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

NGUYỄN THỊ THUÝ HẰNG

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA CẤU KIỆN BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG CỐT LIỆU XỈ THÉP

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 08 năm 2021

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

NGUYỄN THỊ THUÝ HẰNG

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA CẤU KIỆN BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG CỐT LIỆU XỈ THÉP

NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT - 9520101

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. PHAN ĐỨC HÙNG
Người hướng dẫn khoa học 2: TS. TRẦN VĂN TIẾNG

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 08 năm 2021

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 25 tháng 08 năm 2021

Nguyễn Thị Thúy Hằng

LỜI CẢM ƠN

Sau thời gian học tập và nghiên cứu tại Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật thành phố Hồ Chí Minh, Nghiên cứu sinh (NCS) đã hoàn thành luận án "Nghiên cứu ứng xử của cấu kiện bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu xỉ thép". Để hoàn thành luận án này, NCS xin được gửi lời tri ân sâu sắc nhất đến hai Thầy hướng dẫn khoa học là PGS.TS Phan Đức Hùng và TS Trần Văn Tiếng. Hai Thầy đã tận tình chỉ bảo, định hướng nghiên cứu ban đầu và trong suốt quá trình thực hiện luận án. Xin chân thành cảm ơn tập thể Khoa Xây Dựng, Phòng Đào tạo; Phòng Thí nghiệm Vật liệu xây dựng Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật thành phố Hồ Chí Minh đã tạo mọi điều kiện giúp đỡ NCS thực hiện luận án. Xin cảm ơn đến các thầy cô trong Khoa Xây dựng đã động viên, nhiệt tình giúp đỡ và cung cấp các tài liệu quý báu để NCS hoàn thành luận án này.

Trân trọng cảm ơn!

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 25 tháng 08 năm 2021

Nguyễn Thị Thúy Hằng

TÓM TẮT

Luận án gồm 6 chương, đối tượng nghiên cứu là xỉ thép được tái chế từ công nghệ luyện thép điện hồ quang từ các nhà máy thép ở khu công nghiệp Phú Mỹ, Bà Rịa - Vũng Tàu. Các nghiên cứu tổng quan được nghiên cứu sinh đề cập cho thấy khả năng ứng dụng rộng rãi của xỉ thép ở trong nước và trên thế giới. Một trong những ứng dụng khả thi của xỉ thép đó là làm cốt liệu lớn trong bê tông xi măng. Từ đó, luận án tập trung nghiên cứu ứng xử của vật liệu bê tông xi măng, cấu kiện bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu lớn xỉ thép. Và để có thể ứng dụng loại vật liệu này hiệu quả hơn, luận án xây dựng một mô hình ứng xử sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép.

Thành phần hóa học và tính chất cơ lý của bê tông xỉ thép, phương pháp lựa chọn thành phần bê tông xỉ thép được được làm sáng tỏ ở chương 2. Kết quả cho thấy xỉ thép hoàn toàn phù hợp để là cốt liệu lớn cho bê tông.

Tiếp đó, các nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử nén và kéo cơ học của bê tông xỉ thép được trình bày ở chương 3, với các nội dung chủ yếu như sau: Quan hệ giữa ứng xuất và biến dạng; Module đàn hồi và hệ số Poisson; Dạng phá hoại của bê tông xỉ thép; Sự phát triển của cường độ chịu nén theo thời gian; Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng của mẫu thử đến cường độ chịu nén; Ảnh hưởng của tỷ lệ nước trên xi măng đến cường độ bê tông; Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng mẫu thử đến cường độ kéo của BTXT khi bị ép chẻ; Cường độ kéo khi uốn.

Nội dung của chương 4 là nghiên cứu ứng xử của cấu kiện dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu xỉ thép (có kích thước lớn: 200x300x3300mm). Các lý thuyết tính toán của bê tông cốt thép thường được dùng để: Phân tích ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn là xỉ thép; Phân tích sự phát triển vết nứt trong các dầm; Tính toán, so sánh độ cong, độ võng và biến dạng uốn của dầm; Tính toán mô men kháng uốn và sức kháng cắt của dầm;

Bên cạnh việc nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử của bê tông xỉ thép. Chương 5 của luận án còn thực hiện việc xây dựng và hiệu chỉnh luật ứng xử nhằm ứng dụng cho việc mô phỏng tính toán số ứng xử của bê tông xỉ thép. Mô hình mô phỏng số sẽ

được xây dựng dựa trên nền tảng phương pháp phần tử rời rạc. Mô hình số ban đầu sẽ được ứng dụng để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép trong thí nghiệm nén – kéo một trục. Khả năng của mô hình số sẽ được kiểm chứng thông qua việc so sánh kết quả mô phỏng với với kết quả thực nghiệm. Kết quả mô phỏng số sẽ được phân tích dưới dạng mối quan hệ ứng suất – biến dạng và cả sự phát triển vết nứt bên trong mẫu vật liệu.

SUMMARY

There are six chapters in this dissertation. The research object is to recycle steel slag collected from electric arc furnace steelmaking in Phu My, Ba Ria - Vung Tau industrial zones. The previous researches mentioned in the dissertation showed the widespread applicability of steel slag in both Vietnam and worldwide. Moreover, one of its feasible applications is used as a coarse aggregate of cement concrete. Thus, the dissertation studies the behavior of steel slag concrete and steel slag concrete structures using the Discrete Element Method.

The chemical composition, physical and mechanical properties of steel slag, the method of choosing the composition of steel slag concrete are clarified in Chapter 2. The results show that the steel slag can use as a coarse aggregate of cement concrete.

Additionally, many experimental studies were performed to investigate the compressive together with tensile behaviors of the steel slag concrete, with the following principal contents: The relationship between stress and strain; Modulus and Poisson's ratio; Failure surface of steel slag concrete; The relationship between compressive strength vs age; Size and shape-dependent compressive strength of the steel-slag concrete; Effect of the added water amount on compressive strength of steel-slag concrete; Influence of specimen size and shape on splitting resistances of steel slag concrete; Flexural strength of plain;

Next, the content of chapter 4 includes the behavior of reinforced concrete beams using the steel slag aggregate (a big size beam with dimension 200x300x3300mm), including: Flexural behaviors of reinforced steel slag concrete beam; Crack patterns of the tested beams; Compare the curvature, deflection, and flexural strain between the steel slag aggregate beams and the traditional beams; Estimating moment resistance of the tested beams.

In addition, chapter 5 of the dissertation also suggests and improves some behavior rules of the steel slag aggregate beams to apply for the numerical simulation. These numerical simulation models are based on the discrete element methods applied to simulate steel slag concrete's behavior in the uniaxial compressive and

tensile test. The numerical models are verified by comparing simulation results with experimental results. The numerical simulation results will be analyzed in stress-strain relationships and crack growth inside the specimens

MỤC LỤC

Trang tựa **Trang**

Lời cam đoan i

Lời cảm ơn ii

Tóm tắt iii

Summary v

Mục lục vii

Danh mục các chữ viết tắt và ký hiệu xii

Danh sách các hình xiv

Danh sách các bảng xvii

Mở đầu 1

Chương 1 5

Tổng quan về linh vực nghiên cứu 5

1.1. Các vấn đề chung 5

1.1.1. Công nghệ sản xuất thép 5

1.1.2. Quá trình hình thành xỉ thép 6

1.1.3. Khả năng tái chế - ứng dụng xỉ thép 6

1.2. Tổng quan về tình hình nghiên cứu xỉ thép ở trong và ngoài nước 7

1.2.1. Tình hình nghiên cứu ở nước ngoài 7

1.2.1.1. Tính chất hóa học của xỉ thép 7

1.2.1.2. Tính chất cơ lý của xỉ thép 10

1.2.1.3. Các nghiên cứu sử dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn cho bê tông 13

1.2.1.4. Nghiên cứu mô phỏng số 21

1.2.2. Tình hình nghiên cứu ứng dụng xỉ thép ở trong nước 25

1.2.2.1. Các nghiên cứu về xỉ thép 25

1.2.2.2. Các nghiên cứu về mô phỏng số dùng phương pháp phần tử rời rạc 26

1.2.3. Nhận xét: 26

1.3. Tính cấp thiết của đề tài 29
1.4. Mục tiêu của đề tài 31
1.4.1. Mục tiêu tổng quát: 31
1.4.2. Mục tiêu cụ thể: 31
1.5. Xác định giới hạn của đề tài. 31
1.6. Phương pháp nghiên cứu. 31
1.7. Sơ đồ tổng quát của đề tài 32
1.8. Kết luận Chương 1 33
Chương 2 35
Nghiên cứu các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép và thiết kế thành phần bê tông dùng cốt liệu xỉ thép 35
2.1. Thành phần hóa học và các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép 36
2.1.1. Thành phần hóa học 36
2.1.2. Các chỉ tiêu cơ lý 37
2.2. Thiết kế thành phần bê tông 40
2.2.1. Phương pháp thiết kế thành phần bê tông 40
2.2.2. Các yêu cầu thiết kế 40
2.2.3. Vật liệu chế tạo bê tông xỉ thép 41
2.2.3.1. Xi măng 41
2.2.3.2. Cát 41
2.2.3.3. Đá dăm 42
2.2.3.4. Xỉ thép 42
2.2.4. Lựa chọn thành phần thành phần bê tông thường sử dụng xỉ thép thay thế cốt liệu lớn 43
2.2.4.1. Lựa chọn thành phần cơ bản 43
2.2.4.2. Lập ba thành phần định hướng 43
2.2.5. Kiểm tra bằng thực nghiệm 43
2.2.5.1. Kiểm tra độ sụt 43
2.2.5.2. Kiểm tra cường độ chịu nén. 45

2.2.6. Đề xuất hiệu chỉnh cấp phối và kiểm chứng.....47
2.3. Kết luận Chương 2 48
Chương 3.....49
Nghiên cứu ứng xử cơ học của bê tông xỉ thép 49
3.1. Thiết kế thí nghiệm 50
3.1.1. Thành phần hỗn hợp bê tông.....50
3.1.2. Chế tạo mẫu thử 50
3.1.2.1. Mẫu thí nghiệm cường độ chịu nén 50
3.1.2.2. Mẫu thí nghiệm Module đàn hồi và hệ số Poisson 52
3.1.2.3. Mẫu thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ.....53
3.1.2.4. Mẫu dầm bê tông xỉ thép.....54
3.2. Ứng xử nén của bê tông xỉ thép 55
3.2.1. Cường độ chịu nén 55
3.2.1.1. Phân tích dạng phá hoại khi nén 55
3.2.1.2. Khảo sát sự phát triển cường độ chịu nén của BTXT theo thời gian.....56
3.2.1.3. Thiết lập mối quan hệ giữa cường độ chịu nén của BTXT và thời gian.....59
3.2.2. Ứng suất nén và biến dạng.....60
3.2.2.1. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng 61
3.2.2.2. Module đàn hồi và hệ số Poisson.....65
3.2.3. Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng của mẫu thử đến cường độ chịu nén 66
3.2.3.1. Lý thuyết Bažant 67
3.2.3.2. Thiết lập hệ số chuyển đổi cường độ 74
3.2.4. Ảnh hưởng của tỷ lệ nước trên xi măng đến cường độ bê tông.....75
3.3. Ứng xử kéo của bê tông xỉ thép 77
3.3.1. Cường độ chịu kéo trực tiếp và gián tiếp của bê tông 77
3.3.2. Cường độ chịu kéo khi ép chẻ.....78
3.3.2.1. Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng mẫu thử đến cường độ kéo của BTXT khi bị ép chẻ.....79

3.3.2.2. Thiết lập hệ số chuyển đổi 84
3.3.3. Cường độ kéo khi uốn 85
3.4. Kết luận Chương 3 88
Chương 4 90
Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu xỉ thép 90
4.1. Cơ sở lý thuyết về ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép theo ACI 318-14 91
4.2. Thiết kế thí nghiệm 93
4.2.1. Lựa chọn cấu tạo dầm và bố trí thí nghiệm 93
4.2.2. Phân tích trạng thái làm việc của dầm BTCTXT theo ACI 318-14 95
4.3. Kết quả thí nghiệm 96
4.3.1. Ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn là xỉ thép 96
4.3.2. Sự phát triển vết nứt trong các dầm BTCTXT 100
4.3.3. Mối quan hệ giữa độ cong, độ võng và biến dạng uốn 102
4.3.4. Tính toán mô men kháng uốn và sức kháng cắt của dầm thí nghiệm 104
4.3.4.1. Mô men kháng uốn 104
4.3.4.2. Sức kháng cắt của dầm 106
4.4. Kết luận Chương 4 107
Chương 5 108
Mô phỏng số ứng xử bê tông xỉ thép 108
5.1. Cơ sở lý thuyết 108
5.1.1. Khái niệm 108
5.1.2. Cơ sở lý thuyết của phương pháp DEM 109
5.2. Mô hình ứng xử DEM cho bê tông xỉ thép 110
5.2.1. Giả thuyết của phương pháp 110
5.2.2. Điều kiện tương tác 110
5.2.3. Luật tương tác cục bộ 111
5.2.3.1. Lực tương tác pháp tuyến 112
5.2.3.2. Lực tương tác tiếp tuyến 113
5.2.4. Tiêu chuẩn phá hủy 114

5.2.5. Luật chuyển tiếp mô men 115
5.3. Xây dựng mẫu thí nghiệm số 116
5.4. Thông số đầu vào của mô hình 117
5.5. Mô phỏng số 119
5.5.1. Thí nghiệm nén dọc trục 120
5.5.2. Thí nghiệm kéo dọc trục 120
5.6. Kết quả mô phỏng số 120
5.6.1. Kết quả thí nghiệm nén dọc trục: 121
5.6.1.1. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng dọc trục 121
5.6.1.2. Sự phát triển vết nứt 124
5.6.2. Kết quả thí nghiệm kéo 125
5.7. Kết luận Chương 5 126
Chương 6 128
Kết luận và kiến nghị 128
6.1. Kết luận và đánh giá kết quả 128
6.2. Kiến nghị 129
Danh mục công bố khoa học 130
Tài liệu tham khảo 131

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU

N_{hc}	:	Nước hiệu chỉnh (lít)
N_{tb}	:	Nước tra bảng (lít)
H_p	:	Độ hút nước (%)
X_{hc}	:	Xi măng hiệu chỉnh (kg)
X_{tt}	:	Xi măng tính toán (kg)
f_c'	:	Cường độ chịu nén (MPa)
P_{max}	:	Tải trọng phá hoại (kN)
ε_{lat}	:	Biến dạng ngang cực hạn (‰)
ε_{axi}	:	Biến dạng dọc trục, ‰
ν_c	:	Hệ số poisson
E_c	:	Module đàn hồi, Gpa
T_c	:	Độ bền, MPa.‰
t	:	Thời gian (ngày)
w_c	:	khối lượng thể tích của bê tông (kg/m^3)
FPZ	:	Vùng phá hủy (fracture process zone)
λ	:	Hệ số chuyển đổi cường độ nén của mẫu bê tông có kích thước không chuẩn về mẫu có kích thước chuẩn 150x150x150mm
ACI	:	American Concrete Institute
f_o	:	cường độ kéo trực tiếp (MPa)
f_{FLX}	:	cường độ kéo khi uốn (MPa)
f_{SPL}	:	cường độ kéo khi ép chẻ (MPa)
χ	:	Hệ số chuyển đổi cường độ kéo khi ép chẻ có kích thước khác chuẩn về mẫu chuẩn 150x300mm
G	:	Khả năng hấp thụ năng lượng
BTXT	:	Bê tông xi măng dùng cốt liệu lớn là xỉ thép
BTCTXT	:	Bê tông cốt thép dùng BTXT

MOR	:	Điểm giới hạn bền uốn (limit of the linear)
LOP	:	Điểm giới hạn đàn hồi (limit of proportionality)
MKN	:	Mất khi nung
TCVN	:	Tiêu chuẩn Việt Nam
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
XT	:	Xỉ thép
TP	:	Thành phần
N/X	:	Tỷ lệ nước trên xi măng

