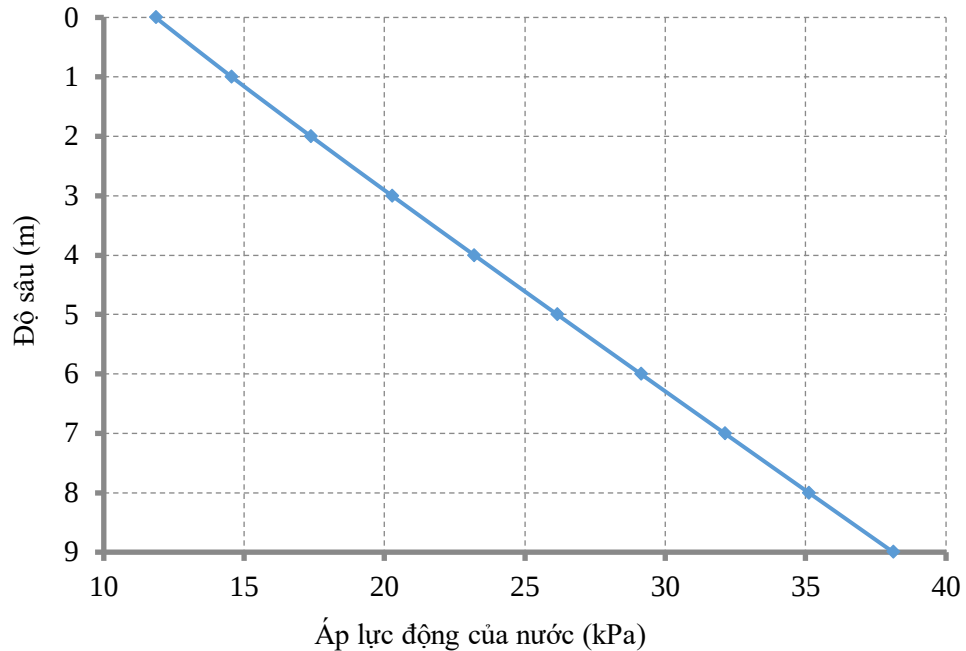
Ví dụ 4a: Bể nước bằng bê tông kích thước hình học như Hình 3. 13 với đặc trưng: bê tông dung trọng $\gamma = 2400 \text{ (kg / m}^3\text{)}$, module đàn hồi $E_c = 2.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, hệ số poisson $\nu = 0.17$ và tỷ số cản $\xi = 3\%$. Yêu cầu tính áp lực nước lên thành khi bể chịu động đất El Centro 1940, biết rằng động đất gây ra gia tốc theo phương X.



Hình 3. 13 Tính áp lực sóng lên bể BTCT chịu động đất

a. Tính toán theo tiêu chuẩn ACI 350.3 - 06

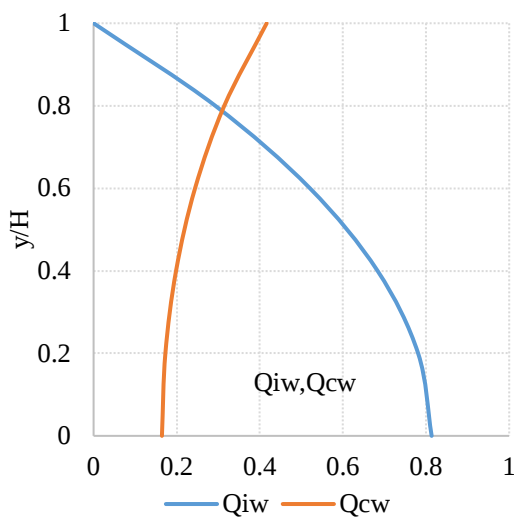
Lần lượt áp dụng các công thức ở mục 3.3.1, quy trình thiết kế bể chứa theo tiêu chuẩn ACI, kết quả tính toán được thể hiện ở Hình 3. 14.



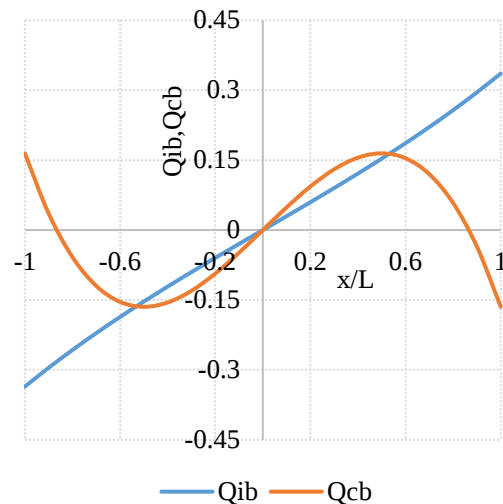
Hình 3. 14 Áp lực động của nước theo ACI 350.3-06

b. Tính toán theo tiêu chuẩn IS 1893 – 2002

Áp lực động học do thành phần xung cứng tác dụng lên đáy bể ($y=0$):

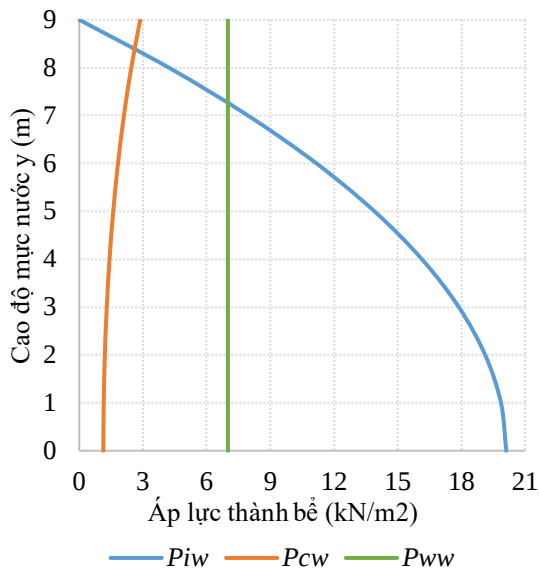


Hình 3. 15 Biểu đồ hệ số áp lực của xung cứng và đối lưu lên thành bể

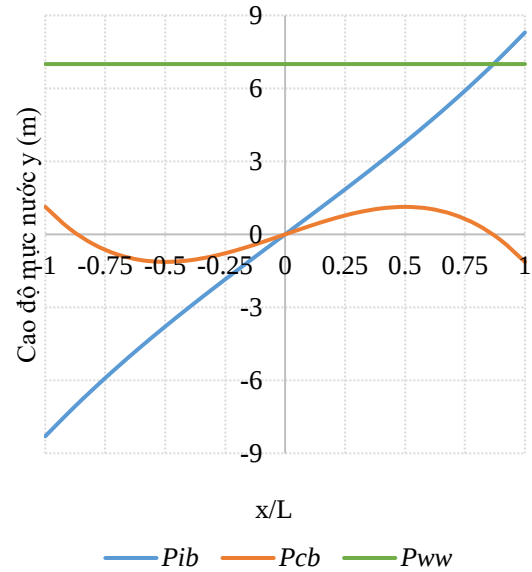


Hình 3. 16 Biểu đồ hệ số áp lực của xung cứng và đối lưu tại đáy bể

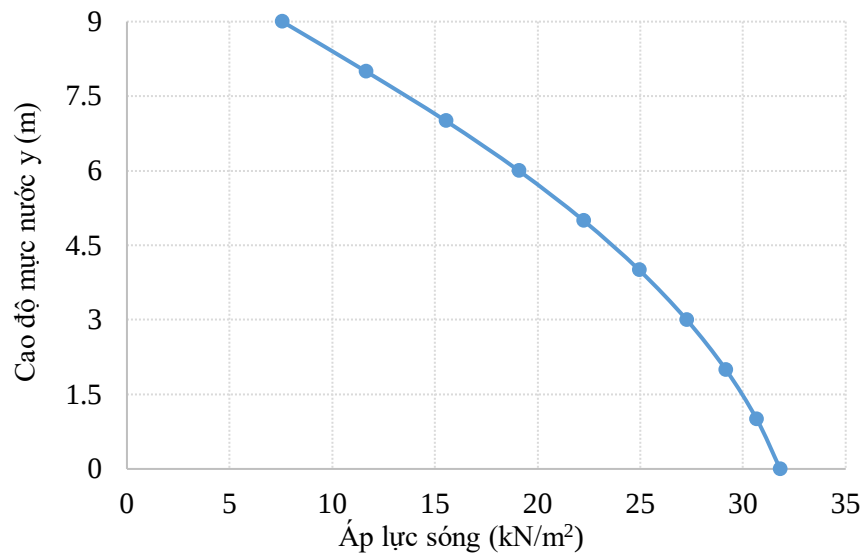
Tổng áp lực nước tại đáy bể tác dụng



Hình 3. 17 Biểu đồ áp lực xung cứng, đối lưu, quán tính lên thành bể



Hình 3. 18 Biểu đồ áp lực xung cứng và đối lưu, quán tính tại đáy bể



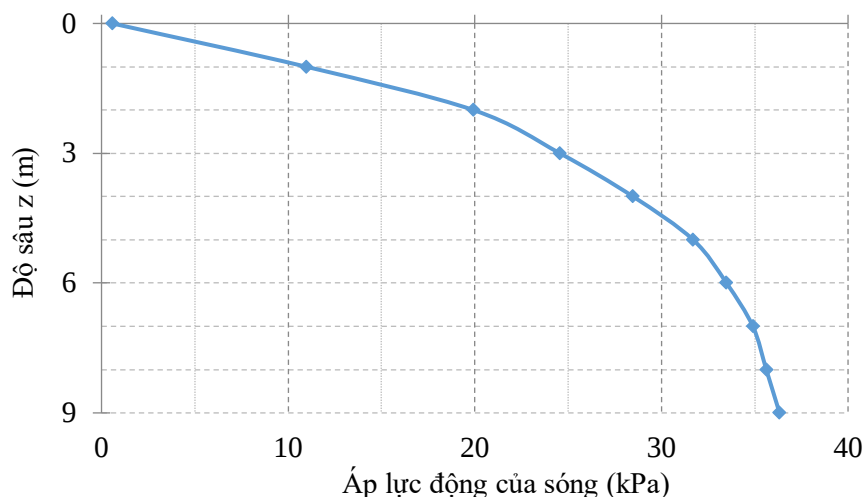
Hình 3. 19 Áp lực động của sóng chất lỏng theo IS 1893:2002

c. Tính toán theo tiêu chuẩn EC8 – Part 4

Tổng áp lực nước tác dụng lên bể tại cao độ z , theo EC8, sử dụng phương pháp SRSS cho độ an toàn không cao vì vậy EC8: Part4 sử dụng tổng giá trị tuyệt đối để tính tổng áp lực động: $p = p_i + p_c$. Kết quả tổng áp lực động ở Hình 3. 20.

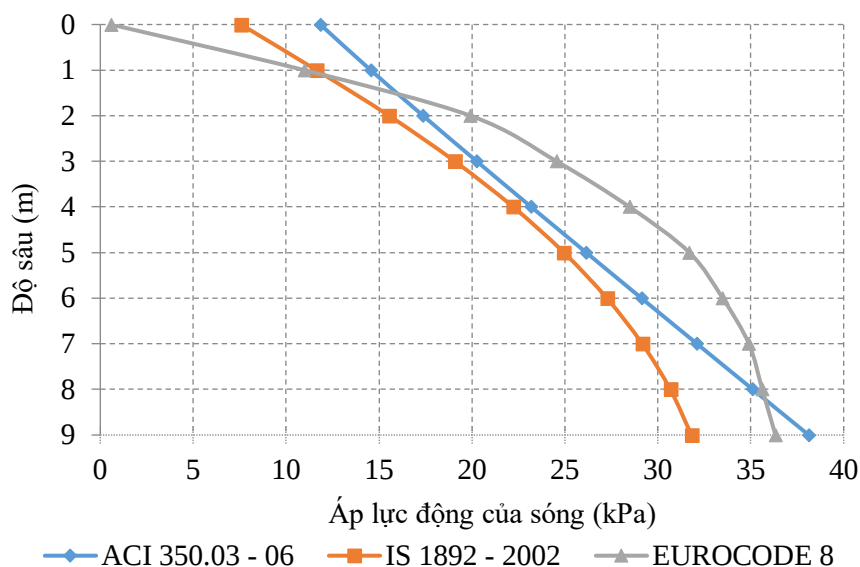
Trong đó:

- Thành phần xung cứng: Áp lực xung cứng phân bố theo cao độ bề z
 $p_i(z,t) = q_o(z)\rho LA_g$
- Thành phần xung đối lưu $p_c(z,t) = q_{c1}(z)\rho LA_1(t)$



Hình 3. 20 Đồ thị áp lực nước động phân bố theo EC 8: Part 4

So sánh kết quả tính toán giữa các tiêu chuẩn, kết quả ở Hình 3. 21

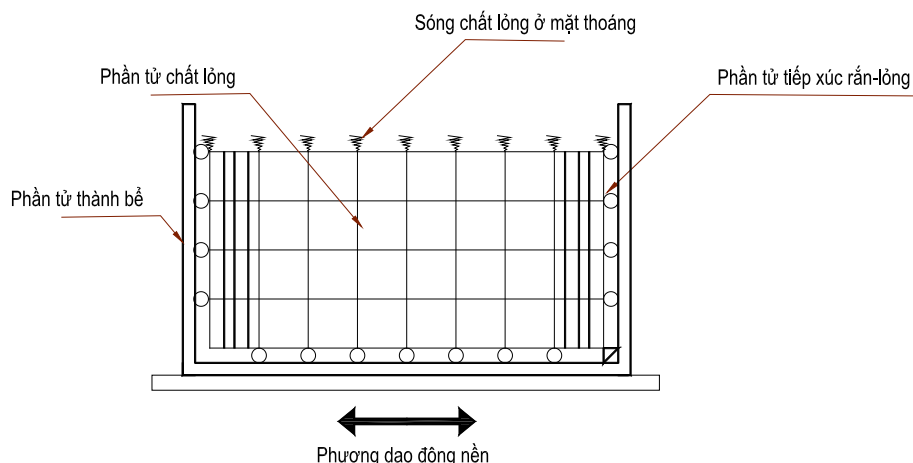


Hình 3. 21 So sánh áp lực động chất lỏng theo các Tiêu Chuẩn thiết kế bể chứa

Từ đồ thị ở Hình 3. 21 cho thấy các Tiêu Chuẩn có kết quả tính toán áp lực động lớn nhất tác dụng lên thành bể khác nhau không nhiều. Giá trị áp lực động cực đại của sóng lên thành bể là 31.81 kN/m² theo IS; 36.33 kN/m² theo EC8; 38.12 kN/m² theo ACI 350.3. Đặc biệt ACI đơn giản trong việc tính toán với đồ thị áp lực tuyến tính.

3.4 FEM phân tích dao động bể chứa có xét FSI

Trong phần này bể chịu dao động như Hình 3. 22 thiết lập bằng FEM cho hai miền rắn-lỏng nhằm tính toán các đặc trưng riêng và p_w lên thành bể khi xét FSI. Các phương pháp số khác để phân tích FSI tham khảo tại [138-141].



Hình 3. 22 Rời rạc hóa bể chứa chất lỏng có xét FSI

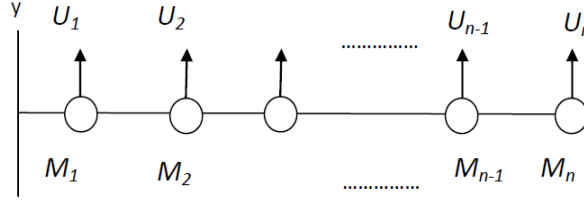
3.4.1 Giới thiệu tổng quan

Phân tích ứng xử dao động tuyến tính của chất lỏng áp dụng FEM có thể thực hiện được trên miền thời gian và miền tần số. Trong phương pháp phân tích từng bước, tải trọng tác động và lịch sử đáp ứng phân ra thành từng bước thời gian Δt hoặc từng pha tính toán. Đáp ứng ở mỗi bước tính toán, kết quả có được từ điều kiện ban đầu và tải trọng tác dụng theo Δt . Phương pháp phân tích từng bước được phân ra hai loại: tường minh (explicit) hoặc ngầm ẩn (implicit) [142, 143]. Trong phương pháp tường minh, bước tính toán sau dựa trên bước đầu một cách rõ ràng cụ thể, quá trình phân tích phụ thuộc số lượng biến cần tìm. Nhưng phương pháp ngầm ẩn, thì ngược lại, giá trị đáp ứng mới trong bước thời gian trước bao gồm một hoặc một vài giá trị có quan hệ với nhau, vì thế cần dùng một giá trị nào đó để thử và sử dụng quy trình lặp nhằm tìm trị chính xác. Sự giải lặp này cần khối lượng tính toán lớn. Theo [142], tốc độ tính của phương pháp tường minh nhanh hơn 5 lần so với ngầm ẩn.

Trong luận án, phương pháp ngầm ẩn được lựa chọn vì thích hợp giải phương trình trường cặp đôi. Khi đó sự giải lặp được thực hiện ở từng bước thời gian mà không cần tính cụ thể tần số dao động riêng, hàm dạng hay tỷ số cản tương ứng [144].

3.4.2 FEM mô phỏng miền kết cấu có xét FSI

Trong hệ MDOF, cần phải biết nhiều hơn chuyển vị một điểm để xác định được cơ chế dao động ở từng bước thời gian cụ thể. Xem xét hệ kết cấu có n-DOF dao động theo hướng Y như ở Hình 3. 23.



Hình 3. 23 Hệ n-DOF dao động theo phương y

Lực quán tính F_I có thể được viết lại như sau ở bước thời gian t bất kỳ:

$$\mathbf{F}_I = \begin{Bmatrix} F_{I1} \\ F_{I2} \\ \vdots \\ F_{I(n-1)} \\ F_{I(n)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & M_2 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & M_{n-1} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & M_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \vdots \\ \ddot{u}_{n-1} \\ \ddot{u}_n \end{Bmatrix}^t \quad (3.26)$$

Dạng rút gọn là:

$$\mathbf{F}_I = \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_t \quad (3.27)$$

Ma trận khối lượng $\mathbf{M}$ là ma trận đường chéo, ở dạng tổng quan thì đó có thể là ma trận đối xứng không qua đường chéo. Lực do sự đàn hồi có thể viết lại như sau:

$$\mathbf{F}_s = \begin{Bmatrix} F_{S1} \\ F_{S2} \\ \vdots \\ F_{S(n-1)} \\ F_{S(n)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

Dạng rút gọn là:

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} \quad (3.29)$$

Với $\mathbf{K}$ là ma trận độ cứng. Ma trận cản sẽ là:

$$\mathbf{F}_D = \begin{Bmatrix} F_{D1} \\ F_{D2} \\ \cdot \\ \cdot \\ F_{D(n-1)} \\ F_{D(n)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{u}_{n-1} \\ \dot{u}_n \end{Bmatrix} \quad (3.30)$$

Dạng rút gọn của ma trận cân

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} \quad (3.31)$$

Với $\mathbf{C}$ là ma trận cân. Phương trình cân bằng nội ngoại lực là:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{f}(t) \quad (3.32)$$

Với $\mathbf{f}$ là ngoại lực tác dụng vào kết cấu.

$$\mathbf{f}(t) = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n(t) \end{Bmatrix} \quad (3.33)$$

Nếu có thêm gia tốc nền tác dụng, phương trình chuyển động (3.32) viết lại thành:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{f}(t) - \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_g \quad (3.34)$$

Trường hợp ngoại lực tác dụng vào kết cấu là chất lỏng, thì có thể phân ra thành áp suất động lực chất lỏng $\mathbf{f}$ và phần còn lại của ngoại lực là $\mathbf{f}_1$. (3.34) viết lại thành:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{f} + \mathbf{f}_1 - \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_g \quad (3.35)$$

Khi thiết kế, thường chọn 2D vì 3D đòi hỏi số bậc tự do mô tả chuyển động quá lớn.

3.4.3 Ma trận trường cặp đôi của tương tác chất lỏng-thành bể

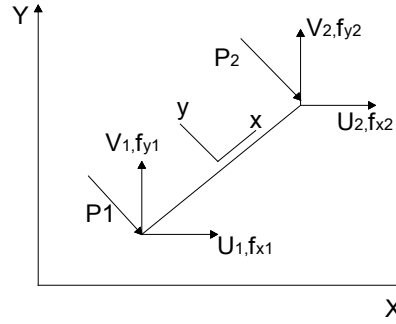
Theo Ghaemmaghami (2010), áp suất của chất lỏng tác dụng một lực tương đương lên kết cấu tại bề mặt tiếp xúc chất lỏng-thành bể [69], ma trận trường cặp đôi $\mathbf{Q}$ mô tả quan hệ áp suất chất lỏng và lực tương đương này là:

$$\mathbf{Q} \cdot \mathbf{P} = \mathbf{f} \quad (3.36)$$

$\mathbf{Q}$ truyền áp suất chất lỏng vào thành bể, và gia tốc thành bể ngược về miền chất lỏng.

Với $\mathbf{f}$ là vectơ lực do áp lực động sóng chất lỏng $\mathbf{P}$ lên thành bể gây ra. Ngoài ra, Hình 3. 24 mô tả phần tử đường thẳng trên biên tương tác rắn-lỏng. Công của áp lực chất lỏng lên biên tương tác bằng công của lực kết cấu tác dụng lên phần tử nút trên mặt biên tương ứng. Với phần tử có độ dày đơn vị như Hình 3. 24, viết lại như sau:

$$\int p U_n ds = \{f^e\}^T \{\delta\} = \{f_{x1} \ f_{y1} \ f_{x2} \ f_{y2}\} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} \quad (3.37)$$



Hình 3. 24 Phần tử tiếp xúc trên biên chất lỏng-thành bể

Trong đó p và U_n là giá trị của áp suất động lực chất lỏng và chuyển vị pháp tuyến trên bề mặt tiếp xúc. $\{\delta\}$ và $\{f^e\}$ là chuyển vị và vector lực của chất điểm tiếp xúc.

u_i và v_i (f_{xi} và f_{yi}) là chuyển vị (lực) tại nút thứ i trên bề mặt tiếp xúc dọc theo trục tọa độ tổng quát X và Y . Tích phân được thực hiện trên mỗi phần tử trong bề mặt tiếp xúc rắn-lỏng. Tham số 'e' tham chiếu cho phần tử tiếp xúc giữa chất lỏng-thành bể. Viết lại u và v , chuyển vị dọc theo trục X và Y , rút ra dạng dao động của kết cấu:

$$\begin{cases} u = N_1 u_1 + N_2 u_2 \\ v = N_1 v_1 + N_2 v_2 \end{cases} \quad (3.38)$$

Với N_1 là hàm dạng kết cấu tại nút thứ i của phần tử tiếp xúc. Đối với chuyển vị dọc theo bề mặt phần tử, U_n , ta có:

$$U_n = u_n + v_n = \eta N_1 u_1 + \eta N_2 u_2 + \beta N_1 v_1 + \beta N_2 v_2 \quad (3.39)$$

η, β là các giá trị tuyệt đối của vectơ trục chuẩn trên biên của X và Y . (3.39) viết lại:

$$U_n = [\eta N_1 \quad \beta N_1 \quad \eta N_2 \quad \beta N_2] \{\delta\} = \{N_n^S\}^T \{\delta\} \quad (3.40)$$

Áp suất động lực chất lỏng được mô tả như hàm dạng của sóng chất lỏng theo dạng:

$$p = \{N^f\}^T \{p^e\} = \begin{bmatrix} N_1^f & N_2^f \end{bmatrix} \{p^e\} \quad (3.41)$$

Với N_i^f là hàm dạng của chất lỏng tại nút thứ i của phần tử tiếp xúc. Kết hợp các phương trình (3.37), (3.40) và (3.41) có được

$$\{f^e\} = \int_{s_e} \{N_n^s\} \{N^f\}^T ds \{p^e\} = \{Q^e\} \{p^e\} \quad (3.42)$$

Trong đó $[Q^e]$ và $\{p^e\}$ là ma trận trường cặp đôi và vector áp suất chất lỏng của phần tử trên mặt tiếp xúc chất lỏng-thành bể. Ma trận trường cặp đôi tổng thể $[Q]$ có được bằng cách tập hợp tất cả các $[Q^e]$ rời rạc. Từ (3.42), $[Q^e]$ được viết lại là:

$$\{Q\}^e = \int_{s_e} \{N_n^s\} \{N^f\}^T ds \quad (3.43)$$

Đối với các phần tử tiếp xúc ở Hình 3. 24, thì:

$$[Q]^e = \int_{s_e} \begin{bmatrix} \eta N_1^s N_1^f & \eta N_1^s N_2^f \\ \beta N_1^s N_1^f & \beta N_1^s N_2^f \\ \eta N_2^s N_1^f & \eta N_2^s N_2^f \\ \beta N_2^s N_1^f & \beta N_2^s N_2^f \end{bmatrix} ds \quad (3.44)$$

(3.44) dùng cho mô hình 2D. Đối với 3D, ma trận trường cặp đôi $[Q^e]$ như sau:

$$[Q]^e = \varpi \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} \alpha_1 N_1^s N_1^s N_1^f & \alpha_1 N_1^s N_1^s N_2^f & \alpha_1 N_1^s N_1^s N_3^f & \alpha_1 N_1^s N_1^s N_4^f \\ \beta_1 N_1^s N_1^s N_1^f & \beta_1 N_1^s N_1^s N_2^f & \beta_1 N_1^s N_1^s N_3^f & \beta_1 N_1^s N_1^s N_4^f \\ \gamma_1 N_1^s N_1^s N_1^f & \gamma_1 N_1^s N_1^s N_2^f & \gamma_1 N_1^s N_1^s N_3^f & \gamma_1 N_1^s N_1^s N_4^f \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \alpha_1 N_1^s N_1^s N_1^f & \alpha_1 N_1^s N_1^s N_2^f & \alpha_1 N_1^s N_1^s N_3^f & \alpha_1 N_1^s N_1^s N_4^f \\ \beta_1 N_1^s N_1^s N_1^f & \beta_1 N_1^s N_1^s N_2^f & \beta_1 N_1^s N_1^s N_3^f & \beta_1 N_1^s N_1^s N_4^f \\ \gamma_1 N_1^s N_1^s N_1^f & \gamma_1 N_1^s N_1^s N_2^f & \gamma_1 N_1^s N_1^s N_3^f & \gamma_1 N_1^s N_1^s N_4^f \end{bmatrix}_{24 \times 4} \times \|t_\xi \times t_\eta\| d\xi d\eta \quad (3.45)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned}
t_\xi &= \left\{ \frac{\partial x}{\partial \xi}, \frac{\partial y}{\partial \xi}, \frac{\partial z}{\partial \xi} \right\} \\
t_\eta &= \left\{ \frac{\partial x}{\partial \eta}, \frac{\partial y}{\partial \eta}, \frac{\partial z}{\partial \eta} \right\} \\
\varpi &= \frac{\int_{A_e} \|t_\xi \times t_\eta\| d\xi d\eta}{\sum_{i=1}^8 \int_{A_e} N_i^s N_i^s \|t_\xi \times t_\eta\| d\xi d\eta}
\end{aligned} \tag{3.46}$$

Trong đó N^f và N^s là hàm dạng của miền chất lỏng và miền kết cấu. Vì thế, α_1 , β_1 và γ_1 là cosines chỉ phương của nút trên phần tử tiếp xúc của bề ở biên thành ướt. Sau khi tính toán được $\mathbf{Q}$, thay vào (3.36) có được quan hệ giữa áp suất chất lỏng-lực tác dụng lên thành bể do sóng gây ra. Đây chính là sự khác nhau chính yếu của bể có thành cứng và mềm.

3.4.4 FEM mô phỏng miền chất lỏng có xét FSI

Trên miền chất lỏng, sự phân bố áp suất động lực học chất lỏng được điều khiển bởi phương trình áp suất được mô tả ở chương 2. Vì thể tích của bể chứa xem như hữu hạn nên vận tốc của áp lực là vô hạn. Giả thiết nước trong bể không nén được, bỏ qua độ nhớt, cơ chế chuyển động của sóng biên độ nhỏ không xoắn của chất lỏng được viết lại từ áp suất chất lỏng trong không gian 3D như sau:

$$\nabla^2 P(x, y, z, t) = 0 \tag{3.47}$$

Trong đó $P(x, y, z, t)$ là áp suất động của chất lỏng.

Áp suất động chất lỏng ở phương trình (3.47) hình thành là do kích thích động đất theo phương ngang và đứng gây ra cho thành bể và đáy bể. Cơ chế chuyển động của các biên này có liên quan đến áp suất động lực học chất lỏng bởi điều kiện biên. Đối với kích thích động đất, điều kiện biên thích hợp ở bề mặt tiếp xúc chất lỏng và thành bể chứa được điều khiển bởi:

$$\frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial n} = -\rho a_n(x, y, z, t) \tag{3.48}$$

Trong đó ρ là khối lượng riêng của chất lỏng, a_n là thành phần gia tốc trên biên dọc theo phương hướng ra ngoài n . Lưu ý rằng đối với thành bể chứa được xem như

tuyệt đối cứng thì giá trị a_n bằng gia tốc nền trong khi đối với bể chứa thành mềm thì giá trị này bằng tổng gia tốc nền và chuyển động tương đối giữa đất nền – thành bể.

Gia tốc tương đối của thành bể chứa phụ thuộc rất nhiều vào độ mềm của thành bể. Mặt khác, phương trình (3.48) cũng chính là sự khác biệt giữa ứng xử của bể chứa chất lỏng có thành cứng và bể chứa chất lỏng thành mềm. Để kể đến khối lượng sóng chất lỏng tác dụng lên mặt thoáng, điều kiện biên được viết lại là:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (3.49)$$

Trong đó z là phương đứng; còn g là gia tốc trọng trường.

Như đã đề cập tại mục 3.2, áp dụng điều kiện biên cho sóng có biên độ dao động bé sẽ dễ dàng tính toán được áp suất đối lưu. Tuy nhiên, với bể có biên độ dao động sóng lớn dưới tác dụng động đất kèm theo hiệu ứng xoáy trong bể, điều kiện biên của sóng đối lưu phức tạp hơn rất nhiều khi thiết lập mô hình cho cơ chế đối lưu. Đặc biệt với bể chất lỏng thấp, sự phi tuyến sóng dễ xảy ra, trong khi đó TLD thường sử dụng bể dạng thấp. Virella và cộng sự (2008) phân tích ảnh hưởng của sóng phi tuyến lên f_{tank} và phân bố p_w cho bể chứa chữ nhật có tỷ số h_f và bề rộng bể từ 0.2 đến 0.82 [145]. Các tác giả kết luận rằng sự phi tuyến của sóng chất lỏng ở mặt thoáng không phải là tác nhân chính gây ảnh hưởng đến áp suất sóng chất lỏng tác dụng lên thành bể cũng như là tần số riêng của sóng. Trong thực tế, điều kiện sóng chất lỏng tuyến tính thường được sử dụng nhằm đơn giản cho việc thiết kế. Khi bỏ qua khối lượng riêng của sóng lúc dao động, điều kiện biên mặt thoáng chất lỏng sẽ trở thành cơ chế dao động của thành phần xung cứng. Phương trình chủ đạo sẽ trở thành:

$$P\left(x, y, \frac{H_l}{2}, t\right) = 0 \quad (3.50)$$

Trong đó H_l là chiều cao của sóng chất lỏng.

Sử dụng sự rời rạc hoá phân tử và thay (3.47), (3.48) vào (3.49), thu được phương trình áp suất chất lỏng ở dạng ma trận như sau:

$$[G]\{\ddot{P}\} + [H]\{P\} = \{F\} \quad (3.51)$$

Trong đó $G_{ij} = \sum G_{ij}^e, H_{ij} = \sum H_{ij}^e$ và $F_i = \sum F_i^e$, Các hệ số G_{ij}^e, H_{ij}^e và F_i^e cho từng phần tử riêng rẽ được tính toán bằng các công thức trong phương trình (3.52):

$$\begin{aligned} G_{i,j}^e &= \frac{1}{g} \int_{A_e} N_i N_j dA \\ H_{i,j}^e &= \int_{V_e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV \\ F_i^e &= \int_{\bar{A}_e} N_i \frac{\partial P}{\partial n} d\bar{A} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Lực $\{F\}$ phụ thuộc vào điều kiện biên của mặt tiếp xúc chất lỏng-bể chứa và có thể tính toán được bằng cách sử dụng phương trình (3.48):

$$\{F\} = -\rho [Q]^T (\{\ddot{U}\} + \{\ddot{U}_g\}) \quad (3.53)$$

Trong (3.52) thì N_i là hàm dạng thứ i của phần tử chất lỏng, $\{\ddot{U}\}$ là vecto gia tốc của nút trên miền kết cấu, $\{\ddot{U}_g\}$ là vecto gia tốc nền gán vào hệ kết cấu và $[Q]$ là ma trận trường cặp đôi. A_e và V_e là diện tích và thể tích phần tử chất lỏng. $\bar{A}_e$ là diện tích bề mặt tiếp xúc của phần tử chất lỏng và kết cấu. $[H]$ và $[G]$ là hằng số trong suốt quá trình phân tích vecto lực, vecto áp lực sóng và các đạo hàm của nó là các biến số phụ thuộc. Tại mặt tương tác, p_w gán vào bề mặt kết cấu được xem như ngoại lực tác dụng lên thành bể. Phương trình tổng quan mô tả FSI viết lại như sau:

$$\begin{cases} [M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{f_1\} - [M]\{\ddot{U}_g\} + [Q]\{P\} = \{F_1\} + [Q]\{P\} \\ [G]\{\ddot{P}\} + [C']\{\dot{P}\} + [H]\{P\} = -\rho [Q]^T (\{\ddot{U}\} + \{\ddot{U}_g\}) = \{F_2\} - \rho [Q]^T \{\ddot{U}\} \end{cases} \quad (3.54)$$

Trong đó $[M]$, $[C]$ và $[K]$ lần lượt là các ma trận khối lượng, cản và độ cứng của bể chứa. $[C']$ là ma trận đặc trưng cho tính cản của chất lỏng, đại lượng này phụ thuộc vào độ nhớt của chất lỏng, khả năng hấp thụ của sóng, và độ nhám của biên tiếp xúc giữa chất lỏng và thành bể chứa. Và cuối cùng như đã đề cập ở mục 3.2, ma trận $[Q]$ trung chuyển áp suất chất lỏng vào thành bể và ngược lại gia tốc thành bể về miền chất lỏng. Phương pháp tích phân trực tiếp được sử dụng để tìm chuyển vị và áp suất của chất lỏng tại bước thời gian thứ $i+1$ khi đã có chuyển vị và áp lực động của chất

lỏng tại bước thời gian thứ i . Phương pháp Newmark được sử dụng để giải (3.54).

Trong phương pháp này $\{\dot{U}\}_{i+1}, \{U\}_{i+1}, \{\dot{P}\}_{i+1}$ và $\{P\}_{i+1}$ có thể được viết lại như sau:

$$\begin{aligned}
\{\dot{U}\}_{i+1} &= \{\dot{U}\}_{i+1}^p + \gamma \Delta t \{\ddot{U}\}_{i+1} \\
\{\dot{U}\}_{i+1}^p &= \{\dot{U}\}_i + (1-\gamma) \Delta t \{\ddot{U}\}_i \\
\{U\}_{i+1} &= \{U\}_{i+1}^p + \beta \Delta t^2 \{\ddot{U}\}_{i+1} \\
\{U\}_{i+1}^p &= \{U\}_i + \Delta t \{\dot{U}\}_i + (0.5-\beta) \Delta t^2 \{\ddot{U}\}_i \\
\{\dot{P}\}_{i+1} &= \{\dot{P}\}_{i+1}^p + \gamma \Delta t \{\ddot{P}\}_{i+1} \\
\{\dot{P}\}_{i+1}^p &= \{\dot{P}\}_i + (1-\gamma) \Delta t \{\ddot{P}\}_i \\
\{P\}_{i+1} &= \{P\}_{i+1}^p + \beta \Delta t^2 \{\ddot{P}\}_{i+1} \\
\{P\}_{i+1}^p &= \{P\}_i + \Delta t \{\dot{P}\}_i + (0.5-\beta) \Delta t^2 \{\ddot{P}\}_i
\end{aligned} \tag{3.55}$$

Trong đó γ và β là các tham số tích phân. Mũ số p đặc trưng cho các thông số ở bước thời gian $i+1$ có thể được tính bằng các thông số ở bước thời gian i . Phương trình chủ đạo tại bước thời gian $i+1$ được viết lại thành:

$$\begin{aligned}
&[M]\{\ddot{U}\}_{i+1} + [C]\{\dot{U}\}_{i+1} + (1+\alpha)[K]\{U\}_{i+1} = \{F_1\}_{i+1} + [Q]\{P\}_{i+1} + \alpha[K]\{U\}_i \\
&[G]\{\ddot{P}\}_{i+1} + [C']\{\dot{P}\}_{i+1} + (1+\alpha)[H]\{P\}_{i+1} = \{F_2\}_{i+1} - \rho[Q]^T \{\ddot{U}\}_{i+1} + \alpha[H]\{P\}_i
\end{aligned} \tag{3.56}$$

Trong đó α là tham số tích phân sử dụng trong hệ phương trình trường cặp đôi. Hệ phương trình này có thể được giải quyết theo phương pháp của Ghaemian và Gobara (1999) [146]. Phương trình chuyển động của hệ kết cấu xấp xỉ thành:

$$[M]\{\ddot{U}\}_{i+1}^* = \{F_i\}_{i+1} + [Q]\{P\}_{i+1}^n - [C]\{\dot{U}\}_{i+1}^p - (1+\alpha)[K]\{U\}_{i+1}^p + \alpha[K]\{U\}_i \tag{3.57}$$

Kết hợp hệ (3.57), (3.56) và (3.55) có được:

$$[M]\{\ddot{U}\}_{i+1} = [M]\{\ddot{U}\}_{i+1}^* + \beta \Delta t^2 [Q]\{\ddot{P}\}_{i+1} - \gamma \Delta t [C]\{\ddot{U}\}_{i+1} - (\alpha+1) \beta \Delta t^2 [K]\{\ddot{U}\}_i \tag{3.58}$$

Sử dụng đặc trưng đường chéo chính của ma trận khối lượng, phương trình (3.58) được hiệu chỉnh lại như sau:

$$[M]\{\ddot{U}\}_{i+1} = [M]\{\ddot{U}\}_{i+1}^* + \beta \Delta t^2 [Q]\{\ddot{P}\}_{i+1} \tag{3.59}$$

Thay (3.59) vào (3.56) dẫn đến:

$$\begin{aligned}
& \left([G] + \rho \beta \Delta t^2 [Q]^T [M]^{-1} [Q] \right) \{ \ddot{P} \}_{i+1} + [C] \{ \dot{P} \}_{i+1} + (1 + \alpha) [H] \{ P \}_{i+1} \\
& = \{ F_2 \}_i - \rho [Q]^T \{ \ddot{U} \}_{i+1}^* + \alpha [H] \{ P \}_i
\end{aligned} \tag{3.60}$$

Trong (3.60), về phải đã biết, giá trị áp suất tại thời điểm $i+1$ tính được và sử dụng để tìm tiếp giá trị chuyển vị tương ứng. Với $\alpha = 0$, phương pháp sẽ có điều kiện ổn định. Phương pháp giải Ghaemian và Gobara (1999) có thể được tóm tắt lại như sau:

- $\{ \ddot{U} \}_{i+1}^*$ tính được dựa vào chuyển vị, vận tốc và áp suất đã biết ở bước thời gian i . Hệ số mũ p ở phương trình (3.57) có thể được tính dựa vào thông số ở bước thời gian i trong phương trình (3.55)
- $\{ \ddot{U} \}_{i+1}^*$ được dùng để tính toán $\{ P \}_{i+1}$
- $\{ P \}_{i+1}$ thay vào phương trình (3.56) để tính toán $\{ U \}_{i+1}$ và các đạo hàm.

Trong luận án, giá trị 0.505 và 0.252 được sử dụng cho γ và β . Chi tiết hơn về phương pháp có thể tìm thấy ở nghiên cứu của Bathe (1996) và Zienkiewicz (1977). Sự chính xác của phương pháp phụ thuộc bước thời gian [147, 148]. Căn cứ các nghiên cứu của Ghaemmaghami (2010) thì bước thời gian 0.005 s phù hợp để tính cho bài toán FSI, và bước thời gian này cũng được sử dụng trong luận án [69].