DANH SÁCH CÁC HÌNH

HÌNH **TRANG**

Hình 1.1: Bãi tập kết xỉ thép ở khu công nghiệp Phú Mỹ [4] 6
Hình 1.2: Phân loại xỉ thép [5] 6
Hình 1.3: Quy trình sản xuất thép trong lò điện hồ quang [4] 7
Hình 1.4: Hình ảnh xỉ thép được quét từ kính hiển vi điện tử [18] 10
Hình 1.5: Sản lượng thép thô trên toàn thế giới [28] 14
Hình 1.6: Kết quả mô đun đàn hồi theo nghiên cứu của Ivanka Netinger [43] 17
Hình 1.7: Kết quả cường độ uốn theo nghiên cứu của Ivanka Netinger [43] 18
Hình 1.8: Kết quả cường độ chịu nén theo nghiên cứu của Ivanka Netinger[43] ... 18
Hình 1.9: Ảnh hưởng của xỉ thép đến cường độ nén của bê tông [47] 19
Hình 1.10: Ảnh hưởng của xỉ thép đến cường độ nén và uốn của bê tông xỉ thép ở các ngày tuổi khác nhau theo Ramzi Taha [49] 20
Hình 1.11. Ảnh hưởng của xỉ thép đến cường độ nén và ép chẻ của bê tông xỉ thép theo Amjad A. Sharba [50] 20
Hình 1.12. Các mẫu trụ với kích thước khác nhau được sử dụng cho nghiên cứu ... 23
Hình 1.13. Luật tương tác cục bộ [66] 24
Hình 1.14: Sơ đồ tổng quát của đề tài 33
Hình 2.1: Sơ đồ chương 2 35
Hình 2.2: Mẫu xỉ thép 36
Hình 2.3: Độ sụt của các thành phần bê tông trước khi hiệu chỉnh 44
Hình 2.4: Độ sụt của các thành phần bê tông sau khi hiệu chỉnh lượng nước 45
Hình 2.5: Biểu đồ quan hệ giữa cường độ chịu nén và tỷ lệ N/X 46
Hình 3.1: Sơ đồ chương 3 49
Hình 3.2: Thí nghiệm cường độ chịu nén 52
Hình 3.3: Mẫu thí nghiệm với các kích thước khác nhau 52
Hình 3.4: Mẫu thí nghiệm 53
Hình 3.5: Thí nghiệm xác định module đàn hồi và hệ số poisson 53

Hình 3.6: Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi ép chẻ 54
Hình 3.7: Thí nghiệm cường độ kéo khi uốn với sơ đồ uốn 4 điểm 55
Hình 3.8: Mặt phá hoại của bê tông xỉ thép và bê tông đối chứng 56
Hình 3.9: Các dạng phá hoại của bê tông dùng cốt liệu là đá tự nhiên.....56
Hình 3.10: Sự phát triển cường độ bê tông theo thời gian.....57
Hình 3.11: Tỷ lệ phần trăm giữa cường độ bê tông ở tuổi t ngày so với tuổi 28 ngày 58
Hình 3.12: Quan hệ giữa cường độ chịu nén và thời gian theo phân tích hồi quy của ba cấp phối xỉ thép XT01, XT02, XT03 60
Hình 3.13: Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của 3 loại cấp phối BTXT 63
Hình 3.14: So sánh các thông số nén của mẫu bê tông xỉ thép.....65
Hình 3.15: Quan hệ giữa module đàn hồi và cường độ bê tông 66
Hình 3.16: So sánh kích thước của FPZ so với kích thước mẫu thí nghiệm [120]...67
Hình 3.17: Mô tả lý thuyết ảnh hưởng kích thước Bazant lên cường độ [120].....68
Hình 3.18: Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và kích thước, hình dạng của mẫu 71
Hình 3.19: Áp dụng luật hiệu ứng kích thước Bazant cho bê tông xỉ thép.....74
Hình 3.20: Quan hệ giữa cường độ chịu nén và tỷ lệ X/N của BTXT và bê tông truyền thống, sử dụng mẫu trụ 150x300 mm [105].....76
Hình 3.21: Ảnh hưởng của tỷ lệ X/N lên độ sụt và cường độ nén của bê tông xỉ thép ở tuổi 28 ngày, mẫu 100x100x100 mm 77
Hình 3.22: Sự phân bố ứng suất khác nhau giữa kéo trực tiếp và kéo gián tiếp.....78
Hình 3.23: Hai phương pháp thí nghiệm kéo khi ép chẻ mẫu bê tông 79
Hình 3.24: Quan hệ giữa tải trọng tác dụng và biến dạng dọc trục khi ép chẻ.....80
Hình 3.25: Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng mẫu lên cường độ chịu kéo khi ép chẻ.....83
Hình 3.26: Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi ép chẻ 84
Hình 3.27: Biểu đồ Moment và lực cắt của sơ đồ uốn 4 điểm.....86
Hình 3.28: Quan hệ giữa tải trọng tác dụng và độ võng của dầm BTXT 86
Hình 3.29: Vết nứt của dầm bê tông xỉ thép trong sơ đồ uốn 4 điểm.....86

Hình 3.30: Phân tích độ bền uốn của bê tông xỉ thép 88
Hình 4.1: Sơ đồ thí nghiệm dầm BTCTXT.....90
Hình 4.2: Biểu đồ ứng suất, biến dạng và nội lực trên tiết diện thẳng góc với trục dọc của dầm BTCTXT.....91
Hình 4.3. Các trạng thái của thép nén và kéo khi cường độ của bê tông đặt cực hạn.....92
Hình 4.4: Thí nghiệm uốn 3 điểm với dầm BTCTXT 94
Hình 4.5: Cấu tạo dầm bê tông cốt thép.....95
Hình 4.6: Biểu đồ Moment và lực cắt của sơ đồ uốn 3 điểm.....97
Hình 4.7: Đường cong điển hình biểu diễn quan hệ giữa tải trọng tác dụng và độ võng của dầm BTCTXT [134].....97
Hình 4.8: Ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn là xỉ thép.....98
Hình 4.9: So sánh khả năng kháng uốn của 3 dầm BTCTXT.....99
Hình 4.10: Phân bố vết nứt trong các dầm.....101
Hình 4.11: Độ cong, biến dạng uốn và độ cứng của dầm BTCTXT khi xuất hiện vết nứt [138].....103
Hình 4.12: Biểu đồ ứng suất, biến dạng và nội lực trên tiết diện thẳng góc với trục dọc của dầm BTCTXT [138] 105
Hình 5.1: Các vật liệu rời trong mô phỏng DEM [143].....109
Hình 5.2: Tương tác giữa 2 phần tử và các thành phần lực tương tác 112
Hình 5.3: Luật tương tác pháp tuyến giữa hai phần tử rời rạc. 113
Hình 5.4: Tiêu chuẩn Mohr – Coulomb dùng trong mô hình [66] 115
Hình 5.5: Mô men chuyển tiếp giữa các phần tử tương tác [66] 116
Hình 5.6: Mẫu thí nghiệm số hình hộp chữ nhật được đề xuất.....117
Hình 5.7: Điều kiện biên của thí nghiệm kéo, nén.....120
Hình 5.8: So sánh quan hệ ứng suất và biến dạng dọc trục giữa thực nghiệm và mô phỏng_ cấp phối XT01.....122
Hình 5.9: So sánh quan hệ ứng suất và biến dạng dọc trục giữa thực nghiệm và mô phỏng_ cấp phối XT02.....122

Hình 5.10: So sánh quan hệ ứng suất và biến dạng dọc trục giữa thực nghiệm và mô phỏng_ cấp phối XT04 123
Hình 5.11: Quan sát vết nứt trên mẫu thí nghiệm số và mẫu thí nghiệm thực nghiệm 125
Hình 5.12: Quan hệ giữa ứng suất kéo và biến dạng dọc trục trong thí nghiệm mô phỏng kéo dọc trục mẫu thí nghiệm số XT01, XT02, XT03 126

DANH SÁCH CÁC BẢNG

BẢNG **TRANG**

Bảng 1.1: Thành phần hóa học trung bình của xỉ thép tại Slovenia [6] 7
Bảng 1.2: Thành phần hóa học của xỉ thép Romania (đơn vị: %)[7] 8
Bảng 1.3: Thành phần hoá học của xỉ thép và đá Dolomite ở Croatia 8
Bảng 1.4: Thành phần hoá học của xỉ thép từ lò điện hồ quang 9
Bảng 1.5: Thành phần khoáng của các loại xỉ [9] 10
Bảng 1.6: So sánh tính chất vật lý của xỉ thép với đá vôi tự nhiên 11
Bảng 1.7: So sánh tính chất vật lý của xỉ thép và cốt liệu tự nhiên 11
Bảng 1.8: Tính chất vật lý của đá vôi và xỉ thép 11
Bảng 1.9: Tính chất cơ lý của xỉ thép và đá granite ở Ấn Độ [23] 12
Bảng 1.10: So sánh tính chất cơ lý của xỉ thép và đá granite, đá sỏi ở Đức 12
Bảng 1.11: Thành phần hạt của cốt liệu xỉ thép 13
Bảng 1.12: Các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép làm cốt liệu lớn ở Hy Lạp 13
Bảng 1.13: Thành phần vật liệu của hỗn hợp bê tông theo Juan M. Manso [40] 16
Bảng 1.14: Tính chất của bê tông xỉ thép trước và sau khi hóa già 16
Bảng 1.15: Thành phần vật liệu của hỗn hợp bê tông theo Ivanka Netinger[43] 17
Bảng 2.1: Kết quả phân tích thành phần hoá học của xỉ thép nghiên cứu và của xỉ thép ở các nghiên cứu [6-8] 36
Bảng 2.2: Tổng hợp các chỉ tiêu cơ lý và phương pháp thí nghiệm xỉ thép 37
Bảng 2.3: Các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép nghiên cứu 38

Bảng 2.4: Thành phần hạt của xỉ thép nghiên cứu 39
Bảng 2.5: So sánh thành phần hạt của xỉ thép nghiên cứu với yêu cầu của TCVN-7570:2006 [89] 39
Bảng 2.6: So sánh các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép nghiên cứu với yêu cầu của TCVN 7570:2006 [89] 40
Bảng 2.7: Các chỉ tiêu cơ lý của xi măng sử dụng 41
Bảng 2.8: Các chỉ tiêu cơ lý của cát sử dụng 41
Bảng 2.9: Thành phần hạt của cát 41
Bảng 2.10: Các chỉ tiêu cơ lý của đá sử dụng 42
Bảng 2.11: Thành phần hạt của đá dăm 42
Bảng 2.12: Thành phần cơ bản của 1m^3 bê tông xỉ thép (kg) 43
Bảng 2.13: Các thành phần định hướng 43
Bảng 2.14: Các thành phần định hướng sau khi hiệu chỉnh lượng nước 44
Bảng 2.15: Kết quả kiểm tra bằng thực nghiệm 45
Bảng 2.16: Kết quả kiểm chứng cấp phối bê tông đề xuất (kg/m^3) 47
Bảng 3.1: Thành phần hỗn hợp bê tông 50
Bảng 3.2: Số tổ mẫu và tuổi ngày thí nghiệm của mỗi cấp phối DC01, DC02, DC03 51
Bảng 3.3: Số tổ mẫu và tuổi ngày thí nghiệm của mỗi cấp phối XT01, XT02, XT03 51
Bảng 3.4: Số tổ mẫu dùng để khảo sát sự ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến cường độ bê tông xỉ thép ở tuổi 28 ngày 51
Bảng 3.5: Số tổ mẫu dùng khảo sát module đàn hồi và hệ số Poisson ở tuổi 28 ngày 52
Bảng 3.6: Mẫu thí nghiệm cường độ ép chẻ ở tuổi 28 ngày 53
Bảng 3.7: Mẫu dầm bê tông xi măng dùng cốt liệu lớn là xỉ thép 54
Bảng 3.8: Cường độ chịu nén ở các tuổi ngày khác nhau 55
Bảng 3.9: Kết quả thí nghiệm module đàn hồi và hệ số Poisson của BTXT 61
Bảng 3.10: Cường độ nén độ chịu nén của bê tông xỉ thép ở tuổi 28 ngày 69

Bảng 3.11. Hệ số chuyển đổi cường độ nén của mẫu bê tông có kích thước không chuẩn về mẫu có kích thước chuẩn 150x150x150mm 75
Bảng 3.12: Cường độ chịu nén của bê tông xỉ thép ở 28 ngày tuổi khi tỷ lệ N/X thay đổi 75
Bảng 3.13: Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ 81
Bảng 3.14: Hệ số chuyển đổi cường độ kéo khi ép chẻ có kích thước khác chuẩn về về mẫu chuẩn (hình trụ: 150x300 mm; hình lập phương: 150x150x150mm) 85
Bảng 3.15: Độ bền uốn của dầm bê tông xỉ thép ở tuổi 28 và 56 ngày 87
Bảng 4.1: Bảng quy cách thép sử dụng trong dầm bê tông cốt thép 94
Bảng 4.2. Kết quả tính trục trung hòa và kiểm tra biến dạng của thép nén và thép kéo theo trường hợp 3 96
Bảng 4.3: Các thông số uốn của dầm bê tông cốt thép xỉ thép ở tuổi 28 ngày 98
Bảng 4.4: Độ bền uốn tại LOP của các dầm thử nghiệm 101
Bảng 4.5: So sánh biến dạng uốn tại LOP 103
Bảng 4.6: So sánh biến dạng uốn tại MOR 104
Bảng 4.7: So sánh Moment lý thuyết và thực nghiệm 105
Bảng 4.8. So sánh sức kháng cắt lý thuyết và thực nghiệm 107
Bảng 5.1. Thông số đầu vào của mô hình lấy từ kết quả thực nghiệm 119
Bảng 5.2: Giá trị góc ma sát và lực dính 119
Bảng 5.3: Kết quả mô phỏng ứng xử mẫu bê tông xỉ thép 121
Bảng 5.4: So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm 121
Bảng 5.5: Kết quả mô phỏng kéo dọc trục 126
Bảng 5.6: So sánh kết quả kéo dọc trục do mô phỏng với thực nghiệm 126

MỞ ĐẦU

Thép được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp, xây dựng, sản xuất chế tạo máy móc thiết bị, hàng gia dụng, y học, an ninh quốc phòng,… Sản lượng thép đã tăng trưởng rất nhanh, đặc biệt trong nửa sau của thế kỷ 20. Quá trình phát triển của ngành công nghiệp luyện kim Việt Nam có thể chia làm 3 giai đoạn [1]:

- Giai đoạn trước năm 1996: Ở giai đoạn này nền kinh tế cả nước nói chung, ngành luyện kim nói riêng gặp rất nhiều khó khăn, kinh tế đất nước lâm vào khủng hoảng, sản xuất kinh doanh theo kế hoạch hóa tập trung, bao cấp, qui mô nền kinh tế còn rất nhỏ, nên ngành luyện kim không phát triển được và chỉ duy trì mức sản lượng khoảng 100 nghìn tấn/năm. Sau năm 1987, ngành thép bắt đầu có tăng trưởng, sản lượng thép trong nước vượt mức trên 100 nghìn tấn/năm.
- Giai đoạn 1996 – 2006: Ngành thép có mức độ tăng trưởng khá cao, đổi mới và đầu tư chiều sâu, có nhiều cơ sở liên doanh. Đây là giai đoạn có tốc độ tăng trưởng cao nhất với nhiều thành phần kinh tế tham gia đầu tư sản xuất và gia công thép ở trong nước rất đa dạng. Trong giai đoạn này có nhiều cơ sở cán thép công suất trên 100 nghìn tấn/năm đi vào hoạt động. Đến năm 2006, sản lượng phôi thép trong cả nước đã đạt trên 1.8 triệu tấn phôi/năm, sản lượng thép xây dựng đạt xấp xỉ 3.5 triệu tấn/năm.
- Giai đoạn 2007 đến nay: Từ tháng 1/2007, Việt Nam gia nhập Tổ chức Thương mại thế giới (WTO), sản lượng thép có sự tăng trưởng cao, nhiều nhà đầu tư trong nước, nước ngoài đã đầu tư với quy mô công suất lớn, vốn đầu tư tăng cao, chủ yếu tập trung vào luyện kim đen, sản xuất thép xây dựng.

Song song với sự phát triển của ngành thép thì lượng xỉ thép, một sản phẩm phụ trong quá trình luyện thép, được tạo ra ngày càng nhiều. Riêng ở khu vực phía Nam (tập trung chủ yếu ở tỉnh Bà Rịa Vũng Tàu) khối lượng xỉ thép do các nhà máy thép sản xuất thải ra ước tính khoảng 0,3 - 0,5 triệu tấn/năm. Nếu không có giải pháp tái

sử dụng nguồn xỉ thép này thì việc bảo quản sẽ tốn rất nhiều chi phí và lãng phí quỹ đất để lưu trữ.

1. Lý do chọn đề tài

Trên thế giới, xỉ thép đã được nghiên cứu trong nhiều lĩnh vực như nông nghiệp, xây dựng, làm phân bón, ... Một trong những ứng dụng khả thi nhất của xỉ thép đó là khả năng thay thế cốt liệu đá dăm truyền thống, làm cốt liệu cho bê tông xi măng. Ngoài ra, xỉ thép cũng thể hiện một số tính chất vượt trội như: hạt xỉ thép hình khối, độ rỗng lớn, nhiều góc cạnh, bề mặt thô ráp giúp các hạt có thể chèn móc vào nhau, ổn định cao nếu được đầm chặt; hàm lượng tạp chất hữu cơ, hàm lượng hạt thoi dẹt, độ mài mòn Los-Angeles, độ nén dập trong xi lanh, …phù hợp trong việc sử dụng làm cốt liệu cho bê tông xi măng (BTXM). Các nghiên cứu ở Việt Nam trong việc sử dụng xỉ thép trong nước làm cốt liệu cho BTXM bước đầu cũng cho thấy bê tông xỉ thép có cường độ vượt trội hơn so với BTXM dùng cốt liệu đá dăm

Vì vậy, đề tài luận án "Nghiên cứu ứng xử của cấu kiện bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép" nhằm nghiên cứu các tính chất cơ lý của xỉ thép, đề xuất hiệu chỉnh phương pháp thiết kế cấp phối bê tông xỉ thép (BTXT), từ đó nghiên cứu một số ứng xử cơ học của bê tông xỉ thép và cấu kiện bê tông xỉ thép. Bên cạnh đó, luận án xây dựng mô hình số để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép giúp dự đoán cường độ nén và kéo của bê tông xỉ thép. Kết quả nghiên cứu làm phong thú thêm nguồn vật liệu xây dựng, đặc biệt là giải quyết được bài toán khan hiếm vật liệu trong xây dựng như hiện nay.

2. Mục đích nghiên cứu

- Nghiên cứu tổng quan trong và ngoài nước về việc sử dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn cho bê tông xi măng;
- Nghiên cứu các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép đã qua tái chế và thiết kế thành phần bê tông dùng cốt liệu lớn là xỉ thép
- Nghiên cứu một số ứng xử cơ học của bê tông xỉ thép (bao gồm ứng xử nén và ứng xử uốn)
- Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép

- Hiệu chỉnh mô hình ứng xử sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng số ứng xử kéo và nén của bê tông xỉ thép nhằm tạo tiền đề cho việc mô phỏng dự đoán được ứng xử của các cấu kiện kết cấu sử dụng bê tông xỉ thép.

3. Phạm vi nghiên cứu

Việc sử dụng xỉ thép tái chế sẽ không có hiệu quả kinh tế nếu như khoảng cách vận chuyển lớn nên đề tài chỉ giới hạn sử dụng nguồn xỉ thép đã qua tái chế bởi công ty TNHH Vật liệu xanh để ứng dụng làm cốt liệu lớn cho bê tông xi măng và cấu kiện bê tông xi măng

4. Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp thống kê, tổng hợp: thu thập, phân tích các nghiên cứu về sử dụng xỉ thép trong xây dựng trên thế giới;
- Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm: Nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trên các mẫu thử ở trong phòng thí nghiệm theo các tiêu chuẩn hiện hành đối với cốt liệu truyền thống và bê tông sử dụng cốt liệu truyền thống; Kết quả thí nghiệm được xử lý thống kê và quy hoạch thực nghiệm nhằm đảm bảo độ tin cậy cần thiết
- Phương pháp số: Dùng phương pháp phần tử rời rạc cổ điển được đề xuất bởi Cundall & Strack [2], với các thông số vật liệu đầu vào được lấy từ kết quả thực nghiệm ở chương 3, các thông số của mô hình được hiệu chỉnh lại dựa vào kết quả thực nghiệm.
- Phương pháp phân tích, so sánh: Phân tích, so sánh các kết quả có được từ lý thuyết, thực nghiệm và mô phỏng bằng phương pháp số để đánh giá khả năng bền vững và ứng dụng của bê tông sử dụng cốt liệu xỉ thép cho các công trình xây dựng.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu

❖ Ý nghĩa khoa học của đề tài:

- Đề xuất hiệu chỉnh phương pháp thiết kế cấp phối bê tông xỉ thép. Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm, cho thấy xỉ thép có các tính chất cơ lý đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật của đá dăm dùng làm BTXM, nên hoàn toàn có thể sử dụng

để thay thế cốt liệu lớn cho BTXM thỏa mãn các tiêu chuẩn kỹ thuật và đảm bảo tính kinh tế;

- Làm rõ các ứng xử cơ học của bê tông xỉ thép;
- Chứng minh được BTCTXT có ứng xử tương đồng với bê tông truyền thống, do đó trong trường hợp các tiêu chuẩn kỹ thuật của BTXT chưa được ban hành thì có thể vận dụng các tiêu chuẩn kỹ thuật của bê tông đá truyền thông;
- Mô phỏng được ứng xử nén và kéo trực tiếp của bê tông xỉ thép bằng phương pháp phần tử rời rạc, giúp dự đoán được cường độ nén và kéo của BTXT

❖ Ý nghĩa thực tiễn của đề tài:

- Kết quả nghiên cứu cho thấy việc tận dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn cho BTXM là khả thi, góp phần làm phong phú thêm nguồn vật liệu xây dựng, tiết kiệm chi phí trong việc xử lý xỉ thép, giảm ô nhiễm môi trường
- Các kết quả nghiên cứu cho phép xác định các đặc trưng của bê tông xỉ thép có thể sử dụng phục vụ công tác thiết kế cấu kiện, kết cấu sử dụng bê tông xỉ thép.

6. Cấu trúc của Luận án

Cấu trúc luận án gồm 6 chương:

- Chương 1: Tổng quan về lĩnh vực nghiên cứu
- Chương 2: Nghiên cứu các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép và thiết kế thành phần bê tông dùng cốt liệu lớn là xỉ thép
- Chương 3: Nghiên cứu ứng xử cơ học của bê tông xỉ thép
- Chương 4:Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép
- Chương 5: Mô phỏng số ứng xử bê tông xỉ thép
- Chương 6: Kết luận và kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ LINH VỰC NGHIÊN CỨU

1.1. Các vấn đề chung

1.1.1. Công nghệ sản xuất thép

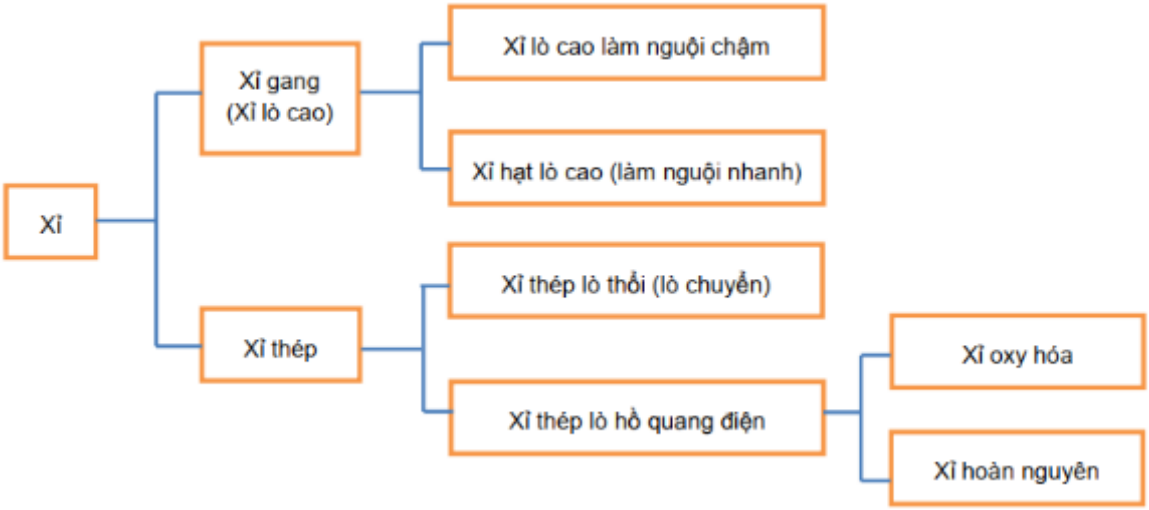
Thép được sản xuất theo hai công nghệ chính là công nghệ lò cao (BOF) và công nghệ lò điện hồ quang-đúc liên tục (EAF). Do điều kiện thiếu gang lỏng nên ngành thép Việt Nam sử dụng chủ yếu là công nghệ EAF. Các lò điện sản xuất thép của Việt Nam hiện có công suất nhỏ, trừ nhà máy Thép Phú Mỹ được trang bị lò điện hồ quang DANARC 70 tấn/mẻ mới được đưa vào vận hành. Các lò điện này đã áp dụng một số tiến bộ kỹ thuật như phun ôxy và than vào tạo xỉ bọt, dùng biến thế siêu cao công suất, sử dụng các loại vật liệu chịu lửa siêu bền, ra thép đáy lệch tâm…. Theo đó, cứ mỗi tấn phôi thép được sản xuất sẽ phát sinh xỉ lò khoảng 110-150 kg, chiếm từ 11%-15% khối lượng sản phẩm phôi [3]

Tỉnh Bà Rịa Vũng Tàu được xem là trung tâm công nghiệp luyện thép của cả nước, với nhiều dự án nhà máy luyện thép đã và đang hoạt động, nhiều dự án đang thực hiện thủ tục xin phép chuẩn bị đầu tư và sẽ hình thành trong tương lai. Toàn tỉnh có 18 dự án đã được cấp phép với tổng vốn đầu tư đăng ký hơn 3.7 tỷ USD, tập trung tại các khu công nghiệp ở huyện Tân Thành. Trong số 18 dự án, có 8 dự án đã đi vào hoạt động, 5 trong số đó đã phát sinh ra lượng xỉ thép. Với năng xuất hoạt động của 5 nhà máy này, năm 2014 sản xuất 5.2 triệu tấn phôi thép, phát sinh khoảng 570-780 nghìn tấn xỉ thép, tương đương khoảng 1567-2136 tấn/ ngày. Xỉ thép là một nguồn thải phát sinh bụi gây ô nhiễm môi trường, ô nhiễm nguồn nước do các nhà máy thép không tự xử lý ngay trong khu vực sản xuất vì thiếu mặt bằng chứa xỉ thép.

Hình 1.1: Bãi tập kết xỉ thép ở khu công nghiệp Phú Mỹ [4]

1.1.2. Quá trình hình thành xỉ thép

Công nghệ luyện thép lò điện hồ quang sử dụng nguyên liệu đầu vào là sắt, thép phế liệu để luyện thép. Để tách các tạp chất có trong thép phế liệu, vôi và một số chất trợ dung được đưa vào lò luyện. Trong quá trình nóng chảy ở nhiệt độ trên 1600^{o}C, xỉ thép sẽ nổi lên phía trên, thép lỏng chìm xuống phía dưới. Lớp xỉ thép được tháo ra khỏi lò, khi nguội thì chuyển sang trạng thái rắn. Sau đó, xỉ thép được vận chuyển tới bãi chứa và tiếp tục được chuyển đến nhà máy tái chế xử lý, tạo thành các sản phẩm có ích sử dụng theo các mục đích khác nhau. Với quy trình này, xỉ thép được hình thành như một sản phẩm phụ của quá trình sản xuất thép.

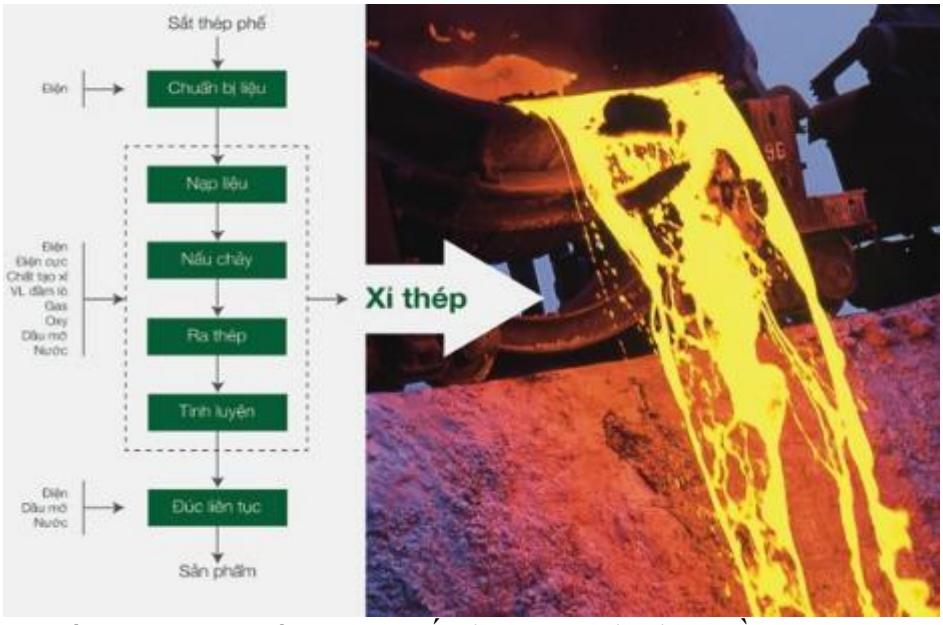


Hình 1.2: Phân loại xỉ thép [5]

1.1.3. Khả năng tái chế - ứng dụng xỉ thép

Với hàng loạt nhà máy đưa vào vận hành và sản lượng thép tăng vọt như hiện nay thì vấn đề đang phải đối mặt là sản lượng xỉ thép tồn đọng quá lớn sẽ dẫn đến

nhiều yếu tố tiêu cực như: tốn quỹ đất để lưu chứa hoặc phải bố trí nơi xử lý chôn lấp, bụi bẩn gây ô nhiễm môi trường. Trong khi đó, xỉ thép không phải là chất thải rắn mà là một dạng phụ phẩm trong công nghiệp, có thể tái chế, tái sử dụng ở nhiều lĩnh vực như làm cốt liệu bê tông, phụ gia cho xi măng, móng kết cấu áo đường….



Hình 1.3: Quy trình sản xuất thép trong lò điện hồ quang [4]

1.2. Tổng quan về tình hình nghiên cứu xỉ thép ở trong và ngoài nước

1.2.1. Tình hình nghiên cứu ở nước ngoài

1.2.1.1. *Tính chất hóa học của xỉ thép*

❖ *Thành phần hoá học*

Thành phần hóa học của xỉ thép phụ thuộc vào công nghệ luyện thép quyết định đến các tính chất cơ lý của xỉ thép. Nhiều tác giả đã nghiên cứu về thành phần hóa của xỉ thép:

- Theo nghiên cứu của Ana Mladenović [6], thành phần hóa học của xỉ thép bao gồm các oxit chủ yếu Fe_xO_y, CaO, SiO_2 như Bảng 1.1:

Bảng 1.1: Thành phần hóa học trung bình của xỉ thép tại Slovenia [6]

Thứ tự	Thành phần	Tỷ lệ (%)
1	FeO	30-40
2	CaO	20-35
3	SiO_2	5-12
4	Fe_2O_3	6-9

Thứ tự	Thành phần	Tỷ lệ (%)
5	Al_2O_3	5-7
6	MgO	4-12
7	Khác	còn lại

- Các kết quả về thành phần hoá học của xỉ thép cũng được nhắc đến trong nghiên cứu của R. Alizadeh [7], thể hiện ở Bảng 1.2. Kết quả nghiên cứu cho thấy xỉ thép không những thích hợp để làm cốt liệu cho bê tông thường mà còn có thể dùng cho bê tông cường độ cao.