3.4.5 Hệ số cản của sóng chất lỏng theo Rayleigh

Khi dao động tự do, cơ chế chuyển động sóng ở bề mặt chất lỏng hình thành do lực cản được tạo từ các tầng biên nhớt. Cơ bản hệ số cản phụ thuộc chiều cao mực nước trong bể, vận tốc động học chất lỏng và kích thước bể chứa. Từ nhận xét này, giá trị và phương pháp tính đặc trưng cản nhớt FSI cần được nghiên cứu thêm. Tuy nhiên do thiếu sót các thông số đầu vào liên quan nên, tương tự Ghaemmaghami và cộng sự (2010) [69, 70], luận án sử dụng hệ số cản nhớt C_f cổ điển của Rayleigh:

$$[C_f] = a[G] + b[H] \tag{3.61}$$

Với $[G]$ & $[H]$ có từ phương trình (3.51); a & b tính bằng phương pháp cản Reyleigh. Trong phương trình (3.61), hệ số a được tính dựa trên tần số cơ bản sóng chất lỏng, đặc trưng cho thành phần đối lưu của đáp ứng dao động; còn b được tính dựa vào tần

số cơ bản sóng nhưng đặc trưng cho thành phần xung cứng của bể. Ngoài ra, sóng chất lỏng dao động trong bể gây ra cản là do tính nhớt, theo các khảo sát của Mikishev và Dorozkin (1961) thì độ cản do sóng chưa đến 0.5% [149], theo ACI350.3-06 thì độ cản này của sóng từ 0.5 đến 1%. Trong FEM, hệ số cản Reyleigh thường tính toán với phương pháp tích phân trực tiếp từng bước. Hệ số cản tương ứng tỷ số cản 0.5-5% thường được áp dụng cho hệ kết cấu. Đối với ứng xử sóng chất lỏng thì hệ số cản 0.5% được sử dụng. Và các thông số này dùng trong luận án.

3.4.6 Ví dụ phân tích dao động bể chứa có xét FSI

Phân tích bể chứa chịu tải trọng động được thực hiện để thấy ảnh hưởng của vấn đề thành bể mềm có xét FSI đến đặc trưng riêng và đáp ứng dao động hai miền rắn-lỏng. Nội dung này là một phần nghiên cứu của Tường và cộng sự (2019) [14].

3.4.6.1 Tần số tự nhiên bể thành mềm khi xét FSI

Xét bốn bể chứa $T0.59 \times 0.03$ ($L = 0.59m$, $h_f = 0.03m$), $T1.0 \times 0.1$, $T3.0 \times 0.2$, và $T6.0 \times 0.5$. Ta có f_{tank} của bể tuyệt đối cứng từ lời giải giải tích theo phương trình (2.27) được đối chiếu với lời giải FEM, kết quả tại Bảng 3. 1.

Bảng 3. 1 Tần số tự nhiên các bể chứa chất lỏng không xét FSI

Tần số tự nhiên của bể f_{tank} (Hz)							
$T0.59 \times 0.03$		$T1.0 \times 0.1$		$T3.0 \times 0.2$		$T6.0 \times 0.5$	
Giải tích	FEM	Giải tích	FEM	Giải tích	FEM	Giải tích	FEM
0.458	0.458	0.316	0.314	0.236	0.233	0.186	0.185

Khi xét FSI với t_w thay đổi, f_{tank} thay đổi theo. Với bể càng cứng (dày) tần số càng tăng, đến một giới hạn thì tần số hội tụ. Từ nhận xét t_w và f_{tank} có mối quan hệ với nhau, luận án đề xuất hệ số nhằm phân biệt thành bể cứng và mềm và đặt tên là “hệ số tương quan” xác định bởi:

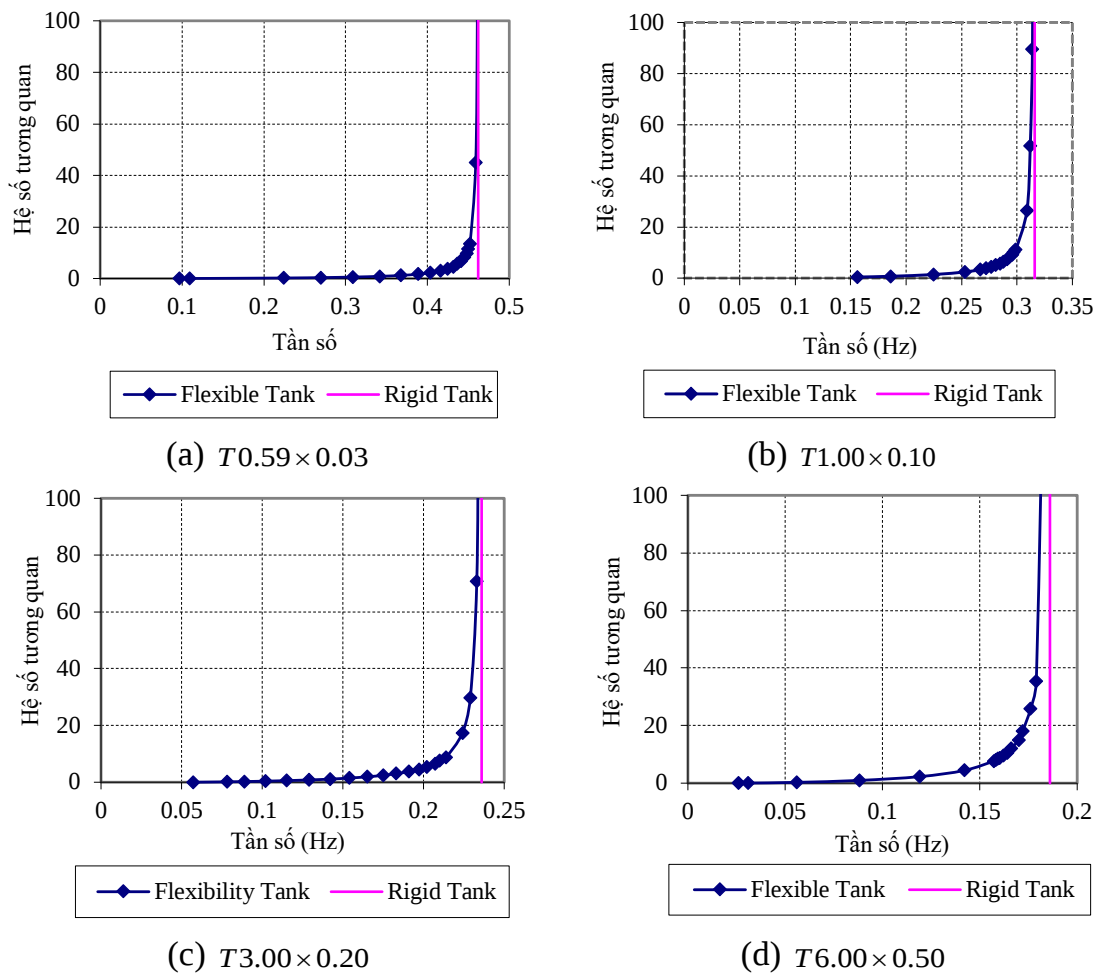
$$\psi = E_{\text{tank}} \times \frac{t_w^3}{h_f^3} \quad (3.62)$$

Trong đó E_{tank} là mô đun đàn hồi vật liệu của thành bể. Từ công thức (3.63), khi t_w đủ lớn dẫn đến $\psi \geq 100$ thì bể này được xem là cứng, chi tiết ở Bảng 3. 2.

Bảng 3. 2 Quan hệ tần số riêng của bể với hệ số ứng xử

Bể chứa chất lỏng	f_{tank} (Hz)			
	$T0.59 \times 0.03$	$T1.00 \times 0.10$	$T3.00 \times 0.20$	$T6.00 \times 0.50$
Thành bể tuyệt đối cứng	0.462	0.316	0.236	0.186
Thành bể mềm với $\psi \geq 100$	0.459	0.312	0.233	0.181
Sai số (%)	0.722	1.197	1.298	1.302

Quan hệ giữa ψ và tần số tự nhiên của bể được thiết lập ở đồ thị Hình 3. 25.



Hình 3. 25 Quan hệ giữa hệ số tương quan và tần số tự nhiên

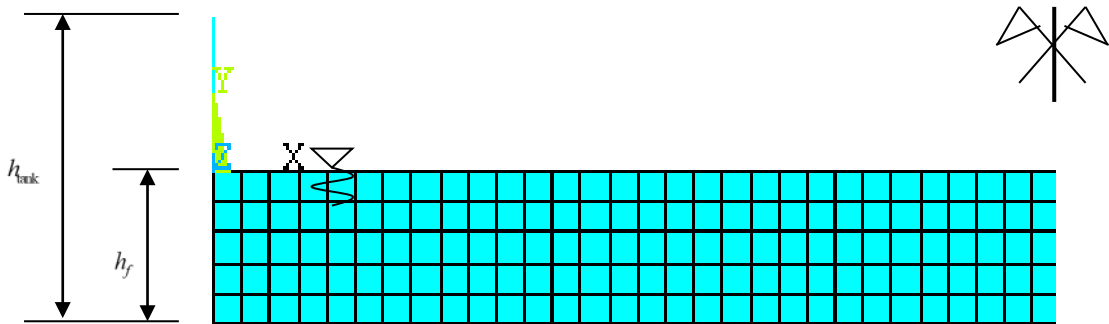
Hình 3. 25 cho thấy khi $\psi > 100$, f_{tank} ở lời giải FEM hội tụ giá trị bể tuyệt đối cứng. Vì vậy $\psi \approx 100$ được đề xuất để phân biệt bể thành mềm & cứng [14]. Vì t_w ảnh hưởng f_{tank} nên khi thiết kế TLD cần lưu ý, nếu TLD đủ mềm thì f_{TLD} thay đổi và mất hiệu quả giảm chấn.

3.4.6.2 Đáp ứng dao động miền chất lỏng khi xét FSI

Khảo sát bể kích thước $6m \times 1m \times 0.5m \times t_w$ ($L \times h_{\text{tank}} \times h_f \times t_w$) dưới tác dụng của dao động nền điều hòa $x = A_0 \times \sin(\omega t)$ với $A_0 = 0.05m$. f_{tank} theo giải tích là:

$$f_{\text{tank}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \times \tanh\left(\frac{h}{L}\right)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi \times 9.81}{6} \times \tanh\left(\frac{0.5}{6}\right)} = 0.18582(\text{Hz})$$

Tần số tính bằng phương pháp giải tích được so sánh lời giải FEM với sự hỗ trợ của ANSYS (Hình 3. 26), kết quả tính toán được thể hiện ở Bảng 3. 3.

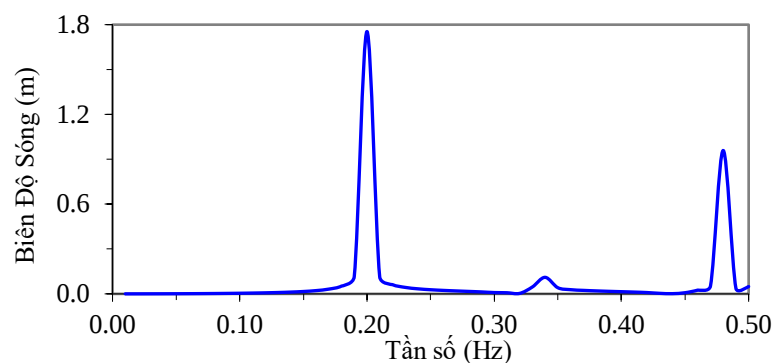


Hình 3. 26 Mô phỏng bể chất lỏng $6m \times 1m \times 0.5m \times t_w$ với ANSYS

Bảng 3. 3 So sánh độ chính xác của FEM khi phân tích tần số bể chứa

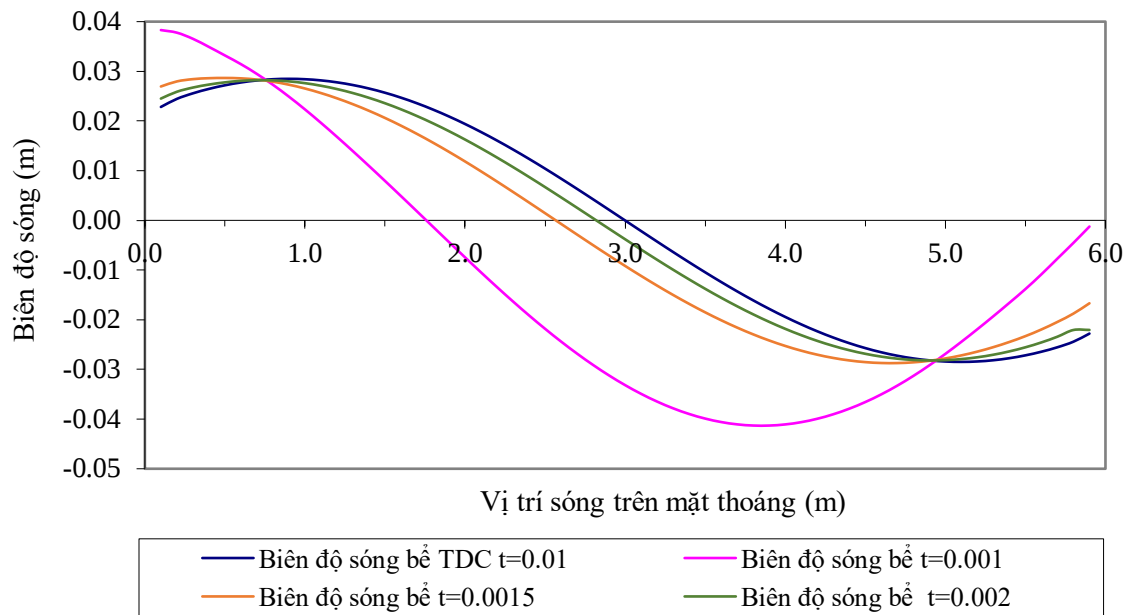
Tần số bể chứa (Hz)		
FEM ($t_w = 0.01m$)	Tuyệt đối cứng ($t_w \rightarrow \infty$)	Sai số
0.18250	0.18582	0.1%

Phân tích trên miền tần số được thực hiện để thấy đáp ứng dao động sóng trong bể chứa tương ứng với tần số ngoại lực kích thích, kết quả ở Hình 3. 27. Đồ thị chỉ ra biên độ sóng chất lỏng η cực đại khi tần số kích thích ngoại lực bằng 0.2 Hz.

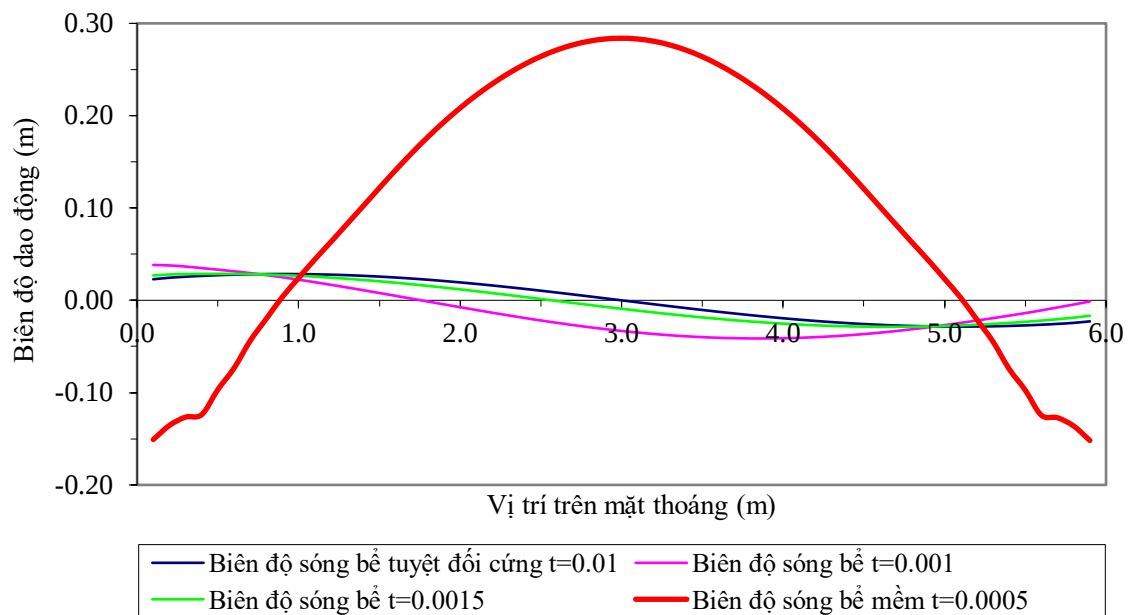


Hình 3. 27 Phân tích đáp ứng biên độ sóng trên miền tần số

Sau đó, tiến hành khảo sát ảnh hưởng t_w có xét FSI đến η cực đại tại mặt thoáng khi bể dao động điều hòa $x = 0.05m \cdot \sin(0.5 \cdot \pi)t$. Kết quả ở Hình 3. 28 và Hình 3. 29.



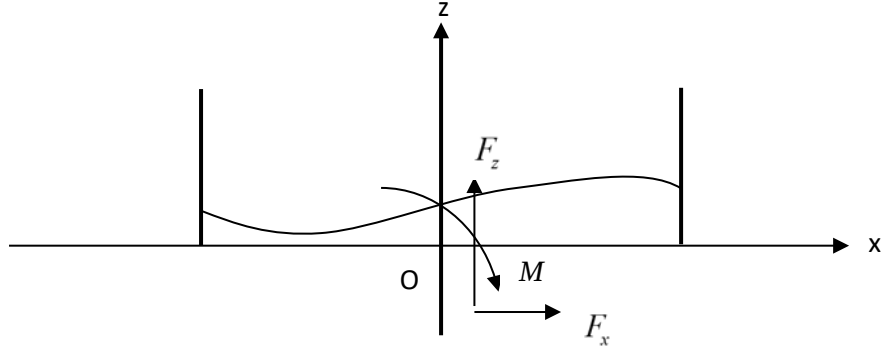
Hình 3. 28 Đáp ứng biên độ lớn nhất của sóng khi thành bể dày



Hình 3. 29 Ảnh hưởng độ dày thành bể đến biên độ dao động sóng

Từ đồ thị ở Hình 3. 28 và Hình 3. 29, có thể thấy rằng đối với các bể chứa có độ dày đủ cứng thì biên độ dao động sóng η ở mặt thoáng gần như không có sự khác nhau đáng kể. Tuy nhiên khi thành bể đủ mềm thì η thay đổi đáng kể.

3.4.6.3 Đáp ứng dao động miền kết cấu thành bể khi xét FSI



Hình 3. 30 Nội lực trong bể do dao động sóng chất lỏng gây ra

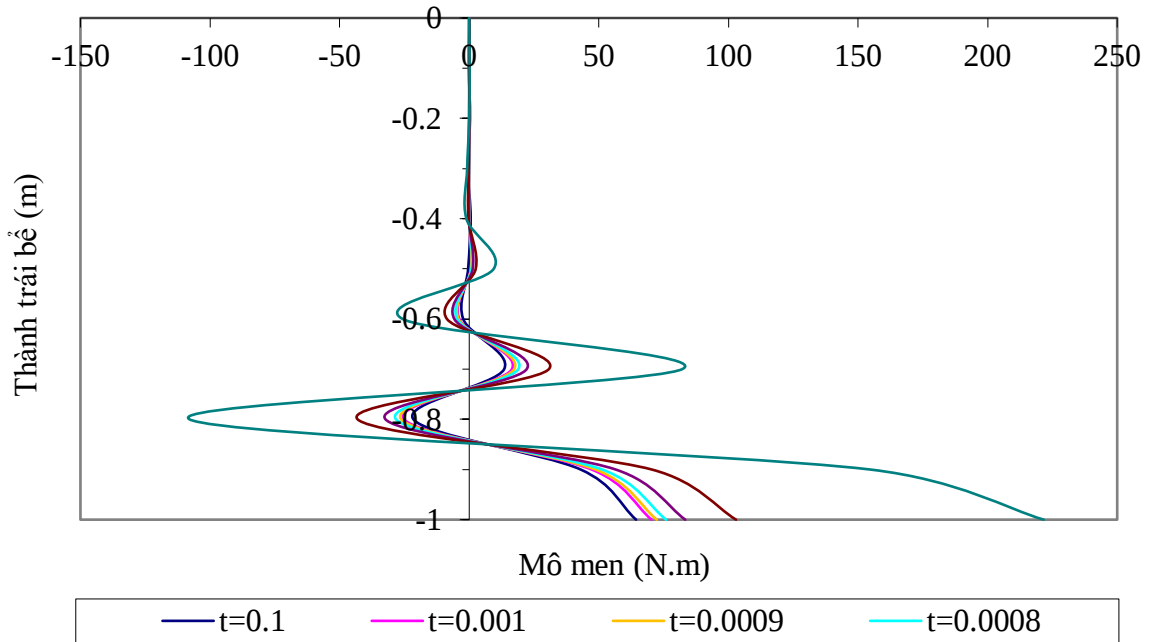
Theo chương 2, áp suất động của sóng chất lỏng tác dụng lên thành bể là:

$$p_w = \rho X_0 \omega^2 \sin \omega t \left\{ \frac{L}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\cosh \left((2n+1) \frac{\pi(z+h)}{L} \right)}{\pi^2 (2n+1)^2 \cosh \left((2n+1) \frac{\pi h}{L} \right)} \frac{4L\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \right\} \quad (3.64)$$

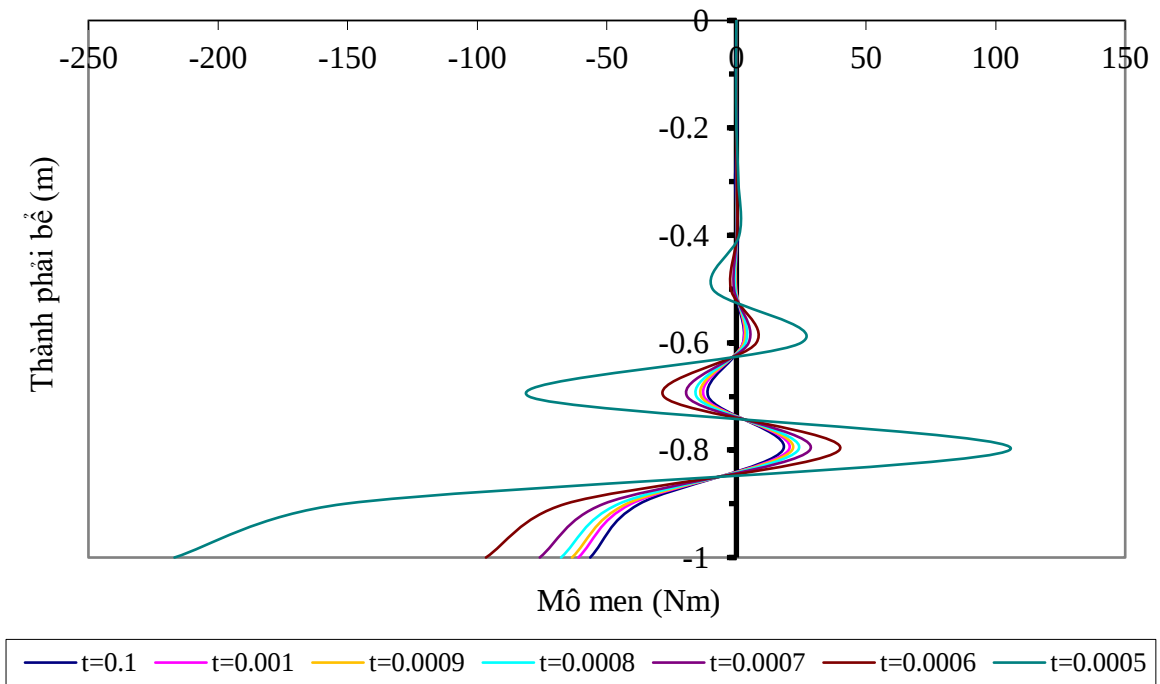
Mô men được tính bằng cách lấy tích phân cho áp suất chất lỏng dọc chiều cao bể:

$$M_z = -2 \int_{-h}^0 p_w z dz \quad (3.65)$$

Kết quả phân tích mô men được vẽ lại qua đồ thị hình (3.14) và (3.15).



Hình 3. 31 Ảnh hưởng của bể dày đến độ lớn mô men thành bể trái



Hình 3. 32 Ảnh hưởng của bề dày đến độ lớn mô men thành phải bể

Đồ thị ở Hình 3. 31 và Hình 3. 32 cho thấy, khi thành bể tuyệt đối cứng thì độ lớn của mô men thành bể gần bằng nhau và mô men lớn nhất ở thành bể trái xấp xỉ $65Nm$ và mô men lớn nhất ở thành bể phải $-56Nm$. Tuy nhiên khi t_w đủ mỏng thì mô men thành bể tăng lên đáng kể, cụ thể khi t_w giảm một nửa từ $1mm \rightarrow 0.5mm$ thì mô men nội lực thành bể trái tăng từ $65Nm \rightarrow 225Nm$.

3.4.6.4 Nhận xét

Trong mục này, hệ số tương quan ψ được đề xuất sử dụng để xác định phạm vi áp dụng của công thức giải tích đã phân tích ở chương 2 và thiết lập mối quan hệ giữa bể được xem là tuyệt đối cứng & mềm.

Qua các khảo sát và phân tích trên, có thể khẳng định thành bể mềm khi xét FSI đóng vai trò quan trọng trong phân tích đáp ứng dao động bể chứa chất lỏng, không chỉ ảnh hưởng đến miền chất lỏng thông qua đáp ứng dao động sóng (p_w và η) mà còn ảnh hưởng đến miền kết cấu thông qua nội lực xuất hiện trong thành bể. Đặc biệt, khi FSI được kể đến trong các kết cấu thành bể đủ mỏng thì f_{tank} thay đổi,

điều này quan trọng khi thiết kế TLD vì nguyên lý hoạt động TLD dựa vào tần số [14].

3.5 FVM/FEM trong phân tích bể chứa chất lỏng chịu động đất

Cơ sở lý thuyết của FVM/FEM được trình bày tại chương 4 mục 4.3, hoặc chi tiết ở nghiên cứu của Malekghashemi và cộng sự (2015) [35]. Tại đây, bể chứa chất lỏng chịu động đất được phân tích bằng cách ứng dụng FVM/FEM. Trong đó, nhấn mạnh f_{tank} và p_w . Kết quả tính toán từ đây được đối chiếu với nghiên cứu của Hashemi và cộng sự (2013) [73, 74] và được so sánh với các Tiêu Chuẩn thiết kế trên thế giới đã được trình bày ở mục 3.3. Mục đích của phần này nhằm đánh giá độ chính xác của FVM/FEM khi phân tích đa trường và lấy đây làm nền tảng để tính toán đáp ứng dao động của kết cấu có sử dụng TLD giảm chấn ở chương 4.

Ví dụ 4b: Khảo sát lại bể chứa 20x50x9.0m ở ví dụ 4a, mục 3.3.4 bằng FVM/FEM với sự hỗ trợ của ANSYS; bể chứa có t_w thay đổi từ mỏng (0.01 m) đến dày (1.00 m); module Workbench kết hợp Mechanical và CFX được dùng để tính toán hai vấn đề: (1) f_{tank} khi có xét FSI và khi không xét FSI; (2) p_w tác dụng lên thành bể.

3.5.1 Tần số tự nhiên bể chứa

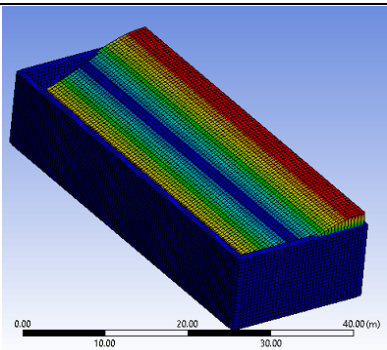
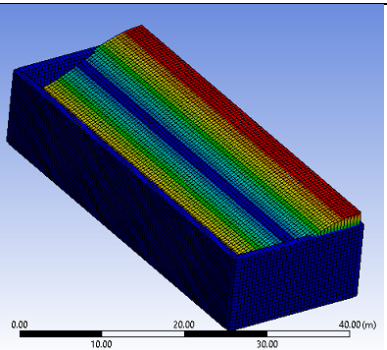
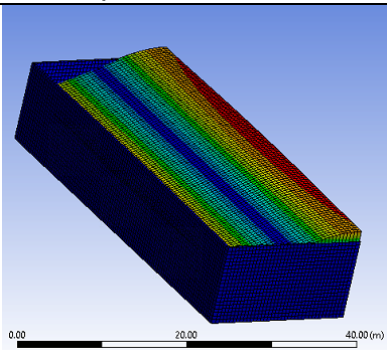
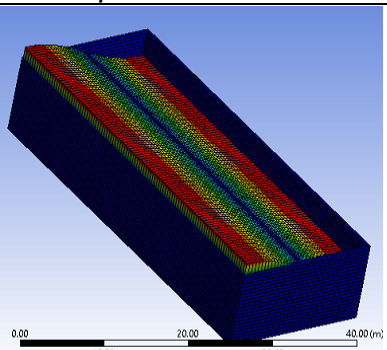
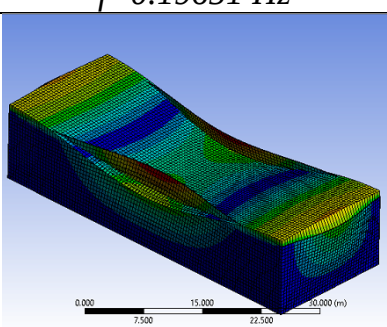
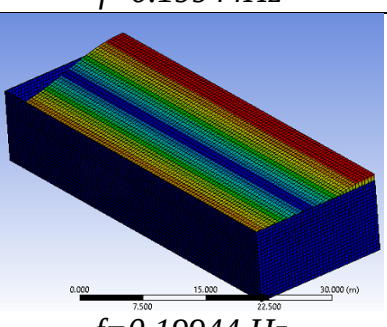
Khi ứng dụng FEM để phân tích f_{tank} có xét FSI thì giá trị khác nhau với t_w khác nhau, chi tiết tại Bảng 3. 4.

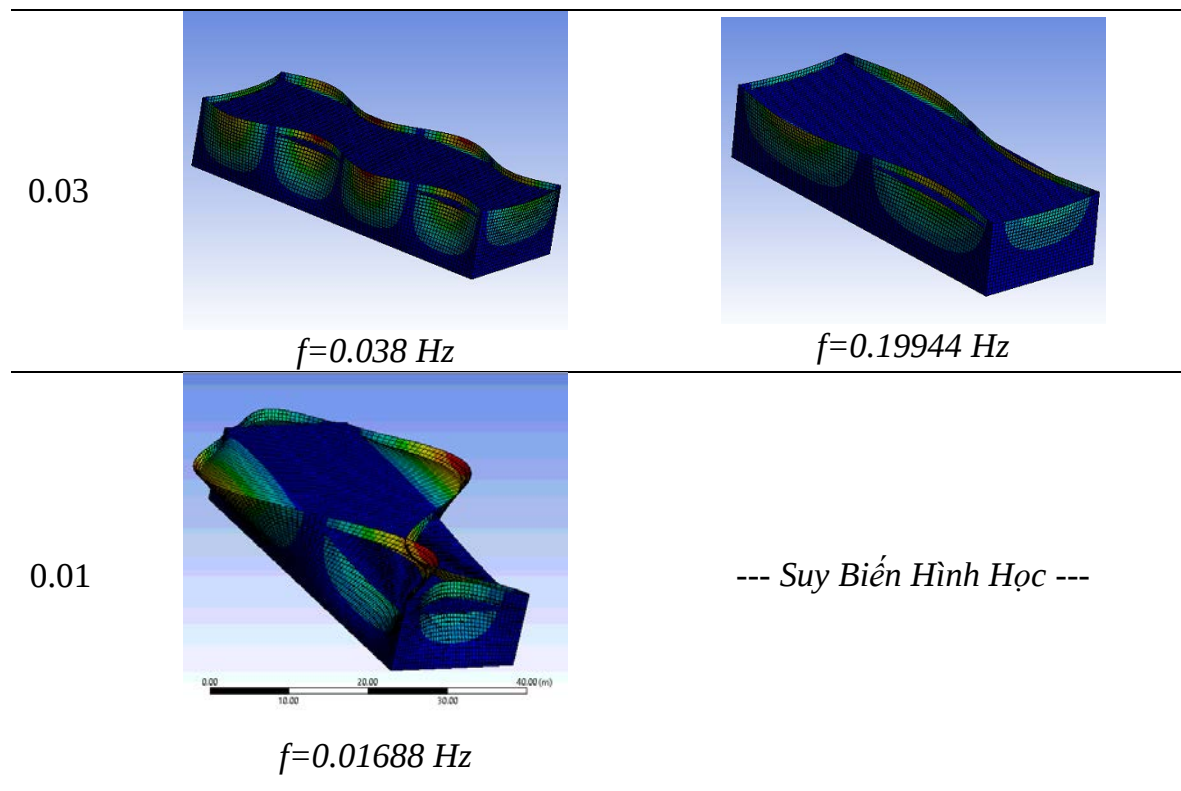
Bảng 3. 4 Ảnh hưởng của độ dày thành bể đến tần số riêng của bể

STT	t_w (m)	Tần số bể khi xét FSI (Hz)	Tần số bể chứa không xét FSI (Hz)
1	1.00	0.19936	0.19944
2	0.30	0.19651	0.19944
3	0.20	0.18921	0.19944
4	0.10	0.14003	0.19944
5	0.05	7.87e-2	0.19944
6	0.03	3.79e-2	0.19944
7	0.01	0.01688	0.09063

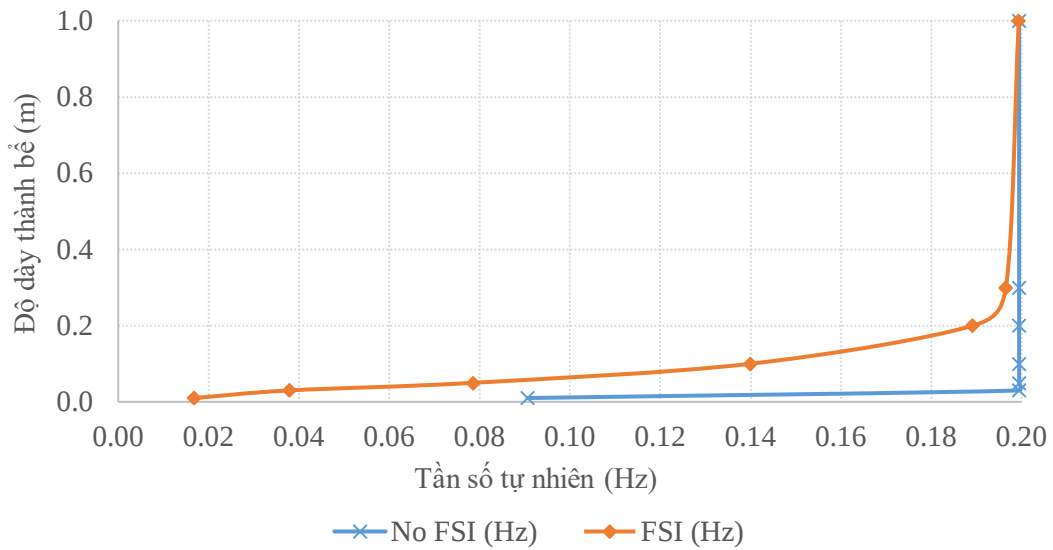
Hình dạng mode của bể chứa tương ứng với các chiều dày thành bể t_w được thể hiện ở Bảng 3. 5 trong trường hợp có xét FSI và không xét FSI.

Bảng 3. 5 Tần số và hàm dạng bể chứa khi có xét và không xét FSI

Tần Số Tự Nhiên Bể Chứa Chất Lỏng (Hz)		
t_w (m)	Có xét FSI	Không xét FSI
1.0	 $f=0.19936 \text{ Hz}$	 $f=0.19944 \text{ Hz}$
0.30	 $f=0.19651 \text{ Hz}$	 $f=0.19944 \text{ Hz}$
0.10	 $f=0.14003 \text{ Hz}$	 $f=0.19944 \text{ Hz}$



Bảng 3. 5 thể hiện quan hệ giữa t_w và f_{tank} , trong trường hợp có và không xét FSI với $h_f = 9.0m$. Khi không xét FSI, f_{tank} không đổi cho đến lúc thành bể bị suy biến hình học tại độ dày $t_w = 0.1m$. Khi xét FSI, mỗi t_w khác nhau sẽ có f_{tank} khác nhau. Đây là điểm mấu chốt trong việc giải phương trình trường cặp đôi (3.54). Đồ thị Hình 3. 33 dưới đây thể hiện mối quan hệ ở Bảng 3. 5 giữa t_w và f_{tank} .

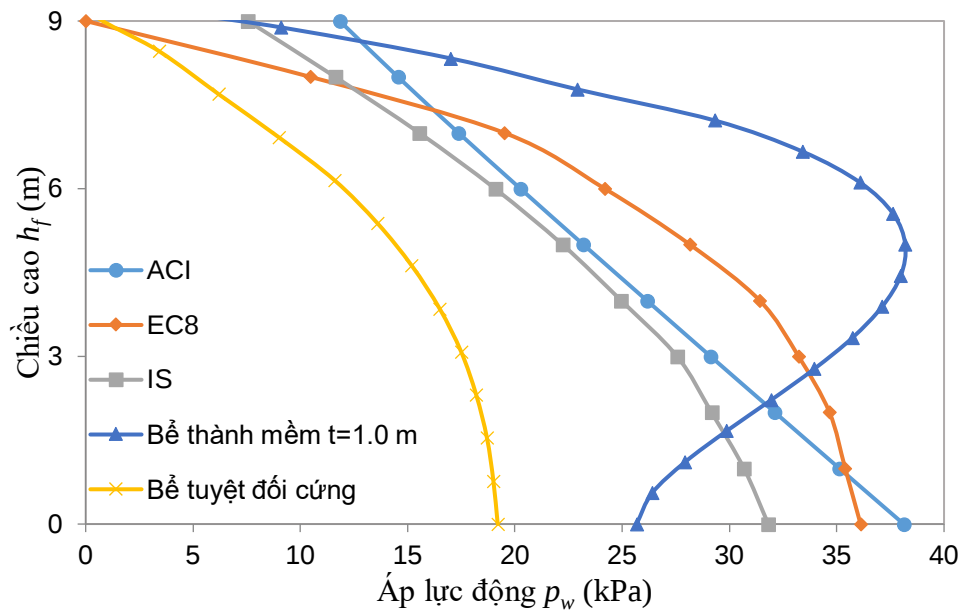


Hình 3. 33 Ảnh hưởng của việc xét tương tác FSI đến tần số riêng của bể

Hình 3. 33 cho thấy trong thực tế t_w ảnh hưởng rất lớn đến f_{tank} , f_{tank} có xét FSI sẽ nhỏ hơn f_{tank} khi không xét FSI đối với bể có thành mềm. Nhưng khi thành bể đủ dày, FSI sẽ không ảnh hưởng đến f_{tank} , đây cũng là khẳng định của Xing và cộng sự (1997, 2007) [60, 65]. Như vậy có thể thấy, FSI rất quan trọng khi thiết kế bể nhưng lại thường bị bỏ qua bằng giả thiết thành bể tuyệt đối cứng. Sự thay đổi f_{tank} sẽ ảnh hưởng khả năng làm việc TLD khi bể chứa đóng vai trò thiết bị giảm chấn dạng chất lỏng, đây là điểm cần lưu ý khi thiết kế TLD có thể tích lớn cho các công trình siêu cao tầng. Ngoài ra, đồ thị Hình 3. 33 cho thấy khi t_w xấp xỉ 1.0 m thì f_{tank} có xét FSI và không xét là như nhau, $t_w \approx 1.0m$ có thể được dùng để phân biệt bể thành mềm và thành cứng. Mục tiếp theo sẽ khảo sát áp lực động tác dụng lên bể p_w với $t_w \approx 1.0m$.

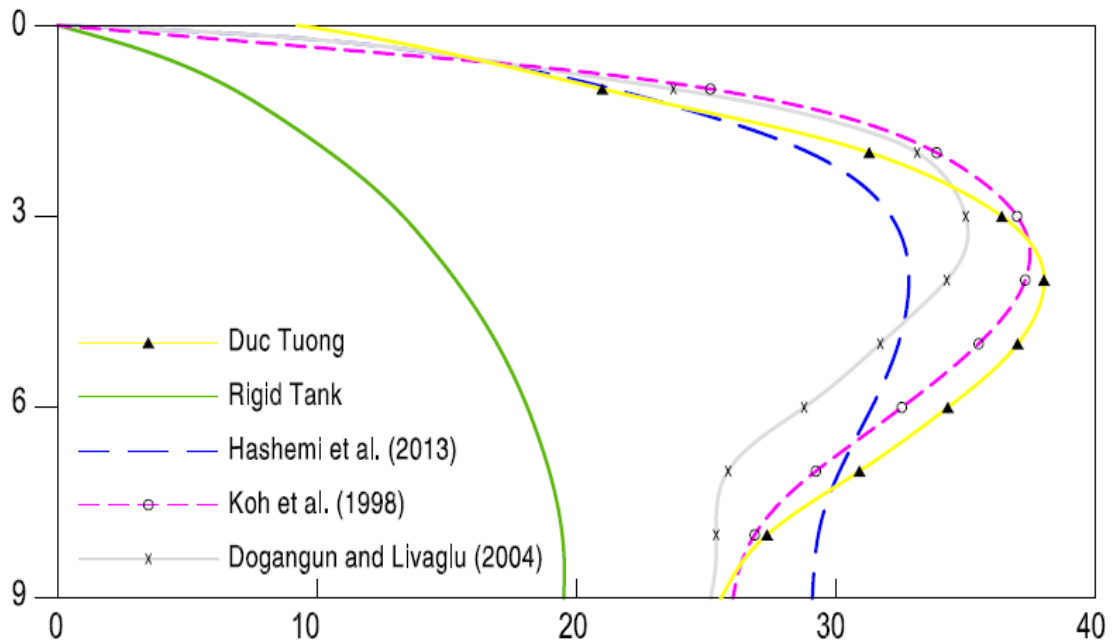
3.5.2 Áp lực động của sóng chất lỏng lên thành bể

Để đánh giá phương pháp FVM/FEM, mục này so sánh đáp ứng bể chịu động đất Elcentro có xét FSI, áp lực động của sóng được tính toán bằng FVM/FEM sau đó so sánh với các Tiêu Chuẩn Xây Dựng đã trình bày ở mục 3.3 thông qua đồ thị Hình 3. 34; ngoài ra còn đối chiếu với các nghiên cứu đi trước tại đồ thị Hình 3. 35.



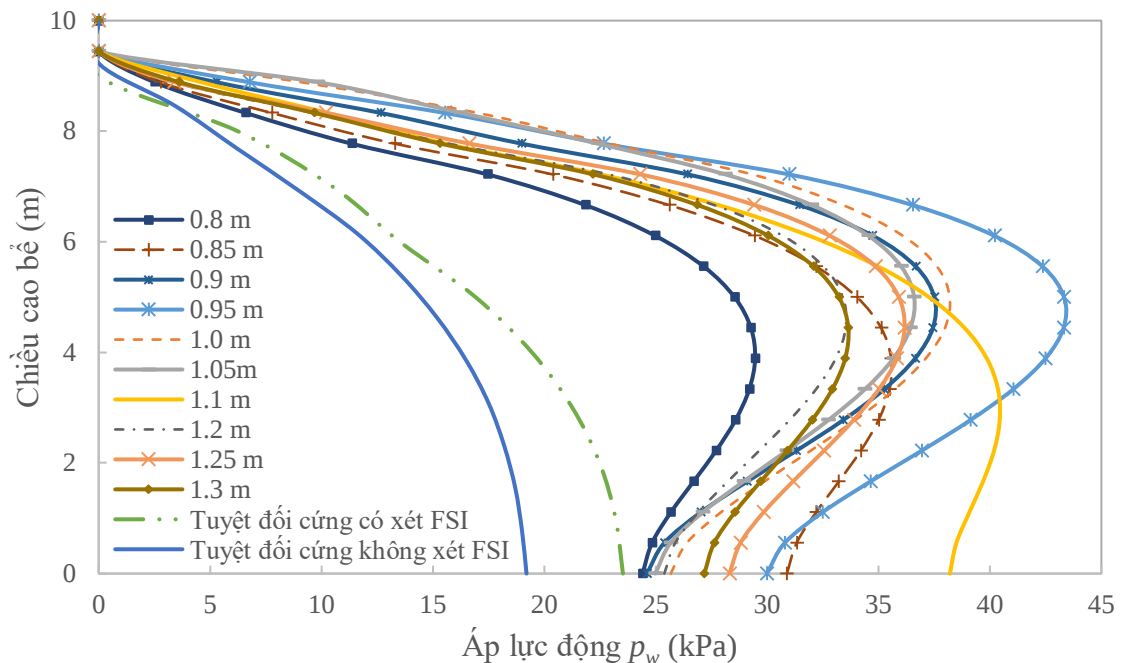
Hình 3. 34 Ảnh hưởng FSI đến p_w tác dụng lên thành bể

Hình 3. 34 cho thấy p_w tính theo các Tiêu Chuẩn phổ biến nhỏ hơn kết quả có được từ luận án (38.19 kPa), trừ ACI (38.12 kPa). Đặc biệt vấn đề FSI hai chiều giữa thành bể-sóng, chưa được tiêu chuẩn nào xem xét. Đây là một trong những kiến nghị khác của luận án đối với các Tiêu Chuẩn thiết kế. Thêm vào đó, các Tiêu Chuẩn cũng chưa dự đoán đúng vị trí lớn nhất của áp lực động phân bố dọc theo thành bể.



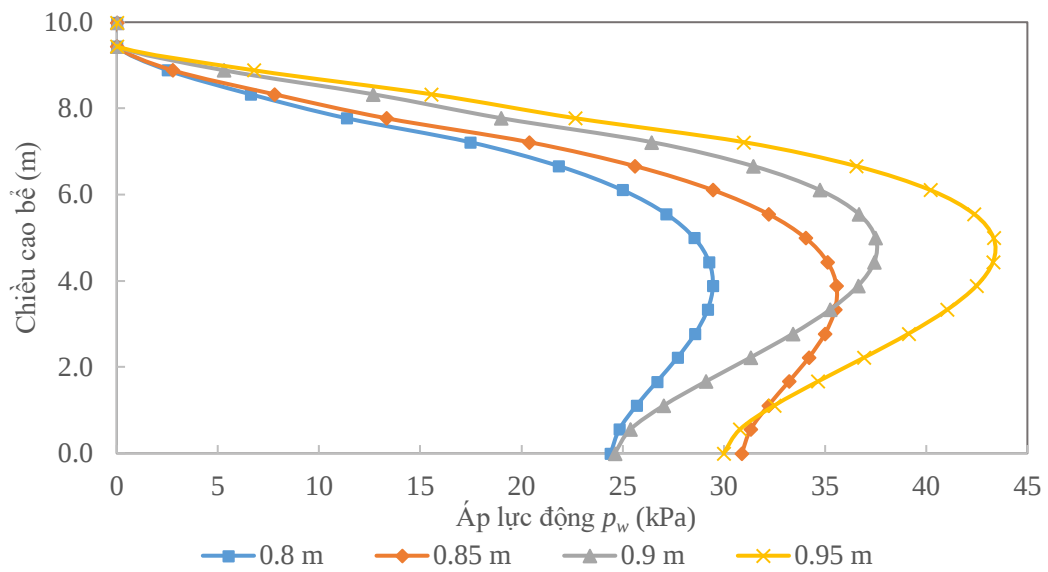
Hình 3. 35 So sánh kết quả áp lực lên thành bể với Hashemi (2013) [74]

Hình 3. 35 cho thấy sự hợp lý của FVM/FEM trong tính toán p_w so với các nghiên cứu đi trước. Ngoài ra, để xét ảnh hưởng của t_w đến p_w , luận án tiến hành khảo sát bể với t_w thay đổi từ 0.75 m đến 1.5 m có xét FSI, kết quả thể hiện ở Hình 3. 36.

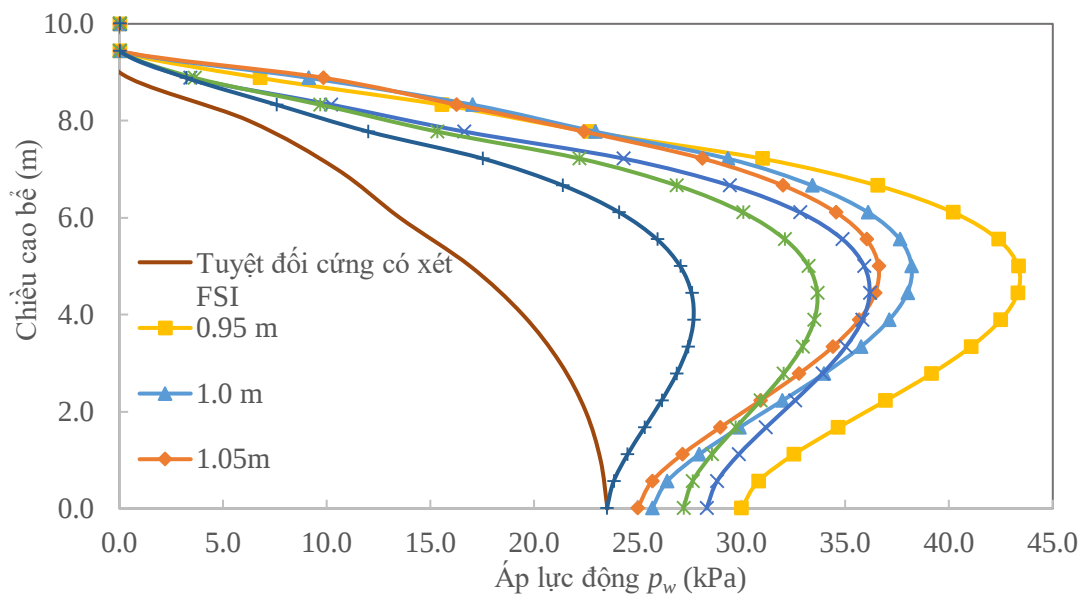


Hình 3. 36 Ảnh hưởng độ dày thành bể đến áp lực động khi có xét FSI

Từ đồ thị ở Hình 3. 36 thấy được rằng: Khi bể chịu động đất, p_w lên thành bể tuyệt đối cứng không xét FSI là 19.2 kPa; xấp xỉ với p_w có xét FSI là 23.5 kPa. Giá trị này chưa đến $\frac{1}{2}$ so với p_w lớn nhất của bể chứa có thành dày 0.95m có xét FSI (43.3 kPa), chứng tỏ có sự chênh lệch rất lớn giữa các giá trị p_w tác dụng lên bể chứa. Sự chênh lệch này phụ thuộc vào độ cứng của bể; đồ thị Hình 3. 37, Hình 3. 38 lần lượt thể hiện độ lớn p_w lên bể thành mềm (<1.0 m) và cứng (≥ 1.0 m).



Hình 3. 37 Áp lực động của sóng lên bề thành mềm có xét FSI



Hình 3. 38 Áp lực động của sóng lên bề thành cứng có xét FSI

Từ Hình 3. 37 và Hình 3. 38, có thể thấy tồn tại một “ngưỡng” độ dày t_w nhất định để phân biệt thành bể là cứng hay mềm. Hình 3. 37 cho thấy khi t_w nhỏ hơn “ngưỡng” độ dày này thì p_w giảm nếu độ dày bể giảm. Hình 3. 38 cho thấy ngược lại, khi t_w vượt qua “ngưỡng” độ dày này, p_w giảm nếu độ dày bể tăng.

3.6 Tóm tắt chương 3

Trong chương 3, mối quan hệ giữa dao động sóng chất lỏng và thành bể mềm có xét FSI đã được thiết lập bằng lời giải giải tích và FEM. Qua đó chỉ ra sự khác nhau chính yếu của mô hình toán giữa bể có thành tuyệt đối cứng và bể thành mềm. Các thông số đặc trưng chính của bể trong trường hợp thành bể t_w mềm được phân tích là f_{tank} , η và p_w . Các đặc trưng khác của bể đều được tính toán thông qua các thông số này như Sun (1991) đã trình bày [150].

Việc phân tích, thiết kế bể chứa chất lỏng thành mềm bằng các Tiêu Chuẩn khác nhau được làm rõ qua ví dụ cụ thể, kết quả thể hiện ở đồ thị Hình 3. 34. Không chỉ f_{tank} bị ảnh hưởng bởi t_w thành mềm có xét FSI mà p_w cũng thay đổi khi t_w thay đổi, như ở đồ thị Hình 3. 36. Đây cũng là khẳng định trong nghiên cứu của Zhou và Liu (2006) tại [151], Zhang và Wan (2018) [8] hoặc Kabiri và cộng sự (2019) [115], theo đó các tác giả khẳng định p_w của sóng tác dụng lên bể chứa thành mềm chịu tải trọng động cần phải kể đến ảnh hưởng của f_{tank} . Ngoài ra, giá trị p_w sẽ giảm khi thành bể quá cứng hoặc quá mềm như ở đồ thị Hình 3. 37 và Hình 3. 38. Ngoài ra, trong vùng giao thoa giữa t_w mềm và cứng sẽ tồn tại p_w lớn nhất, đây là hướng mở cho các nghiên cứu tiếp theo trong tương lai. Nhận xét này có tính mới so với nghiên cứu đi trước chỉ dừng lại ở khẳng định p_w giảm khi độ cứng thành bể tăng [152].

Độ cứng (hoặc mềm) của bể chứa phụ thuộc hai yếu tố: (1) là độ dày t_w và (2) là module đàn hồi của vật liệu thành bể. Tuy nhiên đối với các vật liệu thường dùng trong thực tế, (bê tông, thép ...) mỗi loại có module đàn hồi gần như không đổi nên luận án không xét nhiều đến vật liệu cấu tạo bể mà chỉ tập trung t_w . Các ví dụ số cho thấy sự ảnh hưởng rất lớn của t_w dạng mềm (mỏng) đến f_{tank} khi xét FSI, kết quả thể hiện ở đồ thị Hình 3. 25 và Hình 3. 33 hoặc Bảng 3. 5. Điều này cũng đã được khẳng định bởi Zhang và cộng sự (2018), các tác giả đã chỉ ra rằng với cùng kích thước bể nhưng nếu các thành bể có độ cứng khác nhau thì f_{tank} cũng sẽ khác nhau [8]. Mở rộng hơn, chính sự thay đổi f_{tank} sẽ làm cho bể chứa chất lỏng khi đóng vai trò như

TLD không thể kích hoạt. Đây là điểm lưu ý với các kỹ sư thiết kế bể chứa nói chung và thiết kế TLD nói riêng.

Từ những nhận xét và kết luận trên, có thể thấy rằng hiện tượng FSI không thể bỏ qua bằng cách xem thành bể là tuyệt đối cứng. Thay vào đó, cần phải xem xét t_w và f_{tank} trong việc thiết kế bể chứa chất lỏng chịu tải trọng động nói chung và TLD nói riêng. Kết quả tính toán trong chương này là nền tảng để áp dụng cho việc phân tích đáp ứng của kết cấu cần điều khiển dao động khi có và không sử dụng thiết bị giảm chấn chất lỏng ở chương 4. Ngoài ra, trong chương 3 đã đề xuất hệ số tương quan ψ giúp phân biệt hai loại bể mềm & cứng. Đây cũng sẽ là hướng mở có thể nghiên cứu thêm trong tương lai.

CHƯƠNG 4

ĐÁP ỨNG DAO ĐỘNG KHUNG VỚI TLD CÓ XÉT TƯƠNG TÁC CHẤT LỎNG - THÀNH BỀ

4.1 Giới thiệu chung

Ở Việt Nam hiện nay, các nghiên cứu về thiết bị giảm chấn bị động TMD, TLD có thể kể đến các công trình của Anh và cộng sự (2007-2016) [[153-158](#)] hoặc Phước và cộng sự (2018, 2019) [[41](#), [42](#)]. Khi bể nước đóng vai trò là thiết bị giảm chấn, TLD được gắn vào kết cấu để thay đổi đặc trưng động lực học và sau đó tiêu tán năng lượng dao động của cơ hệ.

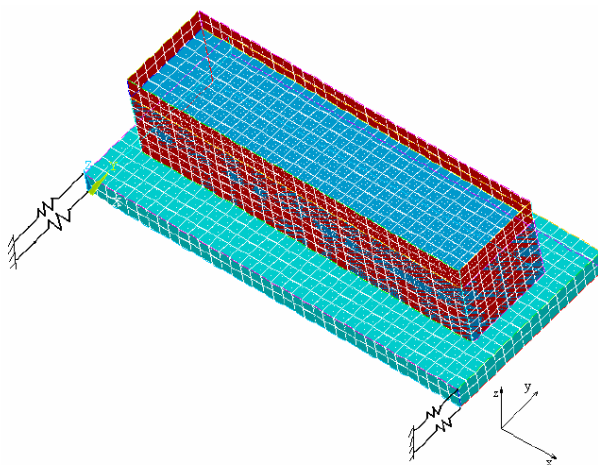
Trong chương này thiết bị giảm chấn dạng chất lỏng đa tần MTLD được thiết kế để giảm chấn cho kết cấu, quy trình thiết kế-kiểm tra thiết bị được đề xuất dựa trên nền tảng kết hợp giữa hai phương pháp khối lượng thu gọn-FVM/FEM. Ngoài ra, một trong những điểm nổi bật của chương là xem xét ứng xử động của kết cấu có sử dụng TLD với t_w thay đổi và có xét FSI. Đây là vấn đề quan trọng, vì hiện nay các TLD có thể tích ngày càng lớn nên FSI với bể thành mềm không thể bỏ qua khi xem xét sự làm việc của thiết bị. Từ những nhận xét trên, chương 4 được bố cục như sau:

- Mục 4.1 giới thiệu tổng quan.
- Mục 4.2 trình bày các nghiên cứu thực hiện gần đây trong việc sử dụng TLD để giảm chấn và có xét FSI.
- Mục 4.3 trình bày phương pháp FVM/FEM mô phỏng cơ hệ thành hai miền riêng biệt và giải quyết điều kiện biên tại mặt tương tác chất lỏng-thành bể.
- Mục 4.4 đề xuất quy trình thiết kế MTLD.
- Mục 4.5 phân tích khả năng kháng chấn của MTLD cho công trình dưới tác dụng của dao động điều hoà, tải trọng nền kích thích và dao động tự do kết hợp so sánh với thí nghiệm trên bàn lắc.
- Mục 4.6 phân tích hiệu quả giảm chấn TLD khi công trình chịu động đất và ảnh hưởng FSI lên TLD thành mềm với t_w từ mỏng (mềm) đến dày (cứng).

4.2 Các nghiên cứu về giảm chấn kết cấu sử dụng TLD có xét FSI

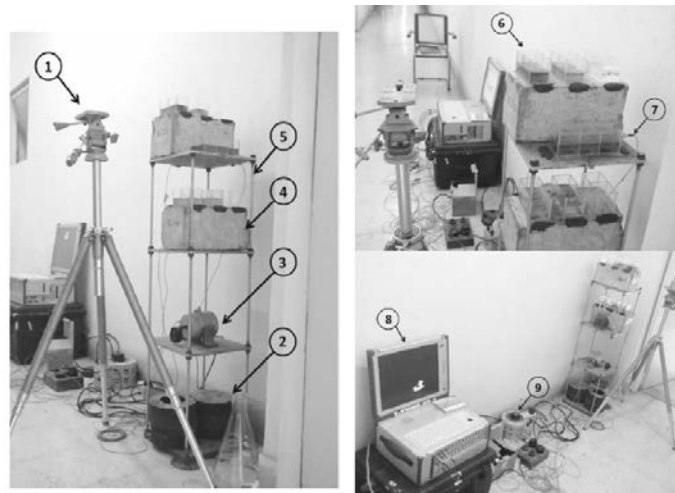
Một trong những nghiên cứu đầu tiên về khả năng điều khiển dao động của TLD có xét FSI thực hiện bởi Yamamoto và Kawahara (1999), các tác giả phân tích ứng xử động của tháp truyền hình Yokohama Marine với TLD. Phương pháp phân tích dao động sóng là Arbitrary Lagrange-Eulerian ALE; còn với kết cấu cần điều khiển dao động, phương pháp Newmark- β được sử dụng [159]. Kết quả chỉ ra rằng, phương pháp trên phù hợp để phân tích ứng xử động kết cấu có TLD, và TLD giúp giảm 30% dao động, tuy nhiên nghiên cứu chưa chỉ ra tầm quan trọng của FSI khi thiết kế TLD. Sau đó, Zheng và cộng sự (2003) sử dụng phương pháp của Yamamoto và Kawahara (1999) phân tích khả năng điều khiển dao động kết cấu với TLD hình trụ [77]. Nghiên cứu thực hiện khảo sát sự biến dạng thành bể do sóng chất lỏng gây ra bằng phương pháp ALE, kết quả phân tích mô hình hai chiều có so sánh với nghiên cứu đi trước. Theo đó, nghiên cứu cho thấy sóng chất lỏng gần tương tự nhau trong trường hợp có xét và không xét FSI, tuy nhiên biến dạng thành bể khi xét FSI lớn hơn nhiều so với khi không xét. Zheng và cộng sự (2003) đã nêu lên sự cần thiết phải xét FSI khi thiết kế bể chứa đóng vai trò như thiết bị giảm chấn chất lỏng.

Những năm gần đây, nhờ khả năng của máy tính, các bài toán mô phỏng đồng thời kết cấu-chất lỏng có xét FSI được nghiên cứu nhiều hơn. Có thể kể đến các công bố của Gradinscak (2009, 2013) như ở Hình 4. 1 [78, 160]. Trong đó, dao động chất lỏng bên trong bể thành mềm được phân tích và có xét đến FSI.



Hình 4. 1 TLD kích thước $1.6 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}^3$ với thành bể thép dày 1mm

Eswaran (2017) đề xuất phương pháp số có xét FSI kết hợp đối chiếu thí nghiệm để khảo sát khung thép ba tầng như Hình 4.2. Khung chịu tải trọng động khi sử dụng MTLD làm thiết bị giảm chấn. Kết cấu cần điều khiển dao động với hệ bể chứa (không có nước bên trong) được phân tích đáp ứng trên miền thời gian bằng phương pháp Runge – Krutta, trong khi đó phương trình bài toán ở miền chất lỏng tính bằng phương pháp sai phân hữu hạn dựa trên giải thuật σ – transformation [80]. Đồng thời thí nghiệm được tiến hành để đánh giá lại độ chính xác của phương pháp.



1. Camera quan sát chất lỏng; 2. Quả nặng gia cố nền; 3. Motor tạo dao động khung; 4. Quả nặng phụ trợ; 5. Kết cấu cần điều khiển; 6. TLD; 7. Gia tốc kế; 8. Máy tính điều khiển; 9. Bộ chuyển đổi nguồn điện

Hình 4. 2 Thiết lập thí nghiệm với khung ba tầng có MTLD

Ashasi (2017) đã phân tích khả năng điều khiển dao động của bể chứa chất lỏng cho khung nhiều tầng có xét FSI. Trong nghiên cứu này, phương pháp RTHS được sử dụng, với bể chứa chất lỏng được thí nghiệm trên bàn lắc để tìm lực quán tính của TLD theo thời gian t . Ngoài ra, giải thuật σ – transformation được áp dụng để giải quyết bài toán tương tác trong thiết bị. Sau khi có được áp lực sóng chất lỏng lên thành bể và lực quán tính $f(t)$ của TLD theo thời gian thì mô phỏng khung chịu lực quán tính $f(t)$ này cùng lúc với việc cho khung chịu tải trọng động [36].

Tường và các cộng sự (2019) đã chỉ ra hiệu quả kháng chấn của bể nước mái đóng vai trò như thiết bị giảm chấn chất lỏng bằng cách mô phỏng công trình và TLD làm việc đồng thời, trong đó có kể đến điều kiện biên giữa chất lỏng và thành bể. Kết quả chỉ ra rằng TLD có khả năng giảm chấn rất hiệu quả. Tuy nhiên nghiên cứu chỉ

dừng lại ở mô hình khung phẳng, sự tương tác được xét đến là FSI một chiều [14]. Gần đây nhất, có công bố của Abdollahzadeh (2020) về phân tích dao động khung trên miền tần số và sóng chất lỏng bên trong bể chứa thành mềm bằng phương pháp Smoothed Particle Hydrodynamics-SPH. Trong đó, khung thép sử dụng TLD xét FSI khi cơ hệ chịu dao động điều hòa và dao động tự do, kết quả từ phương pháp số được đối chiếu với lời giải giải tích [44]. Ngoài ra, còn có các nghiên cứu khác tính toán phản ứng kết cấu chịu tải trọng động có xét tương tác đa trường như các bài toán hồ chứa, tuabin gió, đập thủy điện, kênh (máng) dẫn nước trên cao, đê (kè) chắn sóng v.v... điển hình là [35, 36, 69-71, 79, 120, 122, 123, 135, 136, 161-168].

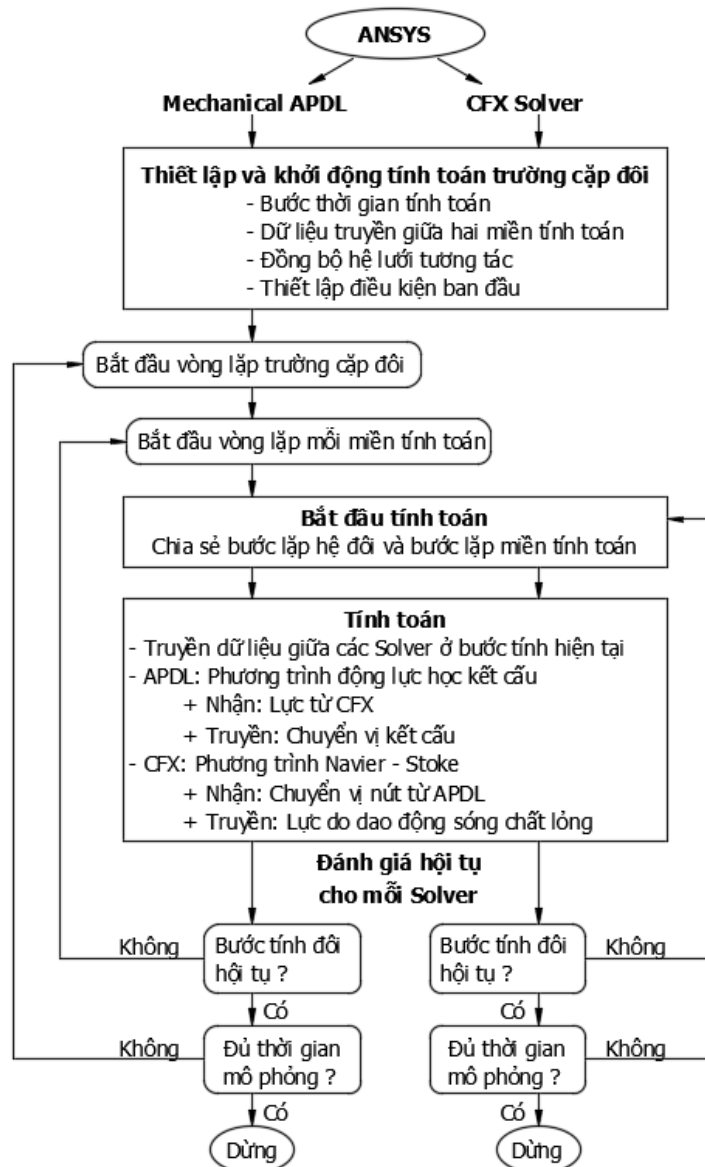
Từ những nghiên cứu đi trước, chương 4 tập trung việc điều khiển dao động bằng hệ bể chứa chất lỏng đa tần MTLD trong tương tác đa trường kết cấu-TLD-thành bể mềm bằng FEM với mô hình 3D. Thêm vào đó, kết quả nghiên cứu được so sánh đối chiếu với thí nghiệm để đánh giá khả năng giảm chấn của thiết bị trong trường hợp chịu tải trọng động, từ đây đưa ra các kiến nghị cho kỹ sư thiết kế. Không những vậy, ảnh hưởng của thành bể mềm đến hiệu quả làm việc của TLD có thành bể mềm cũng được xét trong chương này.

4.3 FVM/FEM phân tích dao động kết cấu với MTLD

Phương pháp rời rạc hai miền rắn-lỏng gần đây được sử dụng rất nhiều trong các nghiên cứu phân tích TLD hoặc các dạng TLD cải tiến để điều khiển dao động, phương pháp này với sự hỗ trợ của ANSYS được xem là một trong những công cụ mạnh mẽ nhất để giải quyết phương trình điều kiện biên tại mặt tương tác [35, 79, 162, 163, 166, 169].

Để phân tích đáp ứng kết cấu theo thời gian có sử dụng MTLD, luận án lựa chọn phương pháp FVM/FEM chia cơ hệ ra thành hai miền riêng biệt: (1) miền kết cấu bên dưới TLD cần điều khiển dao động và (2) miền chất lỏng bên trong TLD. Trong miền chất lỏng, sử dụng phương pháp FVM tính toán dao động sóng để có giá trị chuyển vị và áp lực sóng theo thời gian. Sau đó đưa lực này tương tác ngược về khung, khi ấy ngoại lực tác dụng lên kết cấu gồm tải trọng kích thích bên ngoài, lực quán tính của chất lỏng và sự dao động của thành bể tại mặt tương tác. Phân tích dao

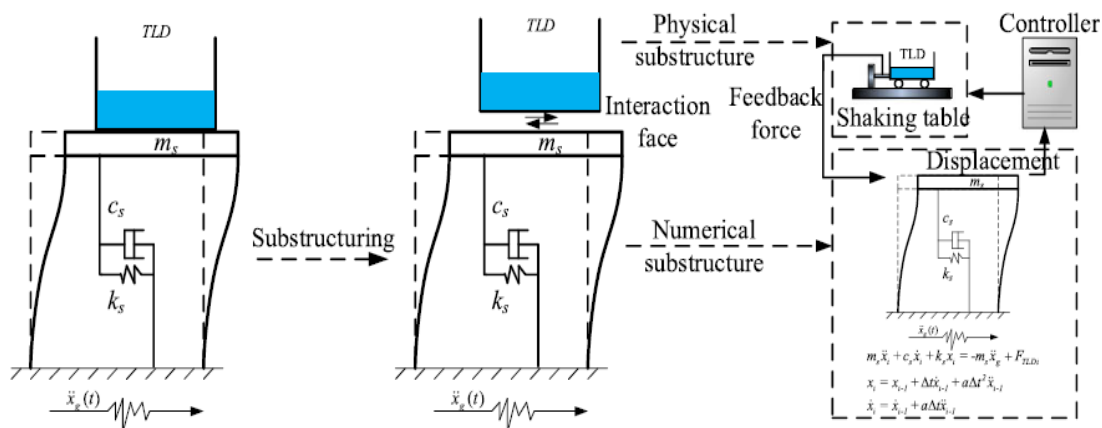
động khung được thực hiện bằng FEM. Quá trình này lặp lại liên tục cho đến khi thỏa mãn điều kiện hội tụ, điều kiện hội tụ được làm rõ ở mục 4.3.3 hoặc tham khảo [170]. Lưu đồ tính toán ở Hình 4. 3, trong đó Module Mechanical mô phỏng miền rắn (kết cấu) và Module CFX cho miền chất lỏng. Phương pháp này gần đây được Dou và cộng sự (2020) sử dụng để tính toán giảm chấn cho kết cấu dàn khoan có sử dụng 1-TLD. Kết quả tính toán cho thấy sự đồng nhất cao với thí nghiệm trên bàn lắc [169].



Hình 4. 3 Lưu đồ mô phỏng sự làm việc đồng thời của hai miền rắn-lỏng

Quy trình tính toán của FVM/FEM gần như tương tự RTHS là phương pháp bán thí nghiệm (Hình 4. 4). Bản chất RTHS cũng phân chia cơ hệ ra thành hai bộ

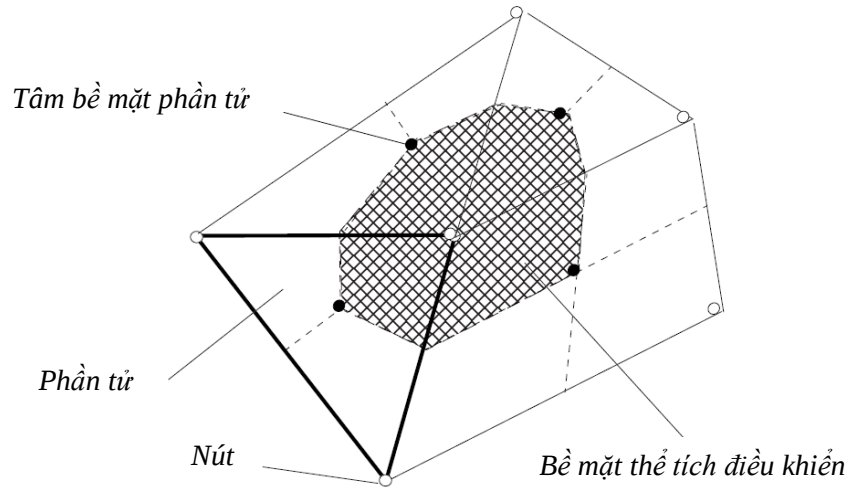
phần: (1) kết cấu cần điều khiển dao động (2) TLD được thí nghiệm trên bàn lắc để đo được giá trị áp lực của sóng theo thời gian [31, 36, 81, 82, 85, 171-176]. Sau đó giá trị áp lực sóng sẽ được mô phỏng trên máy theo thời gian thực và trở thành ngoại lực tác dụng lên kết cấu. Tóm lại, kết cấu cần điều khiển dao động chịu ngoại lực kích thích cùng với giá trị áp lực động của TLD đo được từ thí nghiệm.



Hình 4. 4 Quy trình phân tích kết cấu sử dụng TLD bằng RTHS

4.3.1 FVM phân tích miền chất lỏng có xét FSI

Dao động của miền chất lỏng được điều khiển bởi phương trình chủ đạo Navier-Stokes, có khá nhiều phương pháp được đề xuất để giải quyết phương trình trên miền thời gian. Điều này gặp không ít khó khăn do vấn đề phi tuyến mạnh mẽ của sóng chất lỏng khi dao động. Harlow và Welch (1965) đã đề xuất phương pháp Marker-And-Cell (MAC) là một trong những phương pháp số đầu tiên để định vị chuyển động của phần tử thể tích chất lỏng [177]. Sau đó được Hirt và Nichols (1981) phát triển với giải thuật Volume-Of-Fluid (VOF), xác định tương đối chính xác dao động sóng trong mặt cắt ngang bể chứa bằng cách tính hệ số tỷ lệ thể tích cho mỗi trường vật liệu trong từng ô tính toán đã được chia lưới [178]. Phương pháp này được quan tâm rất nhiều trong vài thập niên vừa, và các phương pháp số được phát triển để giải quyết phương trình Navier-Stokes, đặc biệt phương pháp thể tích hữu hạn FVM. Eymard và cộng sự (2000) cho thấy FVM có nhiều ưu điểm và đây là phương pháp bảo toàn cục bộ từng phần do cách tiếp cận của phương pháp là “cân bằng”, sự cân bằng cục bộ được tính toán trên từng ô lưới được rời rạc hóa có tên “thể tích điều khiển” (control volume) như ở Hình 4. 5 [179].



Hình 4. 5 Phần tử thể tích điều khiển

Để dàng nhận thấy được tất cả các nút phần tử đều được bao quanh bởi tập hợp các bề mặt nhằm xác định phần tử thể tích điều khiển. Tất cả các biến số và đặc trưng của chất lỏng đều được chứa tại các nút phần tử này. Module CFX của ANSYS dựa trên nền tảng FVM được sử dụng để phân tích sự làm việc của chất lỏng bên trong TLD. Để làm rõ các bước tính toán của lưu đồ trên phương trình chủ đạo Navier-Stokes điều khiển dao động sóng chất lỏng. Phương trình Navier-Stokes ở dạng bảo toàn khối lượng và mô men động lượng được viết lại như sau [45]:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \left[\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \right] + \mathbf{F} \quad (4.2)$$

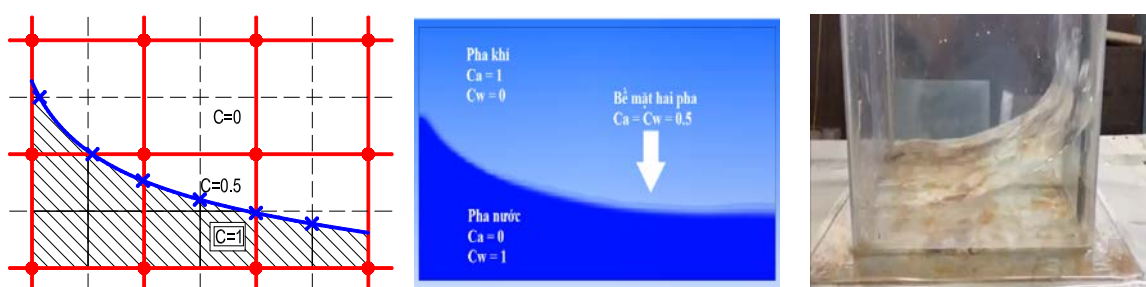
Trong đó $\mathbf{v}$ là trường vận tốc; ρ và μ lần lượt là khối lượng riêng và độ nhớt, p là áp suất còn $\mathbf{F}$ là lực thể tích. Phương trình (4.1) là điều kiện biên liên tục của chất lỏng; phương trình (4.2) là điều kiện bảo toàn mô men động lượng. Về trái (4.2) đặc trưng cho thành phần quán tính sóng chất lỏng, ba đại lượng ở vế phải lần lượt là gradient áp suất, lực nhớt và ngoại lực lên chất lỏng. Không chỉ giải phương trình bảo toàn khối lượng và mô men động lượng, cần giải thêm phương trình hỗ trợ cho hệ số tỷ trọng thể tích C của mỗi pha (nước hoặc khí) [144]. Phương trình của C có cùng dạng với phương trình bảo toàn khối lượng:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C = 0 \quad (4.3)$$

C có giá trị là “1” khi phần tử chất lỏng đầy, triệt tiêu bằng “0” khi phần tử rỗng và có giá trị trung bình “0.5” khi phần tử nằm trên bề mặt giữa pha lỏng và pha khí (Hình 4. 6). Các đặc trưng vật lý của khối lượng riêng trộn lẫn 2 pha là ρ và độ nhớt μ được mô tả như hàm số của đặc trưng pha và hệ số tỷ lệ thể tích C , tính bằng tỷ số của thể tích chất lỏng trên tổng thể tích phần tử chất lỏng trong ô lưới được rời rạc:

$$\begin{aligned}\rho &= C\rho_L + (1-C)\rho_A \\ \mu &= C\mu_L + (1-C)\mu_A\end{aligned}\quad (4.4)$$

Trong đó L và A là 2 pha chất lỏng và khí.



Hình 4. 6 Hệ số tỷ lệ thể tích C của bể chứa T0.2x0.3m

Sau khi phương trình Navier-Stokes được giải quyết sẽ có giá trị chuyển vị, vận tốc, gia tốc lẫn áp lực sóng từ đó có được lực quán tính trong bể theo thời gian. Chi tiết giải phương trình (4.1) và (4.2) tại [180]. Kết quả của phương trình Navier-Stokes là điều kiện đầu vào cho bài toán phân tích kết cấu cần điều khiển dao động. FVM với module CFX đã được sử dụng để phân tích bể chứa chất lỏng ở ví dụ 3a T0.2x0.3m mục 2.2.2 hoặc ở ví dụ 4a T 20mx50m mục 3.3.4, trong đó ảnh hưởng thành bể được bỏ qua và bài toán chỉ có phần tử chất lỏng với hai pha khí và nước. Vì vậy tại đây luận án không bổ sung thêm ví dụ minh họa

4.3.2 FEM phân tích kết cấu cần điều khiển dao động

Để phân tích phản ứng động của hệ kết cấu thì phương pháp Newmark được sử dụng, chi tiết được trình bày cụ thể bởi Ray and Joseph (2003) [181]. Bài toán động lực học trên từng bước thời gian được tính toán, với ngoại lực tác động là chuyển vị nền của kết cấu và lực quán tính của sóng chất lỏng bên trong TLD tại đỉnh công trình. Phương trình vi phân chuyển động cho bài toán động lực học phi tuyến có thể được viết dưới dạng tổng quát:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \quad (4.5)$$

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \dot{\mathbf{x}}(t_0) = \dot{\mathbf{x}}_0 \quad (4.6)$$

Trong đó:

- $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}$ là vecto chuyển vị, vận tốc và gia tốc
- $\mathbf{M}$ là ma trận khối lượng của hệ
- $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ đặc trưng cho nội lực kết cấu, đó là hàm của chuyển vị và vận tốc
- $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t)$ là ngoại lực tác động lên kết cấu, nó được mô tả là hàm của chuyển vị

Trong trường hợp bài toán động lực học tuyến tính thì:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{F}(t) \quad (4.8)$$

với

- $\mathbf{C}, \mathbf{K}$ là ma trận cản và ma trận khối lượng của hệ
- $\mathbf{F}(t)$ là hàm độc lập với biến $\mathbf{x}$

Thay $\mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{F}$ vào (4.5), phương trình động lực học cho trường hợp tuyến tính là:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}(t) \quad (4.9)$$

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \dot{\mathbf{x}}(t_0) = \dot{\mathbf{x}}_0 \quad (4.10)$$

Để giải phương trình vi phân (4.5) và (4.9), các phương pháp số được đề xuất là Euler, Euler cải tiến, chuỗi Taylor, Runge Kutta, sai phân hữu hạn, Houbolt – HHT, Wilson và phương pháp Newmark. Phương pháp Newmark được lựa chọn trong luận án để phân tích kết cấu chịu tải trọng động theo thời gian, chi tiết phương pháp ứng dụng cho FEM tham khảo tài liệu của Bathe (2006) mục 9.2.3 [182]. Trong đó, vận tốc và chuyển vị của nút được tính toán như sau:

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1} = \dot{\mathbf{x}}_n + \left[(1-\delta)\ddot{\mathbf{x}}_n + \delta\ddot{\mathbf{x}}_{n+1} \right] \quad (4.11)$$

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \Delta t\dot{\mathbf{x}}_n + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\mathbf{x}}_n + \alpha\ddot{\mathbf{x}}_{n+1} \right] (\Delta t)^2 \quad (4.12)$$

Với δ và α là hằng số chỉ mức độ gia tốc tại cuối khoảng thời gian Δt tham gia vào phương trình vận tốc và chuyển vị. δ và α được chọn để đạt độ chính xác mong muốn và thỏa đặc trưng ổn định. Khi đó (4.11) và (4.12) sẽ là:

$$\ddot{\mathbf{x}}_{n+1} = \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2}(\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n) - \frac{1}{\alpha\Delta t}\dot{\mathbf{x}}_n - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1\right)\ddot{\mathbf{x}}_n \quad (4.13)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1} = \frac{1}{\alpha\Delta t}(\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n) + \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right)\dot{\mathbf{x}}_n + \left(1 - \frac{\delta}{2\alpha}\right)\Delta t \times \ddot{\mathbf{x}}_n \quad (4.14)$$

Thế (4.13) và (4.14) vào (4.9) thu được phương trình:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_{n+1} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_{n+1} + \mathbf{K}\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1} \quad (4.15)$$

$\mathbf{x}_{n+1}$ có thể có lời giải dưới dạng sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{n+1} = & \left[\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2}\mathbf{M} + \frac{\delta}{\alpha\Delta t}\mathbf{C} + \mathbf{K} \right]^{-1} \left[\mathbf{F}_{n+1} + \left(\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2}\mathbf{x}_n + \frac{1}{\alpha\Delta t}\dot{\mathbf{x}}_n + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\mathbf{x}}_n \right) \mathbf{M} \right. \\ & \left. + \left(\frac{\delta}{\alpha\Delta t}\mathbf{x}_n + \left(\frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \dot{\mathbf{x}}_n + \left(\frac{\delta}{2\alpha} - 1 \right) \Delta t \ddot{\mathbf{x}}_n \right) \mathbf{C} \right] \end{aligned} \quad (4.16)$$

Thế (4.16) vào (4.13) và (4.14) để tìm $\dot{\mathbf{x}}_{n+1}$ và $\ddot{\mathbf{x}}_{n+1}$. Các bước tiếp theo được tính với cùng một quy trình như trên cho bước thời gian $(n+2)$. Trong phương pháp Newmark thì tùy vào phương pháp giải tường minh (explicit) hay ngầm ẩn (implicit) mà lời giải có cần điều kiện ổn định hay không, theo Bathe (2006) lời giải ổn định khi:

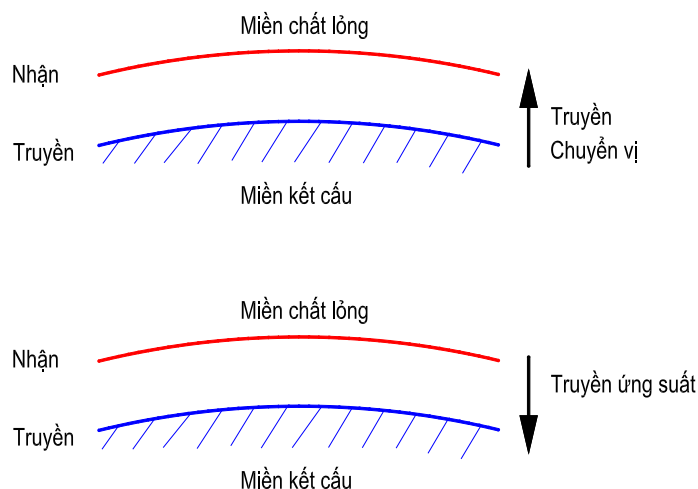
$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\delta - 2\alpha}} \quad (4.17)$$

trong đó T_n là chu kỳ dao động tự nhiên nhỏ nhất của hệ.