Bảng 1.2: Thành phần hóa học của xỉ thép Romania (đơn vị: %)[7]

Thành phần	Xỉ lò điện hồ quang	Xỉ lò cao	Xỉ thép của công ty Khuzestan
SiO_2	31-45	10-19	15.45
Al_2O_3	10-17	1-3	2.05
Fe, FeO, Fe_2O_3	0.1-1	15-30	41.19
CaO	34-48	40-52	30.35
MgO	1-15	5-10	7.78
SO_3	0.3	---	---
P_2O_5	---	0.5-1	---
MnO	0.1-1.4	5-8	---
K_2O	0.6-1	---	0.08
Na_2O	0.1-0.5	---	0.42
TiO_2	2-3	---	0.68

- Ivanka Netinger [8] đã so sánh thành phần hoá học của đá dolomite và hai loại xỉ thép được tái chế từ hai bãi chôn lấp ở thị trấn Sisak và Split, Croatia, kết quả thể hiện ở Bảng 1.3:

Bảng 1.3: Thành phần hoá học của xỉ thép và đá Dolomite ở Croatia

Thành phần	Đá dolomite	Xỉ thép từ Sisak	Xỉ thép từ Split
SiO_2	0.49	17.08	14.24
CaO	31.78	24.98	31.52
Al_2O_3	0.1	5.4	7.6
Fe_2O_3	0.1	25.45	25.74
MgO	20.85	10.58	7.42
MnO	-	8.91	3.8
Na_2O	0.01	0.12	0.13
K_2O	0.01	0.13	0.08
SO_3^{2-}	-	0.25	0.44

Thành phần	Đá dolomite	Xỉ thép từ Sisak	Xỉ thép từ Split
SO^{2-}	-	0.05	0.04

- Mohd. Rosli Hainin và công sự [9] đã có những nghiên cứu tổng quan về thành phần hoá học và thành phần khoáng của xỉ thép được tạo ra từ lò điện hồ quang EAF và thống kê trong Bảng 1.4 và Bảng 1.5

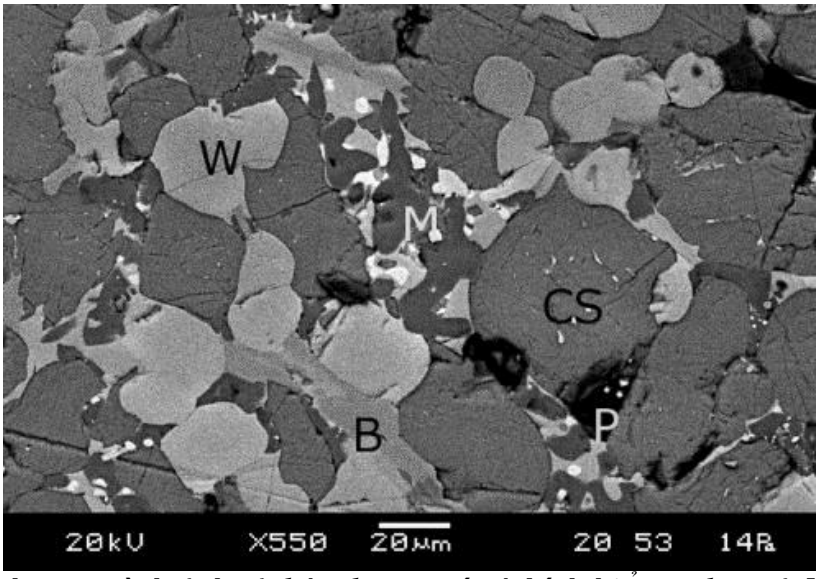
Bảng 1.4: Thành phần hoá học của xỉ thép từ lò điện hồ quang

Tác giả nghiên cứu	Thành phần hóa học (%)											
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	Fe_2O_3	$Fe_{tổng}$	SO_3	MnO	TiO_2	P_2O_5	$CaO_{tự\ do}$
Waligora [10]	47.7	13.3	3	6.4	-	24.4	-	-	2.6	0.7	1.5	9.2
Xuequan [11]	45-60	10-15	1-5	3-13	7-20	3-9	-	-	-	-	1-4	-
Barra [12]	29.5	16.1	7.6	5	-	32.6	-	0.6	4.5	0.8	0.6	-
Luxan [13]	24.4	15.4	12.2	2.9	34.4	-	-	-	5.6	0.6	1.2	-
Manso [14]	23.9	15.3	7.4	5.1	-	-	42.5	0.1	4.5	-	-	0.5
Shi [15]	35-36	9-20	2-9	3.9	15-30	-	-	0.1 - 0.2	3-8	-	0-0.3	-
Tossavainen [16]	38.8	14.1	6.7	6.5	5.6	20.3	-	-	5	-	-	-
Tsakiridis [17]	35.7	17.5	6.3	7.9	-	26.4	-	-	2.5	0.8	-	-

❖ *Thành phần khoáng*

Các nghiên cứu [6, 18] cho thấy thành phần khoáng chủ yếu của xỉ thép gồm:

+ W: Wustite (FeO);
+ CS: Calcium Silicates ($2CaO.SiO_2$, C_2S và $3CaO.SiO_2$, C_3S);
+ B: Brownmillerite ($Ca_2(Al,Fe)_2O_5$,C_4AF);
+ M: mayenite ($12CaO.7Al_2O_3$, $C_{12}A_7$);
+ P: Khe rỗng;
+ Thép (phần màu trắng).



Hình 1.4: Hình ảnh xỉ thép được quét từ kính hiển vi điện tử [18]

Bảng 1.5: Thành phần khoáng của các loại xỉ [9]

Tác giả	Loại xỉ	Thành phần khoáng
Tossavainen [16]	EAF	$Ca_3Mg(SiO4)_2$, β-Ca_2SiO_4, Spinel solid solution (Mg, Mn)(Cr, Al)$_2O_4$, wustite-type solid solution ((Fe, Mg, Mn)O), $Ca_2(Al, Fe)_2O_5$
Barra [12]	EAF	$CaCO_3$, FeO, MgO, Fe_2O_3, $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Ca_2SiO_4
Luxan [13]	EAF	Ca_2SiO_5, $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Fe_2O_3, $Ca_{14}Mg_2(SiO_4)_8$, $MgFe_2O_4$, Mn_3O_4, MnO_2
Tsakiridis [17]	EAF	Ca_2SiO_4, $4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$, $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Ca_3SiO_5, $2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$, FeO, Fe_3O_4, MgO, SiO_2
Nicolae [19]	EAF	EAF MnO2, MnO, Fe_2SiO_4, Fe_7SiO_{10}
Qian [20]	EAF	γ-Ca_2SiO_4, C_3MS_2, CFMS, FeO-MnO-MgO solid solution
Geiseler [21]	EAF	$2CaO{\cdot}SiO_2$, $3CaO{\cdot}SiO_2$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, FeO, (Ca, Fe)O (calciowustite), (Mg, Fe)O (magnesiowustite), free MgO, CaO

1.2.1.2. *Tính chất cơ lý của xỉ thép*

Theo nghiên cứu của Gurmel [22] thì xỉ thép ở Teesport và Port Talbot (Anh) có kích thước hạt tương tự nhau, nằm trong khoảng từ 60µm-30mm, khối lượng thể tích khoảng 3360kg/m^3, khối lượng thể tích xốp khoảng 1482kg/m^3, độ rỗng khoảng 31-45%, độ pH từ 10-12. Theo nghiên cứu này, các tính chất vật lý của xỉ thép được ghi nhận rất tốt.

Tại Ấn Độ, theo nghiên cứu của V. Maruthachalam [23], tính chất cơ lý của xỉ thép được thống kê như Bảng 1.6:

Bảng 1.6: So sánh tính chất vật lý của xỉ thép với đá vôi tự nhiên

Thứ tự	Tính chất	Xỉ thép	Đá vôi làm cốt liệu cho bê tông
1	Khối lượng riêng (kg/m^3)	3330	2680
2	Khối lượng thể tích xốp (kg/m$^{3)}$	1482	1382
3	Độ rỗng (%)	55.5	48.3
4	Độ hút nước (%)	2.5	0.75
5	Khả năng chống phân mảnh (%)	13.9	24.1
6	Chỉ số bong tróc (%)	8.0	38.4
7	Khả năng chống tan chảy (1% NaCl)	0.81	0.87
8	Tính bền vững của Magie Sunphat (%)	23.6	21.4

Tahir Sofilić [24] đã so sánh một số tính chất vật lý của xỉ thép với cốt liệu tự nhiên (Diabaz và Carbonate), kết quả được thể hiện trong Bảng 1.7, cho thấy xỉ thép rất phù hợp để dùng trong làm vật liệu xây dựng.

Bảng 1.7: So sánh tính chất vật lý của xỉ thép và cốt liệu tự nhiên

TT	Tính chất	Xỉ thép	Đá Diabaz	Đá Carbonate
1	Độ hao mòn LA	13	15	29
2	Độ hao mòn Deval	8	8	11
3	Độ bền băng giá, %	1	0	1.7
4	Sức kháng băng giá, đóng băng và tan băng, %	0.4	0	0.3
5	Độ mài mòn	70	Không xác định	30
6	Hàm lượng hạt nhỏ, %	0.5	0.5	Không xác định
7	Độ hút nước, %	>1	<1	<1
8	Độ ổn định thể tích, %	2.9	-	-

Maslehuddin [25], đã so sánh tính chất vật lý của đá vôi và xỉ thép như Bảng 1.8 và đưa ra kết luận là xỉ thép có những tính chất vượt trội hơn so với đá vôi, xỉ thép nặng hơn đá vôi khoảng 17%.

Bảng 1.8: Tính chất vật lý của đá vôi và xỉ thép

Tính chất	Cốt liệu đá vôi	Cốt liệu xỉ thép
Khối lượng thể tích, g/cm^3	2.54	3.51

Tính chất	Cốt liệu đá vôi	Cốt liệu xỉ thép
Độ hút nước, %	2.20	0.85
Hàm lượng bụi bùn sét, %	0.65	0.12
Độ mài mòn, %	24.2	11.6

Khi nghiên cứu xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông cường độ cao, tính chất cơ lý của xỉ thép cũng được Verapathran Maruthachalam [23] xác định trong Bảng 1.9. Kết quả cho thấy xỉ thép có thể dùng như cốt liệu lớn trong bê tông thường và bê tông cường độ cao.

Bảng 1.9: Tính chất cơ lý của xỉ thép và đá granite ở Ấn Độ [23]

	Khối lượng riêng, g/cm^3	Hàm lượng hạt mịn, %	Độ hút nước, %	Khối lượng thể tích, kg/m^3	Độ nén đập trong xi lanh, %	Độ va chạm, %	Độ mài mòn, %
Đá granite	2.71	7.06	0.40	1719	26	25	23
Xỉ thép	2.89	6.64	1.90	1611	27	23	29

Trong nghiên cứu của H. Motz [26], các tính chất cơ lý của xỉ thép cũng được so sánh với đá granit và đá sỏi, với kết quả ở Bảng 1.10, H. Motz cho rằng xỉ thép có thể xử lý để thay thế cho cốt liệu tự nhiên.

Bảng 1.10: So sánh tính chất cơ lý của xỉ thép và đá granite, đá sỏi ở Đức

Tính chất	Xỉ lò BOF	Xỉ lò điện hồ quang	Đá Granite	Đá sỏi
Khối lượng riêng	3.3	3.5	2.5	2.6
Hàm lượng thoi dẹt	<10	<10	<10	<10
Độ va đập	22	18	12	21
Cường độ nén đập trong xi lanh	15	13	17	21
Độ mài mòn	320	350	260	250
Độ hút nước	1	0.7	<0.5	<0.5
Sức kháng băng giá	<0.5	<0.5	<0.5	<1

Trong nghiên cứu của Lykoudis ở Hy Lạp [27], tuyến đường Egnatia đã sử dụng một lớp bê tông nhựa dày 2.5cm, trong đó cốt liệu sử dụng là xỉ thép có các tính chất cơ lý được trình bày ở Bảng 1.11 và Bảng 1.12.

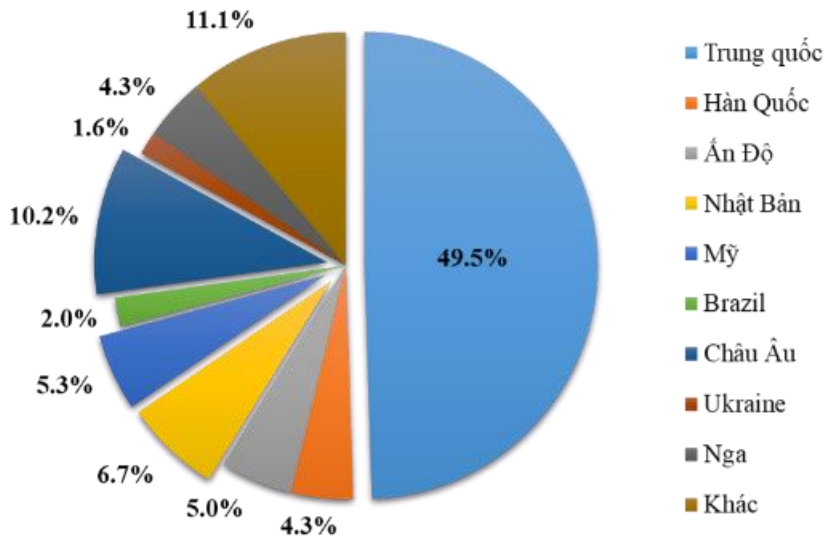
Bảng 1.11: Thành phần hạt của cốt liệu xỉ thép

Cốt liệu lớn		
Kích thước mắt sàng (mm)	Lượng lọt sàng tích luỹ theo tiêu chuẩn (%)	Lượng lọt sàng tích luỹ của xỉ thép (%)
14	100	100
10	99 – 85	87.9
8	37 – 62	40
6.3	1 – 15	4.7
4	0 – 5	1.8
0.6	0 – 2	0.6

Bảng 1.12: Các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép làm cốt liệu lớn ở Hy Lạp

Chỉ tiêu thí nghiệm	Kết quả	Tiêu chuẩn kỹ thuật
Độ mài mòn Los Angeles %	15.06	(ASTM C 131/89)
Độ hút nước của cốt liệu lớn %	1.16	(AASHO T-85)
Độ hút nước của cốt liệu phụ %	1.15	(AASHO T-85)
Khối lượng riêng của cốt liệu lớn (g/cm3)	3.268	(AASHO T-84 & T-85)
Khối lượng riêng của cốt liệu phụ (g/cm3)	2.263	(AASHO T-84 & T-85)
Khả năng chống mài mòn khi sử dụng $MgSO_4$ cho cốt liệu lớn %	2.91	(AASHO T-104-99)
Cường độ nén đập trong xi lanh %	12	(ΕΛΟΤ EN 1097.02)
Độ mài mòn %	2.80	(BS 812.113-1991)
Chỉ số Flakiness %	9.77	(BS 812.105.1:1989)
Hàm lượng hạt thoi dẹt %	11.32	(BS 812.105.1:1989)

1.2.1.3. *Các nghiên cứu sử dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn cho bê tông*



Hình 1.5: Sản lượng thép thô trên toàn thế giới [28]

Theo số liệu của Hiệp hội Thép Thế giới [28], sản lượng thép thô trên thế giới đạt 1620 triệu tấn trong năm 2015 (Hình 1.5). Trong đó, Trung Quốc, Châu Âu, Nhật Bản và Hoa Kỳ là 4 khu vực đứng đầu về sản lượng thép, chiếm 71.7% tổng sản lượng của thế giới. Lượng xỉ thép do các nước này tạo ra cũng khá lớn và đa số chúng được tái sử dụng trong xây dựng đường, sản xuất xi măng, trong xây dựng dân dụng, tái chế tại nhà máy, trong nông nghiệp. Tại Nhật Bản [29], theo thống kê vào năm 2016, lượng xỉ thép được sản xuất ra vào khoảng 14.1 tỷ tấn và tỷ lệ tái sử dụng đạt 98.4%. Từ năm 2000 đến nay, hai năm một lần, Hiệp hội Xỉ thép Châu Âu [30] đều có những thống kê về việc sản xuất và sử dụng xỉ thép ở châu Âu (gồm 17 quốc gia). Kết quả khảo sát vào năm 2012 cho thấy, có khoảng 21.8 tỷ tấn xỉ thép được sản xuất ở Châu Âu và tỷ lệ tái sử dụng là 87.0%, một số nước ở Châu Âu như Đức và Pháp có tỷ lệ sử dụng xỉ thép cao hơn 90%. Theo dữ liệu từ hội khảo sát địa chất ở Mỹ [31], lượng xỉ thép đạt 7.8 tỷ tấn vào năm 2013, trong đó có 49.7% sử dụng trong xây dựng đường, 16.0% sử dụng làm cốt liệu cho bê tông, chỉ có 15.6% lượng xỉ thép được để tại bãi chứa. Ở Trung Quốc [32], lượng xỉ thép sản xuất ra đạt 100 tỷ tấn vào năm 2013, tuy nhiên tỷ lệ sử dụng xỉ thép ở nước này vào khoảng 29.5%, lượng xỉ thép tồn đọng lên đến 300 triệu tấn.

Như vậy, có sự chênh lệch đáng kể về việc tái sử dụng xỉ thép giữa các khu vực nói trên cũng như trên thế giới. Qua các khảo sát ở trên cũng khẳng định xỉ thép không

phải là chất thải rắn, nó là một phụ phẩm trong công nghiệp, có thể tái chế, tái sử dụng ở nhiều lĩnh vực. Do đó, đề tài này sẽ tập trung phân tích về việc ứng dụng làm cốt liệu lớn trong bê tông xi măng của xỉ thép.

Có rất nhiều nghiên cứu ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông (cốt liệu lớn, cốt liệu nhỏ) [33-38].

M. Maslehuddin và các cộng sự [39] đã thực nghiệm trên nhiều loại cấp phối bê tông xỉ thép. Các loại bê tông này có tỷ lệ giữa cốt liệu thô so với tổng lượng cốt liệu là 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 1.00 trong đó cốt liệu thô được thay thế hoàn toàn bằng xỉ thép. Kết quả cho thấy cường độ nén và cường độ uốn có giá trị tăng theo tỷ lệ tăng của xỉ thép. Cường độ nén của bê tông cốt liệu xỉ thép lớn hơn bê tông đối chứng có tỷ lệ cốt liệu thô tương đương nhưng lại không có sự cải thiện đáng kể về độ bền uốn so với bê tông đối chứng.

M. Maslehuddin và các cộng sự [25] đã công bố một nghiên cứu khác về xỉ thép, trong đó tác giả đã thực hiện đánh giá các tính chất cơ học và đặc tính độ bền của bê tông cốt liệu xỉ thép so với bê tông cốt liệu đá vôi nghiền. Độ bền của cả bê tông xỉ thép và bê tông cốt liệu đá vôi nghiền được đánh giá tính thấm nước, vận tốc xung, độ ổn định kích thước và ăn mòn cốt thép. Kết quả chỉ ra rằng đặc tính độ bền của bê tông xỉ thép tốt hơn so với bê tông cốt liệu đá vôi nghiền. Tương tự, một số tính chất vật lý của bê tông cốt liệu xỉ thép tốt hơn so với bê tông cốt liệu đá vôi nghiền.

Juan M. Manso và các cộng sự [40] đã thực hiện các nghiên cứu ứng dụng xỉ thép trong bê tông xi măng. Sáu loại mẫu thí nghiệm M-1. M-2, M-3, M-4, M-5 và M-6 được chế tạo (Bảng 1.13), trong đó, M-1 có thành phần cốt liệu là vật liệu truyền thống, M-2 có cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ được thay thế hoàn toàn bằng xỉ thép, M-3 có cốt liệu lớn được thay thế hoàn toàn bằng xỉ thép, cốt liệu nhỏ là vật liệu truyền thống, M-4, M-5, M-6 có cốt liệu lớn được thay thế hoàn toàn bằng xỉ thép, cốt liệu nhỏ được thay thế một phần bằng xỉ thép. Các thí nghiệm được tiến hành bao gồm: xác định cường độ nén ở tuổi 7, 28 và 90 ngày theo ASTM C39, thí nghiệm già hóa bê tông theo tiêu chuẩn ASTM D-4792. Kết quả thể hiện trong Bảng 1.14 đã cho thấy các mẫu M-1, M-3, M-4, M-6 có thể đạt cường độ 30MPa ở tuổi 28 ngày, cường độ

ở tuổi 90 ngày cao hơn 28 ngày khoảng 20-30% chứng minh rằng xỉ thép có thể ứng dụng để chế tạo bê tông xi măng. Kết quả cường độ nén của bê tông sau khi già hóa nhỏ hơn bê tông cùng loại ở 90 ngày tuổi khi được bảo dưỡng liên tục trong phòng ẩm, tuy nhiên vẫn nằm trong phạm vi cho phép.

Bảng 1.13: Thành phần vật liệu của hỗn hợp bê tông theo Juan M. Manso [40]

Hỗn hợp	Nước	Xi măng	Đá dăm nghiền	Cỡ hạt 0-4mm		Cỡ hạt 4-12mm		Cỡ hạt 12-20mm	
				Đá dăm	Xỉ thép	Đá dăm	Xỉ thép	Đá dăm	Xỉ thép
M-1	186	310	-	920	-	520	-	415	-
M-2	186	310	-	-	950	-	515	-	430
M-3	186	310	-	960	-	-	550	-	345
M-4	186	310	480	-	480	-	550	-	345
M-5	186	310	480	-	480	-	380	-	240
M-6	186	310	330	-	630	-	380	-	240

Bảng 1.14: Tính chất của bê tông xỉ thép trước và sau khi hóa già

Hỗn hợp	Cường độ nén, MPa			Cường độ sau khi bị già hóa, MPa
	7 ngày	28 ngày	90 ngày	
M-1	29.4	36.3	41.3	37.3
M-2	12.8	20.6	22.4	23.0
M-3	26.3	32.3	38.7	34.7
M-4	28.9	34.8	42.2	38.3
M-5	22.8	29.8	39.5	32.6
M-6	25.6	31.9	40.4	35.4

Jigar P.Patel [41] đã nghiên cứu thay thế một phần đá tự nhiên bằng xỉ thép (từ 25% đến 100%). Kết quả cho thấy các tính chất cơ học của bê tông xỉ thép gần như tương tự với bê tông truyền thống khi xỉ thép thay thế khoảng 50%-75%

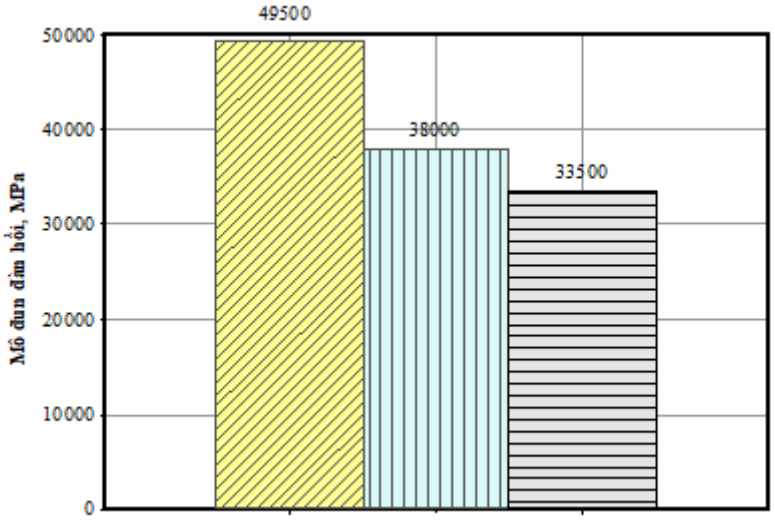
Ioanna Papayianni và cộng sự [42] đã trình bày các nghiên cứu của mình về việc sử dụng xỉ thép từ lò điện hồ quang trong sản xuất bê tông. Xỉ thép đã được so sánh với đá vôi về tính chất cơ lý, tính chất hoá học. Kết quả cho thấy, các tính chất cơ lý và hoá học của xỉ thép phù hợp để làm cốt liệu cho bê tông.

Ivanka Netinger và cộng sự [43] đã dùng xỉ thép được lấy từ 2 bãi chôn lấp lớn nhất ở Croatia thay thế cho cốt liệu thô trong bê tông xi măng. Ba loại mẫu thí nghiệm

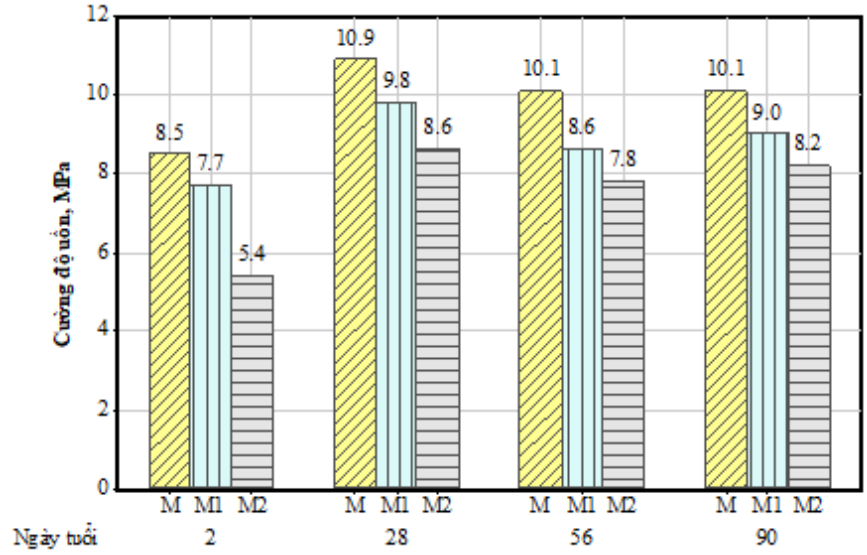
được chế tạo. Thành phần của mẫu đối chứng M sử dụng cốt liệu truyền thống và mẫu M1, M2 sử dụng cốt liệu lớn được lấy từ 2 bãi chôn lấp khác nhau được trình bày trong Bảng 1.15. Các kết quả ghi nhận được ở Hình 1.6, Hình 1.7 và Hình 1.8 đã khẳng định bê tông xỉ thép có thể được sử dụng trong các kết cấu mặc dù các giá trị cường độ nén, cường độ uốn và mô đun đàn hồi của bê tông xỉ thép (M1, M2) ghi nhận được đều nhỏ hơn bê tông tuyền thống, điều này trái ngược với kết quả của nhiều tác giả khác.

Bảng 1.15: Thành phần vật liệu của hỗn hợp bê tông theo Ivanka Netinger[43]

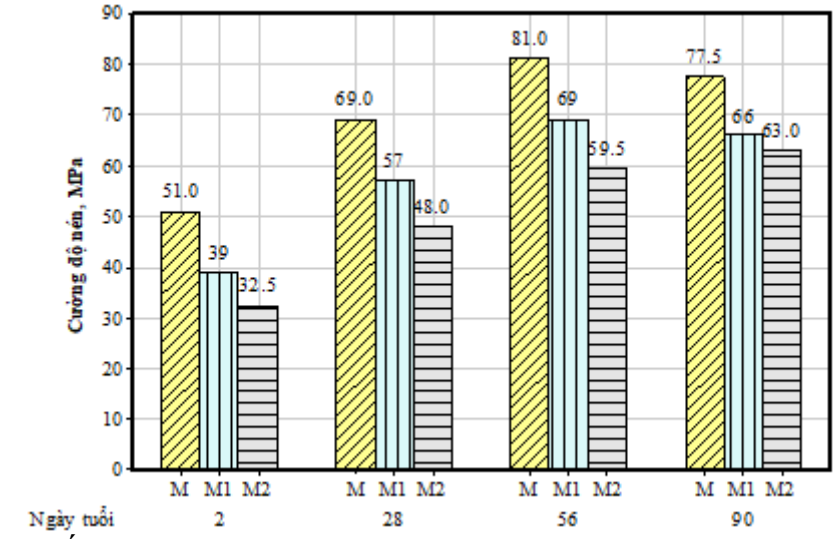
Cấp phối	W/C	Phụ gia (kg)	Xi măng (kg)	Cốt liệu tự nhiên (kg)			Xỉ thép 1 (kg)		Xỉ thép 2 (kg)	
				0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm	4-8 mm	8-16 mm	4-8 mm	8-16 mm
M	0.43	3.2	400	807	367	661				
M1	0.43	3.2	400	864			422	723		
M2	0.43	3.2	400	841					411	704



Hình 1.6: Kết quả mô đun đàn hồi theo nghiên cứu của Ivanka Netinger [43]



Hình 1.7: Kết quả cường độ uốn theo nghiên cứu của Ivanka Netinger [43]



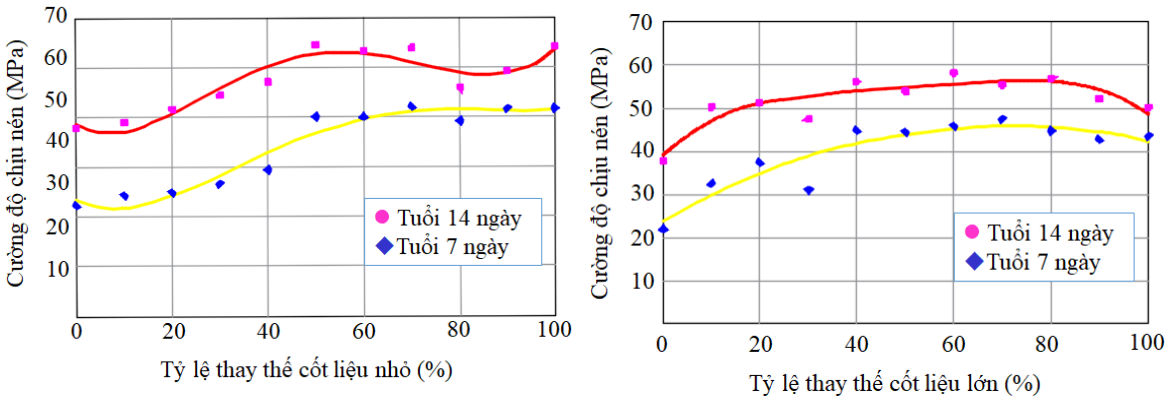
Hình 1.8: Kết quả cường độ chịu nén theo nghiên cứu của Ivanka Netinger[43]

Liu Chunlin và cộng sự [44] tại hội nghị quốc tế về những tiến bộ trong khoa học kỹ thuật đã trình bày các nghiên cứu ban đầu về khả năng của bê tông khi dùng xỉ thép làm cốt liệu nhỏ và lớn. Kết quả cho thấy bê tông dùng xỉ thép có khả năng chịu lực tương tự bê tông truyền thống với cường độ chịu nén cao hơn, cường độ chịu uốn kém hơn và độ co ngót ít hơn.

Sang-Woo Kim và cộng sự [45] đã ước tính khả năng chịu uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu là xỉ thép. Các mối quan hệ giữa momen-độ võng, vết nứt khi tải trọng cực đại cũng như moment và biến dạng được phân tích và so sánh với dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu tự nhiên. Kết quả cho thấy ứng xử của hai dầm

là tương tự nhau, khả năng chịu uốn của dầm xỉ thép thỏa mãn các yêu cầu kết cấu theo công thức của ACI 318-14 [46].

Sultan A. Tarawneh và cộng sự [47] ở đại học Jordan Mu'tah đã nghiên cứu ảnh hưởng của việc sử dụng xỉ thép kết hợp với cốt liệu đá vôi theo các tỷ lệ khác nhau. Một số thí nghiệm đã được thực hiện để nghiên cứu ảnh hưởng của việc thay thế một phần cốt liệu lớn hoặc cốt liệu nhỏ bằng xỉ thép trong hỗn hợp bê tông và xác định ảnh hưởng của hàm lượng xỉ đến tính chất cơ học của bê tông. Hình 1.9 cho thấy ảnh hưởng của việc thay thế một phần cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn bằng xỉ thép đến cường độ nén của bê tông ở cả 7 ngày và 28 ngày. Cả hai trường hợp này đều ghi nhận thấy cường độ bê tông tăng khi tỉ lệ xỉ thép tăng và việc thay thế xỉ thép cho cốt liệu nhỏ có kết quả tốt hơn.

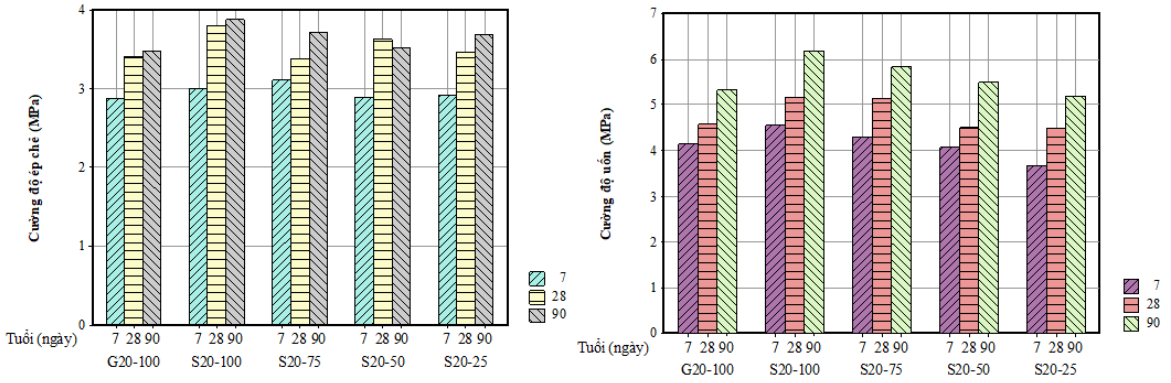


Hình 1.9: Ảnh hưởng của xỉ thép đến cường độ nén của bê tông [47]

Hisham Qasrawi [48] đã nghiên cứu việc sử dụng xỉ thép để tăng cường tính chất cơ học của bê tông sử dụng vật liệu tái chế và bảo vệ môi trường, kết quả cho thấy dùng cốt liệu tái chế và xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông đã góp phần giảm các vấn đề về môi trường khi phải xử lý chúng, đồng thời giúp giảm khai thác các mỏ đá cần thiết. Nghiên cứu cũng cho thấy, khi dùng xỉ thế xỉ thép thay cho 67% cốt liệu tái chế, khả năng chịu lực của bê tông được cải thiện.

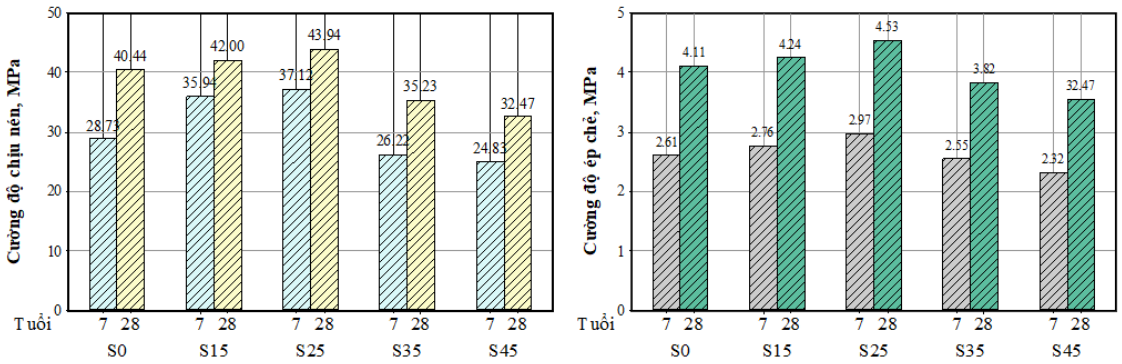
Một nghiên cứu ở Qatar do Ramzi Taha và cộng sự [49] thực hiện, trong đó cốt liệu lớn của bê tông được thay thế bằng xỉ thép với nhiều tỷ lệ khác nhau: 100%, 75%, 50%, 25% và 0%. Kết quả quả cho thấy bê tông với 100% xỉ thép thay thế cốt liệu lớn có cường độ nén dọc trục, cường độ ép chẻ và cường độ uốn vượt trội so với bê tông

đối chứng tương ứng là 11%, 11% và 12.8%. Các giá trị cường độ này của bê tông xỉ thép tăng lên khi tỷ lệ xỉ thép thay thế tăng từ 25% đến 100% (Hình 1.10).