4.3.3 Giải quyết phương trình điều kiện biên tại mặt tương tác

FVM/FEM là tên gọi phương pháp đề xuất bởi Malekghasemi [35] bản chất là sự kết hợp của hai phương pháp: (1) FVM để tìm dao động sóng tại từng bước thời gian trên miền chất lỏng và (2) FEM để tính giá trị biên dạng kết cấu trên miền rắn. Sau khi có kết quả áp lực sóng từ FVM tại các nút phần tử, sẽ áp đặt lực lên các nút của miền rắn làm điều kiện ngoại lực tác dụng. Khi đó FEM được dùng để giải bài

toán trên miền rắn và có kết quả là biến dạng thành bể; đây sẽ là ngoại lực để làm thông số đầu vào cho miền chất lỏng ở bước thời gian tiếp theo như Hình 4. 7.



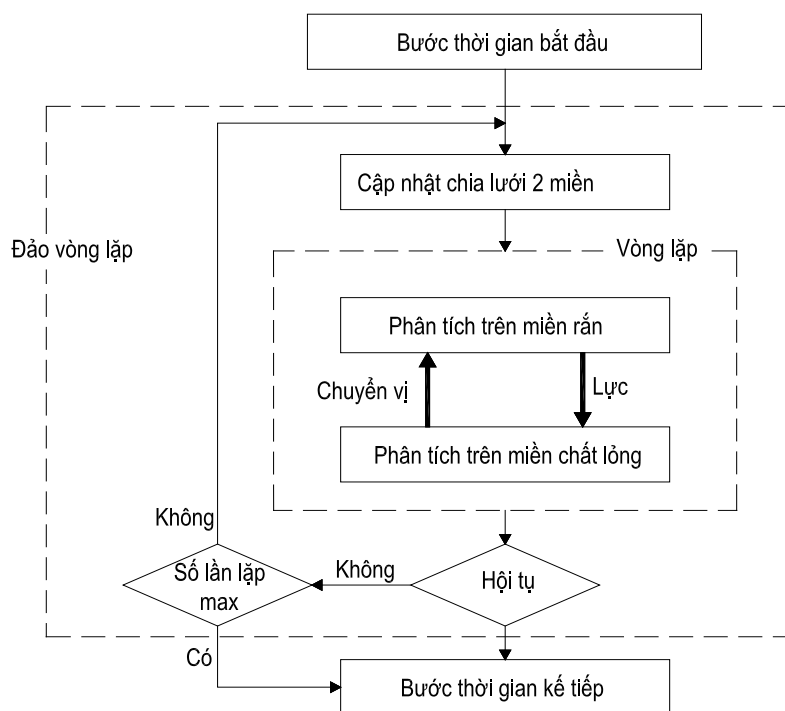
Hình 4. 7 Sự truyền lực tại mặt tương tác rắn-lỏng

Áp suất chất lỏng và biến dạng thành bể được “truyền dữ liệu” vào nhau tại mặt tương tác của thành ướt bể, đây cũng chính là điều kiện biên của FSI. Sau khi các miền chất lỏng và rắn được phân tích bằng CFD và FEM, hệ phương trình trường cặp đôi sẽ được sử dụng để “truyền dữ liệu” giữa hai miền tại mỗi bước thời gian như Hình 4. 7. Quy trình cứ tiến hành liên tục như vậy trên từng bước thời gian cho đến khi kết thúc việc phân tích dao động như ở Hình 4. 8 khi điều kiện hội tụ đạt được. Tại bề mặt tương tác giữa hai miền rắn lỏng, phương trình động học cơ bản (điều kiện biên) được áp dụng như sau:

$$\begin{cases} \tau_f \cdot \mathbf{n}_f = \tau_s \cdot \mathbf{n}_s \\ d_f = d_s \end{cases} \quad (4.18)$$

Trong đó τ_f và τ_s là ứng suất tương ứng tại nút trên miền chất lỏng và thành bể như ở Hình 3. 1. $\mathbf{n}_f$ và $\mathbf{n}_s$ là vector chỉ hướng đơn vị tương ứng hai miền chất lỏng-kết cấu. d_s và d_f lần lượt là biến dạng của hai miền rắn-lỏng. Miền ướt của bể và biên của miền chất lỏng (Hình 4. 7) tại mặt FSI sẽ thu-nhận trường áp suất-trường biến dạng; để giảm sai số do sự thu-nhận này, các lưới phần tử trên mặt FSI được chia cùng kích thước. Trong hệ phương trình trường cặp đôi, bước thời gian 0,01 giây được chọn cho phân tích trên miền chất lỏng bằng phương pháp FVM với CFX lẫn trong miền

kết cấu với FEM. ANSYS với năm (5) lần ghép nối ma trận với hai mươi lăm (25) lần lặp tối đa trên miền chất lỏng tại mỗi bước thời gian Δt được sử dụng để đảm bảo độ chính xác của FVM/FEM. Chỉ khi miền chất lỏng và miền kết cấu hội tụ cùng một bước hoặc đạt đến số lần lặp tối đa, hệ phương trình trường cặp đôi sẽ tiến hành với bước thời gian kế tiếp như ở Hình 4. 8.



Hình 4. 8 Quy trình phân tích FSI-2 chiều bằng FVM/FEM

Để đánh giá sự hội tụ của việc truyền dữ liệu ở mặt tương tác, mỗi bước lặp cần được tính toán lại so với bước lặp liền trước. Điều kiện hội tụ là sự thay đổi trong tất cả các giá trị truyền dữ liệu giữa hai lần lặp kế tiếp được giảm nhỏ hơn giá trị dung sai cho phép (còn gọi là mục tiêu hội tụ) [165, 183]. Giá trị mục tiêu hội tụ mặc định trong ANSYS là $1e-2$, tuy nhiên hoàn toàn có thể thay đổi cho phù hợp với từng bài toán. Sự hội tụ được xác định như sau:

$$\varepsilon^* = \frac{\log(\varepsilon / \varepsilon_{toler})}{\log(10.0 / \varepsilon_{toler})} \quad (4.19)$$

Trong đó ε_{toler} là giá trị mục tiêu hội tụ. ε là giá trị thay đổi chuẩn tại mặt tiếp xúc, được xác định như sau:

$$\varepsilon = \frac{\|\varphi_{new} - \varphi_{pre}\|}{\|\varphi_{new}\|} \quad (4.20)$$

Với φ_{new} là vecto dữ liệu mới từ trường vật lý khác, φ_{pre} là vecto dữ liệu áp dụng lên trường tương tác ở bước lặp trước. Giá trị φ ở thời điểm hiện tại được xác định bởi:

$$\varphi = \varphi_{pre} + \alpha (\varphi_{new} - \varphi_{pre}) \quad (4.21)$$

Trong đó α là hệ số “chùng” (relaxation factor), đây là hằng số dùng trong phương pháp lặp. Hệ số này giúp cho quá trình giải lặp được nhanh chóng hội tụ, và gần như chỉ có thể chọn hiệu quả bằng phương pháp thử và sai [45]. Theo cơ sở lý thuyết của ANSYS (2011) [170], điều kiện hội tụ để dừng vòng lặp là:

$$\varepsilon^* \leq 0 \quad (4.22)$$

4.4 Quy trình thiết kế MTLD

Quy trình này tương tự như ở mục 2.4.3. Điểm khác là tại đây sự điều chỉnh tần số và khối lượng của MTLD đơn giản bằng cách thay đổi chiều cao nước trong bể, sau đó FVM/FEM được ứng dụng để phân tích khả năng điều khiển dao động của thiết bị. Việc phân tích này chính xác hơn nhưng tốn nhiều thời gian tính toán hơn do có kể đến sự làm việc của miền chất lỏng trong bể chứa mà không cần phải quy đổi như ở mục 2.4. Việc tối ưu thiết kế MTLD hầu như chỉ dựa trên hai phương trình (4.23) và (4.24) bên dưới. Theo hiểu biết còn hạn chế của tác giả thì ngoài phương pháp thử và sai, đến nay hầu như chưa có phương pháp thiết kế TLD/MTLD có xét đến sự phi tuyến của sóng chất lỏng và FSI đồng thời. Minh chứng cho điều này, có thể tham khảo thêm nghiên cứu của Chang trang 68-71 [184] hoặc Chang và cộng sự [23] cũng như nghiên cứu của Malekghasemi trang 50-51 [34] để thấy quy trình thiết kế và lựa chọn các thông số chính cho thiết bị MTLD.

Quy trình thiết kế này tính toán đáp ứng không chỉ dao động khung theo thời gian, mà còn đáp ứng của sóng chất lỏng bên trong bể chứa. Do đó tốn rất nhiều tài nguyên tính toán vì vậy chỉ nên sử dụng khi đã hoàn thành việc chọn sơ bộ số lượng bể, kích thước bể, chiều cao nước và các đặc trưng khác của MTLD như trình bày ở chương 2 trước khi thực hiện việc thiết kế thiết bị với FVM/FEM. Đây cũng chính là đề xuất của Tường và Huỳnh (2020) trong việc thiết kế giảm chấn với MTLD [185].

4.4.1 Lựa chọn khối lượng MTLD

Trong thiết kế MTLD, tương tự MTMD, tỷ số của khối lượng chất lỏng m_f trên kết cấu m_s bằng 1-5%. Có thể nói đây gần như là thông số quan trọng bậc nhất của MTLD vì ảnh hưởng nhiều nhất đến khả năng giảm chấn của thiết bị [82].

$$\frac{m_f}{m_s} = 1 - 5\% \quad (4.23)$$

4.4.2 Lựa chọn dải tần số hoạt động của MTLD

f_w trong bể chứa được điều chỉnh sao cho bằng với tần số dao động tự nhiên của công trình bên dưới f_s . Sau đó lựa chọn số lượng bể chứa sao cho:

$$0.8 \leq \frac{f_{MTLD}}{f_s} \leq 1.2 \quad (4.24)$$

Phương trình (4.24) tương đương điều kiện $\Delta R = 0 - 0.2$.

4.4.3 Đặc trưng cản của kết cấu khung

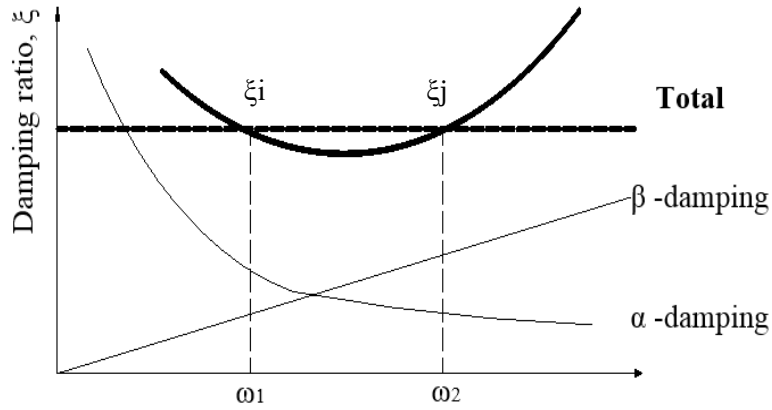
Tỷ số cản ξ là đại lượng thể hiện sự tắt dần của dao động kết cấu khi kết cấu dao động tự do, để xác định được tỷ số cản ξ thì cần phải có các thí nghiệm chính xác và đáng tin cậy. Các thí nghiệm này sẽ được trình bày cụ thể hơn ở chương 5. Sự cản ảnh hưởng lớn đến việc phân tích kết cấu chịu tải trọng động nên cần được tính toán hợp lý. Và độ chính xác của kết quả mô phỏng số phụ thuộc rất nhiều vào hệ số này. Mỗi mode dao động của kết cấu có tỷ số cản khác nhau, trong luận án sử dụng lý thuyết cản đề xuất bởi Reyleigh. Đây là lý thuyết cản được sử dụng nhiều nhất do tính đơn giản và hiệu quả. Theo [186], ma trận hệ số cản tính theo Rayleigh có dạng:

$$\mathbf{C} = \alpha \cdot \mathbf{M} + \beta \cdot \mathbf{K} \quad (4.25)$$

Trong đó:

$\mathbf{C}, \mathbf{M}, \mathbf{K}$ lần lượt là ma trận cản, khối lượng và độ cứng

α, β lần lượt là hệ số tỷ lệ tương ứng hệ số cản khối lượng và độ cứng



Hình 4. 9 Quan hệ tần số - tỷ số cản trong cản Rayleigh

Trong công thức cản Rayleigh, trình bày tại nghiên cứu của Yue và cộng sự (2018) hoặc Liaghat và cộng sự (2014), khối lượng ảnh hưởng lớn đến hiệu quả cản ở tần số thấp hơn và độ cứng sẽ ảnh hưởng đối với tần số cao hơn. Vì thế α và β là hai thuộc tính đại diện cho tần số thấp hơn và tần số cao hơn. Tỷ số cản ξ_i ở mỗi tần số f_i là khác nhau, do đó hai giá trị α và β thay đổi. Giả sử, trong khoảng tần số từ $f_i \rightarrow f_j$ sẽ có tỷ số cản tương ứng $\xi_i \rightarrow \xi_j$, khi đó α và β sẽ được tính như sau[83, 135]:

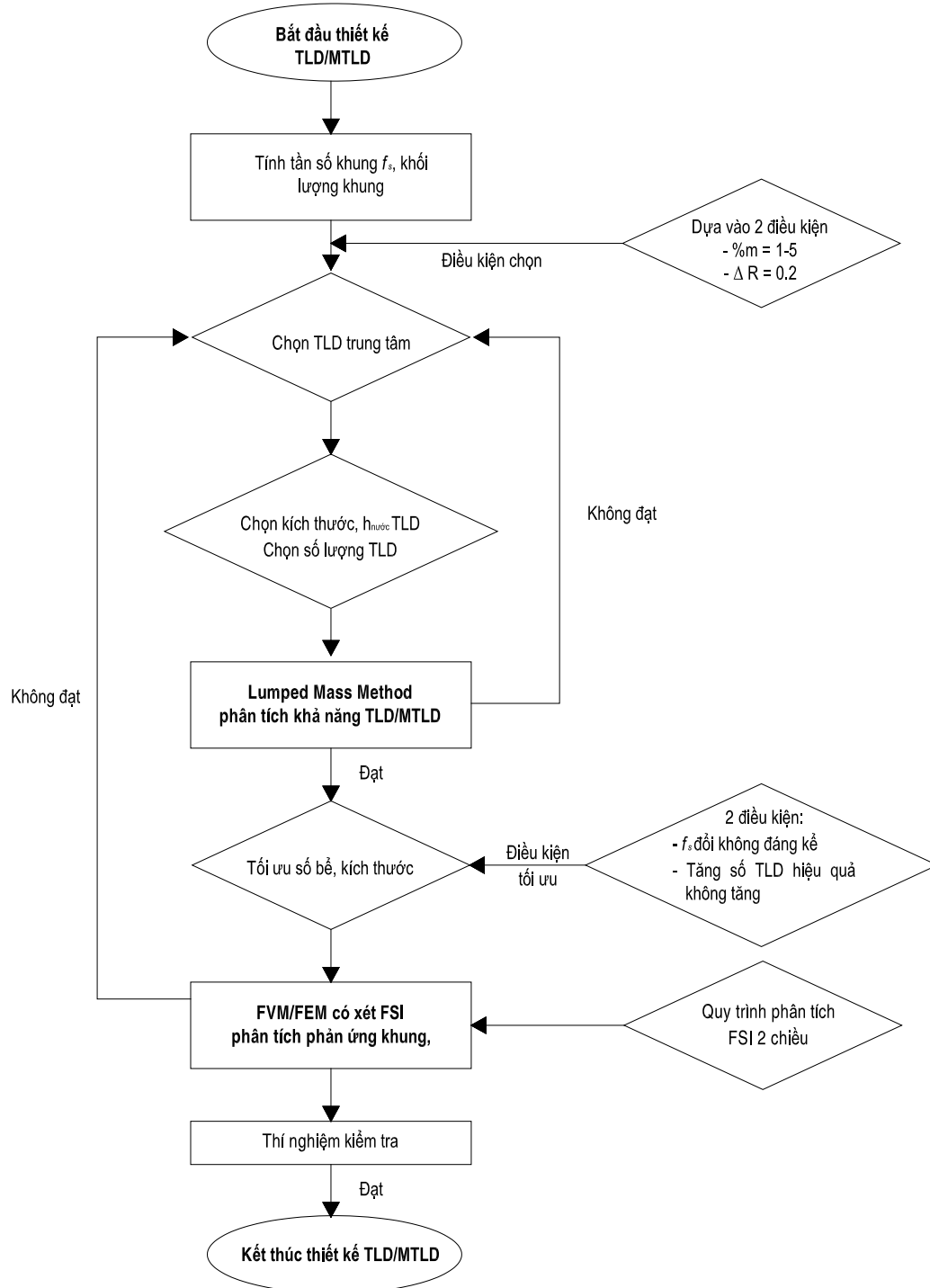
$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{pmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -\frac{1}{\omega_j} & \frac{1}{\omega_i} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (4.26)$$

Tuy nhiên, để đơn giản, có thể coi tỷ số cản như là hằng số trên một phạm vi tần số hoặc giữa hai tần số tự nhiên liên tiếp, tức là $\xi_i = \xi_j = \xi$. Lúc này (4.26) trở thành:

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \begin{Bmatrix} \omega_i\omega_j \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4.27)$$

Ngoài phương pháp tính hệ số cản của Rayleigh, còn có phương pháp của Ong và cộng sự (2017) [131].

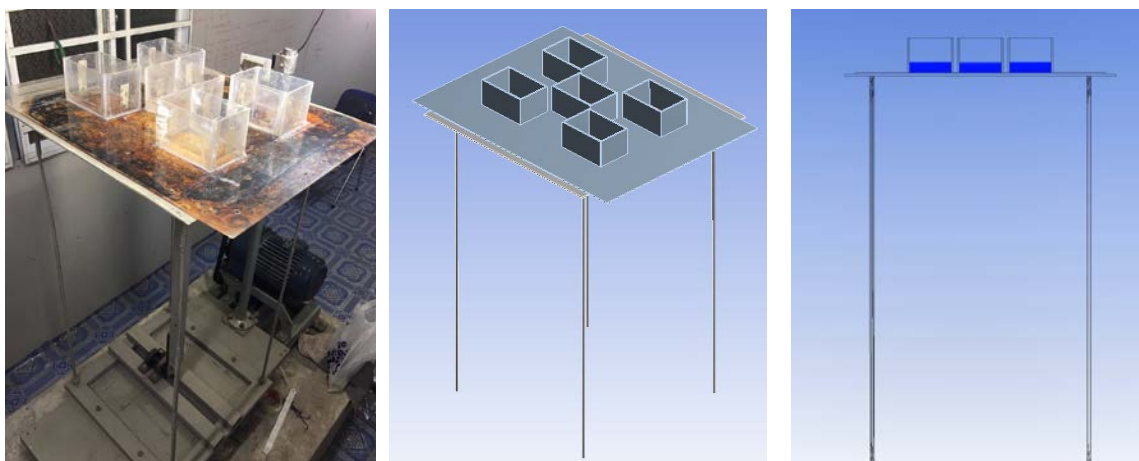
Tóm lại, quy trình thiết kế MTLD có thể tóm tắt bằng lưu đồ ở Hình 4. 10. Lưu đồ này gồm hai phần: (1) thiết kế cơ sở lựa chọn sơ bộ MTLD cho hệ kết cấu và phân tích khả năng giảm chấn thiết bị và (2) ứng dụng FVM/FEM để kiểm tra đánh giá sự làm việc của thiết bị một cách chính xác khi có kể đến FSI đối với TLD/MTLD.



Hình 4. 10 Quy trình thiết kế MTLD

4.5 FVM/FEM phân tích khả năng giảm chấn của MTLD

Xét lại khung thép ở mục 2.4.3.4 (Hình 4. 11), khung chịu dao động tự do và chịu tải trọng động. Cơ hệ với chất lỏng bên trong MTLD được xét FSI bằng FVM/FEM. Đặc trưng vật liệu được liệt kê tại Bảng 4. 1.



Hình 4. 11 Phân tích phản ứng động khung thép sử dụng MTLD giảm chấn

Bảng 4. 1 Đặc trưng của khung thép 1 tầng và MTLD sử dụng

STT	Đặc trưng vật liệu	Ký hiệu	Giá trị
Khung thép			
1	Chiều cao khung	h_k	1.10 m
2	Bước cột	b_c	0.52 m
3	Độ dày sàn	h_s	5.0 mm
4	Đường kính cột	d_c	10.0 mm
5	Khối lượng riêng thép	ρ_t	7850 kg / m ³
6	Module đàn hồi thép	E_t	210 GPa
7	Hệ số poisson thép	ν_t	0.3
Đặc trưng bể chứa MTLD			
8	Bề rộng mỗi TLD	B	0.15 m
9	Chiều dài mỗi TLD	L	0.10 m
10	Khối lượng riêng vật liệu mica của TLD	ρ_{mi}	1000 kg / m ³
11	Module đàn hồi mica	E_{mi}	2.7 GPa
12	Hệ số Poisson của mica	ν_{mi}	0.27
13	Khối lượng riêng của nước	ρ_f	1000 kg / m ³

Áp dụng quy trình thiết kế ở Hình 4. 10 với hai điều kiện: (1) tổng khối lượng nước từ 1-5% để không làm thay đổi lớn f_s và (2) MTLD có ΔR xoay quanh f_s , hiệu quả sẽ cao nhất khi số bể là lẻ với bể trung tâm có $f_{TLD} \approx f_s$. Bên cạnh đó, tính ổn định MTLD được nâng cao nhờ hệ bể đa tần. Từ nhận xét trên với quy trình thiết kế ở mục 4.4, kết quả thiết kế 5TLD (Hình 4. 12) kích thước $0.15 \times 0.1 \times 0.1(m)$ với chiều cao mực nước được liệt kê ở Bảng 4. 2.



Hình 4. 12 Hệ bể chứa $0.15m \times 0.10m \times 0.10m$ (DxRxH)

Bảng 4. 2 Tần số tự nhiên khung thép và MTLD được thiết kế

STT	m_{khung} (kg)	f_{khung} (Hz)	m_{TLD} (kg)	f_{TLD} (Hz)	h_{TLD} (mm)	m_{TLDi}/m_{frame} (%)
1			0.269	1.99829	18.0	1.21
2			0.284	2.04231	19.0	1.27
3	22.3	2.08	0.299	2.08398	20.0	1.34
4			0.314	2.12345	21.0	1.41
5			0.329	2.16083	22.0	1.48

Từ các phương trình (2.43), (2.44), (2.45), (2.46) và (2.47), tính toán được các đặc trưng của MTLD, bao gồm tần số trung tâm f_0 , dải băng tần hoạt động ΔR , bước tần số β_i và tham số điều chỉnh $\Delta\gamma$, được trình bày ở Bảng 4. 3.

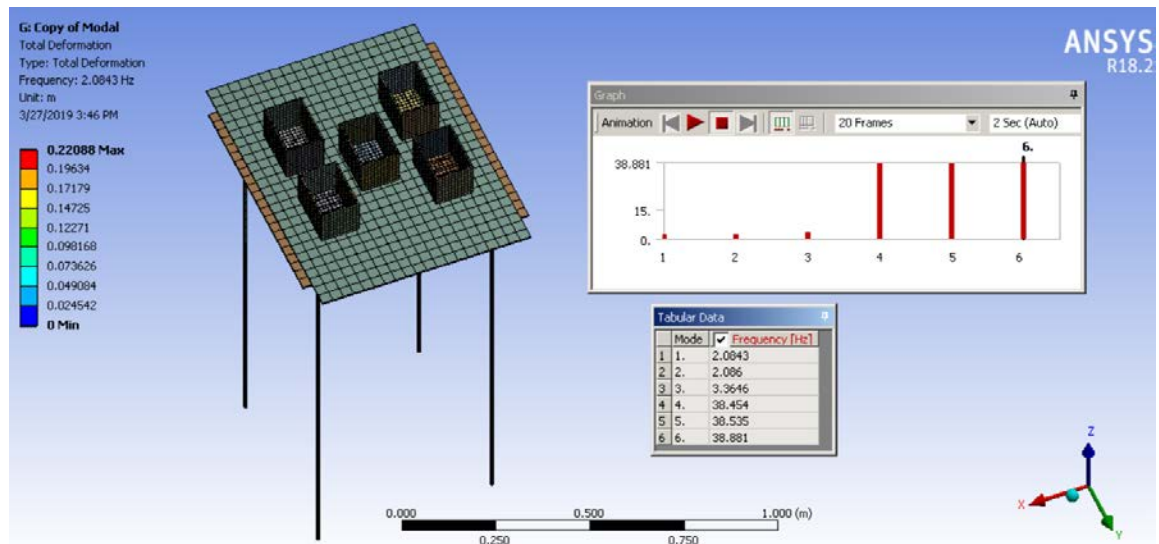
Bảng 4. 3 Các thông số đặc trưng riêng của MTLD

MTLD	f_1 (Hz)	f_N (Hz)	f_0 (Hz)	ΔR	β_i	$\Delta\gamma$	Chiều cao chất lỏng trong mỗi TLD
1	2.085	2.085	2.085	0.000	N/A	0.03	$h_1 = 2$ cm
2	1.999	2.085	2.042	0.042	0.086	0.05	$h_1 = 1.8$ cm; $h_2 = 2$ cm
3	1.999	2.085	2.042	0.042	0.043	0.05	$h_1 = 1.8$ cm; $h_2 = 2.2$ cm; $h_3 = 2$ cm
4	1.999	2.043	2.021	0.022	0.015	0.06	$h_1 = 1.8$ cm; $h_2 = 2.2$ cm; $h_3 = 2$ cm; $h_4 = 1.9$ cm
5	1.999	2.125	2.062	0.061	0.031	0.04	$h_1 = 1.8$ cm; $h_2 = 2.2$ cm; $h_3 = 2$ cm; $h_4 = 1.9$ cm; $h_5 = 2.1$ cm

Để thấy khả năng giảm chấn MTLD, phân tích khung thép khi có và không sử dụng MTLD khi khung dao động tự do, chịu tải trọng điều hòa và dao động nền kích thích.

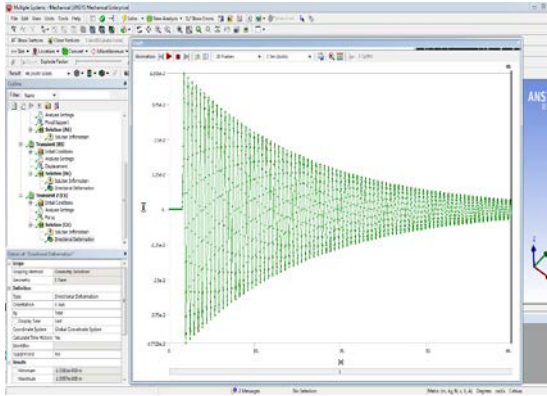
4.5.1 Khung dao động tự do

Tần số tự nhiên của khung tính được là $f_1 = 2.0843\text{Hz}$, $f_2 = 2.086\text{Hz}$. Từ hai tần số này kết hợp với tỷ số cản $\xi_s = 0.5\%$ (xác định từ thí nghiệm, sẽ trình bày chi tiết ở chương 5), ta có $\alpha = 0.0655069$ và $\beta = 0.00038164$ theo phương trình (4.27).

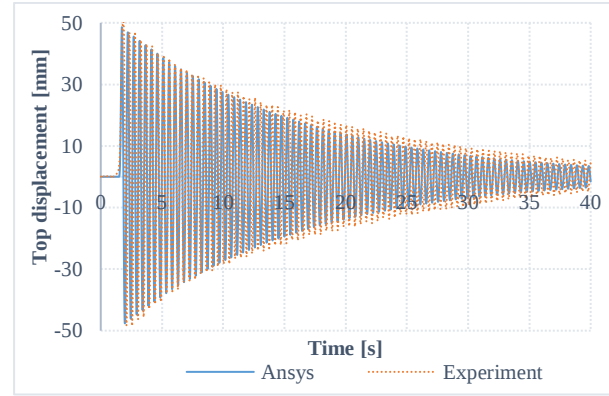


Hình 4. 13 Kết quả tần số khung 1 tầng theo ANSYS

Kết quả khung dao động tự do được thể hiện ở Hình 4. 14 và Hình 4. 15.



Hình 4. 14 Sự tắt dần dao động khung khi không sử dụng TLD

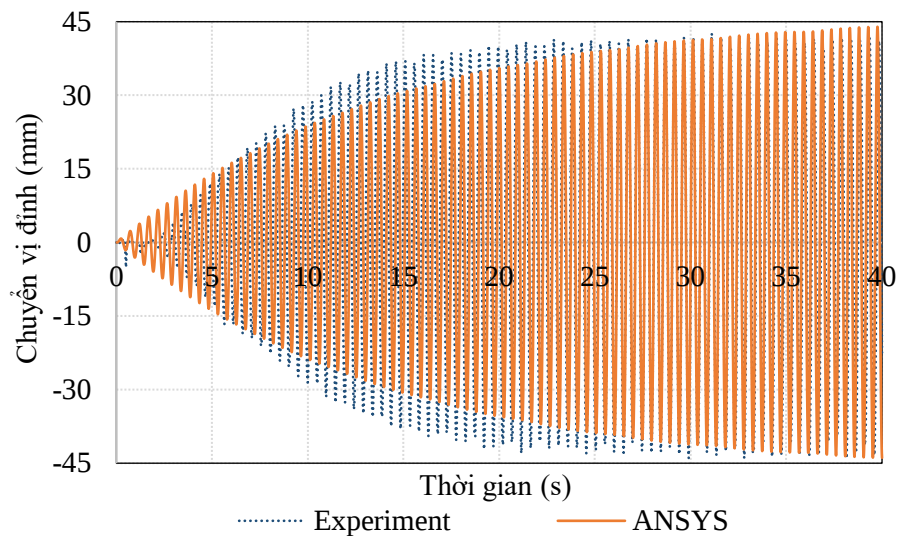


Hình 4. 15 So sánh sự tắt dần dao động với 0-TLD giữa ANSYS và thí nghiệm

Từ đồ thị ở Hình 4. 15 cho thấy kết quả mô phỏng số phù hợp với thí nghiệm. Điều này khẳng định sự chính xác của thông số đầu vào $\xi_s = 0.5\%$. Đây là cơ sở để phân tích khả năng điều khiển dao động của MTLD trong các mục tiếp theo.

4.5.2 MTLD điều khiển dao động khung khi chịu tải trọng điều hòa

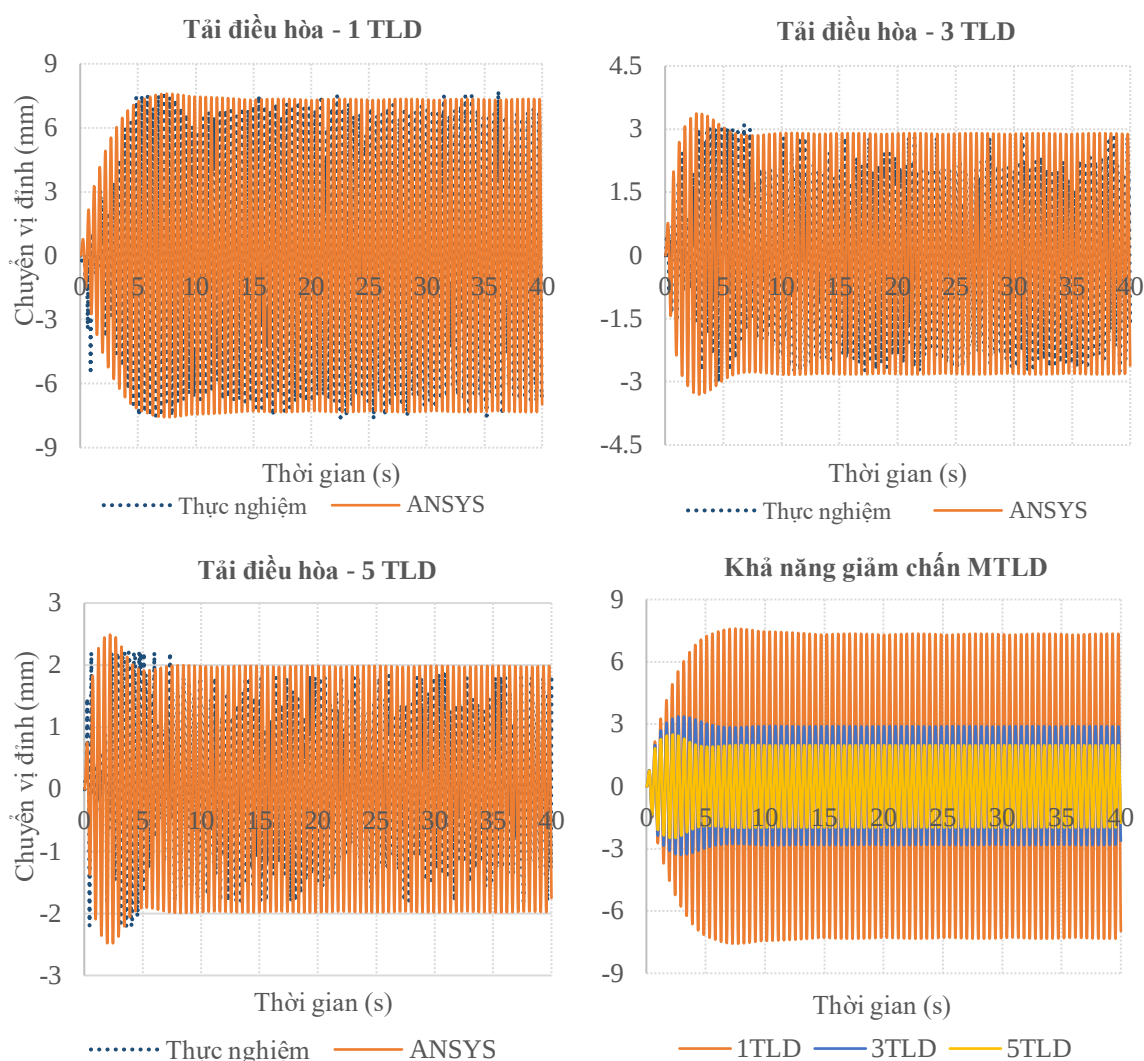
Để phân tích khả năng giảm chấn của MTLD, kết cấu chịu tải trọng dao động điều hòa $x = 0.5mm \cdot \sin(2\pi \cdot 2.0843 \cdot t)$ có tần số ngoại lực kích thích bằng tần số tự nhiên của khung, mục đích để tạo ra sự cộng hưởng. Chuyển vị đỉnh khung trong trường hợp không sử dụng TLD được thể hiện ở Hình 4. 16 có so sánh với thí nghiệm.



Hình 4. 16 Chuyển vị đỉnh khung khi cộng hưởng với 0-TLD

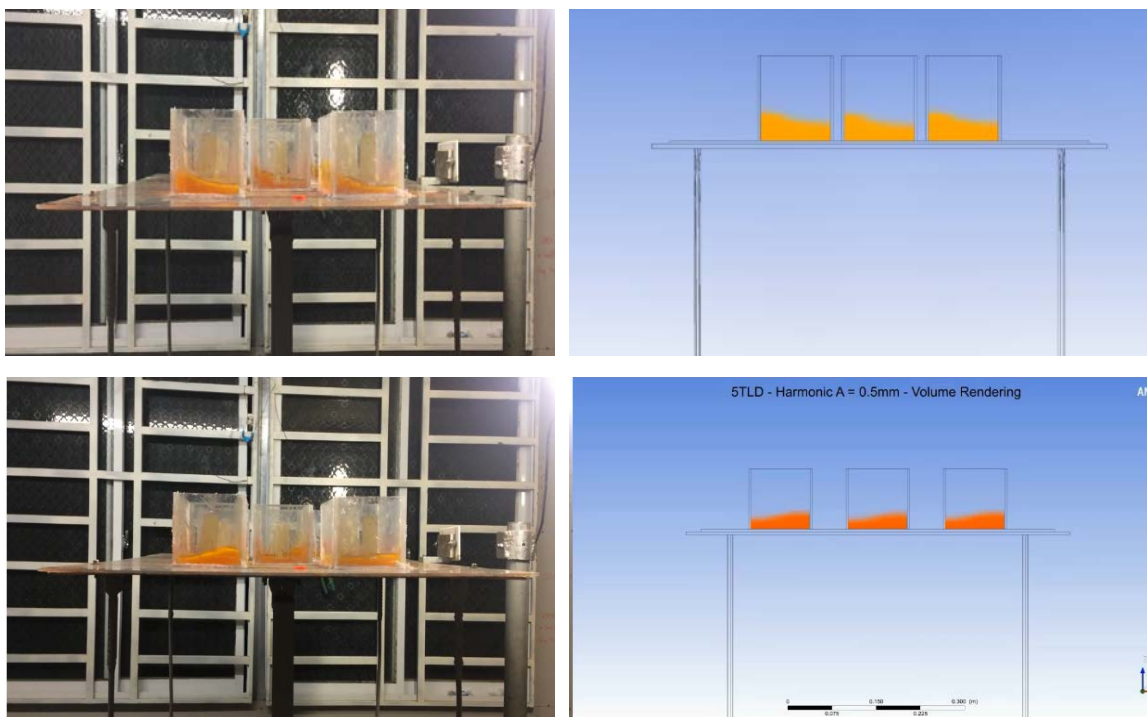
Đồ thị ở Hình 4. 16 cho thấy hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi kết cấu chịu kích thích nền điều hòa, giá trị chuyển vị đỉnh đạt cực đại là $\pm 45mm$. Để giảm chấn thì

MTLD ở Bảng 4. 2 và Bảng 4. 3 lần lượt được sử dụng. FVM/FEM thực hiện phân tích chuyển vị đỉnh khung, kết quả được thể hiện ở Hình 4. 17.



Hình 4. 17 Hiệu quả giảm chấn MTLD khi khung chịu dao động nền điều hòa

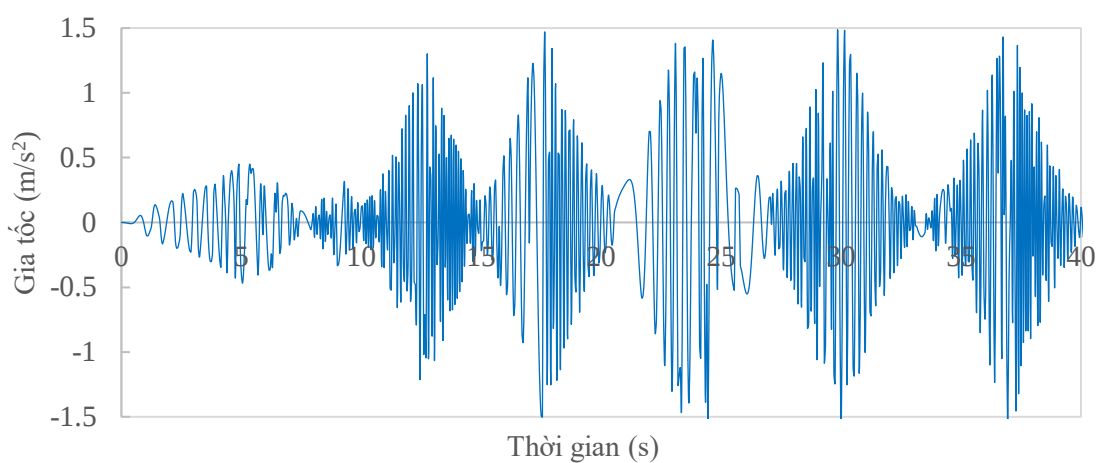
Đồ thị ở Hình 4. 17 cho thấy thiết bị MTLD giúp giảm một cách đáng kể sự dao động của khung, lần lượt giúp khung giảm 83% (45.0mm còn 7.4mm), 93.8% (từ 45mm còn 2.75mm) và 95.5% (45mm còn 2.0mm) trong trường hợp sử dụng lần lượt 1, 3 và 5 bể chứa chất lỏng. Ngoài ra FVM/FEM (Hình 4. 18) còn cho thấy sự chính xác giữa mô phỏng số và thí nghiệm trong phân tích pha dao động cũng như biên độ cực đại đỉnh khung khi khung chịu tải điều hòa có sử dụng MTLD để giảm chấn.



Hình 4. 18 Dao động sóng khi sử dụng 5TLD tại 3.3s và 15.2s

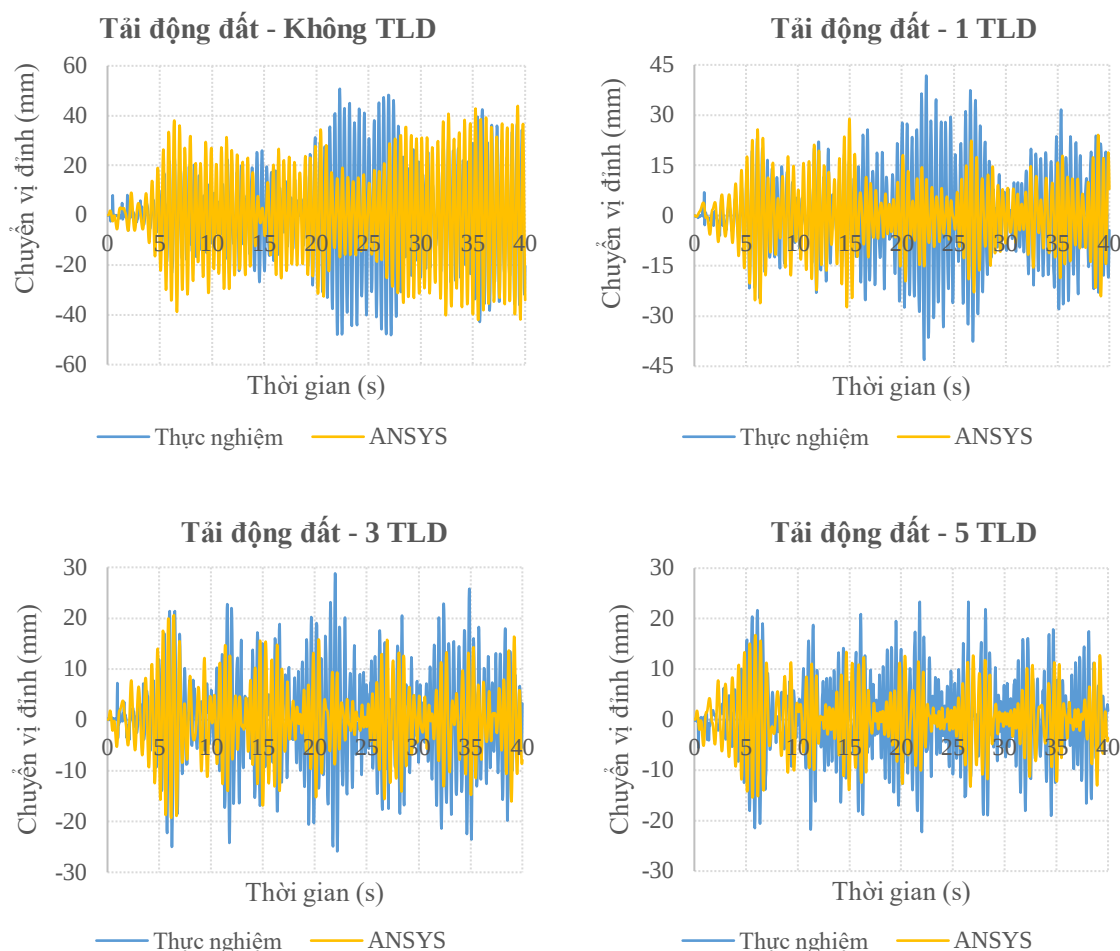
4.5.3 MTLD điều khiển dao động khung khi chịu tải trọng nền kích thích

Dao động nền kích thích được tạo ra với đồ thị gia tốc theo thời gian được thể hiện như Hình 4.15, là dữ liệu nền ở chương 2, Hình 2. 32. Ở đây sử dụng lại để phân tích khung và so sánh phương pháp khối lượng thu gọn với FVM/FEM. Dữ liệu nền này được lựa chọn vì hai nguyên nhân: (1) khi khung chịu dao động này thì chuyển vị đỉnh khung đạt cực đại 45.0mm và (2) dữ liệu này phù hợp với khả năng tạo chuyển động của bàn lắc được chế tạo tại Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM.



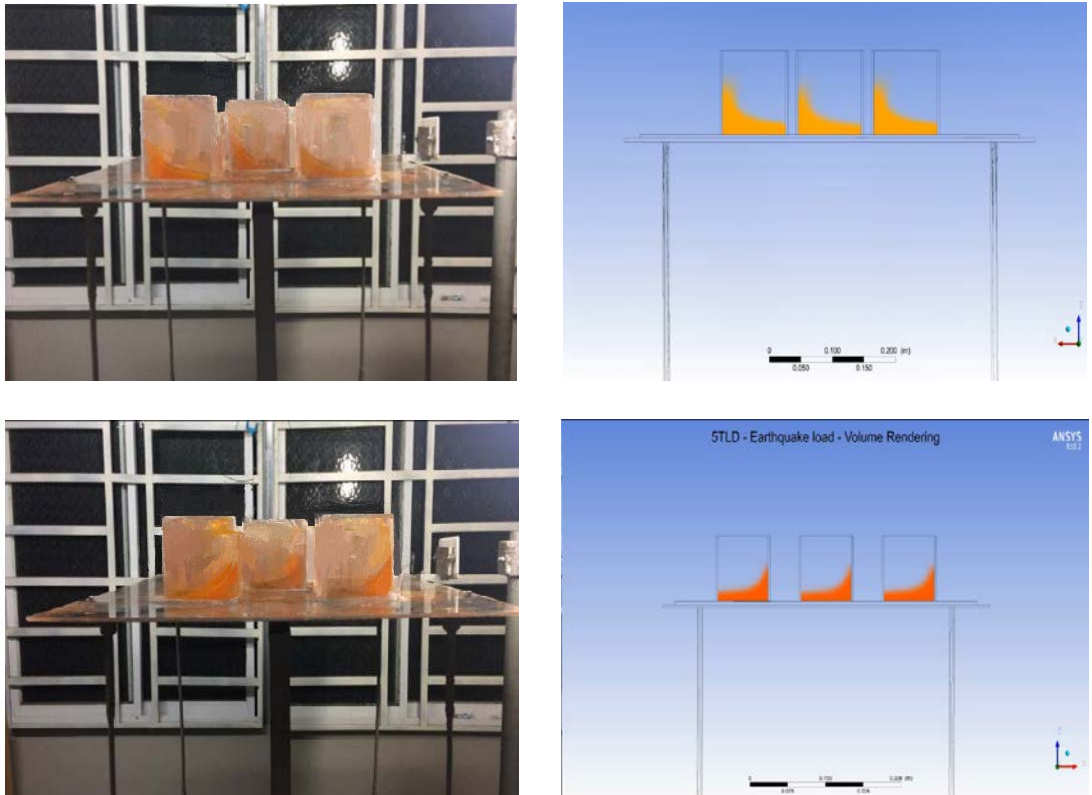
Hình 4. 19 Dữ liệu dao động nền kích thích trên bàn lắc

Kết quả phân tích chuyển vị đỉnh khung theo thời gian khi không sử dụng thiết bị giảm chấn và sử dụng MTLD với 1,3,5 TLD được thể hiện ở Hình 4. 20

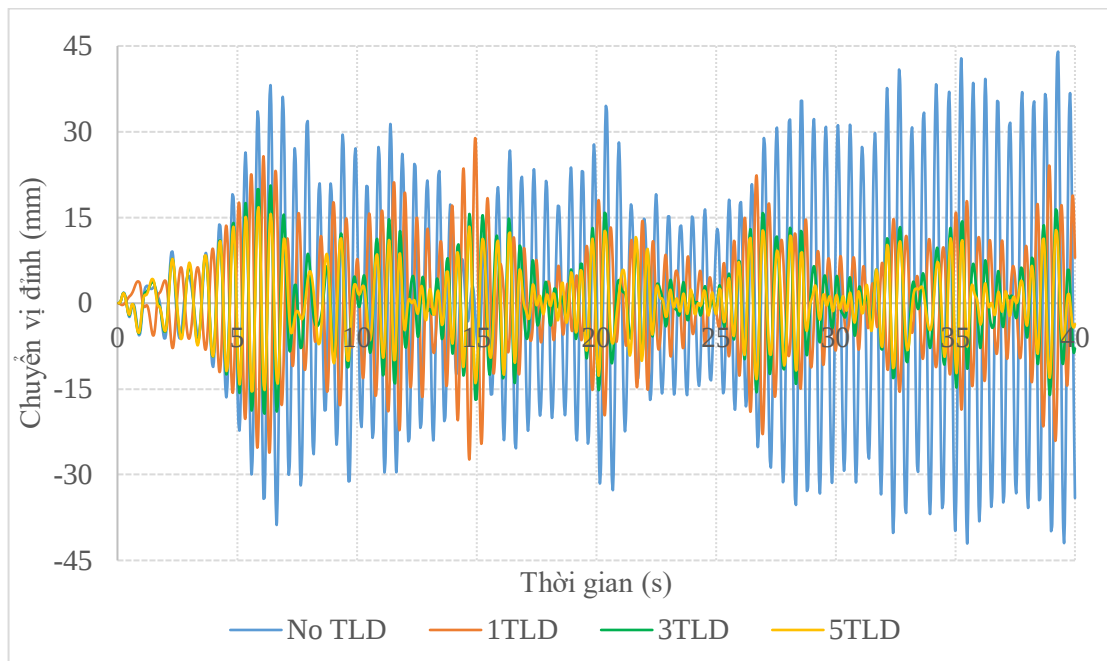


Hình 4. 20 Hiệu quả giảm chấn MTLD khi khung chịu dao động nền kích thích

Đồ thị ở Hình 4. 20 chỉ ra rằng chuyển vị đỉnh cực đại của khung với 0-TLD khi mô phỏng số đạt giá trị cực đại bằng 43.89 mm tại giây thứ 39.3 s, trong khi đó giá trị lớn nhất đo được từ thí nghiệm là 47.3 mm ở 26.45 s. Ngoài ra, trong 6 s đầu tiên khi sử dụng thiết bị giảm chấn, MTLD không giúp cho khung giảm dao động. Tuy nhiên kể từ giây thứ 6 trở đi, thiết bị giúp giảm chuyển vị đỉnh cực đại của khung lần lượt 60%, 73% và 78.4% còn 17.16 mm (t=39.44 s) với 1 TLD, 11.83 mm (t=38.65 s) với 3 TLD và 9.45 mm (t=39.15 s) với 5 TLDs. Sự tương thích giữa mô phỏng số và thí nghiệm được thể hiện ở Hình 4. 21



Hình 4. 21 Sóng chất lỏng ở 4.5s và 17.2s khi chịu dao động nền kích thích
 Hiệu quả giảm chấn MTLD phân tích bằng phương pháp FVM/FEM được thể hiện ở đồ thị Hình 4. 22 trong trường hợp không sử dụng TLD và sử dụng 1,3,5 TLD.



Hình 4. 22 Hiệu quả giảm chấn của MTLD khi phân tích bằng FVM/FEM

4.5.4 Nhận xét kết quả

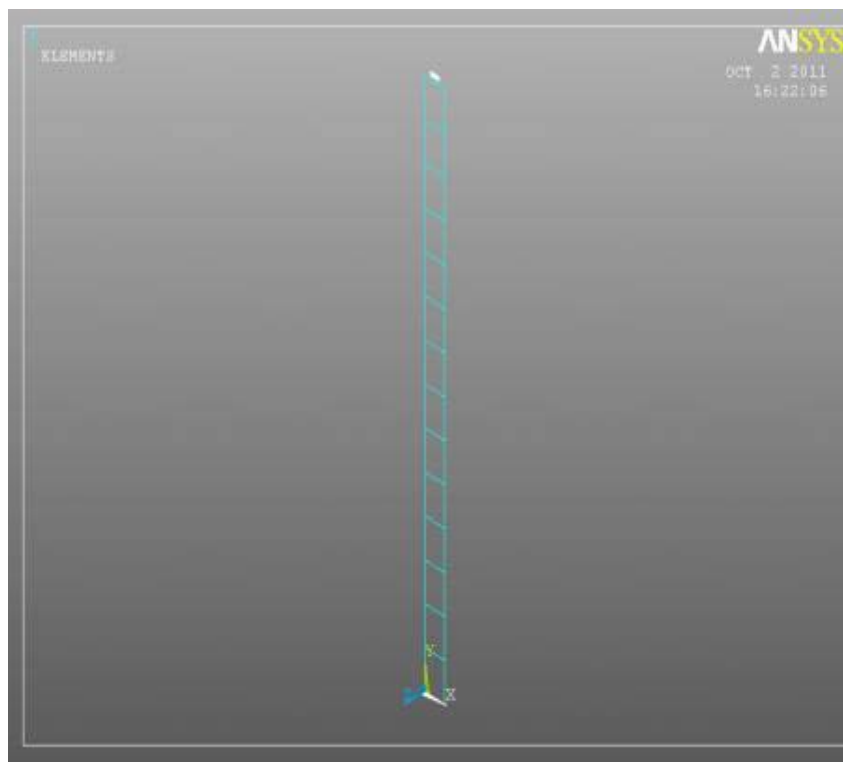
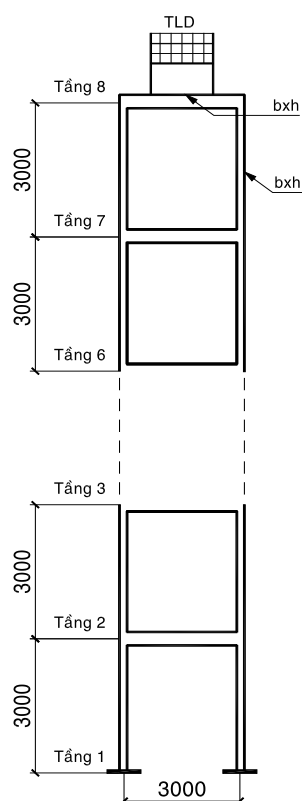
Kết quả phân tích bằng FVM/FEM khung chịu tải trọng động cho thấy khả năng điều khiển dao động của MTLD là rất tốt, khi số lượng TLD càng nhiều thì hiệu quả thiết bị càng tăng. Tuy nhiên, tương tự như ở chương 2, đến một số lượng bề nhất định kết quả giảm chấn của thiết bị là hội tụ. Trong trường hợp này số lượng 5TLD được xem là tối ưu. Ngoài ra, vẫn còn có sự sai khác giữa mô phỏng số và thí nghiệm đặc biệt khi khung chịu dao động nền kích thích (Hình 4. 20). Sự sai khác này do nhiều nguyên nhân, tuy nhiên giá trị chuyển vị đỉnh cực đại chênh lệch không nhiều (<10% giữa 43.89mm và 47.3mm) nên có thể chấp nhận được trong thực tế thiết kế.

MTLD giúp giảm đến 95% (45mm còn 2mm) chuyển vị đỉnh trong trường hợp công trình chịu tải trọng dao động điều hoà (đồ thị ở Hình 4. 17), kết luận này phù hợp với nghiên cứu của Bhattacharjee và cộng sự (2013) [113]. MTLD giúp giảm 78.3% chuyển vị đỉnh khung khi công trình chịu dao động nền kích thích, kết luận này phù hợp nghiên cứu đã thực hiện bởi Ashasi và cộng sự (2014) [96]. Ngoài ra, MTLD chỉ được kích hoạt làm việc kể từ giây thứ 6 trở đi theo kết quả mô phỏng số.

4.6 Ảnh hưởng của thành bể mềm khi xét FSI đến hiệu quả TLD

Mục này là một trong những nội dung đã được nghiên cứu bởi Tường và cộng sự (2019) [14]. Nội dung chính của mục là xem xét sự làm việc của TLD thành bể có xét FSI nhằm mục đích không bỏ qua sự đàn hồi của thành bể, có thể dẫn đến thay đổi đặc trưng động lực học bể chứa chất lỏng, đặc biệt là tần số riêng TLD. Khi đó, TLD sẽ không làm việc theo thiết kế và mất tác dụng giảm chấn. Ngoài ra, với các TLD có kích thước lớn như ở các toà nhà Gama ở Indonesia, Comcast hay The Vista ở Hoa Kỳ với các bể nước lên đến hơn 1.5 triệu lít thì không thể giả thiết thành bể tuyệt đối cứng.

Để thấy ảnh hưởng của thành bể mềm đến sự làm việc của TLD, khung 8 tầng (Hình 4. 23) chịu tải trọng động được phân tích trong trường hợp không sử dụng và có sử dụng thiết bị giảm chấn, với t_w từ mỏng đến dày. Phương pháp mô phỏng thực hiện tương tự nghiên cứu của Ong và cộng sự (2017) [131].



Hình 4. 23 Khung phẳng sử dụng bể nước mái như thiết bị TLD

Quy trình thiết kế TLD có thể tham khảo tại nghiên cứu của Tường và cộng sự (2019) [14] hoặc nghiên cứu của Banerji và cộng sự (2000) [27]. Kết quả tính toán TLD và đặc điểm của khung được thể hiện ở Bảng 4. 4 và Bảng 4. 5.

Bảng 4. 4 Đặc trưng riêng khung 8 tầng và TLD sử dụng

STT	Đặc trưng vật liệu	Ký hiệu	Giá trị
Khung thép			
1	Chiều cao khung	h_k	$3 \times 8 = 24 \text{ m}$
2	Bước cột	b_c	3.0 m
3	Kích thước cột	$b_c \times h_c$	$0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$
4	Kích thước dầm	$b_d \times h_d$	$0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$
5	Khối lượng riêng thép	ρ_t	7800 kg / m^3
6	Module đàn hồi thép	E_t	210 GPa
7	Hệ số poisson thép	ν_t	0.3

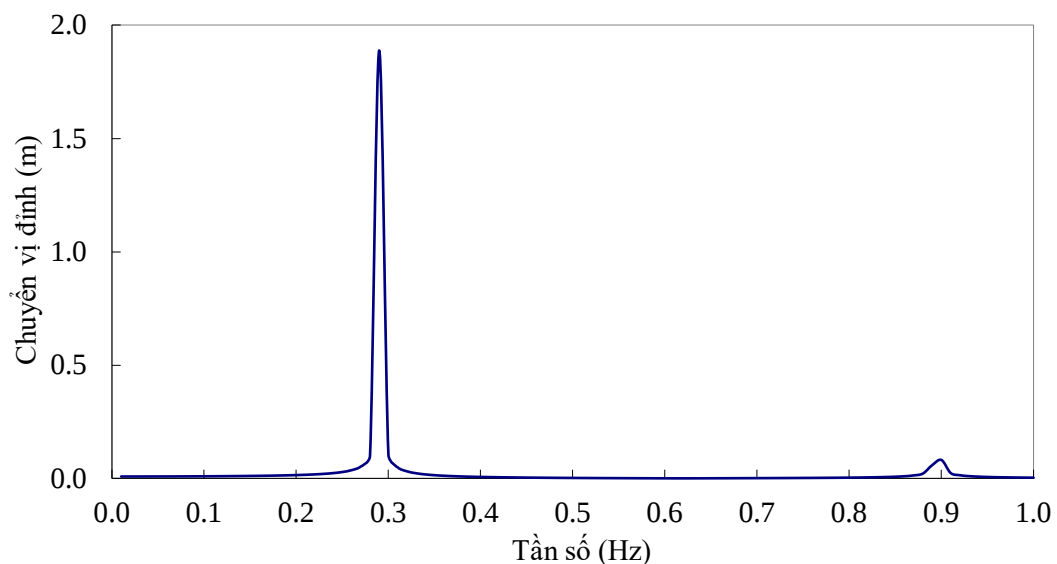
Đặc trưng thiết bị TLD bằng thép			
8	Chiều dài mỗi TLD	L	2.0 m
9	Chiều cao nước	h_f	0.14 m
10	Tần số TLD f_{TLD}	f_{TLD}	0.291 Hz

Bảng 4. 5 Tần số tự nhiên của khung 8 tầng

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Tần số (Hz)	0.2985	0.89582	1.5681	2.3326

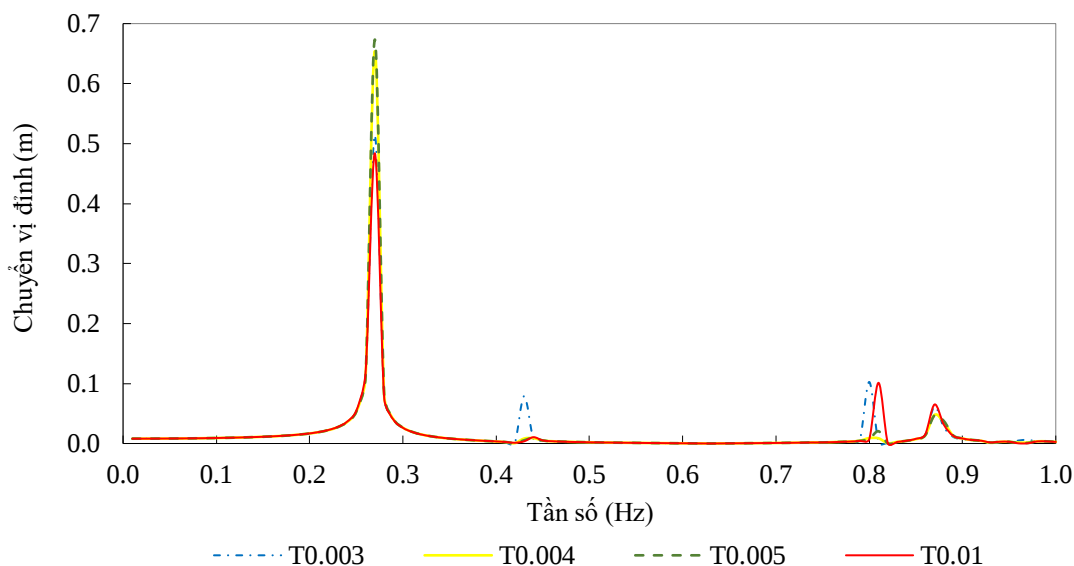
4.6.1 Khung chịu tải điều hòa

Để phân tích đáp ứng điều hòa kết cấu, cho khung thép chịu tải trọng tập trung ở đỉnh trái như sau $F = F_0 \sin(\omega t)$ trong đó $F_0 = 1000N$, tần số của lực kích thích được chọn phân tích từ $0 \rightarrow 1\text{Hz}$ tương đương $\omega = 0 \rightarrow 2\pi(\text{rad/s})$. Kết quả phân tích đáp ứng chuyển vị đỉnh phải của khung trên miền tần số khi không sử dụng TLD giảm chấn được thể hiện ở Hình 4. 24. Có thể nhận thấy đáp ứng chuyển vị đỉnh khung đạt cực đại tại tần số tự nhiên $f_1 = 0.29\text{Hz}$ và $f_2 = 0.89\text{Hz}$. Điều này hoàn toàn hợp lý khi so sánh tần số của tải trọng gây cộng hưởng khung với tần số dao động tự nhiên của khung tại Bảng 4. 5.



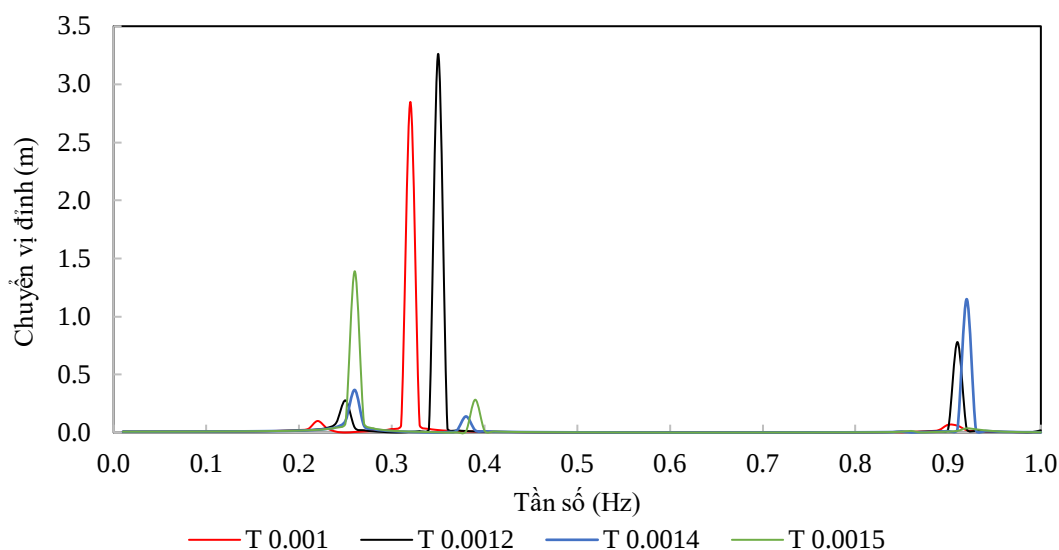
Hình 4. 24 Chuyển vị đỉnh khung 8 tầng khi không có TLD

Khi sử dụng TLD làm thiết bị giảm chấn (ký hiệu T0.003 tương ứng bể có $t_w = 0.003m$), đáp ứng dao động khung giảm đáng kể. Tuy nhiên với t_w khác nhau, chuyển vị đỉnh khung có sự chênh lệch nhau. Kết quả thể hiện qua đồ thị ở Hình 4. 25 và Hình 4. 26.



Hình 4. 25 Chuyển vị đỉnh khung 8 tầng khi có TLD với thành bể cứng

Từ Hình 4. 25, có thể thấy độ dày của thành bể t_w là khác nhau nhưng tần số ngoại lực gây cộng hưởng và đáp ứng chuyển vị đỉnh khung là tương đương nhau. Điều này chứng tỏ, tồn tại một “ngưỡng” t_w của bể chứa để TLD có thể xem là tuyệt đối cứng, và mỗi một bể chứa có một “ngưỡng” t_w khác nhau phụ thuộc vào chiều cao chất lỏng, độ dày thành bể... như đã trình bày ở Chương 3. Đây là một trong những nét mới của luận án, ý nghĩa của điều đó là, khi độ dày TLD lớn hơn “ngưỡng” t_w thì khả năng điều khiển dao động của thiết bị là như nhau và cũng chính là khả năng của TLD có thành bể tuyệt đối cứng. Tuy nhiên t_w không phải là một hằng số cố định mà có thể thay đổi, phụ thuộc vào độ lớn của ngoại lực tác động vào cơ hệ như kết luận của Tường và cộng sự [9]. Điều này hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu gần đây của Ching-Ching Yu và cộng sự [187].

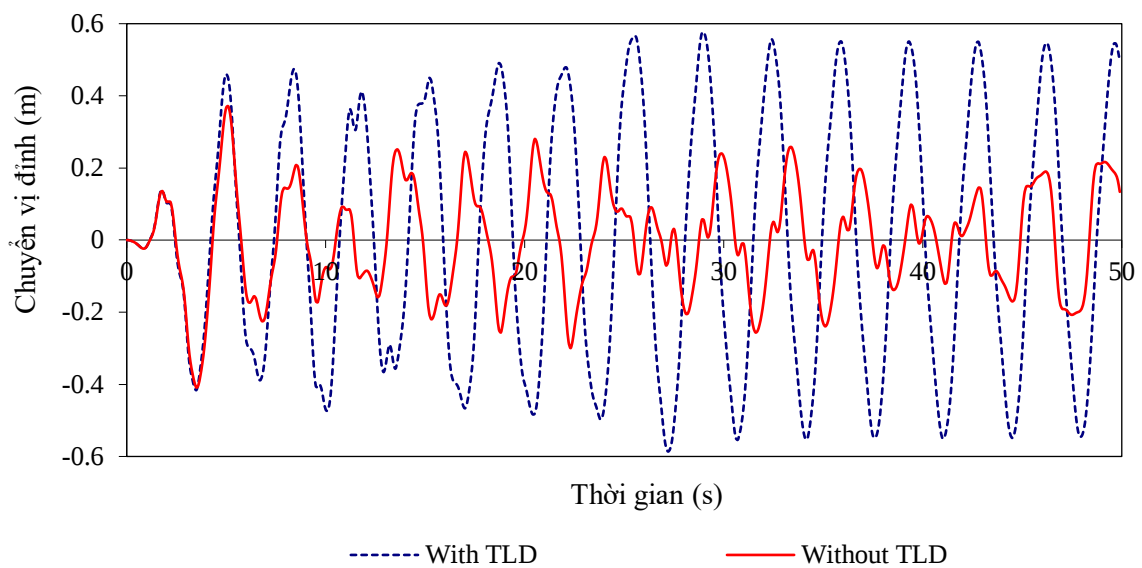


Hình 4. 26 Chuyển vị đỉnh khung 8 tầng khi có TLD với thành bể mềm

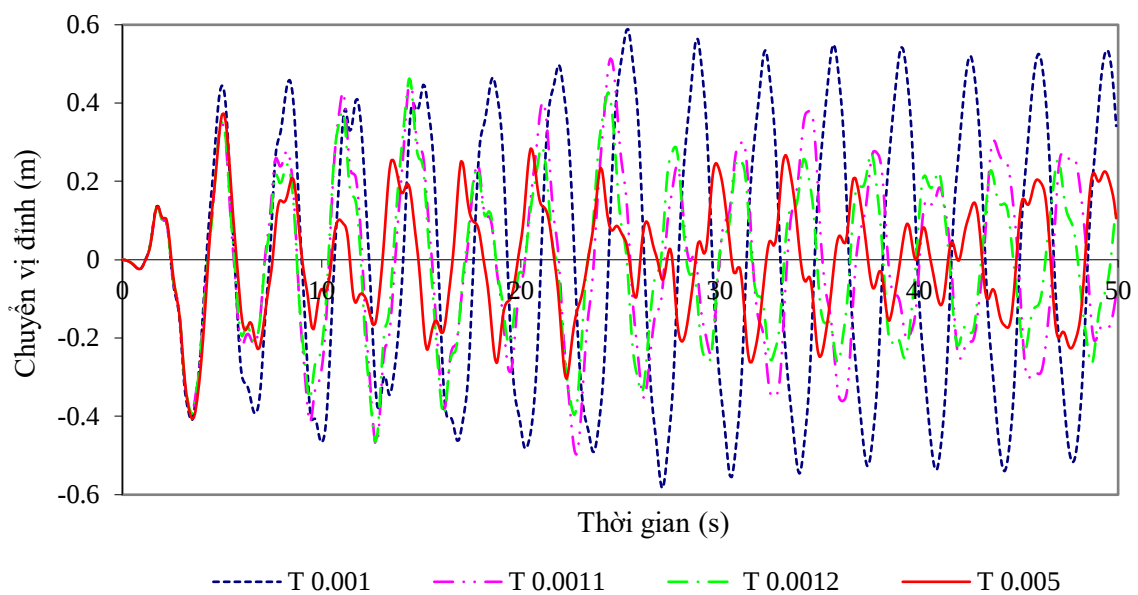
Khi t_w nhỏ hơn “ngưỡng” cứng thì tác dụng của TLD giảm dần, và đến một giới hạn nhất định ($t_w \leq 1.5mm$) thì TLD mất hoàn toàn tác dụng, điều này thể hiện qua đồ thị Hình 4. 26. Hơn thế nữa, chất lỏng bên trong bể thành mỏng dao động trở thành ngoại lực gây ra chuyển vị đỉnh khung có TLD lớn hơn so với khi không sử dụng TLD để giảm chấn. Vì vậy kỹ sư thiết kế cần phải lưu ý vấn đề độ dày thành bể khi thiết kế thiết bị giảm chấn chất lỏng.

4.6.2 Khung chịu động đất Elcentro

Tương tự như khi chịu đáp ứng dao động điều hòa, đối với trường hợp khung chịu tải trọng động đất Elcentro, chuyển vị đỉnh khung giảm đi đáng kể trong trường hợp sử dụng thiết bị giảm chấn. Khi có TLD, chuyển vị cực đại đỉnh khung là 0.573m, tuy nhiên khi có sử dụng TLD với thành bể xem như cứng thì chuyển vị đỉnh khung là 0.23m thể hiện qua đồ thị Hình 4. 27.



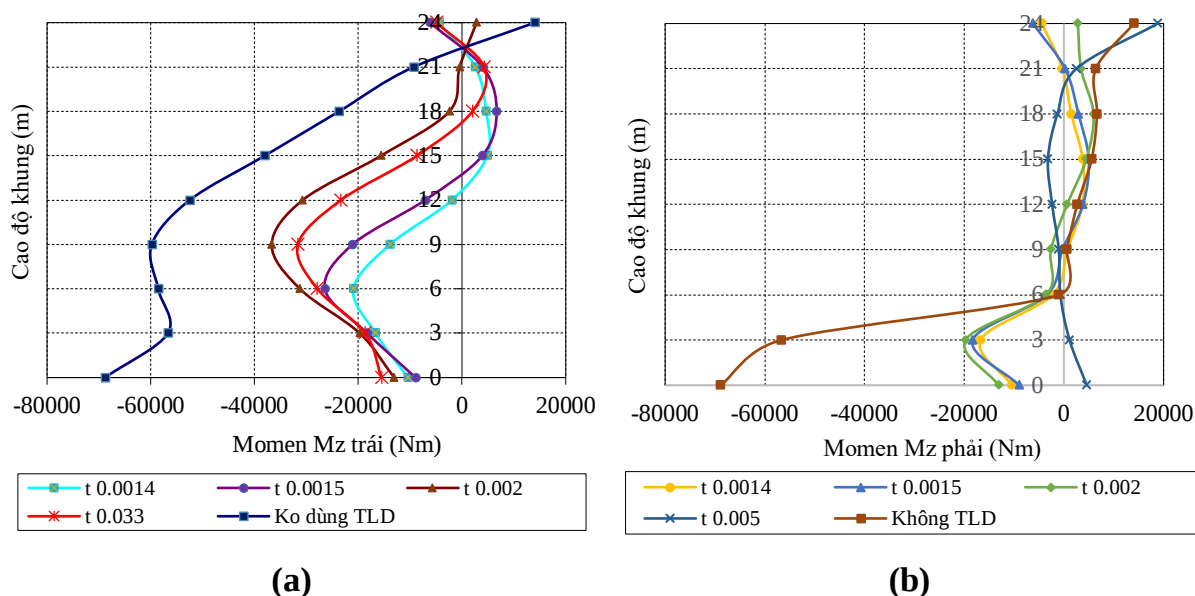
Hình 4. 27 Hiệu quả giảm chấn TLD thành cứng khi khung chịu động đất



Hình 4. 28 Hiệu quả giảm chấn TLD thành mềm khi khung chịu động đất

Tương tự trường hợp khung chịu tải điều hòa, đối với TLD có thành mỏng hiệu quả giảm chấn của thiết bị sẽ bị ảnh hưởng rất nhiều và khi độ dày thành bể mỏng đến một mức nào đó $t_w \leq 0.001m$ thì TLD mất khả năng điều khiển dao động khi khung 8 tầng chịu tải trọng động đất Elcentro như đồ thị ở Hình 4. 28.

Để thấy rõ hơn khả năng của TLD cũng như ảnh hưởng của t_w đến đáp ứng dao động của khung, mô men trong cột được tính toán và trình bày ở đồ thị Hình 4. 29.



Hình 4. 29 Momen khung với TLD có độ dày khác nhau

Từ đồ thị Hình 4. 29, có thể thấy mô men trong khung được giảm đi đáng kể lên đến 50% cho cột trái và 75% cho cột phải khi sử dụng TLD làm thiết bị giảm chấn. Tuy nhiên với cùng một TLD nhưng độ dày thành bể khác nhau thì khả năng giảm chấn của thiết bị cũng khác nhau, sự chênh lệch có thể từ 10-15%.

4.7 Tóm tắt chương 4

FVM/FEM được sử dụng để phân tích hiệu quả giảm chấn kết cấu với MTLD trong trường hợp khung thép chịu dao động điều hòa và chịu dao động nền kích thích. Khung thép được mô phỏng ba chiều xét FSI với kết quả tính toán có sự đồng nhất so với thí nghiệm trên bàn lắc. Đối với trường hợp khung chịu tải điều hòa, kết quả phân tích chuyển vị đỉnh gần như không sai lệch so với thí nghiệm (đồ thị ở Hình 4. 16, Hình 4. 17 và Hình 4. 18). Đối với trường hợp chịu dao động nền kích thích, có sự khác nhau nhưng chuyển vị cực đại đỉnh khung giữa mô phỏng và thí nghiệm là xấp xỉ nhau (Hình 4. 20 và Hình 4. 22). Điều này có ý nghĩa trong thực tiễn thiết kế.

TLD được ứng dụng phổ biến và rộng rãi trên thế giới cho các công trình ngày càng cao tầng, đến thời điểm hiện tại (2020) đã có công trình The Vista, Hoa Kỳ cao

101 tầng (365m) với TLD lên đến 1.5 triệu lít nước đã được đưa vào sử dụng. Với thể tích nước lớn làm việc như thiết bị giảm chấn, hiện tượng FSI không thể bị bỏ qua khi thiết kế. FSI đóng vai trò quan trọng trong việc thiết kế TLD đặc biệt đối với các bể có thành mỏng phải được xét đến một cách cẩn thận vì có thể làm mất đi khả năng giảm chấn của TLD (Hình 4. 25 và Hình 4. 27). Khi độ dày thành bể còn nằm trong một giới hạn nào đó thì TLD vẫn phát huy tác dụng giảm chấn nhưng khi thành bể đủ mỏng thì điều này không còn đúng nữa (Hình 4. 26 và Hình 4. 28) như khẳng định của Tường và cộng sự (2019) [[14](#)]. Ngoài ra, FSI còn phải được xem xét đối với bể thành mềm vì khi dao động sóng chất lỏng đủ lớn làm áp lực tác dụng lên thành bể cũng như biến dạng bể lớn sẽ dẫn đến thành bể bị phá hoại [[77](#)]. Sự phá hoại này đã từng xảy ra với thiết kế bể chứa xem thành bể tuyệt đối cứng ở chương 3 [[119](#), [121](#), [188](#)].

Việc thiết kế MTLD có thể sử dụng quy trình ở Hình 4. 10. Quy trình này giúp thiết kế lựa chọn nhanh các thông số chính của thiết bị bằng phương pháp khối lượng thu gọn, sau đó thực hiện bài toán kiểm tra một cách chính xác sự đáp ứng dao động kết cấu và chất lỏng bên trong TLD có xét FSI bằng FVM/FEM. Các nội dung trên đã được công bố trong nghiên cứu gần đây của Tường và Huynh (2020) [[185](#)].