Hình 1.10: Ảnh hưởng của xỉ thép đến cường độ nén và uốn của bê tông xỉ thép ở các ngày tuổi khác nhau theo Ramzi Taha [49]

Amjad A. Sharba (2019) [50] cũng đã có những nghiên cứu về bê tông xỉ thép trong đó, tác giả sử dụng xỉ thép để thay thế cốt liệu nhỏ trong bê tông M40 với tỷ lệ về khối lượng là 0%, 15%, 25%, 35%, và 45%. Các tính chất cơ học của bê tông xỉ thép được cải thiện rõ rệt khi tỷ lệ thay thế là 15% và 25% (trong đó tỷ lệ 25% là tốt nhất). Khi tỷ lệ thay thế tăng lên 35%, cường độ chịu nén, uốn và ép chẻ đều nhỏ hơn mẫu đối chứng (Hình 1.11).



Hình 1.11. Ảnh hưởng của xỉ thép đến cường độ nén và ép chẻ của bê tông xỉ thép theo Amjad A. Sharba [50]

Trong nghiên cứu của V. Ducman [51], xỉ thép còn được đề cập đến vai trò làm cốt liệu cho bê tông chịu lửa, có thể sử dụng làm vật liệu chịu lửa trong công nghiệp ở nhiệt độ lên đến 1000°C.

Bên cạnh việc ứng dụng cho bê tông thường, xỉ thép còn được nghiên cứu ứng dụng cho bê tông cường độ cao [23, 52, 53] như:

- H. Beshr và cộng sự [54] đã đánh giá ảnh hưởng của bốn loại cốt liệu lớn là đá vôi, đá đolomit, đá thạch anh và xỉ thép lên các tính chất cơ học của bê tông cường độ cao sử dụng chúng làm cốt liệu lớn. Kết quả cho thấy với các loại cốt liệu khác nhau sẽ ảnh hưởng khác nhau đến cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ và module đàn hồi của bê tông cường độ cao, trong đó xỉ thép sẽ cho kết quả lớn nhất và đá vôi cho kết quả nhỏ nhất

- R. Alizadeh và cộng sự [55] đã tiến hành các thí nghiệm như độ hấp thụ nước, phản ứng kiềm-silica, khả năng chống suy thoái, độ bền của cốt liệu, cường độ nén, độ bền uốn, module đàn hồi được khảo sát cho bê tông thường và bê tông cường độ cao. Kết quả cho thấy do tính chất hoá học, đặc tính vật lý và cơ học thích hợp nên việc ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông có vẻ như có lợi thế hơn cốt liệu tự nhiên. Xỉ thép có cường độ cao hơn cốt liệu tự nhiên dẫn đến sự khác biệt lớn về cường độ giữa bê tông cường độ cao sử dụng xỉ thép so với khi sử dụng đá tự nhiên.

- Yasmina Biskri và cộng sự [56] đã so sánh các chỉ tiêu cơ học và độ bền của bê tông hiệu suất cao (HPC) sử dụng cốt liệu nhân tạo như xỉ thép và xỉ kết tinh làm cốt liệu thô với HPC sử dụng cốt liệu đá vôi tự nhiên. Các hỗn hợp khác nhau đã được kiểm tra độ bền cơ học ở các độ tuổi khác nhau, các chỉ số độ bền như độ hấp thụ mao dẫn, độ xốp của nước, tính thấm khí và độ khuếch tán ion clorua cũng được thực hiện. Khi phân tích các kết quả thử nghiệm cho thấy, thành phần khoáng vật, hình dạng bề mặt và cường độ của cốt liệu là những yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến cường độ nén và độ bền của HPC. Kết quả cho thấy HPC với cốt liệu xỉ thép có tính chất cơ học cao nhất do xỉ thép có cường độ cao và kết cấu bề mặt thô ráp nên đã cải thiện liên kết giữa cốt liệu và hồ xi măng.

- Saaid I. Zaki và cộng sự (Ai Cập, 2011) [57], đã chế tạo 8 dầm bê tông cốt thép chất lượng cao có kích thước (150×150×1850 mm) trong đó 4 dầm dùng cốt liệu thô là xỉ thép và 4 dầm dùng cốt liệu thô là đá đolomit. Kết quả cho thấy Bê tông chất lượng cao xỉ thép làm cốt liệu có tính chất cơ học được cải thiện hơn so với các dầm dùng đá đolomit. Ứng xử uốn của dầm xỉ thép cũng vượt trội hơn so với dầm dùng cốt liệu tự nhiên.

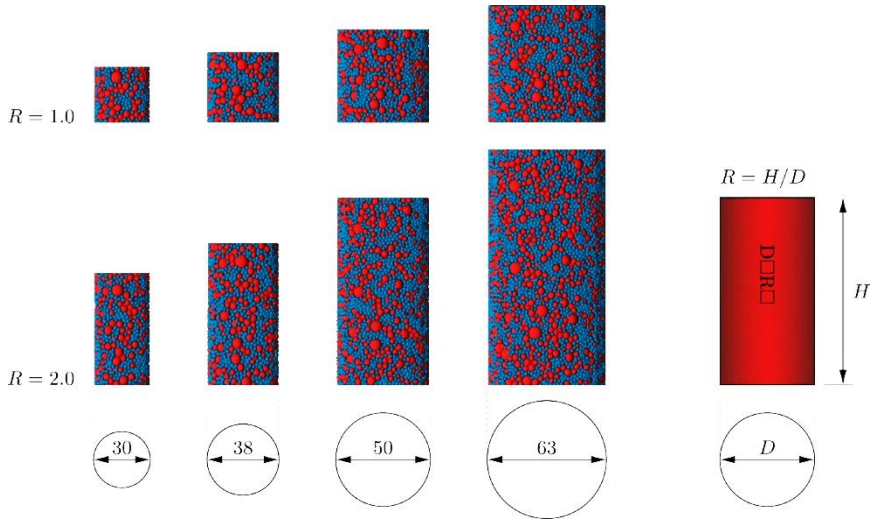
1.2.1.4. *Nghiên cứu mô phỏng số*

Mô phỏng số cho phép kiểm chứng lý thuyết, tiên đoán thực nghiệm một cách nhanh chóng và tốn ít chi phí. Một số phương pháp được dùng để mô phỏng như phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM); phương pháp sai phân hữu hạn (Finite Difference Method – FDM); phần tử biên (Boundary Element Method - BEM) và thể tích hữu hạn (Finite Volume Method - FVM. Trong đó, FEM là phương pháp được sử dụng rất rộng rãi trong việc tính toán kết cấu công trình, nền móng cũng như lập biện pháp thi công. Để mô phỏng ứng xử của vật liệu bê tông cũng như cấu kiện bê tông cốt thép, một số tác giả đã dùng FEM như: B.L.Wahalathantri và cộng sự [58] đề xuất mô hình quan hệ ứng suất biến dạng miền nén và sự phá hoại miền kéo; D. Sihua và cộng sự [59] mô hình phá hoại dẻo được sử dụng mô phỏng dầm chịu uốn và phân tích ứng xử và phá hoại của dầm bê tông cốt thép . S.V.Chaudhari và cộng sự [60] đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm ABAQUS để xây dựng mô hình 3D của khối bê tông.

Các lý thuyết tính toán trên đều dựa trên nền tảng của các môn học cơ học kết cấu và sức bền vật liệu mà xuất phát điểm của chúng là các lý thuyết của cơ học môi trường liên tục với các giả thiết như: "Vật liệu có tính chất liên tục, đồng nhất và đẳng hướng" hay "Chuyển vị, biến dạng của vật thể là vô cùng bé so với kích thước của vật thể" [61]. Trong phần lớn các trường hợp thì các giả thiết này là chấp nhận được, việc tính toán không gây sai số đáng kể. Tuy nhiên, với ứng xử phức tạp của vật liệu bê tông: vật liệu có tính rời, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng phi tuyến, biến dạng mềm, liên kết giữa bê tông và cốt thép thì việc sử dụng các phương pháp liên tục như trên không còn chính xác nữa. Khi đó, phương pháp Phần tử rời rạc (Discrete Element Method - DEM) là một gợi ý. DEM được phát triển với mục đích giải quyết các bài toán mô phỏng cho các loại vật liệu mang tính rời rạc hay các loại vật liệu địa kỹ thuật như đất đá, bê tông, …dựa trên việc mô phỏng đúng bản chất rời rạc vốn có của vật liệu. Với DEM, vật liệu được mô phỏng thành tập hợp các phần tử rời rạc với nhiều hình dạng khác nhau như hình đĩa, hình cầu, hình đa diện,… các phần tử này tương tác với nhau thông qua các luật ứng xử cục bộ. Bên cạnh đó, DEM là phương pháp không lưới nên là phương pháp rất ưu việt trong việc mô phỏng dòng vật liệu hay mô phỏng quá trình hình thành và phát triển vết nứt cũng như sự phá hủy của vật

liệu mà không cần tới việc chia lại lưới hay sử dụng các kỹ thuật phức tạp khác như phương pháp phần tử hữu hạn. Vì những lý do này, việc sử dụng DEM để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép là phù hợp.

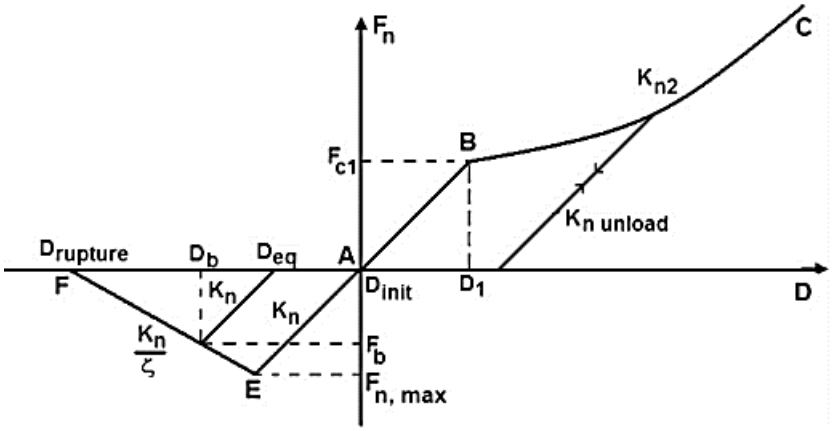
DEM được đề xuất lần đầu tiên bởi Cundall vào năm 1971 [62] dùng cho cơ học đá. Sau đó, DEM đã dần được sử dụng rộng rãi cho rất nhiều loại vật liệu khác, trong đó có địa vật liệu như đất đá, bê tông. S. Sinaie [63] đã dùng phương pháp phần tử rời rạc để nghiên cứu hiệu ứng kích thước đến các tính chất của mẫu bê tông hình trụ với tỷ lệ chiều cao và đường kính là 1 và 2 như Hình 1.12. Mô hình phần tử rời rạc được hiệu chuẩn đúng cách, cho kết quả mô phỏng gần sát với kết quả thực nghiệm. S. Sinaie [64] cũng đã tận dụng lợi thế của phương pháp phần tử rời rạc để phát triển một mô hình bê tông cho các mô phỏng tuần hoà. Kết quả mô phỏng được so sánh với các giá trị thực nghiệm đã cho thấy khả năng của mô hình trong việc dự đoán các đặc tính chu kỳ của bê tông.



Hình 1.12. Các mẫu trụ với kích thước khác nhau được sử dụng cho nghiên cứu

J. Kozicki [65] dựa vào phương pháp phần tử rời rạc đã nghiên cứu ảnh hưởng của cấu trúc cốt liệu lên sự phát triển vết nứt trong bê tông bằng mô hình 3D. Tran và cộng sự [66] đã sử dụng phần tử rời rạc 3D dạng hình cầu (với lực tương tác cục bộ như Hình 1.13) để mô phỏng ứng xử của mẫu bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén ba trục với áp lực buồng nén siêu cao. Nghiên cứu này cho thấy phương pháp phần tử rời rạc đã mô phỏng được ứng xử của mẫu bê tông dưới tác dụng của siêu tải trọng. Bên cạnh đó, kết quả mô phỏng còn cho thấy sự phát triển của lực tương tác

giữa các phần tử rời rạc qua đó thể hiện được sự phát triển vết nứt trong mẫu số giống như sự phát triển vết nứt trong mẫu thực nghiệm.



Hình 1.13. Luật tương tác cục bộ [66]

Viktor Mechtcherine [67] dùng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng dòng chảy của bê tông tươi. M. Nitka [68] đã mô hình hoá ứng xử của bê tông chịu tải trọng nén và kéo đơn bằng phương pháp phần tử rời rạc. Ngoài ra, tác giả R.Hart và cộng sự [69] đã đưa ra luật ứng xử để mô phỏng vật liệu với phần tử rời rạc 3D được thể hiện bằng chương trình 3DEC. Kết quả nghiên cứu cho thấy biến dạng trượt và xoay là hai biến dạng chính trong môi trường hạt. Với việc mô phỏng số sử dụng phần tử 2D, tác giả F. Alonso-Marroquin và cộng sự [70] đã phân tích quá trình xoay và tiêu tán năng lượng bằng phương pháp phần tử rời rạc. Serguei Potapov và cộng sự [71] đã sử dụng mô hình phần tử rời rạc 3D hình cầu kết hợp phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng ứng xử của dầm bê tông cốt thép dưới tải trọng va đập. Nghiên cứu đã chỉ ra sự phát triển của vết nứt cũng như độ võng của dầm mô phỏng số tương đồng với kết quả thí nghiệm thực nghiệm. Antoniou [72] đã đề cập đến mô hình phần tử rời rạc của kết cấu bê tông dưới tải trọng va đập. Nghiên cứu cho phép dự đoán thiệt hại trên kết cấu bê tông cốt thép khi chịu tác động của tên lửa hoặc máy bay. Donze và cộng sự [73] đã sử dụng DEM để mô phỏng ứng xử của bê tông chịu va đập trong thí nghiệm thanh Hopkinson với tốc độ thay đổi từ 350 đến 700 s^{-1}, kết quả cho thấy các hiện tượng xảy ra trong mẫu (các vùng chuyển tiếp ứng suất, sự phá

hủy của vật liệu) trong và sau va chạm đã được mô phỏng một cách rõ ràng bằng phương pháp DEM

Việc nghiên cứu ứng xử của bê tông xỉ thép hầu như chỉ mới được thực hiện bởi các nghiên cứu thực nghiệm mà chưa có nhiều nghiên cứu về mô phỏng số. Vì vậy, việc nghiên cứu mô phỏng số ứng xử của bê tông xỉ thép là cần thiết.

1.2.2. Tình hình nghiên cứu ứng dụng xỉ thép ở trong nước

1.2.2.1. *Các nghiên cứu về xỉ thép*

Năm 2011, Bộ Xây dựng có văn bản về việc sử dụng xỉ thép như là một nguyên liệu: "Xỉ thép sau khi tái chế có thành phần hóa, khoáng gần giống như thành phần hóa và khoáng của xi măng mác thấp, khi nghiền mịn và hoạt hóa với nước nó có khả năng đóng rắn và cường độ. Đây là nguồn nguyên liệu phục vụ ngành công nghiệp sản xuất vật liệu xây dựng như: làm phụ gia xi măng, vật liệu không nung, làm đường giao thông" [74].

Một số công trình nghiên cứu về xỉ thép cũng đã được tiến hành bao gồm:

- Nhóm nghiên cứu do tác giả Trần Văn Miền chủ trì [75], đã nghiên cứu, chế tạo gạch bê tông rỗng sử dụng xỉ thép làm cốt liệu có khả năng thoát nước tốt, độ rỗng 18-30%, tương ứng với hệ số thấm 1.2 đến 2.5 cm/s, đáp ứng được yêu cầu về cường độ và độ bền ứng dụng vào các công trình như công viên, bãi đậu xe, quảng trường, các sảnh nhà hàng, khách sạn lớn, sân gôn, sân tennis …

- Tác giả Nguyễn Vĩnh Phước và cộng sự [76] đã nghiên cứu việc tái chế xỉ thép để làm phụ gia cho xi măng và bê tông. Xét về cường độ chịu nén, có thể thay thế khoảng 20% xỉ thép EAF Đồng Tiến trong xi măng Portland mà vẫn duy trì 80% cường độ chịu nén so với mẫu chuẩn đối chứng xi măng Portland.

- Trần Văn Miền và Tôn Nữ Phương Nhi [77] đã nghiên cứu các tính chất của bê tông mác 30 và 40 MPa dùng cốt liệu lớn là xỉ thép thay thế cốt liệu tự nhiên và đưa ra kết luận rằng có thể dùng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông xi măng mác 40 MPa để làm đường cấp III.

- Trần Văn Miền và cộng sự [78] trong một nghiên cứu khác đã mô tả tính chất hoá học, vật lý và thành phần khoáng vật của xỉ thép và dùng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông cường độ cao có cường độ nén khác nhau lần lượt là 60, 70 và 80 MPa. Các thí nghiệm về cường độ chịu nén, cường độ chịu nén dưới các

chu kỳ nhiệt và khả năng kháng Clorua được thực hiện. Kết quả cho thấy, khả năng chịu lực của bê tông xỉ thép và bê tông đá tự nhiên là tương đương, độ bền của bê tông xỉ thép tốt hơn so với bê tông đá tự nhiên về khả năng kháng clorua thâm nhập và điện trở suất.

1.2.2.2. *Các nghiên cứu về mô phỏng số dùng phương pháp phần tử rời rạc*

Phương pháp Phần tử rời rạc không còn xa lạ trên thế giới tuy nhiên vẫn còn rất mới với Việt Nam. Một số tác giả như Lương Nguyễn Hoàng Phương và cộng sự [79] bước đầu đã có những nghiên cứu tổng quan về sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng ứng suất có hiệu trong đất chưa bão hòa. Nguyễn Tiến Cường và cộng sự [80] đã sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng một số bài toán trong cơ học đất. Nghiên cứu đã cho thấy tiềm năng ứng dụng phương pháp này trong mô phỏng số ứng xử vật liệu địa kỹ thuật.

Trần Văn Tiếng và cộng sự [81] đã phát triển mô hình kết hợp gồm mô hình phần tử rời rạc và mô hình lưu chất nhằm mục đích mô phỏng ứng xử của bê tông ẩm và bão hòa nước trong thí nghiệm nén ba trục dưới nhiều cấp tải trọng khác nhau. Kết quả cho thấy sự ảnh hưởng của độ bão hòa ban đầu đến ứng xử của mẫu số tương ứng với kết quả thu được từ thực nghiệm. Bên cạnh đó, kết quả cho phép quan sát các hiện tượng xảy ra ở cấp độ vi mô như sự phân phối áp lực lỗ rỗng, sự hình thành vết nứt. Nghiên cứu cho thấy khả năng ứng dụng mô hình kết hợp này cho vật liệu bê tông cũng như tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực của địa vật liệu ẩm hay bão hòa. Năm 2017, Trần Văn Tiếng và Nguyễn Văn Bình [82] đã áp dụng mô hình kết hợp phần tử rời rạc và mô hình chất lỏng để mô phỏng ứng xử không thoát nước của đất. Trong nghiên cứu này, ngoài việc thể hiện mối quan hệ ứng suất biến dạng của mẫu đất, nghiên cứu còn cho thấy sự phát triển của áp lực nước lỗ rỗng thặng dư trong mẫu đất. Các nghiên cứu này cho thấy khả năng ứng dụng rộng rãi của phương pháp phần tử rời rạc trong mô phỏng số ứng xử của vật liệu địa kỹ thuật, bê tông, bê tông xỉ thép và các loại vật liệu khác.

1.2.3. Nhận xét:

Cùng với ngành công nghiệp luyện thép, xỉ thép có mặt ở hầu hết các quốc gia trên thế giới. Do đó, nghiên cứu ứng dụng xỉ thép đang là vấn đề chung của toàn cầu.

Tổng quan các nghiên cứu cho thấy, xỉ thép đã được sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau: y học, nông nghiệp, xây dựng… Trong đó, các ứng dụng trong xây dựng như làm lớp móng, mặt đường bê tông nhựa, làm cốt liệu cho bê tông, làm phụ gia cho bê tông và xi măng là nhiều nhất và mang lại hiệu quả cao nhất về mặt thực tiễn cũng như về mặt kinh tế.

Các nghiên cứu cũng cho thấy thành phần hoá học của xỉ thép bao gồm các oxit: CaO, Fe_xO_y, MgO, MnO_2, SiO_2 và Al_2O_3, MgO… ở các phức bền vững, trong đó thành phần chính là CaO, SiO_2 và Fe_xO_y chiếm trên 80% tổng trọng lượng của xỉ thép và dao động tùy thuộc vào nguồn gốc xỉ thép nghiên cứu, loại thép sản xuất cũng như công nghệ luyện thép. Một trong những thành phần khoáng chính của xỉ thép là CS (DeCalcium và TriCalcium Silicates), đây là loại khoáng chất có trong thành phần của xi măng Porland. Ngoài ra, trong thành phần khoáng của xỉ thép còn có Wustite, Brownmilerite, Mayenite. CaO và MgO tự do cũng được phát hiện trong xỉ thép, đây là thành phần có thể gây mất ổn định thể tích [21].

Về tính chất cơ lý, ngoại trừ việc xỉ thép nặng hơn, độ rỗng lớn hơn nên độ hút nước cũng lớn hơn cốt liệu truyền thống thì các chỉ tiêu khác của xỉ thép (cường độ nén đập trong xi lanh, độ hao mòn LA, hàm lượng thoi dẹt,…) gần như tương đồng với cốt liệu truyền thống. Tuy nhiên, có sự chênh lệch lớn giữa các nghiên cứu khác nhau: khối lượng riêng nằm trong khoảng từ 2.89g/cm^3 [23] đến 3.51g/cm^3 [25], độ hút nước nằm trong khoảng từ từ 0.7% [23] đến 2.5% [26]….Nguyên nhân của sự chênh lệch này có thể giải thích là do nguồn gốc của xỉ thép nghiên cứu khác nhau, dẫn đến hàm lượng các oxit trong xỉ thép khác nhau.

Các nghiên cứu ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn cho bê tông xi măng tập trung vào các tính chất cơ học và độ bền của bê tông sử dụng xỉ thép làm cốt liệu. Các kết quả nghiên cứu cho thấy xỉ thép có những tính chất tương đồng với đá tự nhiên và thích hợp để làm cốt liệu cho bê tông. Tuy nhiên, sự khác nhau về công nghệ luyện thép dẫn đến sự khác nhau về hàm lượng các oxit trong thành phần hoá cũng như tính chất cơ lý của xỉ thép. Do đó, bê tông xỉ thép sử dụng các loại xỉ khác nhau sẽ có một số khác biệt về cơ tính, được thể hiện trong các nghiên cứu [44] và [55]. Như vậy, để

có thể ứng dụng xỉ thép một cách hợp lý như là một loại cốt liệu cho bê tông thì cần phải có những nghiên cứu cụ thể về xỉ thép và ứng xử của bê tông xỉ thép.

Việc lựa chọn tỷ lệ xỉ thép thay thế cũng là nguyên nhân gây ra sự khác nhau giữa các kết quả nghiên cứu, I. Netinger và cộng sự [43] cho rằng với loại xỉ thép ở Croatia thì bê tông xỉ thép có cường độ kém hơn bê tông truyền thống (tỉ lệ thay thế là 100%), Jigar P.Patel lại cho rằng tỷ lệ thay thế 50%-70% sẽ cho kết quả tốt nhất, số đông các nghiên cứu (M. Maslehuddin [39] , J. M. Manso [40], R. Taha [49]) cho thấy tỷ lệ thay thế 100% (tức thay thế hoàn toàn cốt liệu lớn bằng xỉ thép) là hợp lý nhất.

Các nghiên cứu về độ bền theo thời gian cũng như sự phát triển cường độ, module đàn hồi theo thời gian của bê tông xỉ thép mới chỉ dừng lại ở thời gian ngắn (3 tháng) [83]. Do đó cần phải có những nghiên cứu với thời gian dài hơn để xem xét sự ảnh hưởng của xỉ thép đến chất lượng bê tông, ảnh hưởng của môi trường đến loại bê tông này hay ngược lại, tạo cơ sở khoa học vững chắc cho việc ứng dụng loại bê tông này vào thị trường.

Các nghiên cứu ứng dụng xỉ thép trong nước còn hạn chế, nhất là ứng dụng xỉ thép để làm cốt liệu cho bê tông xi măng. Với nhóm tác giả Trần Văn Miền và Tôn Nữ Phương Nhi [84], khi nghiên cứu về xỉ thép làm cốt liệu lớn cho bê tông, chủ yếu khảo sát cường độ chịu nén của bê tông dùng cốt liệu xỉ thép ở tuổi 28 ngày, với một loại cấp phối bê tông (30MPa) và hình dạng mẫu (150x150x150mm), đồng thời cốt liệu xỉ thép được ngâm bão hoà trước khi trộn bê tông.

Trong lĩnh vực tính toán mô phỏng số, chưa có nhiều nghiên cứu mô phỏng về bê tông xỉ thép mà chỉ tập trung vào mô phỏng bê tông cốt liệu đá truyền thống. Đồng thời, các mô hình mô phỏng chủ yếu dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn và còn nhiều hạn chế nhất định trong việc mô tả ứng xử cơ lý của bê tông, một loại vật liệu có cấu thành từ các thành phần cấp phối rời rạc, nhất là trong việc mô tả bản chất vật lý của vật liệu, cũng như mô phỏng quá trình hình thành và phát triển vết nứt cũng như sự phá hủy của bê tông. Trong nghiên cứu này, phương pháp phần tử rời rạc, với những ưu việt của một phương pháp không lưới, phương pháp rời rạc hóa môi trường vật liệu theo đúng bản chất vật lý của nó, đã được ứng dụng để mô phỏng ứng xử của

bê tông xỉ thép. Với phương pháp này, một mô hình ứng xử cho bê tông sẽ được xây dựng và kiểm chứng dựa trên kết quả từ thí nghiệm nén thực trên bê tông xỉ thép sẽ là tiền đề cho việc mô phỏng dự đoán cho các cấu kiện kết cấu sử dụng loại bê tông này.

1.3. Tính cấp thiết của đề tài

Qua phân tích về thực trạng xỉ thép như trên, hiện có một lượng lớn xỉ thép không được tái chế nên các nhà máy thép đang lưu giữ chất thải ngay tại các nhà máy hoặc giao cho một số đơn vị đổ thải không đúng quy định. Các bãi đổ này nằm xen kẽ trong các khu dân cư để các đơn vị này phân loại thủ công nhằm tìm phế liệu sắt trong xỉ thải, do đó, đã làm phát sinh hàng loạt vấn đề như [85, 86]:

- Phát sinh bụi gây ra ô nhiễm môi trường không khí;
- Gây ô nhiễm nước ngầm (nước mưa chảy tràn qua bãi xỉ thép)
- Làm mất cảnh quan môi trường.

Trong khi đó các nghiên cứu ở Đức, Arap Saudi [87], Nam Phi, Mỹ [88] đã chứng minh, xỉ thép không nguy hại, vì xỉ thép phát sinh từ quá trình luyện thép và được lấy ra ở nhiệt độ 1600^{o}C. Trong khi, lò đốt chất thải nguy hại trên thế giới hiện nay cũng chỉ ở nhiệt độ 1200^{o}C. Do đó, ở nhiệt độ 1600^{o}C, tất cả các kim loại nặng độc hại có trong nguyên liêu đầu vào như chì, kẽm, thủy ngân …sẽ bị tiêu hủy hoàn toàn (các kim loại này bị thăng hoa ở nhiệt độ 700^{o}C)

Ngoài ra, trong giai đoạn phát triển hiện nay, ngược lại với việc quy mô các công trình xây dựng ngày càng nhiều, càng lớn thì nguồn vật liệu truyền thống như cát, đá để phục xây dựng lại càng ít đi và khan hiếm dần. Đây là nhân tố bất lợi trong việc xây dựng công trình và làm giá thành đầu tư xây dựng rất lớn.

Do đó, các dự án xử lý, tái chế xỉ thải tạo nguồn nguyên liệu mang lại lợi ích kinh tế nhưng vẫn bảo đảm được các quy định về bảo vệ môi trường cũng như giải quyết vấn đề tìm ra nguồn vật liệu thay thế là hết sức cấp bách. Một trong những ứng dụng khả thi của xỉ thép đó là làm cốt liệu lớn trong bê tông xi măng, hướng đến phát triển bền vững – "kết hợp chặt chẽ, hài hòa giữa tăng trưởng kinh tế, bảo đảm tiến bộ xã hội và bảo vệ môi trường". Do đó, việc nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về bê tông xi măng sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép nhằm mục đích tìm hiểu tính chất và yêu

cầu kỹ thuật của nguyên liệu, tỷ lệ phối hợp hợp lý giữa chúng, quá trình rắn chắc và phát triển cường độ là cơ sở để việc ứng dụng nó trở nên rộng rãi hơn trong thực tế. Bên cạnh đó, để loại bê tông này được ứng dụng rộng rãi trong các cấu kiện kết cấu thì việc tính toán mô phỏng số là rất cần thiết. Trên yêu cầu đó, luận án xây dựng một mô hình ứng xử sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép. Mô hình phần tử rời rạc sẽ được kiểm chứng thông qua việc so sánh kết quả mô phỏng với kết quả thực nghiệm, một khi mô hình được kiểm chứng sẽ là tiền đề cho việc ứng dụng vào mô phỏng cho các cấu kiện kết cấu sử dụng loại bê tông này. Bên cạnh đó, việc ứng dụng mô hình phần tử rời rạc vào mô phỏng dự đoán ứng xử của cấu kiện sử dụng bê tông xỉ thép sẽ giảm bớt được các thí nghiệm thực nghiệm trên cấu kiện kết cấu.

- Tính thời sự:
  - Việc nghiên cứu ứng dụng xỉ thép đã và đang là đề tài thu hút nhiều nhà khoa học trên thế giới cũng như trong nước trong việc tìm kiếm vật liệu thay thế cho cốt liệu truyền thống ngày càng cạn kiệt dần đi đồng thời giải phóng xỉ thải.
- Tính mới:
  - Làm sáng tỏ về tính chất hoá học, các chỉ tiêu cơ lý của vật liệu xỉ thép ở khu vực Bà Rịa Vũng Tàu, trung tâm công nghiệp thép của cả nước;
  - Nghiên cứu thiết kế thành phần bê tông sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép;
  - Nghiên cứu một số ứng xử cơ tính của vật liệu bê tông xi măng dùng cốt liệu lớn là xỉ thép;
  - Nghiên cứu ứng xử của cấu kiện dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép có kích thước lớn (200x300x3300mm);
  - Áp dụng một phương pháp mới, phương pháp phần tửrời rạc để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép.
- Tính khoa học:
  - Kết quả nghiên cứu của đề tài không những đưa ra khả năng ứng dụng xỉ thép trong các sản phẩm, cấu kiện xây dựng mà còn góp phần giải quyết về vấn đề môi trường. Đồng thời, việc xây dựng mô hình phần tử rời rạc để mô phỏng

ứng xử của bê tông xỉ thép trong thí nghiệm nén một trục là cơ sở, là tiền đề cho việc ứng dựng mô hình này trong tính toán, mô phỏng dự đoán ứng xử của các cấu kiến sử dụng bê tông xỉ thép.

1.4. Mục tiêu của đề tài

1.4.1. Mục tiêu tổng quát:

- Nghiên cứu ứng xử cơ học của cấu kiện bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn là xỉ thép để từ đó có thể ứng dụng xỉ thép sử dụng làm cốt liệu cho bê tông, giúp tiết kiệm nguồn nguyên liệu tự nhiên, giúp bảo vệ môi trường.
- Nghiên cứu phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng ứng xử của vật liệu bê tông xỉ thép nhằm tạo tiền đề cho việc mô phỏng dự đoán được ứng xử của các cấu kiện kết cấu sử dụng bê tông xỉ thép

1.4.2. Mục tiêu cụ thể:

- Tổng hợp các nghiên cứu tổng quan ở trong nước cũng như trên thể giới.
- Xác định các chỉ tiêu cơ, lý hóa của xỉ thép nghiên cứu, từ đó đề xuất phương pháp thiết kế cấp phối bê tông xỉ thép, đề xuất các điều chỉnh nếu có.
- Thực nghiệm về bê tông xi măng và cấu kiện bê tông xi măng dùng cốt liệu lớn là xỉ thép
- Hiệu chỉnh và áp dụng mô hình phần tử rời rạc nhằm mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép, mô hình số sẽ được kiểm chứng thông qua việc mô phỏng ứng xử của bê tông trong thí nghiệm nén – kéo một trục, kết quả mô phỏng sẽ được so sánh với kết quả thực nghiệm để kiểm chứng mô hình.