CHƯƠNG 5

THÍ NGHIỆM ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG KẾT CẤU TRÊN BÀN LẮC TỰ CHẾ TẠO

Trong chương này, một số nghiên cứu đã thực hiện trước đây về phương pháp thí nghiệm kiểm tra động lực học kết cấu được trình bày tóm tắt hoặc đề cập, từ đó làm cơ sở để thiết lập mô hình thí nghiệm. Mục đích không chỉ để tìm hiểu ứng xử động của kết cấu khi sử dụng MTLD như thiết bị giảm chấn và đối chiếu với kết quả mô phỏng ở các chương trước, mà còn để phát triển cho các hướng nghiên cứu sẽ thực hiện trong tương lai.

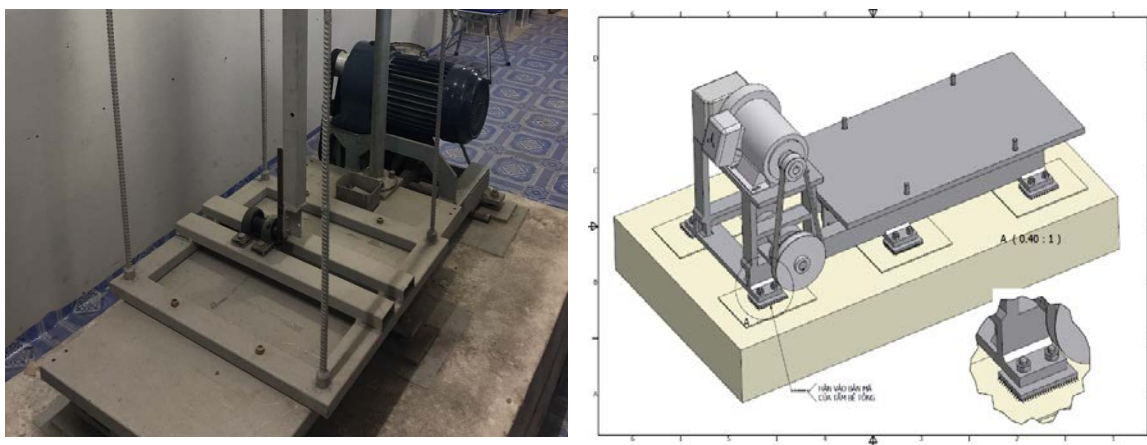
5.1 Phương pháp thí nghiệm

Thí nghiệm đóng vai trò rất quan trọng trong việc đánh giá ứng xử của hệ kết cấu khi chịu các tải trọng động như động đất hay cháy nổ. Nếu thí nghiệm được thực hiện chuẩn xác, các kết quả đạt được từ đó có thể làm cho các mô hình số đáng tin cậy hơn. Các thí nghiệm cũng sẽ cho thấy được các thông số đặc trưng giúp dự đoán được ứng xử của một công trình thật khi trải qua các tình huống tương tự. Chính từ đó sẽ giúp cho kỹ sư có phương án tiết kiệm hơn để thiết kế công trình. Có rất nhiều phương pháp thực nghiệm kiểm tra động lực học kết cấu như phương pháp giả động, mô hình thu nhỏ tỷ lệ với dao động trên bàn lắc, bán thí nghiệm kết hợp mô phỏng v.v... mỗi phương pháp đều có ưu nhược điểm riêng [173].

Để thí nghiệm kiểm tra khả năng điều khiển dao động của thiết bị giảm chấn dạng chất lỏng MTLD thì cần phải có bàn lắc tạo dao động nền. Kết cấu bên trên bàn lắc được cho (1) dao động tự do (2) chịu dao động nền điều hoà tại tần số cộng hưởng và (3) chịu dao động nền kích thích trong trường hợp không và có sử dụng thiết bị MTLD. Từ đó xác định được chuyển vị đỉnh, tỷ số cản và tần số dao động riêng của khung, ngoài ra còn xác định được chiều cao sóng chất lỏng bên trong bể khi dao động. Đây là những thông số cần thiết để đánh giá hiệu quả giảm chấn. Kết quả thí

nghiệm được so sánh với kết quả mô phỏng từ các phần mềm SAP 2000 hoặc ANSYS để thấy được sự phù hợp giữa thực tế và phương pháp số.

Bàn lắc được tác giả chế tạo tại Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM (Hình 5. 1). Thiết bị sử dụng năng lượng điện với giao diện tiếng Việt rất tiện lợi cũng như tiết kiệm khi tiến hành thí nghiệm, ngoài ra thiết bị không phụ thuộc hãng sản xuất khi cần nâng cấp hay thay đổi phần cứng, là nhược điểm của các bàn lắc được cung cấp bởi các hãng nước ngoài. Bàn lắc tạo chuyển vị nền với biên độ dao động được điều chỉnh bằng cách tăng giảm khoảng lệch tâm giữa đầu thanh truyền với trục khuỷu (Hình 5. 2). Khả năng mang tải của bàn lắc là 300kg, giả lập được nhiều dạng dao động với gia tốc cực đại đến 1.5 m/s^2 . Biên độ dao động của bàn là $\pm 5 \text{ cm}$. Việc thay đổi tốc độ quay của động cơ sẽ làm cho chuyển vị nền là điều hòa hay tạo kích thích nền theo dữ liệu xác định trước.

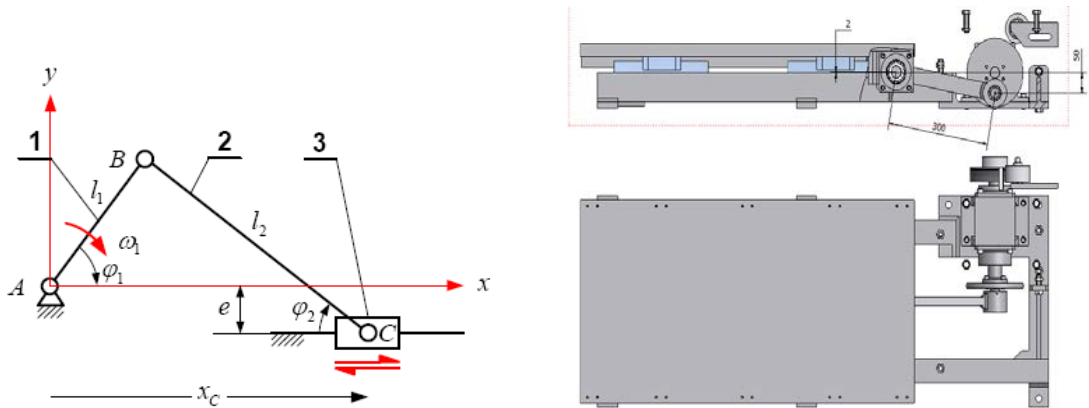


Hình 5. 1 Bàn lắc tự chế tạo

5.2 Cơ sở lý thuyết chế tạo bàn lắc

Dao động của bàn lắc là dựa trên sự di chuyển của tay quay con trượt như Hình 5. 2 chi tiết về các bộ phận bàn lắc thể hiện ở Hình 5. 3. Nguyên lý hoạt động của thiết bị này là khi động cơ quay tại vị trí A làm cho trục khuỷu I_1 quay, I_1 quay dẫn đến thanh truyền động I_2 quay với đầu một đầu thanh truyền B quay quanh vị trí cân bằng đầu C còn lại sẽ trượt trên trục x và mang theo bàn lắc. Khi tốc độ động cơ thay

đổi thì tốc độ bàn lắc cũng thay đổi theo, từ đó tạo ra dao động điều hoà hoặc dao động nền kích thích.



Hình 5. 2 Nguyên lý hoạt động của động cơ tay quay con trượt với (1): trục khuỷu, (2) thanh truyền, (3) con trượt mang bàn lắc

Từ các dữ liệu động đất cũng như dao động điều hoà thường xuyên thí nghiệm cho công trình, chọn các giá trị l_1, l_2 ; riêng ω_1 là tần số dao động vòng phụ thuộc vào năng suất tốc độ của động cơ, thông số cần tìm là gia tốc và vận tốc tại đầu C (chính là dao động của bàn lắc tại chân của công trình) cần phải xác định được nhằm mục đích khi điều chỉnh ω_1 thì sẽ có được gia tốc, vận tốc tại C. Từ Hình 5. 2, xác định được vị trí bàn lắc C theo công thức:

$$x_C = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \quad (5.1)$$

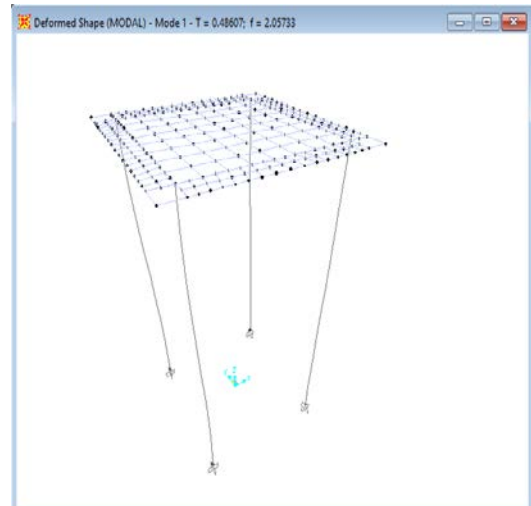
trong đó
$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_1(t) = \omega_1(t) \\ l_1 \sin \varphi_1 + e = l_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \Rightarrow \varphi_2 = \arcsin \frac{l_1 \sin \varphi_1 + e}{l_2}$$

$$x_C = x_C(\varphi_1) = x_C(\omega_1(t)) \Rightarrow \begin{cases} v_C = v_C(t) = -l_1 \omega_1 (\sin \varphi_1 + \cos \varphi_1 \tan \varphi_2) \\ a_C = a_C(t) = -l_1 \omega_1^2 \left[\frac{\cos(\varphi_1 + \varphi_2)}{\cos \varphi_2} + \frac{l_1 \cos^2 \varphi_1}{l_2 \cos^3 \varphi_2} \right] \end{cases} \quad (5.2)$$

Từ hệ phương trình (5.2) có thể thấy được rằng để có được vận tốc, gia tốc của C thì chỉ cần lấy đạo hàm x_C theo t . Trên đây là bài toán cho trước giá trị góc quay ω động cơ, tìm gia tốc của con trượt hay bàn lắc.

5.3 Thiết lập mô hình thí nghiệm

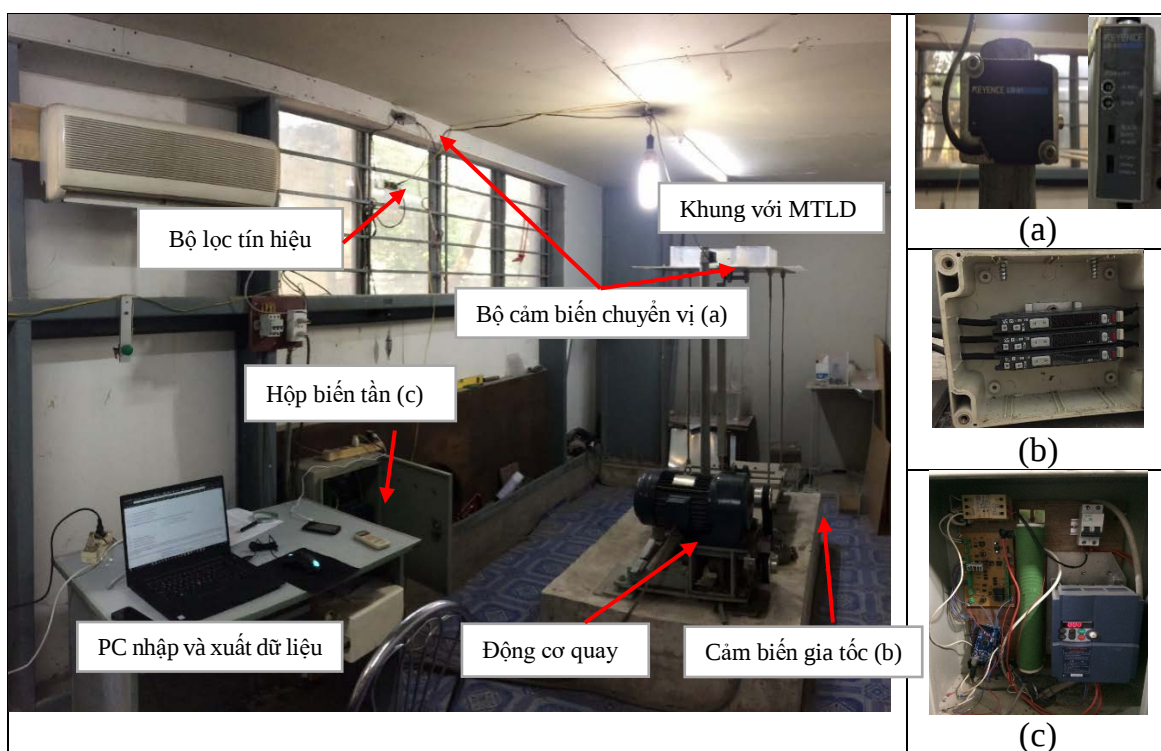
Như được trình bày ở chương 2 và chương 4, kết cấu được thí nghiệm trong luận án là khung không gian chịu uốn một tầng được liên kết ngàm với nền bên dưới. Chiều cao của khung là 1100mm, bước cột của khung theo cả hai phương X và Y đều là 520mm. Tấm sàn bằng thép có kích thước là 650mm x 650mm và có độ dày 5.0mm. Liên kết cứng giữa đầu cột và sàn thông qua bốn bulong như ở Hình 5. 5. Thêm vào đó, để chống xoay cho khung thì một thanh thép hộp (5cm x 5cm) có khả năng trượt dọc trục và cố định theo trục còn lại được hàn từ đáy tấm sàn xuống nền bên dưới. Ngoài ra thanh thép hộp này còn giúp cho tấm sàn tăng cường độ cứng trong mặt phẳng (sàn tuyệt đối cứng). Chi tiết này rất quan trọng đối với việc giữ cho khung được ổn định trong toàn bộ quá trình thí nghiệm.



Hình 5. 5 Khung thép được thí nghiệm giảm chấn bằng MTLTD

Bốn cột thép là thép tròn có gân với cường độ chịu kéo $f_u = 365MPa$ và đường kính 10mm. Kết quả mô phỏng số giúp xác định được khối lượng hữu hiệu trong các mode dao động, theo đó thì khối lượng hữu hiệu của hai mode đầu tiên theo phương X là 87.73% và theo phương Y là 7.68%. Nói cách khác, khối lượng hữu hiệu ở hai hàm dạng đầu của khung phẳng đóng góp 95.5% toàn bộ khối lượng hữu hiệu của khung. Do đó thiết bị giảm chấn MTLTD chỉ cần được thiết kế để không chế chuyển vị đối với tần số cơ bản của khung như ở nghiên cứu của Ashasi (2014) [96]. Khối lượng của khung thép đo được là 22.3 kg với các đặc trưng đã được trình bày ở Bảng 4. 1.

Bàn lắc có thể tạo ra dao động nền điều hòa hoặc dao động nền kích thích với các tần số dao động khác nhau. Như được chỉ ra ở Hình 5. 6, để đo được đáp ứng chuyển vị đỉnh khung, cảm biến KEYENCE mã hiệu sản xuất LB-01 được sử dụng để truyền tín hiệu đi và KEYENCE mã hiệu sản xuất LB-60 dùng để nhận tín hiệu về. Thêm vào đó, một cảm biến gia tốc KEYENCE FS-N11N-FV32 kết nối với hệ thống thu nhận dữ liệu được ứng dụng để ghi lại gia tốc hành trình của bàn lắc theo thời gian. Bộ thu nhận dữ liệu được kết nối với thiết bị lọc số liệu, xử lý nhiễu và lọc tín hiệu để có được các giá trị thu về tốt nhất từ đáp ứng dao động của khung. Tín hiệu chuyển vị đỉnh khung được lấy mỗi 0.05 giây theo thời gian thực.



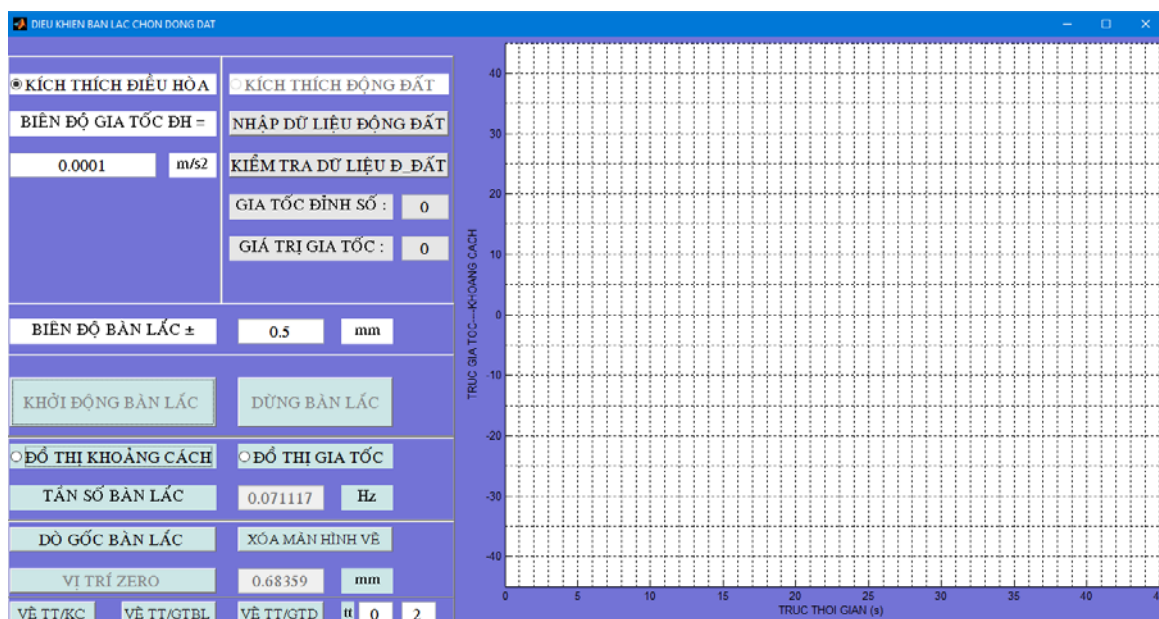
Hình 5. 6 Thiết lập thí nghiệm với (a) cảm biến chuyển vị, (b) cảm biến gia tốc và (c) hộp biến tần

Có ba quy trình thí nghiệm đối với khung thép dao động trên bàn lắc bao gồm: (1) khung dao động tự do để xác định được tỷ số cản của khung cũng như sự tắt dần dao động khung (2) khung chịu dao động nền điều hòa tại tần số cộng hưởng và (3) khung chịu dao động nền kích thích. Cả ba quy trình đều được thí nghiệm trong trường hợp có và không sử dụng MTLĐ.



Hình 5. 7 Kích thước hình học và chiều chuyển động khung thí nghiệm

Toàn bộ dữ liệu truyền về máy tính sẽ được chương trình phân tích dao động xử lý kết quả thực nghiệm như Hình 5. 8.

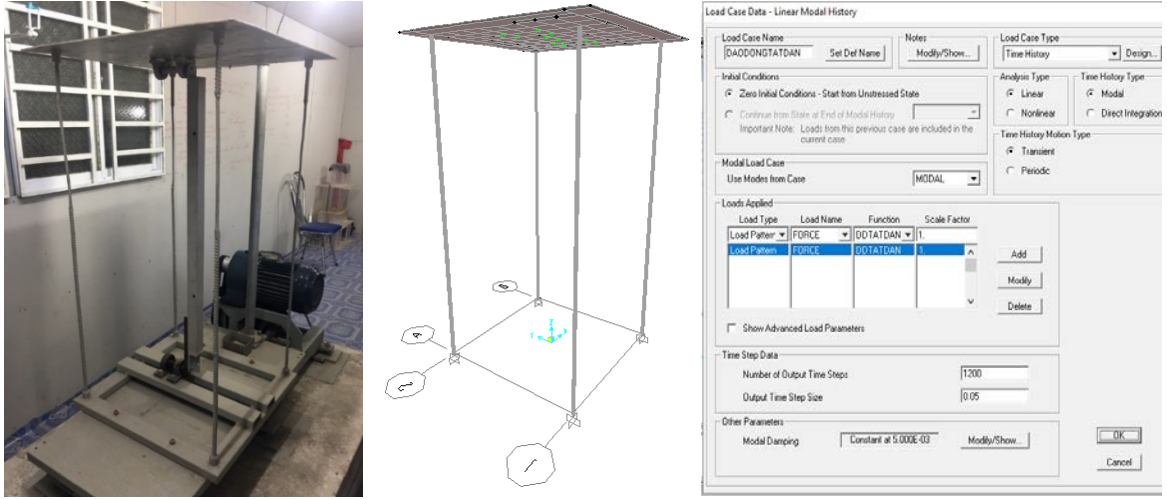


Hình 5. 8 Giao diện chương trình điều khiển bàn lắc

5.4 Tiến hành thí nghiệm và kết quả

5.4.1 Phân tích tần số dao động riêng

Trong mục này sẽ trình bày phương pháp thí nghiệm xác định tần số riêng của khung (Hình 5. 9) sau đó đối chiếu với kết quả mô phỏng từ SAP2000 và ANSYS. Kết quả khung có chu kỳ $T = 0.486$ (s), ứng với tần số $f = 2.058$ (Hz).



Hình 5. 9 Khung thép thí nghiệm và tần số khung từ SAP2000

Để xác định tỷ số cản của khung và xác định tần số riêng từ thí nghiệm, khung thép được kéo ra khỏi vị trí cân bằng khoảng 50mm sau đó cho dao động tự do để đo chuyển vị đỉnh khung, trình tự thực hiện này tương tự như phương pháp của Pabarja và cộng sự (2019) [189]. Từ chuyển vị đỉnh khung đo được xác định tần số riêng của khung bằng cách tính độ giảm loga trung bình δ_{tb} , tỷ số cản ξ_{tb} và sau đó là chu kỳ dao động có cản τ_d bằng các công thức từ (5.3) đến (5.6). Với m là số chu kỳ dao động trong một khoảng thời gian t . Chi tiết của phương pháp có thể tham khảo các nghiên cứu của Rao (1995, 2011) [108, 190].

$$\delta_{tb} = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{x_1}{x_{m+1}} \right) \quad (5.3)$$

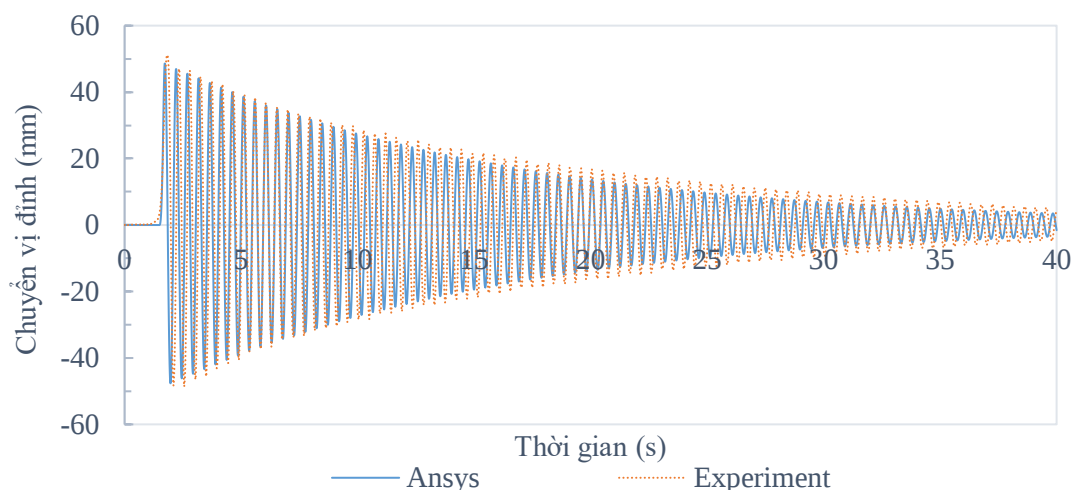
$$\xi_{tb} = \frac{\delta_{tb}}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta_{tb}^2}} \quad (5.4)$$

$$\tau_d = \left(\frac{t_{m+1} - t_1}{m} \right) \Rightarrow f_d = \frac{1}{\tau_d} \quad (5.5)$$

$$f_s = \frac{f_d}{\sqrt{1 - \xi_{tb}^2}} \quad (5.6)$$

Trong đó t_1, t_{m+1} là thời điểm cuối của chu kỳ đầu tiên và chu kỳ m

Thí nghiệm kết cấu chịu dao động tự do được tiến hành, chuyển vị đỉnh khung được đo với mỗi từng bước thời gian 0.05s. Sau khi đo chuyển vị đỉnh khung theo thời gian, từ (5.3) xác định δ_{tb} sau đó từ (5.4) xác định tỷ số cản $\xi_{tb} = 0.5\%$, đây chính là tỷ số cản đã dùng mô phỏng khung ở chương 2 và chương 4. $\xi_{tb} = 0.5\%$ được dùng để phân tích khung chịu dao động tự do trên ANSYS và đối chiếu với thí nghiệm, kết quả chuyển vị đỉnh từ mô phỏng và thí nghiệm thể hiện ở Hình 5. 10.



Hình 5. 10 Chuyển vị đỉnh khung dao động tự do so sánh ANSYS

Hình 5. 10 cho thấy kết quả mô phỏng khung chịu dao động tự do giữa thí nghiệm và ANSYS là độ đồng nhất cao, do đó tỷ số cản $\xi_{tb} = 0.5\%$ là hợp lý. Xét các chu kỳ liên tục của dao động khi chuyển vị đỉnh giảm từ 50mm xuống dưới 30mm (8 chu kỳ), bằng cách áp dụng công thức (5.5) xác định tần số có cản f_d và công thức (5.6), tính được tần số riêng của khung $f_s = 2.05Hz$.

Như vậy, qua các bước tính toán bên trên cho thấy kết quả tần số giữa SAP2000 và thí nghiệm đều cho ra cùng giá trị. Ngoài ra, chuyển vị đỉnh khung khi dao động tự do giữa mô phỏng ANSYS và thí nghiệm cho thấy sự phù hợp trong kết quả đo. Điều này chứng tỏ bàn lắc tự chế tạo và các cảm biến đáng tin cậy.

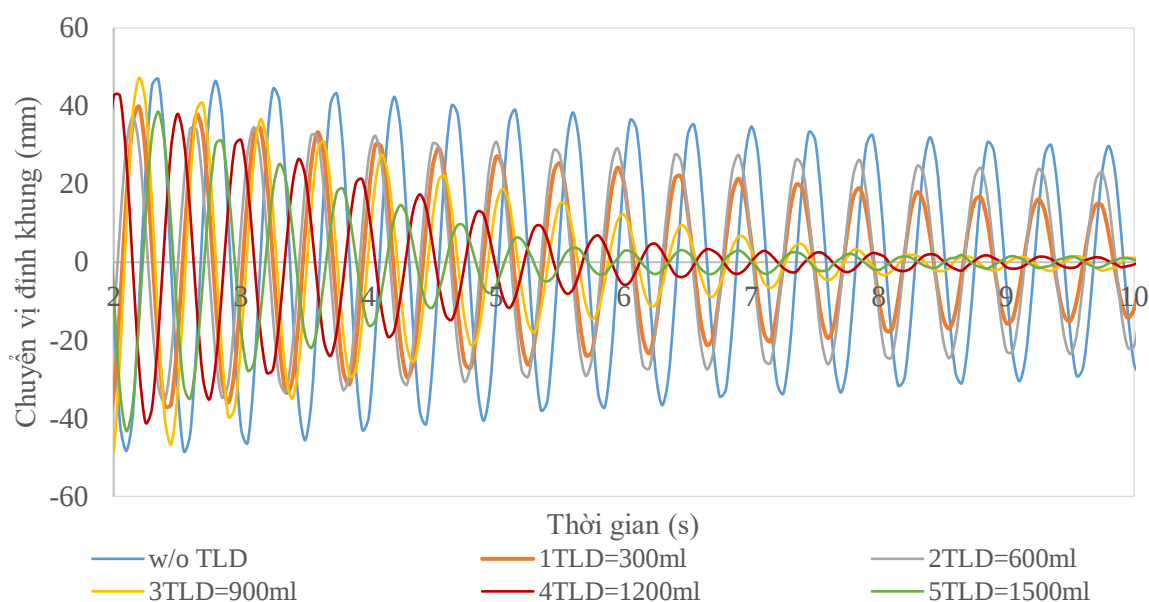
5.4.2 Hiệu quả MTLD khi khung dao động tự do

Để kiểm tra khả năng làm tắt dần dao động tự do khi sử dụng thiết bị giảm chấn chất lỏng đa tần, thí nghiệm khung được tiến hành với trường hợp có 1TLD, 2TLD, 3TLD, 4TLD và 5TLD. Như đã được trình bày ở chương 4, chi tiết chiều cao,

tần số, khối lượng chất lỏng trong MTLĐ có tại Bảng 5. 1, kết quả thí nghiệm đo dao động tắt dần của khung được thể hiện ở Hình 5. 11.

Bảng 5. 1 Chi tiết MTLĐ sử dụng thí nghiệm

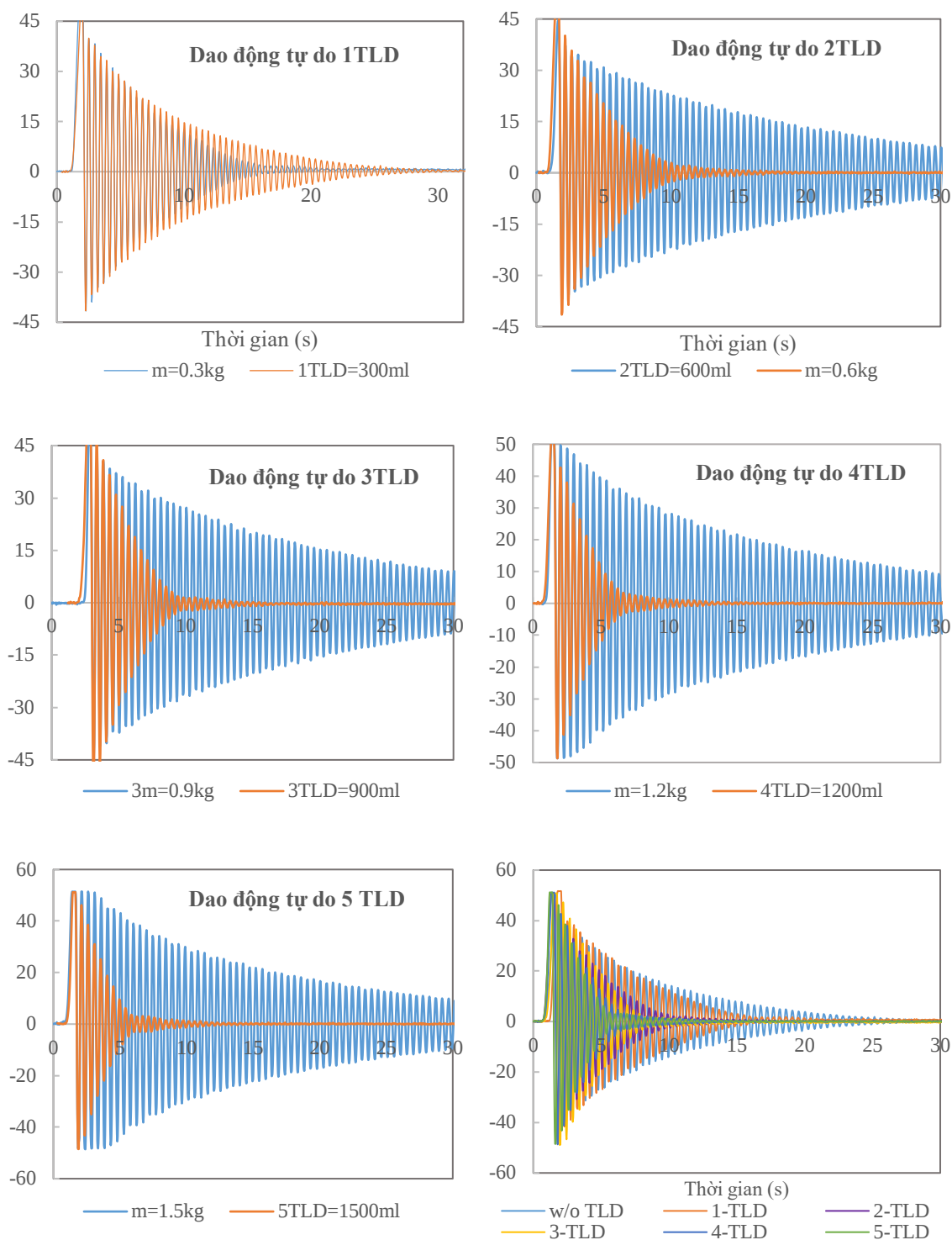
MTLD	TLD1	TLD2	TLD3	TLD4	TLD5
h_f (mm)	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0
f_{TLD} (Hz)	1.999	2.043	2.085	2.125	2.162
$\frac{f_{TLD}}{f_s}$	0.975	0.996	1.017	1.037	1.054
m_{TLD} (kg)	0.27	0.285	0.30	0.315	0.33
$\frac{m_{TLD}}{m_s}$ (%)	1.21	1.28	1.35	1.41	1.48



Hình 5. 11 Dao động tắt dần khi khung dao động tự do với MTLĐ

Thí nghiệm được tiến hành để so sánh thời gian tắt dần chuyển vị đỉnh khung khi có và không sử dụng MTLĐ trong trường hợp khung thép dao động tự do. MTLĐ lần lượt chứa chất lỏng với chiều cao tương ứng Bảng 5. 1. Tuy nhiên, từ Bảng 5. 1 cho thấy tổng khối lượng MTLĐ, m_{MTLD} , chiếm từ 1.35% $\rightarrow$ 6.73% m_s do đó tổng khối lượng của công trình thay đổi dẫn đến f_s cũng thay đổi, cho nên đồng thời tiến hành thêm các thí nghiệm với việc quy đổi thể tích nước của MTLĐ (M=1-5) về khối lượng quả nặng tương ứng (lớn nhất bằng 1,5kg “=” 5TLD ở Bảng 5. 1). Ý nghĩa việc này

là khi MTLD đặt ở đỉnh làm khung nặng hơn, có thể làm thay đổi f_s nên để so sánh khả năng giảm chuyển vị đỉnh thì thí nghiệm được tiến hành hai lần: (1) khung “+” MTLD và (2) khung “+” quả nặng. Kết quả chuyển vị đỉnh thể hiện ở Hình 5. 12.



Hình 5. 12 Dao động tắt dần với MTLD và quả nặng tương đương

Qua các kết quả trên, rút ra được kết luận:

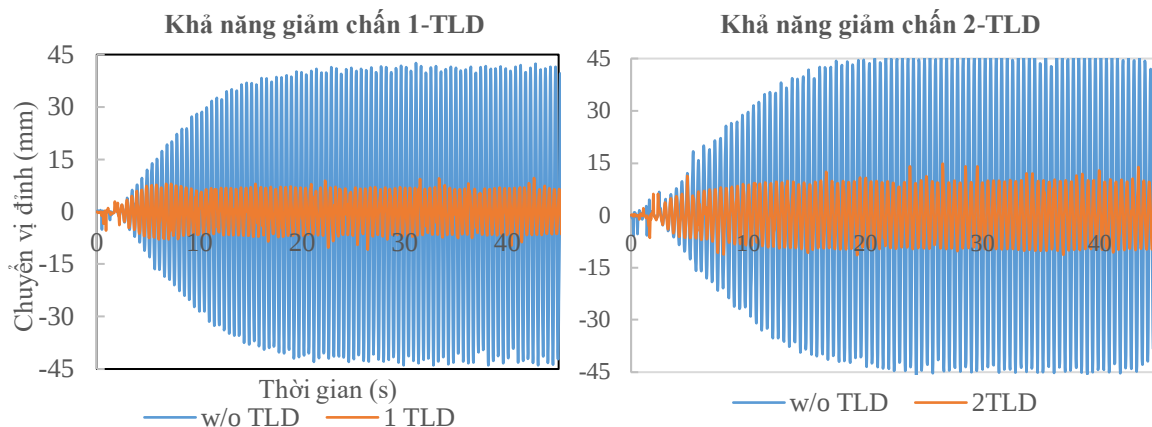
- Thiết bị giảm chấn chất lỏng đa tần MTLD giúp cho công trình tắt dần dao động tự do rất nhanh chóng. MTLD giảm 90% dao động từ 50mm xuống còn 5mm lần lượt ở giây thứ 37.7s, 13.3s, 7.4s và 4.9s với các khung có sử dụng 0,1,3 và 5TLD.
- Khi hệ sử dụng càng nhiều TLD thì khung tắt dần càng nhanh, nhưng từ hệ 3TLD đến hệ 5TLD sự khác nhau không nhiều, vì vậy có thể kết luận rằng 5 TLD là tối ưu đối với khung thép. Kết luận này cũng phù hợp với kết quả tính toán ở chương 2.

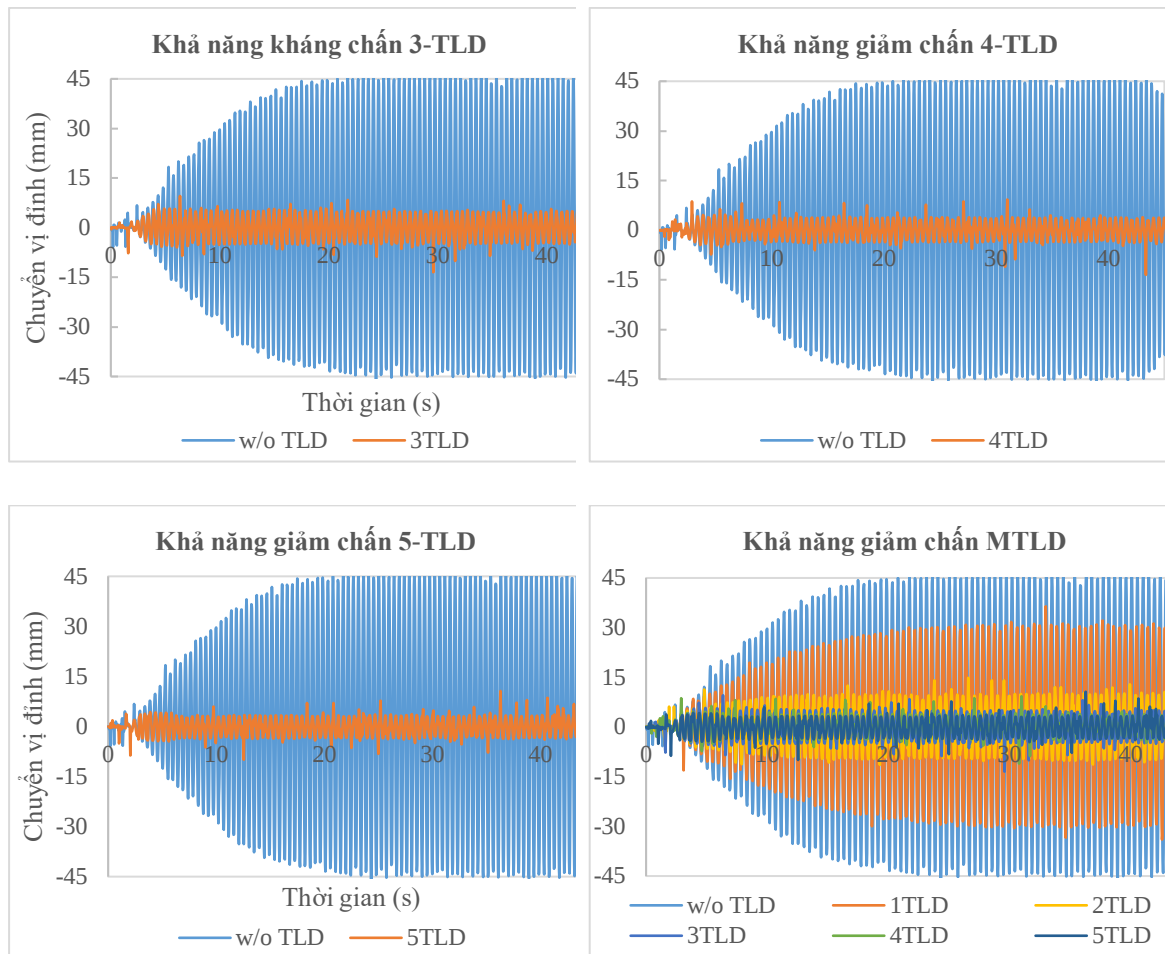
5.4.3 Hiệu quả MTLD khi khung dao động điều hòa

Để chứng tỏ hiệu quả giảm chấn của hệ, bàn lắc được sử dụng tạo kích thích dao động điều hòa $x = A \sin \omega_s t = 0.5 \cdot \sin \omega_s \cdot t (mm)$ ngay tại tần số riêng f_s để tạo ra hiện tượng cộng hưởng. Chuyển vị đỉnh của khung tối đa lên đến 4.5cm. Sau đó lần lượt sử dụng thiết bị giảm chấn với 1, 2, 3, 4 và 5 TLD. Theo cơ sở lý thuyết MTLD đã được trình bày ở chương 2, tần số của bể trung tâm f_n là:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi \times 9.81}{0.1} \tanh\left(\frac{\pi \times 0.02}{0.1}\right)} = 2.085 Hz$$

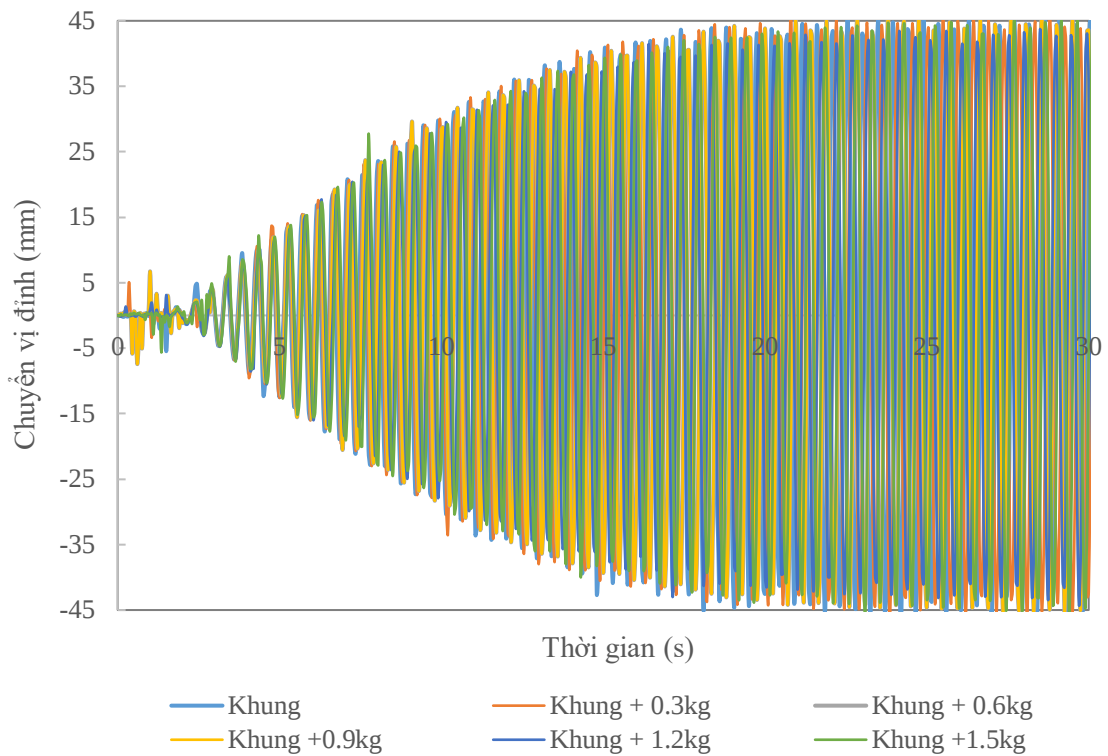
Kết quả chuyển vị đỉnh khi sử dụng thiết bị MTLD được thể hiện ở Hình 5. 13. Kết quả này đã được sử dụng để đối chiếu với kết quả mô phỏng ở chương 2 và 4.





Hình 5. 13 Hiệu quả MTLD khi khung chịu dao động nền điều hoà

Từ đồ thị ở Hình 5. 13 cho thấy MTLD giúp giảm đến 93% chuyển vị đỉnh của công trình (45.0mm còn 3.0mm). Càng nhiều TLD thì khả năng giảm chấn của thiết bị càng tăng lên. Tuy nhiên số lượng TLD tối ưu xác định từ Hình 5. 13 là 5 bể. Bên cạnh đó, từ nhận xét m_{MTLD} chiếm từ 1.35% $\rightarrow$ 6.73% m_s có thể làm thay đổi f_s nên cũng tương tự cách thí nghiệm ở khung dao động tự do, thí nghiệm đã thay chất lỏng trong bể bằng quả nặng với khối lượng tương đương gắn chặt vào khung để thí nghiệm. Kết quả chuyển vị đỉnh được thể hiện ở Hình 5. 14.

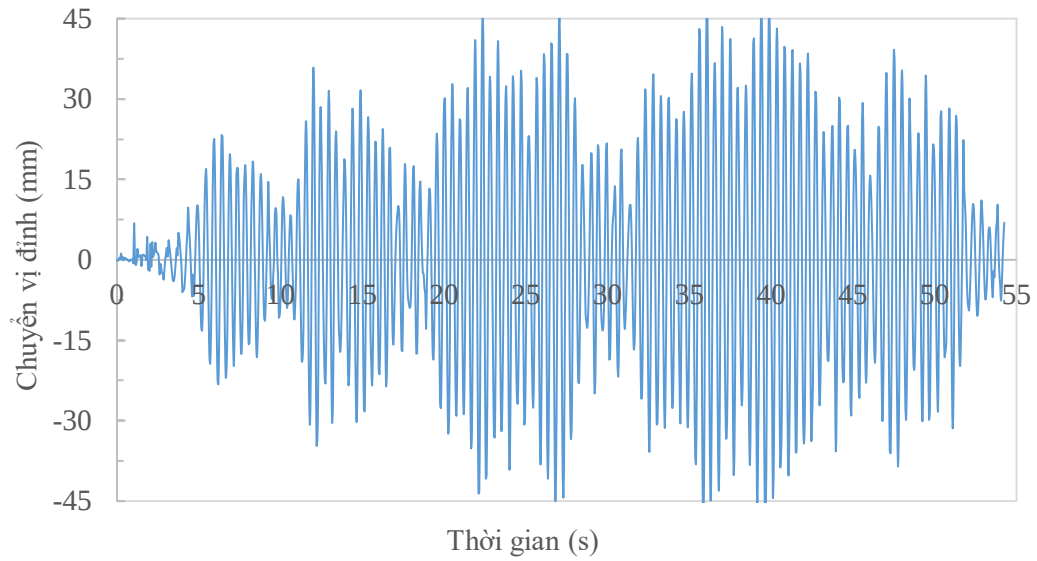


Hình 5. 14 *Khung dao động điều hòa với quả nặng tương đương MTLĐ*

Đồ thị Hình 5. 14 cho thấy khi khung mang thêm khối lượng bằng khối lượng của chất lỏng ở tất cả sáu trường hợp (0-5TLD) thì cộng hưởng vẫn xảy ra ở f_s ban đầu. Như vậy sự thay đổi khối lượng như trên không ảnh hưởng nhiều đến f_s của khung.

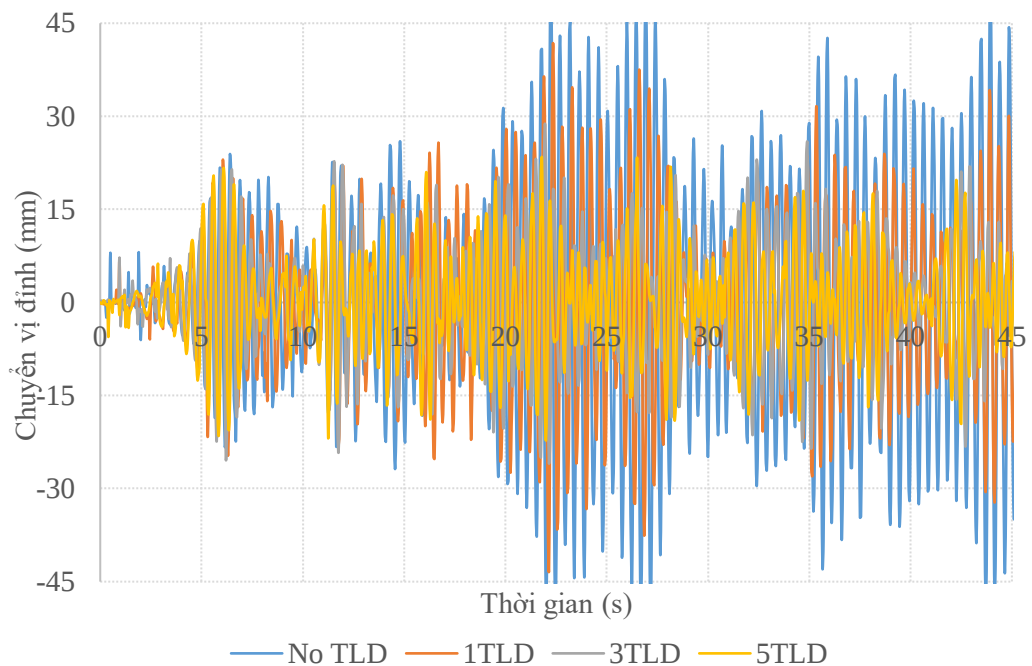
5.4.4 Hiệu quả MTLĐ khi khung chịu dao động nền kích thích

Tương tự như thí nghiệm với tải điều hòa, để khảo sát ảnh hưởng của TLD khi khung thép chịu dao động nền kích thích, một dữ liệu dao động nền theo thời gian như ở Hình 4. 19 được khởi tạo, trong đó biên độ cực đại khi dao động của bàn lắc là $\pm 3.0mm$. Thí nghiệm tiến hành với khung trong trường hợp không và có sử dụng MTLĐ để giảm chấn. Kết quả thí nghiệm thể hiện tại Hình 5. 15.



Hình 5. 15 Thí nghiệm khung với 0-TLD chịu dao động nền kích thích

Trong trường hợp không sử dụng MTLD thì chuyển vị đỉnh cực đại của khung là 45.0mm, bằng với chuyển vị đỉnh lớn nhất trong trường hợp dao động điều hòa khi cộng hưởng xảy ra. Kết quả thí nghiệm khung với MTLD được thể hiện ở Hình 5. 16.



Hình 5. 16 Thí nghiệm khung với MTLD chịu dao động nền kích thích

Từ đồ thị ở Hình 5. 16 cho thấy khi sử dụng MTLD điều khiển dao động thì chuyển vị đỉnh khung giảm đi đáng kể đặc biệt trong trường hợp sử dụng 5TLD, chuyển vị

đỉnh chỉ còn 17mm (giảm 63%) và trong trường hợp sử dụng 1TLD chuyển vị đỉnh còn 35mm (giảm 22%). Khả năng điều khiển dao động của thiết bị phù hợp với kết luận của Pandey (2019) [191]. Ngoài ra đồ thị cũng cho thấy, MTLD chỉ phát huy tác dụng kể từ giây thứ 7 trở đi đối với hệ 5TLD và giây thứ 10 đối với hệ 1TLD. Điều này cũng minh chứng cho kết luận càng nhiều TLD thì thiết bị giảm chấn sẽ càng ổn định hơn của Sun (1991) [150].

Nhận xét kết quả

- Thí nghiệm dao động tự do của khung được dùng để tính tỷ số cản có đối chiếu kết quả tính toán với phần mềm mô phỏng và cho kết quả tỷ số cản ξ_s hợp lý như các nghiên cứu đi trước [35, 131, 189, 191]. Đây cũng là thông số đầu vào cho phần mềm mô phỏng SAP2000 và ANSYS 18.2
- MTLD giúp dao động tự do tắt dần nhanh chóng. Càng nhiều bể chứa thì hiệu quả càng phát huy như đã chỉ ra ở Hình 5. 11.
- Đối với dao động điều hòa thì MTLD giúp giảm đến 93% dao động của khung khi hiện tượng cộng hưởng xảy ra như ở đồ thị Hình 5. 13.
- Đồ thị ở Hình 5. 16 chỉ ra rằng đối với tải trọng động đất, hệ 5TLD giúp chuyển vị đỉnh giảm đến 63% biên độ dao động.
- Tóm lại, thông qua các thí nghiệm trình bày bên trên, có thể kết luận rằng khả năng giảm chấn của thiết bị MTLD được đánh giá là tốt và càng nhiều TLD thì tính ổn định của thiết bị càng cao.

5.5 Tóm tắt chương 5

Khả năng điều khiển dao động của thiết bị MTLD được đánh giá là rất tốt, không chỉ trong trường hợp làm tắt rất nhanh chuyển vị đỉnh khi dao động tự do, mà còn giảm chấn hiệu quả với trường hợp công trình chịu tải trọng động

Thí nghiệm khảo sát hiệu quả giảm chấn của MTLD (1 → 5 bể) so với STLD khi khối lượng nước trong mỗi bể xấp xỉ $\mu = 1.3\%$, chịu tải trọng điều hòa có tần số kích thích bằng tần số cộng hưởng của khung. Kết quả cho thấy MTLD có hiệu quả

cao hơn đáng kể so với STLD và chuyển vị đỉnh giảm đến 93% khi sử dụng 5TLD. Tuy nhiên, đồ thị ở Hình 5. 13 cho thấy có sự hội tụ khi sử dụng 4 và 5 TLD.

Khi chịu dao động nền kích thích, MTLD giúp giảm từ 22% đến 63% chuyển vị đỉnh lớn nhất khi sử dụng 1 đến 5TLD. Giá trị này phù hợp với kết quả của Ong và cộng sự (2017) [[131](#)]

Bàn lắc được chế tạo với độ chính xác có thể dùng được trong nghiên cứu với giao diện tiếng Việt và rất dễ điều khiển. Tần số kích thích bàn lắc có độ chuẩn xác cao, do đó hiện tượng cộng hưởng khi tần số khung bằng tần số bàn lắc rất dễ dàng kiểm soát.

Kết quả thí nghiệm ở Chương 5 đã được công bố trong nghiên cứu gần đây của Tường và Huynh (2020) [[185](#)].

CHƯƠNG 6

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

6.1 Kết Luận

Thông qua kết quả nghiên cứu đạt được trong luận án, có thể rút ra một số kết luận như sau:

Khả năng ứng dụng của TLD gần như không bị giới hạn cho mọi loại công trình với quy mô khác nhau nhờ khả năng điều chỉnh tần số dễ dàng bằng cách hiệu chỉnh kích thước bể hoặc chiều cao mực nước. Thêm vào đó, giá thành TLD không đắt so với các thiết bị cùng tính năng, lại có thể sử dụng được cho công trình đã đưa vào sử dụng [91, 192] nên TLD rất phù hợp với điều kiện kinh tế, địa lý của Việt Nam, là quốc gia ít có hiện tượng động đất xảy ra. Vì vậy, nếu sử dụng các thiết bị chủ động hoặc bán bị động sẽ gây lãng phí nên TLD được xem như là một giải pháp hiệu quả về mặt kinh tế. Các vấn đề chính được tập trung trong luận án là:

- Phân tích các thông số đặc trưng của bể chứa chất lỏng nói chung và thiết bị TLD, MTLD nói riêng.
- Lập trình thiết kế MTLD bằng cách xem xét MTLD như MTMD để tính toán số lượng bể chứa, băng tần số phù hợp và tỷ số khối lượng tối ưu cho MTLD. Phương pháp quy đổi từ MTLD thành MTMD được thực hiện và mô phỏng bằng SAP2000 kết hợp thí nghiệm kiểm tra.
- Sự tương tác chất lỏng và thành bể do tính đàn hồi và độ dày thành bể ảnh hưởng đến các đặc trưng cơ bản của bể chứa chất lỏng nói chung và TLD nói riêng nên cần được khuyến cáo cho kỹ sư thiết kế lưu ý khi tính toán. Ngoài ra, độ chính xác của phương pháp FVM/FEM trong bài toán phân tích bể chứa chịu tải trọng động có xét FSI là nền tảng cho mô phỏng số của kết cấu sử dụng MTLD làm thiết bị giảm chấn.
- Luận án chỉ ra sự thiếu sót trong các Tiêu Chuẩn Xây Dựng phổ biến trên thế giới khi xem xét vấn đề thành bể đàn hồi trong thiết kế bể chứa chất lỏng. Độ

dày thành là một trong những thông số quan trọng cần lưu ý khi phân biệt thành bê cứng và thành bê mềm.

- Mô hình tính toán đa trường trong không gian ba chiều có kể đến sự tương tác được thiết lập nhằm phân tích đáp ứng dao động của khung cho kết quả hợp lý so với thí nghiệm. Đặc biệt trong trường hợp khung chịu dao động điều hòa thì kết quả chuyển vị đỉnh khung giữa thí nghiệm và mô phỏng là tương đương nhau. Các nghiên cứu về MTLĐ được so sánh với các kết quả của các tác giả đi trước chỉ ra hiệu quả giảm chấn của thiết bị này lên đến 93% cho khung chịu tải điều hoà và 63% khi chịu dao động nền kích thích.
- Sự ảnh hưởng của thành bê mềm có thể dẫn đến hiện tượng cộng hưởng dao động giữa sóng chất lỏng và thành bê, làm gia tăng áp lực sóng tác dụng lên bê và quan trọng nhất là thay đổi đặc trưng của TLD, làm TLD mất tác dụng giảm chấn.
- Bàn lắc dùng trong luận án được tác giả tự chế tạo tại Phòng Thí Nghiệm Kháng Chấn của Khoa Xây Dựng trực thuộc Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM. Mục đích bàn lắc để tạo chuyển vị nền dao động điều hòa hoặc động đất tác dụng lên công trình. Mức độ chính xác của bàn lắc được chứng tỏ qua các thí nghiệm và có thể khẳng định sự tin cậy.

6.2 Kiến nghị

Bên cạnh những kết quả đạt được, vẫn còn có một số vấn đề cần thêm sự nghiên cứu, phát triển trong tương lai:

- Hệ số ứng xử phân biệt thành bê mềm và cứng có thể được nghiên cứu mở rộng mục đích áp dụng cho nhiều loại vật liệu bê với nhiều dạng dao động nền khác nhau.
- Bàn lắc được thí nghiệm ở luận án là 1D, hướng nghiên cứu tiếp theo cần sử dụng 2D để có thể có kết quả tổng quát hơn.
- Phần đất nền bên dưới móng cũng có sự tương tác với công trình vì vậy hướng nghiên cứu mới là xem xét sự tương tác đa trường cơ hệ gồm kết cấu-chất lỏng-thành bê-nền móng.

PHỤ LỤC

A. Lập trình Matlab hệ MDOF với MTMD

A.1 Phân tích dao động MDOF với MTMD trên miền tần số

```
clc;
clear all;
close all;
Nfloor=[50];
Ntmd=[1]% 5 11 21 31];
damping_ratio_TMD_a=[0.01]% 0.01 0.01 0.01 0.01];
delta_gamma_a=[0 0.001 0.001 0.001 0.001];
gamma_c_a=[0.979];
for iN=1:max(size(Nfloor))
    N_FloorNumber=Nfloor(iN)
    for iNtmd=1:max(size(Ntmd))
        n_TMDNumber=Ntmd(iNtmd)
        %central TMD
        gamma_c=gamma_c_a(iN)
        damping_ratio_TMD=damping_ratio_TMD_a(iNtmd)
        delta_gamma=delta_gamma_a(iNtmd)

        M_bar=M_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        K_bar=K_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        [D,V]=eig(K_bar,M_bar);
        V11=V(1,1);
        %file name
        %s1='forceexcited_Freq_res_Amp_With control_N5n1.txt';
        s1='forceexcited_Freq_res_Amp_With control_N';
        s3=num2str(N_FloorNumber);
        s1=[s1 s3 'n'];
        s3=int2str(n_TMDNumber);
        s1=[s1 s3 '.txt'];

        %s2='forceexcited_Freq_res_Amp_Without control_N5n0.txt';
        s2='forceexcited_Freq_res_Amp_Without control_N';
        s3=num2str(N_FloorNumber);
        s2=[s2 s3 'n'];
        s3=int2str(0);
        s2=[s2 s3 '.txt'];
        %tính phi_mass
        phi_mass=0.01*N_FloorNumber/n_TMDNumber;
        % Force excited (wind)
        P_bar=[linspace(0.1,1,N_FloorNumber)
zeros(1,n_TMDNumber)]';
        omega_ratio=0:0.0005:0.2;
        %damping ratio of main structure
        damping_ratio=0.01;
        if n_TMDNumber ==1
            gamma_1=gamma_c-delta_gamma/2;
            for j=1:1:n_TMDNumber
```

```

        r(j)=gamma_1;
    end
end
if n_TMDNumber >1
    gamma_1=gamma_c-delta_gamma/2;
    for j=1:1:n_TMDNumber
        r(j)=(j-1)*delta_gamma/(n_TMDNumber-1)+gamma_1;
    end
end
r=r*sqrt(V11);
r_c=(phi_mass*damping_ratio_TMD/damping_ratio)*r;
r_k=phi_mass*(r.^2);
[M_bar,C_bar,K_bar] =
MCK_Normalize(N_FloorNumber,n_TMDNumber,phi_mass,r_c,r_k);

Phi_passive_withcontrol=passivecontrol_FreqRes(M_bar,C_bar,K_bar,omega_ratio,damping_ratio,P_bar,0);
dlmwrite(s1, [Phi_passive_withcontrol(:,1:N_FloorNumber)],
'delimiter', '\t');

% %%-----WITHOUT CONTROL-----%%
P_bar=[linspace(0.1,1,N_FloorNumber)]';
M_bar_withoutcontrol=M_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
C_bar_withoutcontrol=C_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
K_bar_withoutcontrol=K_Normalize(N_FloorNumber,0,0);

Phi_without=withoutcontrol_FreqRes(M_bar_withoutcontrol,C_bar_withoutcontrol,K_bar_withoutcontrol,omega_ratio,damping_ratio,P_bar,0);
;
dlmwrite(s2, [omega_ratio' Phi_without], 'delimiter',
'\t');
plot(omega_ratio,
[Phi_without(:,N_FloorNumber),Phi_passive_withcontrol(:,N_FloorNumber)]);
hold on;
end
end
end

```

A.2 MDOF với MTMD chịu tải điều hòa

```

clc;
clear all;
close all;

%Nfloor=[1];
%Ntmd=[1 5 11 21 31];
%damping_ratio_TMD_a=[0.059 0.027 0.019 0.019 0.019];
%delta_gamma_a=[0.0 0.115 0.14 0.147 0.149];
%gamma_c_a=[0.985];
%peak_frequency_ratio=1.0;
%tspan=[0 200];
%omega_f=2*pi*2.0;

```

```

%omega_0=omega_f*1/peak_frequency_ratio;
%story=1;

Nfloor=[5];
Ntmd=[1 5 11 21 31];
damping_ratio_TMD_a=[0.079 0.032 0.03 0.03 0.03];
delta_gamma_a=[0.0 0.15 0.172 0.18 0.183];
gamma_c_a=[0.978];
peak_frequency_ratio=0.2845;
tspan=[0 200];
omega_f=2*pi*2.0;
omega_0=omega_f*1/peak_frequency_ratio;
story=5;

%Nfloor=[10];
%Ntmd=[1 5 11 21 31];
%damping_ratio_TMD_a=[0.075 0.01 0.011 0.01 0.01];
%delta_gamma_a=[0.0 0.187 0.204 0.218 0.222];
%gamma_c_a=[0.967];
%peak_frequency_ratio=0.1495;
%tspan=[0 200];
%omega_f=2*pi*2.0;
%omega_0=omega_f*1/peak_frequency_ratio;
%story=10;

for iN=1:max(size(Nfloor))
    N_FloorNumber=Nfloor(iN)
    for iNtmd=1:max(size(Ntmd))
        n_TMDNumber=Ntmd(iNtmd)
        %central TMD
        gamma_c=gamma_c_a(iN)
        damping_ratio_TMD=damping_ratio_TMD_a(iNtmd)
        delta_gamma=delta_gamma_a(iNtmd)

        M_bar=M_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        K_bar=K_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        [D,V]=eig(K_bar,M_bar);
        V11=V(1,1);
        %file name
        s1='baseexcited_timeresponse_With control_N';
        s3=num2str(N_FloorNumber);
        s1=[s1 s3 'n'];
        s3=int2str(n_TMDNumber);
        s1=[s1 s3 '.txt'];

        s2='baseexcited_timeresponse_Without control_N';
        s3=num2str(N_FloorNumber);
        s2=[s2 s3 'n'];
        s3=int2str(0);
        s2=[s2 s3 '.txt'];
        %tinh phi_mass
        phi_mass=0.01*N_FloorNumber/n_TMDNumber;

```

```

        Z0=zeros(2*(N_FloorNumber+n_TMDNumber),1);%initial
condition
        %damping ratio of main structure
        damping_ratio=0.01;
        if n_TMDNumber ==1
            gamma_1=gamma_c-delta_gamma/2;
            for j=1:1:n_TMDNumber
                r(j)=gamma_1;
            end
        end
        if n_TMDNumber >1
            gamma_1=gamma_c-delta_gamma/2;
            for j=1:1:n_TMDNumber
                r(j)=(j-1)*delta_gamma/(n_TMDNumber-1)+gamma_1;
            end
        end
        r=r*sqrt(V11);
        r_c=(phi_mass*damping_ratio_TMD/damping_ratio)*r;
        r_k=phi_mass*(r.^2);
        [M_bar,C_bar,K_bar] =
MCK_Normalize(N_FloorNumber,n_TMDNumber,phi_mass,r_c,r_k);
        % for base excited input
        P_bar=diag(M_bar);
        [T_with Z_with]=ode45(@(t,y)
f_ode_baseexcited(t,y,M_bar,C_bar,K_bar,P_bar,omega_0,damping_rati
o,omega_f),tspan,Z0);
        dlmwrite(s1, [T_with Z_with(:,1:N_FloorNumber)],
'delimiter', '\t');

        % %%-----WITHOUT CONTROL-----%%
%init
        Z0=zeros(2*(N_FloorNumber+0),1);
        M_bar =M_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        % for base excited input
        P_bar=diag(M_bar);
        C_bar =C_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        K_bar =K_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        [T_without Z_without]=ode45(@(t,y)
f_ode_baseexcited(t,y,M_bar,C_bar,K_bar,P_bar,omega_0,damping_rati
o,omega_f),tspan,Z0);
        dlmwrite(s2, [T_without Z_without(:,1:N_FloorNumber)],
'delimiter', '\t');
        plot(T_with, Z_with(:,story),'color','blue');
        hold on;
        plot(T_without, Z_without(:,story),'color','red');
    end
end
end

```

A.3 MDOF với MTMD chịu động đất El Centro

```

clc;
clear all;

```

```

close all;

Nfloor=[1];
Ntmd=[1 ] %5 11 21 31];
damping_ratio_TMD_a=[0.059 0.027 0.019 0.019 0.019];
delta_gamma_a=[0.0 0.115 0.14 0.147 0.149];
gamma_c_a=[0.985];
peak_frequency_ratio=1.0;
tspan=[0 40];
omega_f=2*pi*2.0;
omega_0=omega_f*1/peak_frequency_ratio;
story=1;

% Nfloor=[5];
% Ntmd=[1 5 11 21 31];
% damping_ratio_TMD_a=[0.079 0.032 0.03 0.03 0.03];
% delta_gamma_a=[0.0 0.15 0.172 0.18 0.183];
% gamma_c_a=[0.978];
% peak_frequency_ratio=0.2845;
% tspan=[0 40];
% omega_f=2*pi*2.0;
% omega_0=omega_f*1/peak_frequency_ratio;
% story=5;
%
% Nfloor=[10];
% Ntmd=[1 5 11 21 31];
% damping_ratio_TMD_a=[0.075 0.01 0.011 0.01 0.01];
% delta_gamma_a=[0.0 0.187 0.204 0.218 0.222];
% gamma_c_a=[0.967];
% peak_frequency_ratio=0.1495;
% tspan=[0 40];
% omega_f=2*pi*2.0;
% omega_0=omega_f*1/peak_frequency_ratio;
% story=10;
acceleration=load('elcentro.mat');
acceleration_t=acceleration.t;
acceleration_Ag=acceleration.Ag;

for iN=1:max(size(Nfloor))
    N_FloorNumber=Nfloor(iN)
    for iNtmd=1:max(size(Ntmd))
        n_TMDNumber=Ntmd(iNtmd)
        %central TMD
        gamma_c=gamma_c_a(iN)
        damping_ratio_TMD=damping_ratio_TMD_a(iNtmd)
        delta_gamma=delta_gamma_a(iNtmd)

        M_bar=M_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        K_bar=K_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
        [D,V]=eig(K_bar,M_bar);
        V11=V(1,1);
        %file name

```

```

s1='ElCentrobbaseexcited_timereponse_With control_N';
s3=num2str(N_FloorNumber);
s1=[s1 s3 'n'];
s3=int2str(n_TMDNumber);
s1=[s1 s3 '.txt'];

s2='ElCentrobbaseexcited_timereponse_Without control_N';
s3=num2str(N_FloorNumber);
s2=[s2 s3 'n'];
s3=int2str(0);
s2=[s2 s3 '.txt'];
%tinh phi_mass
phi_mass=0.01*N_FloorNumber/n_TMDNumber;
Z0=zeros(2*(N_FloorNumber+n_TMDNumber),1);%initial
condition
% damping ratio of main structure
damping_ratio=0.01;
if n_TMDNumber ==1
    gamma_1=gamma_c-delta_gamma/2;
    for j=1:1:n_TMDNumber
        r(j)=gamma_1;
    end
end
if n_TMDNumber >1
    gamma_1=gamma_c-delta_gamma/2;
    for j=1:1:n_TMDNumber
        r(j)=(j-1)*delta_gamma/(n_TMDNumber-1)+gamma_1;
    end
end
r=r*sqrt(V11);
r_c=(phi_mass*damping_ratio_TMD/damping_ratio)*r;
r_k=phi_mass*(r.^2);
[M_bar,C_bar,K_bar] =
MCK_Normalize(N_FloorNumber,n_TMDNumber,phi_mass,r_c,r_k);
% for base excited input
P_bar=diag(M_bar);
[T_with Z_with]=ode45(@(t,y)
f_ode_ELCentrobbaseexcited(t,y,M_bar,C_bar,K_bar,P_bar,omega_0,damp
ing_ratio,omega_f,acceleration_t,acceleration_Ag),tspan,Z0);
dlmwrite(s1, [T_with Z_with(:,1:N_FloorNumber)],
'delimiter', '\t');

% %%-----WITHOUT CONTROL-----%%
%init
Z0=zeros(2*(N_FloorNumber+0),1);
M_bar =M_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
% for base excited input
P_bar=diag(M_bar);
C_bar =C_Normalize(N_FloorNumber,0,0);
K_bar =K_Normalize(N_FloorNumber,0,0);

```

```

        [T_without Z_without]=ode45(@(t,y)
f_ode_ELCentrobasetexcited(t,y,M_bar,C_bar,K_bar,P_bar,omega_0,damp
ing_ratio,omega_f,acceleration_t,acceleration_Ag),tspan,Z0);
        dlmwrite(s2, [T_without Z_without(:,1:N_FloorNumber)],
'delimiter', '\t');
        plot(T_with, Z_with(:,story),'color','blue');
        hold on;
        plot(T_without, Z_without(:,story),'color','red');
    end
end

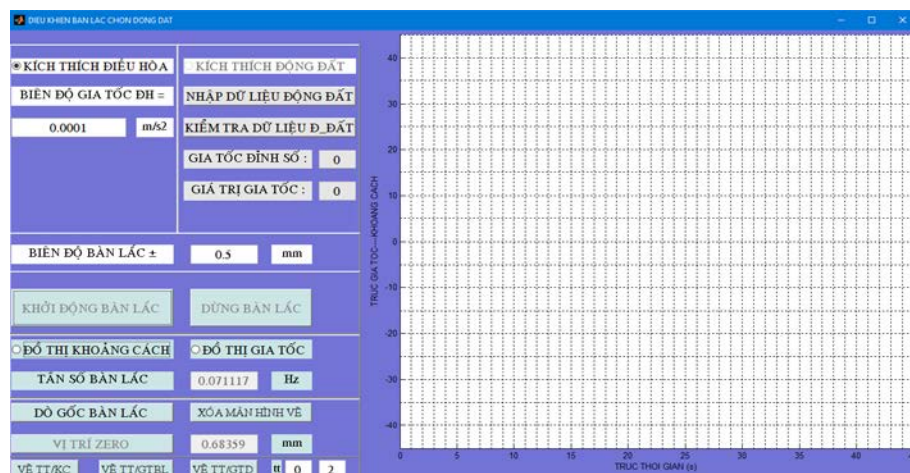
```

B. Chương trình điều khiển dao động bàn lắc

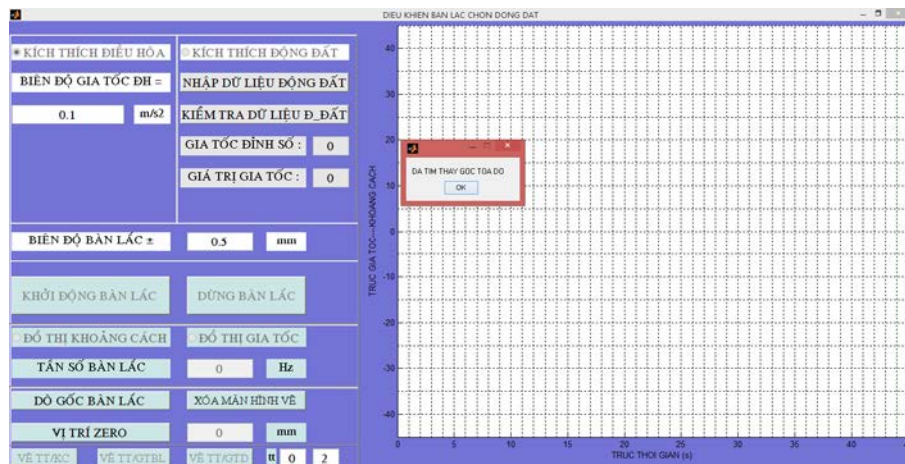
B.1 Giao diện và thông số đầu vào

Giao diện chương trình được viết bằng Tiếng Việt, rất thân thiện với người Việt Nam. Các thông số cần khai báo trước khi bàn lắc hoạt động bao gồm:

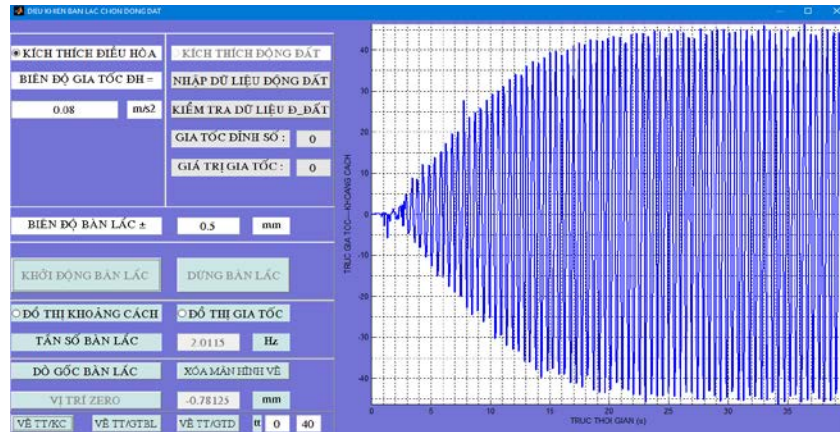
- Dạng dao động nền (điều hòa hoặc dao động nền kích thích)
- Biên độ bàn lắc
- Đối với dao động điều hòa: Chọn gia tốc bàn lắc
- Đối với dao động nền kích thích: nhập bang gia tốc nền



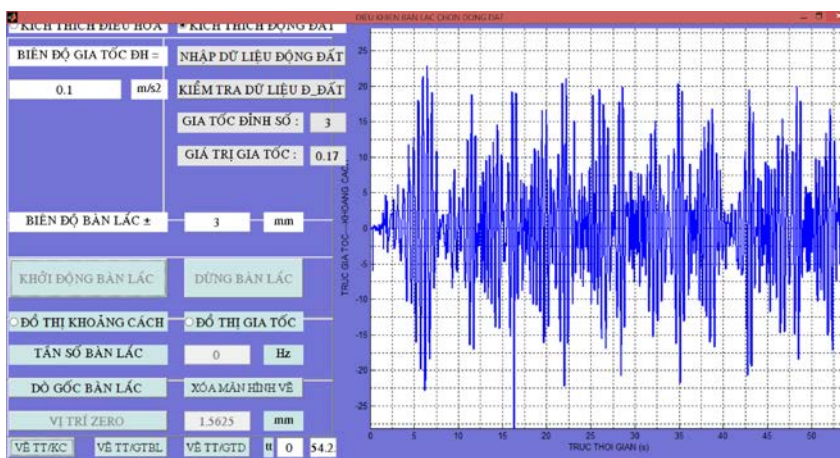
B.1 Giao diện phần mềm



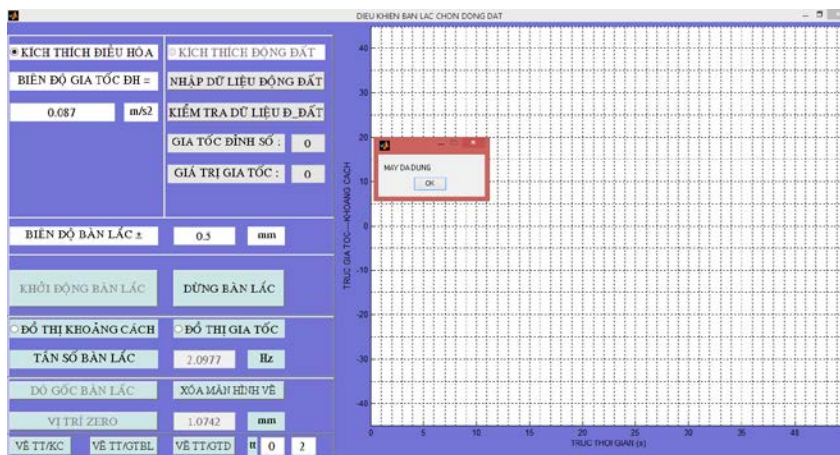
B.2 Dò tìm vị trí cân bằng của bàn lắc



B.3 Chọn gia tốc đỉnh cho dao động điều hòa



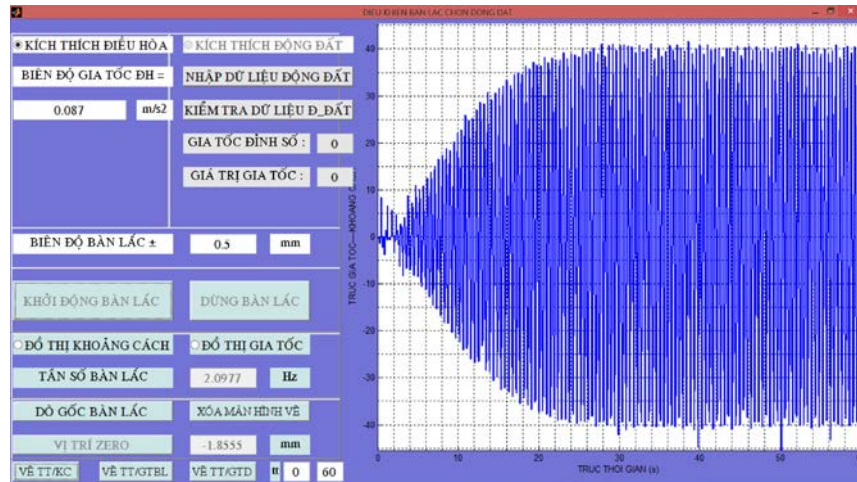
B.4 Lấy dữ liệu động đất từ file GIATOC1.txt



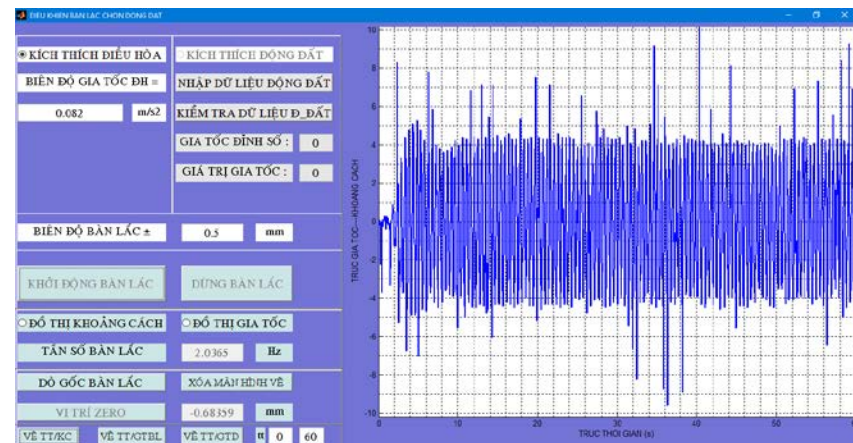
B.5 Kiểm tra cảm biến chuyển vị và thực hiện rung lắc

B.1 Kết quả phân tích, thông số đầu ra

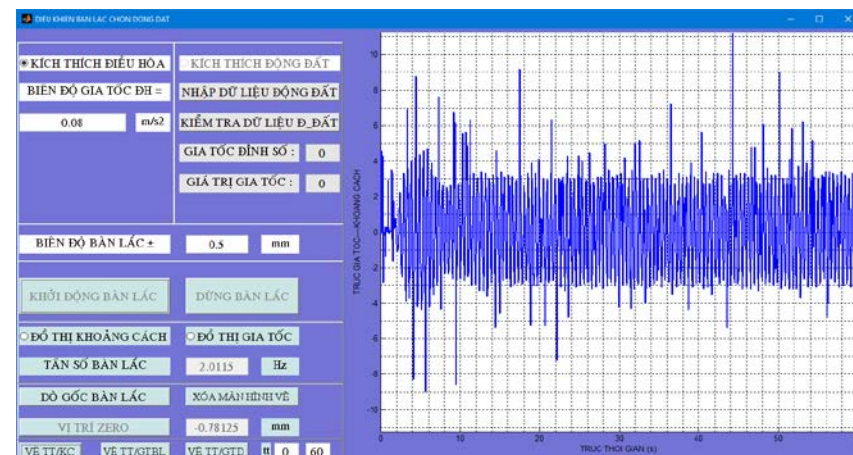
Giá trị đầu ra của chương trình gồm chuyển vị đỉnh khung thép và gia tốc nền bàn lắc. Ngoài ra chương trình vẽ được các đồ thị kết quả chuyển vị, gia tốc đỉnh, bàn lắc theo thời gian trực tiếp trên giao diện hoặc xuất dữ liệu ra excel.



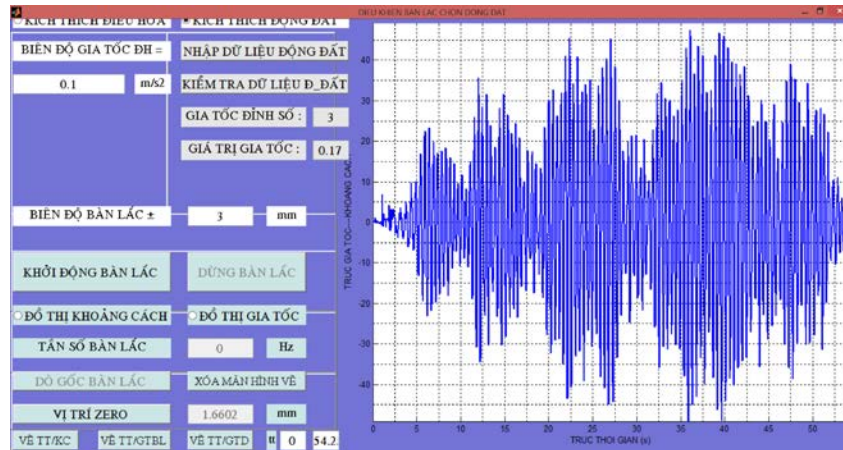
B.6 Kết quả chuyển vị đỉnh khi dao động điều hoà $0.5\text{mm} \times \sin(2\pi \times 2.0977 \times t)$



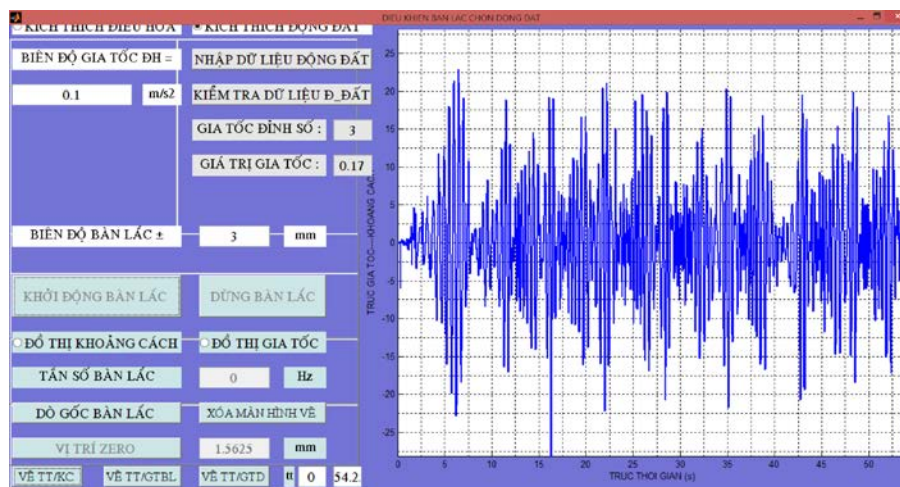
B.7 Chuyển vị đỉnh khung có 3TLD chịu tải điều hoà $0.5\text{mm} \times \sin(2\pi \times 2.0977 \times t)$



B.8 Chuyển vị đỉnh khung có 5TLD chịu tải điều hoà $0.5\text{mm} \times \sin(2\pi \times 2.0977 \times t)$



B.9 Kết quả chuyển vị đỉnh khung chịu tải động đất không dùng TLD



B.10 Kết quả chuyển vị đỉnh khung động đất với 5TLD

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. T. Soong and B. F. Spencer, "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice," *Engineering Structures*, vol. 24, pp. 243-259, 2002/03/01/ 2002.
- [2] K. C. Biswal, "Dynamic Response of Liquid Filled Composite Containers with Baffles Considering Liquid-Structure Interaction," IIT, Kharagpur, 2003.
- [3] M. J. Tait, A. A. El Damatty, N. Isyumov, and M. R. Siddique, "Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 20, pp. 1007-1023, 2005/11/01/ 2005.
- [4] C.-y. Shang and J.-c. Zhao, "Periods and energy dissipations of a novel TLD rectangular tank with angle-adjustable baffles," *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, vol. 13, pp. 139-144, 2008.
- [5] M. Marivani and M. Hamed, "Evaluate pressure drop of slat screen in an oscillating fluid in a tuned liquid damper," *Computers & Fluids*, vol. 156, pp. 384-401, 2017.
- [6] M. Marivani and M. S. Hamed, "Numerical Study of Slat Screen Pattern Effect on Design Parameters of Tuned Liquid Dampers," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 136, 2014.
- [7] T. Wakahara, T. Ohyama, and K. Fujii, "Suppression of wind-induced vibration of a tall building using Tuned Liquid Damper," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 43, pp. 1895-1906, 1992/01/01/ 1992.
- [8] Y. Zhang and D. Wan, "MPS-FEM coupled method for sloshing flows in an elastic tank," *Ocean Engineering*, vol. 152, pp. 416-427, 2018/03/15/ 2018.
- [9] B. P. D. Tuong, P. D. Huynh, T.-T. Bui, and V. Sarhosis, "Numerical Analysis of the Dynamic Responses of Multistory Structures Equipped with Tuned Liquid Dampers Considering Fluid-Structure Interactions," *Open Construction and Building Technology Journal*, vol. 13, pp. 289-300, 2019.

- [10] A. Kareem, T. Kijewski, and Y. Tamura, "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications," *Wind and structures*, vol. 2, pp. 201-251, 1999.
- [11] J. D. Holmes, "Listing of installations," *Engineering Structures*, vol. 17, pp. 676-678, 1995/11/01/ 1995.
- [12] Y. Tamura, R. Kohsaka, O. Nakamura, K.-i. Miyashita, and V. J. Modi, "Wind-induced responses of an airport tower — efficiency of tuned liquid damper," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 65, pp. 121-131, 1996/12/01/ 1996.
- [13] Y. Tamura, K. Fujii, T. Ohtsuki, T. Wakahara, and R. Kohsaka, "Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation," *Engineering structures*, vol. 17, pp. 609-621, 1995.
- [14] B. P. D. Tuong, P. D. Huynh, T.-T. Bui, and V. Sarhosis, "Numerical Analysis of the Dynamic Responses of Multistory Structures Equipped with Tuned Liquid Dampers Considering Fluid-Structure Interactions," *The Open Construction and Building Technology Journal*, vol. 13, 2019.
- [15] T. SHIMIZU and S. HAYAMA, "Nonlinear Responed of Sloshing Based on the Shallow Water Wave Theory: Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry," *JSME international journal*, vol. 30, pp. 806-813, 1987.
- [16] L. M. Sun, Y. Fujino, B. M. Pacheco, and M. Isobe, "Nonlinear waves and dynamic pressures in rectangular tuned liquid damper (TLD)," *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 1989, pp. 81-92, 1989.
- [17] L. M. Sun, Y. Fujino, B. M. Pacheco, and P. Chaiseri, "Modelling of tuned liquid damper (TLD)," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 43, pp. 1883-1894, 1992/01/01/ 1992.
- [18] Y. Fujino, L. Sun, B. M. Pacheco, and P. Chaiseri, "Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structures," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 118, pp. 2017-2030, 1992.

- [19] L. M. Sun and Y. Fujino, "A Semi-Analytical Model for Tuned Liquid Damper (TLD) with Wave Breaking," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 8, pp. 471-488, 1994/07/01/ 1994.
- [20] L. M. Sun, Y. Fujino, P. Chaiseri, and B. M. Pacheco, "The properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 24, pp. 967-976, 1995/07/01 1995.
- [21] L. M. Sun, Y. Fujino, and K. Koga, "A model of tuned liquid damper for suppressing pitching motions of structures," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 24, pp. 625-636, 1995.
- [22] S. D. Xue, J. M. Ko, and Y. L. Xu, "Experimental Study on Performance of Tuned Liquid Column Damper in Suppressing Pitching Vibration of Structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 10, pp. 386-396, 1999.
- [23] Y. Chang, A. Noormohamed, and O. Mercan, "Analytical and experimental investigations of modified tuned liquid dampers (MTLDs)," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 428, pp. 179-194, 2018.
- [24] A. Samanta and P. Banerji, "Structural vibration control using modified tuned liquid dampers," *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, vol. 3, pp. 14-27, 2010/02/01 2010.
- [25] J. K. Yu, "Nonlinear characteristics of tuned liquid dampers," University of Washington, 1997.
- [26] D. Reed, J. Yu, H. Yeh, and S. Gardarsson, "Investigation of Tuned Liquid Dampers under Large Amplitude Excitation," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, pp. 405-413, 1998/04/01 1998.
- [27] P. Banerji, M. Murudi, A. H. Shah, and N. Popplewell, "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 29, pp. 587-602, 2000.
- [28] A. Samanta and P. Banerji, "Efficient numerical schemes to analyse earthquake response of structures with tuned liquid dampers," 2006.

- [29] M. Lu, "Predicting ice accretion and alleviating galloping on overhead power lines," 2002.
- [30] P. Banerji, A. Samanta, and S. A. CHAVAN, "Earthquake vibration control of structures using tuned liquid dampers: experimental studies," 2010.
- [31] S.-K. Lee, E. C. Park, K.-W. Min, S.-H. Lee, L. Chung, and J.-H. Park, "Real-time hybrid shaking table testing method for the performance evaluation of a tuned liquid damper controlling seismic response of building structures," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 302, pp. 596-612, 2007.
- [32] J.-K. Yu, T. Wakahara, and D. A. Reed, "A non-linear numerical model of the tuned liquid damper," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 28, pp. 671-686, 1999.
- [33] Y. Xin, G. Chen, and M. Lou, "Seismic response control with density-variable tuned liquid dampers," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 8, pp. 537-546, 2009/12/01 2009.
- [34] H. Malekghasemi, "Experimental and analytical investigations of rectangular tuned liquid dampers (TLDs)," 2011.
- [35] H. Malekghasemi, A. Ashasi-Sorkhabi, A. R. Ghaemmaghami, and O. Mercan, "Experimental and numerical investigations of the dynamic interaction of tuned liquid damper–structure systems," *Journal of Vibration and Control*, vol. 21, pp. 2707-2720, 2015.
- [36] A. Ashasi-Sorkhabi, H. Malekghasemi, A. Ghaemmaghami, and O. Mercan, "Experimental investigations of tuned liquid damper-structure interactions in resonance considering multiple parameters," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 388, pp. 141-153, 2017/02/03/ 2017.
- [37] Y. Fujino and L. M. Sun, "Vibration Control by Multiple Tuned Liquid Dampers (MTLDs)," *Journal of Structural Engineering*, vol. 119, pp. 3482-3502, 1993.
- [38] M. J. Tait, "Modelling and preliminary design of a structure-TLD system," *Engineering Structures*, vol. 30, pp. 2644-2655, 2008/10/01/ 2008.

- [39] J. S. Love, M. J. Tait, and H. Toopchi-Nezhad, "A hybrid structural control system using a tuned liquid damper to reduce the wind induced motion of a base isolated structure," *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 738-746, 2011/03/01/ 2011.
- [40] T. Nakamura, K. Tsuchida, H. Ohno, and N. Nagamoto, "Bai Chay Bridge, Vietnam," *Structural Engineering International*, vol. 17, pp. 210-213, 2007/08/01 2007.
- [41] T. P. Nguyen, D. T. Pham, and K. T. Ngo, "Effectiveness of multi tuned liquid dampers with slat screens for reducing dynamic responses of structures," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 143, p. 012023, 2018/04 2018.
- [42] P. T. Nguyen and T. D. Pham, "The effectiveness of improved tuned liquid column damper on the dynamic response of the structure under earthquake excitations," *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, vol. 6, pp. 27-34, 2019.
- [43] N. V. Khang, D. T. Duong, N. T. V. Huong, N. D. T. T. Dinh, and V. D. Phuc, "Optimal control of vibration by multiple tuned liquid dampers using Taguchi method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, pp. 1563-1572, April 01 2019.
- [44] M. Y. Abdollahzadeh Jamalabadi, "Frequency analysis and control of sloshing coupled by elastic walls and foundation with smoothed particle hydrodynamics method," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 476, p. 115310, 2020/06/23/ 2020.
- [45] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*: Pearson Education Limited, 2007.
- [46] G. W. Housner, "The dynamic behavior of water tanks," *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 53, pp. 381-387, 1963.
- [47] A. C. 350, "Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary," ed, 2006, p. 61.

- [48] B. S. Institution, "Eurocode 8 : design provisions for earthquake resistance of structures.," 2006.
- [49] IS-1893, "Criteria for earthquake resistant design of structures," ed: Beuro of Indian Standards New Delhi, 2002.
- [50] J. Y. Yang, "Dynamic Behavior of Fluid Tank Systems," Rice University, 1976.
- [51] C. Minowa, "Dynamic analysis for rectangular water tanks," *Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering in Japan*, pp. 135-142, 1980.
- [52] C. Minowa, "Experimental studies of seismic properties of various type water tanks," in *Proc., 8th WCEE*, 1984, pp. 945-952.
- [53] M. A. Haroun, "Vibration studies and tests of liquid storage tanks," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 11, pp. 179-206, 1983/03/01 1983.
- [54] M. A. Haroun and H. M. Ellaithy, "Model for flexible tanks undergoing rocking," *Journal of engineering mechanics*, vol. 111, pp. 143-157, 1985.
- [55] M. A. Haroun and M. A. Tayel, "Response of tanks to vertical seismic excitations," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 13, pp. 583-595, 1985.
- [56] M. A. Haroun and W. Abou-Izzeddine, "Parametric study of seismic soil-tank interaction. ii: Vertical excitation," *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, pp. 798-811, 1992.
- [57] J. K. Kim, H. M. Koh, and I. J. Kwahk, "Dynamic response of rectangular flexible fluid containers," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 122, pp. 807-817, 1996.
- [58] J. Kim and J.-H. Park, "Fluid–structure interaction analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM–FEM and comparison with test results," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 27, pp. 109-124, 02/01 1998.

- [59] S. S. Babu and S. Bhattacharyya, "Finite element analysis of fluid-structure interaction effect on liquid retaining structures due to sloshing," *Computers & structures*, vol. 59, pp. 1165-1171, 1996.
- [60] J. Xing, W. Price, M. Pomfret, and L. Yam, "Natural Vibration of a Beam—Water Interaction System," *Journal of sound and vibration*, vol. 199, pp. 491-512, 1997.
- [61] A. Doğangün, A. Durmuş, and Y. Ayvaz, "Static and dynamic analysis of rectangular tanks by using the Lagrangian fluid finite element," *Computers & Structures*, vol. 59, pp. 547-552, 1996.
- [62] A. Dogangun and R. Livaoglu, "Hydrodynamic pressures acting on the walls of rectangular fluid containers," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 17, pp. 203-214, 2004.
- [63] J. Z. Chen and M. R. Kianoush, "Seismic response of concrete rectangular tanks for liquid containing structures," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 32, pp. 739-752, 2005/08/01 2005.
- [64] M. R. Kianoush and J. Z. Chen, "Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks," *Engineering Structures*, vol. 28, pp. 704-715, 2006/04/01/ 2006.
- [65] J. T. Xing, "Natural vibration of two-dimensional slender structure–water interaction systems subject to Sommerfeld radiation condition," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 308, pp. 67-79, 2007.
- [66] R. Livaoglu, "Investigation of seismic behavior of fluid–rectangular tank–soil/foundation systems in frequency domain," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 28, pp. 132-146, 2008/02/01/ 2008.
- [67] J. Z. Chen and M. R. Kianoush, "Generalized SDOF system for seismic analysis of concrete rectangular liquid storage tanks," *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 2426-2435, 2009/10/01/ 2009.
- [68] M. R. Kianoush and A. R. Ghaemmghami, "The effect of earthquake frequency content on the seismic behavior of concrete rectangular liquid tanks

- using the finite element method incorporating soil–structure interaction," *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 2186-2200, 2011/07/01/ 2011.
- [69] A. R. Ghaemmaghami and M. R. Kianoush, "Effect of Wall Flexibility on Dynamic Response of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks under Horizontal and Vertical Ground Motions," *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, pp. 441-451, 2010/04/01 2010.
- [70] A. Ghaemmaghami, M. Moslemi, and M. Kianoush, "Dynamic behaviour of concrete liquid tanks under horizontal and vertical ground motions using finite element method," in *9th US national and 10th Canadian conf. on earthquake eng*, 2010.
- [71] A. Ghaemmaghami and M. Kianoush, "Effect of wall flexibility on dynamic response of concrete rectangular liquid storage tanks under horizontal and vertical ground motions," *Journal of structural engineering*, vol. 136, pp. 441-451, 2009.
- [72] M. Moslemi and M. R. Kianoush, "Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks," *Engineering Structures*, vol. 42, pp. 214-230, 2012/09/01/ 2012.
- [73] S. Hashemi, M. Saadatpour, and M. Kianoush, "Dynamic analysis of flexible rectangular fluid containers subjected to horizontal ground motion," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 42, pp. 1637-1656, 2013.
- [74] S. Hashemi, M. M. Saadatpour, and M. R. Kianoush, "Dynamic behavior of flexible rectangular fluid containers," *Thin-Walled Structures*, vol. 66, pp. 23-38, 2013/05/01/ 2013.
- [75] M. Rezaiee-Pajand, M. S. Kazemiyan, and A. Aftabi S, "Solving coupled beam-fluid interaction by DTM," *Ocean Engineering*, vol. 167, pp. 380-396, 2018/11/01/ 2018.

- [76] IS., "Indian Standard (IS): 4326, 1993, Indian Standard Code of Practice for Earthquake Resistant Design and Construction of Buildings," ed: Bureau of Indian Standards New Delhi, 1993.
- [77] Z. Zheng, F. Chen, and Z. Hou, "Fluid-Structure interaction during large amplitude sloshing and TLD vibration control," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 8, pp. 90-96, 2003.
- [78] M. Gradinscak, "Liquid sloshing in containers with flexibility," Victoria University, 2009.
- [79] A. R. Ghaemmaghami, R. Kianoush, and O. Mercan, "Numerical modeling of dynamic behavior of annular tuned liquid dampers for the application in wind towers under seismic loading," *Journal of Vibration and Control*, vol. 22, pp. 3858-3876, 2016/10/01 2015.
- [80] M. Eswaran, S. Athul, P. Niraj, G. R. Reddy, and M. R. Ramesh, "Tuned liquid dampers for multi-storey structure: numerical simulation using a partitioned FSI algorithm and experimental validation," *Sādhanā*, vol. 42, pp. 449-465, 2017/04/01 2017.
- [81] F. Zhu, J.-T. Wang, F. Jin, and L.-Q. Lu, "Real-time hybrid simulation of full-scale tuned liquid column dampers to control multi-order modal responses of structures," *Engineering Structures*, vol. 138, pp. 74-90, 2017.
- [82] F. Zhu, J. T. Wang, F. Jin, L. Q. Lu, Y. Gui, and M. X. Zhou, "Real-time hybrid simulation of the size effect of tuned liquid dampers," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 24, p. e1962, 2017.
- [83] H. Yue, J. Chen, and Q. Xu, "Sloshing characteristics of annular tuned liquid damper (ATLD) for applications in composite bushings," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 25, p. e2184, 2018.
- [84] T. Buckley, P. Watson, P. Cahill, V. Jaksic, and V. Pakrashi, "Mitigating the structural vibrations of wind turbines using tuned liquid column damper considering soil-structure interaction," *Renewable Energy*, vol. 120, pp. 322-341, 2018/05/01/ 2018.

- [85] A. Roy, A. Staino, A. Ghosh, B. Basu, and S. Chatterjee, "Seismic Vibration Control of Elevated Water Tank by TLD and Validation of Full-Scale TLD Model through Real-Time-Hybrid-Testing," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 744, p. 012042, 2016/09 2016.
- [86] T. Novo, H. Varum, F. Teixeira-Dias, H. Rodrigues, M. F. Silva, A. C. Costa, *et al.*, "Tuned liquid dampers simulation for earthquake response control of buildings," *Bulletin of earthquake engineering*, vol. 12, pp. 1007-1024, 2014.
- [87] Q. Jin, X. Li, N. Sun, J. Zhou, and J. Guan, "Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform," *Marine Structures*, vol. 20, pp. 238-254, 2007/10/01/ 2007.
- [88] Y. L. Xu, K. C. S. Kwok, and B. Samali, "The effect of tuned mass dampers and liquid dampers on cross-wind response of tall/slender structures," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 40, pp. 33-54, 1992/04/01/ 1992.
- [89] H. Gao, K. S. C. Kwok, and B. Samali, "Characteristics of multiple tuned liquid column dampers in suppressing structural vibration," *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 316-331, 1999/04/01/ 1999.
- [90] G. B. Warburton, "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 10, pp. 381-401, 1982.
- [91] J. S. Love, B. Morava, and A. W. Smith, "Monitoring of a Tall Building Equipped with an Efficient Multiple-Tuned Sloshing Damper System," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 25, p. 05020003, 2020.
- [92] G. Saravanan, D. Kumar, and R. Saraswat, "Response Control of FPSO Using Multiple Tuned Liquid Dampers," in *Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018)*, 2019, pp. 43-63.
- [93] S. Elias, V. Matsagar, and T. K. Datta, "Dynamic Response Control of a Wind-Excited Tall Building with Distributed Multiple Tuned Mass Dampers,"

- International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 19, p. 1950059, 2019.
- [94] J. Love and M. Tait, "Estimating the added effective damping of SDOF systems incorporating multiple dynamic vibration absorbers with nonlinear damping," *engineering structures*, vol. 130, pp. 154-161, 2017.
 - [95] J. Love and M. Tait, "Multiple tuned liquid dampers for efficient and robust structural control," *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, p. 04015045, 2015.
 - [96] A. Ashasi-Sorkhabi, J. Kristie, and O. Mercan, "Investigations of the Use of Multiple Tuned Liquid Dampers in Vibration Control," in *Structures Congress 2014*, ed, 2014, pp. 1185-1196.
 - [97] S. Bhattacharyya and A. Ghosh, "A Frequency Domain Study on the Seismic Response Mitigation of Elevated Water Tanks by Multiple Tuned Liquid Dampers," in *Proceedings of the International Symposium on Engineering under Uncertainty: Safety Assessment and Management (ISEUSAM - 2012)*, India, 2013, pp. 603-618.
 - [98] I. Soliman, "Passive and semi-active structure-multiple tuned liquid damper systems," 2012.
 - [99] K. Shankar and T. Balendra, "Application of the energy flow method to vibration control of buildings with multiple tuned liquid dampers," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, pp. 1893-1906, 2002/12/01/ 2002.
 - [100] M. Gu, S. R. Chen, and C. C. Chang, "Parametric study on multiple tuned mass dampers for buffeting control of Yangpu Bridge," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 89, pp. 987-1000, 2001/09/01/ 2001.
 - [101] C. G. Koh, S. Mahatma, and C. M. Wang, "Reduction of structural vibrations by multiple-mode liquid dampers," *Engineering Structures*, vol. 17, pp. 122-128, 1995/02/01/ 1995.

- [102] A. Kareem and S. Kline, "Performance of Multiple Mass Dampers under Random Loading," *Journal of Structural Engineering*, vol. 121, pp. 348-361, 1995.
- [103] M. Abé and Y. Fujino, "Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 23, pp. 813-835, 1994.
- [104] H. Yamaguchi and N. Harnpornchai, "Fundamental characteristics of Multiple Tuned Mass Dampers for suppressing harmonically forced oscillations," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 22, pp. 51-62, 1993.
- [105] K. Xu and T. Igusa, "Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 21, pp. 1059-1070, 1992.
- [106] H. R. Samiee, "Hybrid passive control system of TLD and TMD for seismic response mitigation of Tall Buildings," *Journal of Vibroengineering*, vol. 19, pp. 3648-3667, 2017.
- [107] C. C. Chang, "Mass dampers and their optimal designs for building vibration control," *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 454-463, 1999/05/01/ 1999.
- [108] S. S. Rao and F. F. Yap, *Mechanical Vibrations*: Prentice Hall, 2011.
- [109] P. Banerji and A. Samanta, "Earthquake vibration control of structures using hybrid mass liquid damper," *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 1291-1301, 2011.
- [110] J. W. Miles and T. B. Benjamin, "Surface-wave damping in closed basins," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 297, pp. 459-475, 1967.
- [111] I. M. Soliman, M. J. Tait, and A. A. El Damatty, "Modeling and analysis of a structure semi-active tuned liquid damper system," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 24, p. e1865, 2017.

- [112] I. M. Soliman, M. J. Tait, and A. A. El Damatty, "Development and Validation of Finite Element Structure-Tuned Liquid Damper System Models," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 137, 2015.
- [113] E. Bhattacharjee, L. Halder, and R. P. Sharma, "An experimental study on tuned liquid damper for mitigation of structural response," *International Journal of Advanced Structural Engineering*, vol. 5, p. 3, 2013/02/12 2013.
- [114] S. Mitra and K. P. Sinhamahapatra, "2D simulation of fluid-structure interaction using finite element method," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 45, pp. 52-59, 2008/12/01/ 2008.
- [115] M. M. Kabiri, M. R. Nikoomanesh, P. N. Danesh, and M. A. Goudarzi, "Numerical and Experimental Evaluation of Sloshing Wave Force Caused by Dynamic Loads in Liquid Tanks," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 141, 2019.
- [116] S. M. Hasheminejad, M. M. Mohammadi, and A. Jamalpoor, "Hydroelastic modeling and active control of transient sloshing in a three dimensional rectangular floating roof tank," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 470, p. 115146, 2020/03/31/ 2020.
- [117] S. M. Hasheminejad and M. M. Mohammadi, "Active sloshing control in a smart flexible cylindrical floating roof tank," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 66, pp. 350-381, 2016/10/01/ 2016.
- [118] G. W. Housner, "Dynamic pressures on accelerated fluid containers," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 47, pp. 15-35, 1957.
- [119] E. Brunesi, R. Nascimbene, M. Pagani, and D. Beilic, "Seismic Performance of Storage Steel Tanks during the May 2012 Emilia, Italy, Earthquakes," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 29, p. 04014137, 2015.
- [120] M. Moslemi, A. Farzin, and M. Kianoush, "Nonlinear sloshing response of liquid-filled rectangular concrete tanks under seismic excitation," *Engineering Structures*, vol. 188, pp. 564-577, 2019.

- [121] P. K. Malhotra, T. Wenk, and M. Wieland, "Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks," *Structural Engineering International*, vol. 10, pp. 197-201, 2000/08/01 2000.
- [122] P. Truong-Thi, H. Nguyen-Xuan, and M. Abdel Wahab, "A Coupled SPH-FEM for Fluid-Structures Interaction Problem with Free-Surface and Revetment Slope Thin-Walled Structures," Singapore, 2019, pp. 187-201.
- [123] P. Truong-Thi, L. Dang-Bao, M. Abdel Wahab, H. Duong-Ngoc, T. Hoang-Duc, and H. Nguyen-Xuan, "Analysis of Fluid–Structures Interaction Problem of Revetment Slope Thin-Walled Structure Using Abaqus," Singapore, 2018, pp. 917-925.
- [124] A. Rawat, V. Mittal, T. Chakraborty, and V. Matsagar, "Earthquake induced sloshing and hydrodynamic pressures in rigid liquid storage tanks analyzed by coupled acoustic-structural and Euler-Lagrange methods," *Thin-Walled Structures*, vol. 134, pp. 333-346, 2019/01/01/ 2019.
- [125] M. Eswaran, U. K. Saha, and D. Maity, "Effect of baffles on a partially filled cubic tank: Numerical simulation and experimental validation," *Computers & Structures*, vol. 87, pp. 198-205, 2009/02/01/ 2009.
- [126] T.-W. Kang, H.-I. Yang, and J.-S. Jeon, "Earthquake-induced sloshing effects on the hydrodynamic pressure response of rigid cylindrical liquid storage tanks using CFD simulation," *Engineering Structures*, vol. 197, p. 109376, 2019/10/15/ 2019.
- [127] S. Nicolici and R. Bilegan, "Fluid structure interaction modeling of liquid sloshing phenomena in flexible tanks," *Nuclear Engineering and design*, vol. 258, pp. 51-56, 2013.
- [128] N. Hosseinzadeh, H. Kazem, M. Ghahremannejad, E. Ahmadi, and N. Kazem, "Comparison of API650-2008 provisions with FEM analyses for seismic assessment of existing steel oil storage tanks," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, pp. 666-675, 2013/07/01/ 2013.

- [129] A. A. Zanni, M. S. Spyridis, and D. L. Karabalis, "Discrete model for circular and square rigid tanks with concentric openings–Seismic analysis of a historic water tower," *Engineering Structures*, vol. 211, p. 110433, 2020.
- [130] R. Ruiz, D. Lopez-Garcia, and A. Taflanidis, "An efficient computational procedure for the dynamic analysis of liquid storage tanks," *Engineering structures*, vol. 85, pp. 206-218, 2015.
- [131] P. P. Ong, A. Adnan, K. C. S. Kwok, C.-K. Ma, P. L. Y. Tiong, and H. Pesaran Behbahani, "Dynamic simulation of unrestrained interlocking Tuned Liquid Damper blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 586-597, 2017/07/30/ 2017.
- [132] M. R. Kianoush, H. Mirzabozorg, and M. Ghaemian, "Dynamic analysis of rectangular liquid containers in three-dimensional space," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 33, pp. 501-507, 2006/05/01 2006.
- [133] R. A. Ibrahim, *Liquid sloshing dynamics: theory and applications*: Cambridge University Press, 2005.
- [134] F. Sotiropoulos and X. Yang, "Immersed boundary methods for simulating fluid–structure interaction," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 65, pp. 1-21, 2014/02/01/ 2014.
- [135] T. Liaghat, F. Guibault, L. Allenbach, and B. Nennemann, "Two-Way Fluid-Structure Coupling in Vibration and Damping Analysis of an Oscillating Hydrofoil," in *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2014.
- [136] H. Schmucker, F. Flemming, and S. Coulson, "Two-way coupled fluid structure interaction simulation of a propeller turbine," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 12, p. 012011, 2010/08/01 2010.
- [137] M. Eswaran and G. R. Reddy, "Liquid Sloshing in Fuel Storage Bays of Advanced Reactor Subjected to Earthquake Loading," *Procedia Engineering*, vol. 144, pp. 1278-1285, 2016/01/01/ 2016.

- [138] S. Rebouillat and D. Liksonov, "Fluid–structure interaction in partially filled liquid containers: A comparative review of numerical approaches," *Computers & Fluids*, vol. 39, pp. 739-746, 2010/05/01/ 2010.
- [139] S. Kollmannsberger, "ALE-type and fixed grid fluid-structure interaction involving the p-version of the Finite Element Method," Technische Universität München, 2010.
- [140] K. J. Paik, "Simulation of fluid-structure interaction for surface ships with linear/nonlinear deformations," 2010.
- [141] L. V. HAI, "Modelling, simulation and behaviour of sloshing liquid-tank-ship coupled system," ed, 2009.
- [142] I. Němec, H. Štekbauer, A. Vaněčková, and Z. Vlk, "Explicit and implicit method in nonlinear seismic analysis," in *MATEC Web of Conferences*, 2017, p. 00066.
- [143] D. Soares, "Nonlinear dynamic analysis considering explicit and implicit time marching techniques with adaptive time integration parameters," *Acta Mechanica*, vol. 229, pp. 2097-2116, 2018/05/01 2018.
- [144] P. Nam and N. Hung, "Numerical simulation of two-phase free surface flows with a coupling explicit-implicit method," 2013.
- [145] J. C. Virella, C. A. Prato, and L. A. Godoy, "Linear and nonlinear 2D finite element analysis of sloshing modes and pressures in rectangular tanks subject to horizontal harmonic motions," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 312, pp. 442-460, 2008/05/06/ 2008.
- [146] M. Ghaemian and A. Ghobarah, "Nonlinear seismic response of concrete gravity dams with dam–reservoir interaction," *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 306-315, 1999/04/01/ 1999.
- [147] K. Bathe, "Finite Element Procedures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996."
- [148] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, P. Nithiarasu, and J. Zhu, *The finite element method* vol. 3: McGraw-hill London, 1977.

- [149] G. Mikishev, "An experimental investigation of free oscillations of a liquid in containers," *News of the Academy of Sciences of USSR, The Branch of Technical Sciences, Mechanics and Machinery (Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk Mekhanika: Mashinostroenie)*, vol. 4, pp. 48-53, 1961.
- [150] L. M. Sun, "Semi-analytical modelling of tuned liquid damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing," 東京大学, 1991.
- [151] D. Zhou and W. Liu, "Hydroelastic vibrations of flexible rectangular tanks partially filled with liquid," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 71, pp. 149-174, 2007.
- [152] A. Dogangun and R. Livaoglu, "Hydrodynamic pressures acting on the walls of rectangular fluid containers," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 17, 02/25 2004.
- [153] N. Anh and N. Nguyen, "Research on the design of non-traditional dynamic vibration absorber for damped structures under ground motion," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 30, pp. 593-602, 2016.
- [154] N. D. Anh, N. X. Nguyen, and N. H. Quan, "Global-local approach to the design of dynamic vibration absorber for damped structures," *Journal of Vibration and Control*, vol. 22, pp. 3182-3201, 2016.
- [155] N. Anh and N. Nguyen, "Design of TMD for damped linear structures using the dual criterion of equivalent linearization method," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 77, pp. 164-170, 2013.
- [156] N. Anh and N. Nguyen, "Extension of equivalent linearization method to design of TMD for linear damped systems," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 19, pp. 565-573, 2012.
- [157] L. D. Viet, N. D. Anh, and H. Matsuhisa, "The effective damping approach to design a dynamic vibration absorber using Coriolis force," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, pp. 1904-1916, 2011/04/25/ 2011.

- [158] N. D. Anh, H. Matsuhisa, L. D. Viet, and M. Yasuda, "Vibration control of an inverted pendulum type structure by passive mass–spring-pendulum dynamic vibration absorber," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 307, pp. 187-201, 2007/10/23/ 2007.
- [159] K. Yamamoto and M. Kawahara, "Structural oscillation control using tuned liquid damper," *Computers & Structures*, vol. 71, pp. 435-446, 1999/05/01/ 1999.
- [160] M. Gradinscak and F. Jafar, "Computational Modelling of Liquid Sloshing in Rectangular Tank," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 365-366, pp. 186-189, 2013.
- [161] R. Suliman, O. F. Oxtoby, A. G. Malan, and S. Kok, "An enhanced finite volume method to model 2D linear elastic structures," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38, pp. 2265-2279, 2014/04/01/ 2014.
- [162] L. Fu, T. Guo, and G. Li, "Investigation on damping performance of new type oscillator-liquid combined damper," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 135, pp. 53-62, 2018.
- [163] X. Xu, T. Guo, G. Li, G. Sun, B. Shang, and Z. Guan, "A combined system of tuned immersion mass and sloshing liquid for vibration suppression: Optimization and characterization," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 76, pp. 396-410, 2018.
- [164] J. Szafran, K. Juszczak, and M. Kamiński, "Coupled finite volume and finite element method analysis of a complex large-span roof structure," *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 22, pp. 995-1017, 2017.
- [165] M. M. Selim, R. Koomullil, and D. R. McDaniel, "Finite Volume Based Fluid-Structure Interaction Solver," in *58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, ed, 2017.

- [166] T. Guo, Y. Ye, and G. Li, "On the Key Parameters of an Interior Sloshing Absorber for Vibration Suppression," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 15, p. 1450076, 2015.
- [167] S. H. Rhee, "Unstructured Grid Based Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method for Liquid Tank Sloshing," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 127, pp. 572-582, 2005.
- [168] A. Ghaemmaghami, R. Kianoush, and X. X. Yuan, "Numerical modeling of dynamic behavior of annular tuned liquid dampers for applications in wind towers," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 28, pp. 38-51, 2013.
- [169] P. Dou, M.-A. Xue, J. Zheng, C. Zhang, and L. Qian, "Numerical and experimental study of tuned liquid damper effects on suppressing nonlinear vibration of elastic supporting structural platform," *Nonlinear Dynamics*, vol. 99, pp. 2675-2691, 2020/03/01 2020.
- [170] R. ANSYS, "14.0, Help System," "Coupled Field Analysis Guide", ANSYS, ed: Inc, 2011.
- [171] J. T. Wang, Y. Gui, F. Zhu, F. Jin, and M. X. Zhou, "Real-time hybrid simulation of multi-story structures installed with tuned liquid damper," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 23, pp. 1015-1031, 2016.
- [172] A. Ashasi-Sorkhabi, H. Malekghasemi, and O. Mercan, "Implementation and verification of real-time hybrid simulation (RTHS) using a shake table for research and education," *Journal of Vibration and Control*, vol. 21, pp. 1459-1472, 2015.
- [173] A. Ashasi-Sorkhabi, *Implementation, Verification and Application of Real-time Hybrid Simulation*: University of Toronto (Canada), 2015.
- [174] A. A. Sorkhabi, H. Malekghasemi, and O. Mercan, "Dynamic Behaviour and Performance Evaluation of Tuned Liquid Dampers (TLDs) Using Real-Time Hybrid Simulation," in *Structures Congress 2012*, ed, 2012, pp. 2153-2162.

- [175] Z. Zhang, "Numerical and experimental investigations of the sloshing modal properties of sloped-bottom tuned liquid dampers for structural vibration control," *Engineering Structures*, vol. 204, p. 110042, 2020/02/01/ 2020.
- [176] A. Roy, Z. Zhang, A. Ghosh, and B. Basu, "On the nonlinear performance of a tuned sloshing damper under small amplitude excitation," *Journal of Vibration and Control*, vol. 25, pp. 2695-2705, 2019.
- [177] F. Harlow and J. Welch, "Volume tracking methods for interfacial flow calculations," *Physics of fluids*, vol. 8, pp. 21-82, 1965.
- [178] C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," *Journal of Computational Physics*, vol. 39, pp. 201-225, 1981/01/01/ 1981.
- [179] R. Eymard, T. Gallouët, and R. Herbin, "Finite volume methods," in *Handbook of Numerical Analysis*. vol. 7, ed: Elsevier, 2000, pp. 713-1018.
- [180] C. Ansys, "Release 11.0: ANSYS CFX-Solver theory guide," *ANSYS Inc., USA*, 2010.
- [181] W. C. Ray and P. Joseph, "Dynamics of structures," *Computers & Structures, Berkeley, CA, USA*, 2003.
- [182] K.-J. Bathe, *Finite element procedures*: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996, 2006.
- [183] M. M. Selim, R. P. Koomullil, and D. R. McDaniel, "Linear Elasticity Finite Volume Based Structural Dynamics Solver," in *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, ed, 2017.
- [184] Y. Chang, "Analytical and Experimental Investigations of Modified Tuned Liquid Dampers (MTLDs)," Civil Engineering, University of Toronto, 2015
- [185] B. P. D. Tuong and P. D. Huynh, "Experimental Test and Numerical Analysis of a Structure Equipped with a Multi-Tuned Liquid Damper Subjected to Dynamic Loading," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 20, p. 2050075, 2020.

- [186] Z. Song and C. Su, "Computation of Rayleigh Damping Coefficients for the Seismic Analysis of a Hydro-Powerhouse," *Shock and Vibration*, vol. 2017, 2017.
- [187] C.-C. Yu and A. S. Whittaker, "Analytical Solutions for Seismic Fluid-Structure Interaction of Head-Supported Cylindrical Tanks," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 146, p. 04020112, 2020.
- [188] J. Colombo and J. Almazán, "Simplified 3D model for the uplift analysis of liquid storage tanks," *Engineering Structures*, vol. 196, p. 109278, 2019.
- [189] A. Pabarja, M. Vafaei, S. C. Alih, M. Y. M. Yatim, and S. A. Osman, "Experimental study on the efficiency of tuned liquid dampers for vibration mitigation of a vertically irregular structure," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 114, pp. 84-105, 2019.
- [190] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations Laboratory Manual*: Year, Edition Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [191] D. K. Pandey, M. K. Sharma, and S. K. Mishra, "A compliant tuned liquid damper for controlling seismic vibration of short period structures," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 132, pp. 405-428, 2019.
- [192] N. K. Rai, G. R. Reddy, and V. Venkatraj, "Tuned Sloshing Water Dampers as Displacement Response Reduction Device: Experimental Verification," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 17, p. 1750026, 2017.