1.5. Xác định giới hạn của đề tài.

Việc sử dụng xỉ thép tái chế sẽ không có hiệu quả kinh tế nếu như khoảng cách vận chuyển lớn. Do đó, nghiên cứu này tập trung phân tích đánh giá về các đặc tính xỉ thép được tái chế từ công nghệ luyện thép điện hồ quang lấy từ các nhà máy thép ở khu công nghiệp Phú Mỹ, tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu. Ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn trong bê tông xi măng và mô phỏng ứng xử của bê tông xi măng có cốt liệu lớn là xỉ thép.

1.6. Phương pháp nghiên cứu.

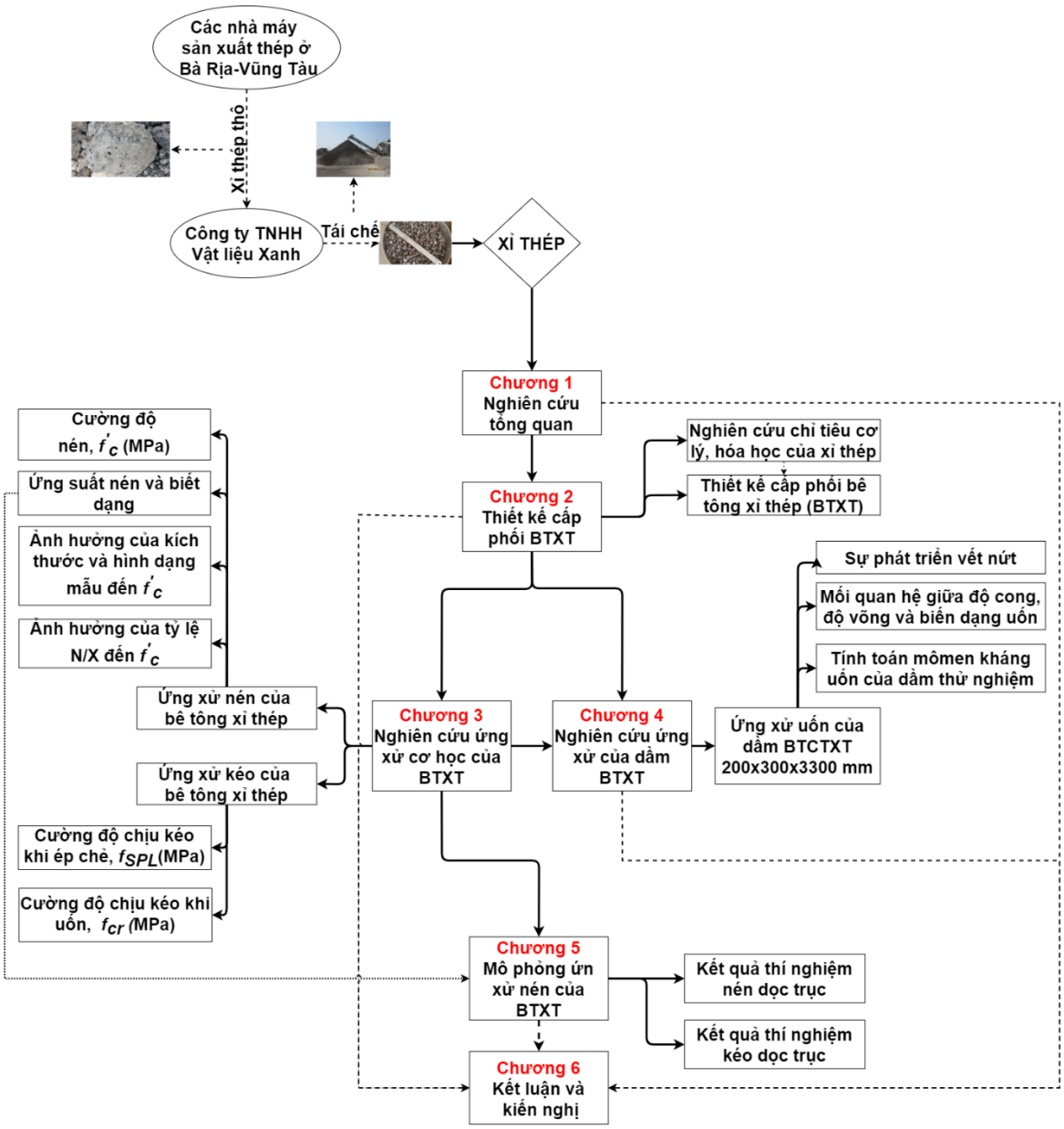
Các phương pháp nghiên cứu sau được sử dụng cho đề tài:

- Phương pháp thống kê, tổng hợp: thu thập, phân tích các nghiên cứu về sử dụng xỉ thép trong xây dựng trên thế giới;
- Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm: Nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trên các mẫu thử ở trong phòng thí nghiệm dựa trên các tiêu chuẩn hiện hành đối với cốt liệu truyền thống và bê tông sử dụng cốt liệu truyền thống; Kết quả thí nghiệm trong phòng được xử lý thống kê và quy hoạch thực nghiệm nhằm đảm bảo độ tin cậy cần thiết
- Phương pháp số: Dùng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép.
- Phương pháp phân tích, so sánh: Phân tích, so sánh các kết quả có được từ lý thuyết, thực nghiệm và mô phỏng bằng phương pháp số để đánh giá khả năng bền vững và ứng dụng của bê tông dùng cốt liệu xỉ trong các công trình xây dựng

1.7. Sơ đồ tổng quát của đề tài

Hình 1.14 mô tả sơ đồ tổng quát của luận án gồm 6 chương. Nội dung chính của từng chương như sau:

- Chương 1: Tổng quan về lĩnh vực nghiên cứu
- Chương 2: Nghiên cứu các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép và thiết kế thành phần bê tông dùng cốt liệu lớn là xỉ thép
- Chương 3: Nghiên cứu ứng xử cơ học của bê tông xỉ thép
- Chương 4:Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép
- Chương 5: Mô phỏng số ứng xử bê tông xỉ thép
- Chương 6: Kết luận và kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo



Hình 1.14: Sơ đồ tổng quát của đề tài

1.8. Kết luận Chương 1

Sau khi nghiên cứu tổng quan về xỉ thép, có thể đưa ra một số kết luận như sau:

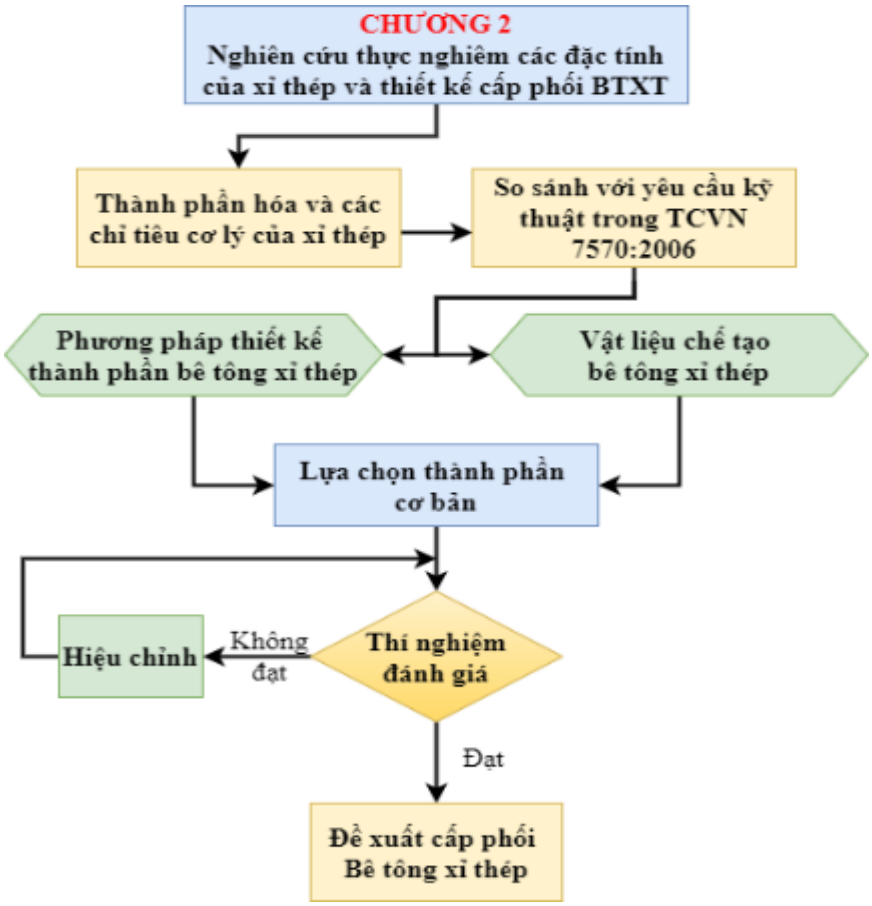
- Nhiều nước trên thế giới đã nghiên cứu và ứng dụng xỉ thép cho thấy: xỉ thép có những tính chất tương đồng với cốt liệu truyền thống, có thể thay thế được cốt liệu lớn trong bê tông xi măng. Tuy nhiên, do khác nhau về công nghệ luyện thép, nguồn gốc xỉ thép, nên tính chất cơ lý của xỉ thép cũng như tính chất cơ lý của bê tông xỉ thép có sự khác biệt trong các nghiên cứu ở trên.

- Ở Việt Nam, các nghiên cứu về ứng dụng xỉ thép trong xây dựng còn hạn chế. Khối lượng xỉ thép được tái sử dụng rất ít, chỉ chiếm gần 20% tổng lượng xỉ thép, chủ yếu dùng để san lấp mặt bằng, làm móng các công trình nội bộ, còn đa phần xỉ thép hiện đang được đổ đống, chôn lấp làm ảnh hưởng đến môi trường. Do đó, việc nghiên cứu sử dụng xỉ thép thay thế cốt liệu lớn trong bê tông xi măng là một hướng đi đúng đắn, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, góp phần làm phong phú thêm chủng loại vật liệu xây dựng, hạn chế sự ô nhiễm môi trường.
- Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu trong phần tổng quan, NCS sử dụng xỉ thép để thay thế toàn bộ cốt liệu lớn trong bê tông xi măng.

CHƯƠNG 2

NGHIÊN CỨU CÁC CHỈ TIÊU CƠ LÝ CỦA XỈ THÉP VÀ THIẾT KẾ THÀNH PHẦN BÊ TÔNG DÙNG CỐT LIỆU XỈ THÉP

Như đã đề cập trong Chương 1, nguồn gốc cốt liệu xỉ thép khác nhau làm cho tính chất của xỉ thép và bê tông dùng xỉ thép làm cốt liệu cũng có sự khác biệt, dẫn đến phương pháp thiết kế, điều kiện vật liệu, quy trình chế tạo, điều kiện thí nghiệm … cần được hiệu chỉnh cho phù hợp. Nội dung của Chương 2, được mô tả tóm lược qua Hình 2.1, bao gồm trình bày các nội dung thực nghiệm xác định thành phần hóa học và các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép, so sánh các chỉ tiêu này với các yêu cầu kỹ thuật của cốt liệu dùng để chế tạo bê tông xi măng, trên cơ sở đó đề xuất các cấp phối bê tông xi măng sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép (bê tông xỉ thép-BTXT).



Hình 2.1: Sơ đồ chương 2

2.1. Thành phần hóa học và các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép

Xỉ thép sử dụng trong thí nghiệm (Hình 2.2) là sản phẩm tái chế của Công ty trách nhiệm hữu hạn Vật Liệu Xanh (Khu công nghiệp Phú Mỹ, Tân Thành, Bà Rịa – Vũng Tàu). Xỉ thép được sàng, rửa và sấy khô đến khối lượng không đổi trước khi đem đi thí nghiệm.

Hình 2.2: Mẫu xỉ thép

2.1.1. Thành phần hóa học

Thành phần hóa của xỉ thép được phân tích bởi phòng thí nghiệm LAS.XD19 thuộc Công ty Cổ phần Khảo sát & Xây dựng - USCO -Trung Tâm Thí Nghiệm & Kiểm định Xây dựng Miền Nam. Kết quả được trình bày ở Bảng 2.1 cho thấy xỉ thép nghiên cứu cũng bao gồm các ôxit chủ yếu như CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_xO_y tương tự như các nghiên cứu ở phần 1.2.1.1. Tuy nhiên, hàm lượng các oxit trong xỉ thép nghiên cứu có sự chênh lệch nhất định so với các nghiên cứu trên [6-9] (Bảng 2.1), trong đó hàm lượng SiO_2 khá cao (55.27%), giúp xỉ thép có tính chất của cốt liệu nhiều hơn.

Bảng 2.1: Kết quả phân tích thành phần hoá học của xỉ thép nghiên cứu và của xỉ thép ở các nghiên cứu [6-8]

Các Oxit	Hàm lượng các Oxit (%)			
	Xỉ thép nghiên cứu	Ana Mladenović [6]	R. Alizadeh [7]	Ivanka Netinger[8]
SiO_2	55.27	5-12	31-45	14-17
Al_2O_3	18.56	5-7	10-17	5-7

Các Oxit	Hàm lượng các Oxit (%)			
	Xỉ thép nghiên cứu	Ana Mladenović [6]	R. Alizadeh [7]	Ivanka Netinger[8]
FeO	0.2	30-40	0.1-1	-
Fe_2O_3	11.66	6-9		25
CaO	5.77	20-35	34-48	24-31
MgO	1.85	4-12	-	7-10
Na_2O	1.34	-	0.1-0.5	0.1
K_2O	1.72	-	0.6-1	0.08
TiO_2	1.02	-	2-3	-
P_2O_5	1.48	-	-	-
SO_3	0.39	-	0.2-0.4	-
MKN	0.21	-	-	-

2.1.2. Các chỉ tiêu cơ lý

Hiện nay, do Việt Nam chưa có tiêu chuẩn kỹ thuật hướng dẫn việc thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép, nên đề tài đã tham chiếu các tiêu chuẩn hiện hành quy định các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu lớn là đá dăm để áp dụng thí nghiệm cho xỉ thép và được trình bày ở Bảng 2.2.

Bảng 2.2: Tổng hợp các chỉ tiêu cơ lý và phương pháp thí nghiệm xỉ thép

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Tiêu chuẩn thí nghiệm [89]
1	Thành phần hạt	TCVN 7572-2:2006
2	Khối lượng riêng	TCVN 7572-4:2006
3	Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	TCVN 7572-4:2006
4	Khối lượng thể tích ở trạng bão hòa	TCVN 7572-4:2006
5	Độ hút nước	TCVN 7572-4:2006
6	Khối lượng thể tích xốp	TCVN 7572-6:2006
7	Độ rỗng giữa các hạt	TCVN 7572-6:2006
8	Độ nén đập trong xi lanh	TCVN 7572-11 : 2006
9	Hệ số hóa mềm	TCVN 7572-11 : 2006
10	Hàm lượng bụi, bùn, sét	TCVN 7572-8:2006
11	Độ hao mòn Los Angeles	TCVN 7572-12:2006

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Tiêu chuẩn thí nghiệm [89]
12	Hàm lượng thoi dẹt	TCVN 7572-13:2006

Các kết quả thí nghiệm về các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép được thực hiện tại phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng, trường Đại học Sư phạm Kỹ Thuật TP.HCM. Kết quả thí nghiệm được tổng hợp ở Bảng 2.3 cho thấy xỉ thép nghiên cứu có sự khác biệt so với các nghiên cứu ở nước ngoài [22-27], trong đó:

- Khối lượng riêng của xỉ thép nghiên cứu bằng 3.59g/cm^3, xấp xỉ bằng xỉ thép trong nghiên cứu của Maslehuddin [25] và lớn hơn hẳn so với xỉ thép trong các nghiên cứu [23, 24, 26, 27].
- Độ hút nước của xỉ thép nghiên cứu bằng 1.98%, lớn hơn so với các nghiên cứu [24-27]
- Xỉ thép nghiên cứu có cường độ nén đập trong xi lanh là 13.91%, tương đương với mác là 80 MPa, xấp xỉ với xỉ thép trong nghiên cứu [26, 27] (12-13%) nhưng nhỏ hơn nhiều (tức mác của xi thép nghiên cứu lớn hơn) so với nghiên cứu [23].

Về thành phần hạt, các sản phẩm xỉ thép tái chế được sàng và loại bỏ cỡ hạt lớn hơn 25mm và nhỏ hơn 5mm để được cấp phối xỉ thép có Dmax=20mm, Dmin=5mm. Kết quả phân tích thành phần hạt của xỉ thép sau quá trình tuyển lựa được trình bày ở Bảng 2.4

Bảng 2.3: Các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép nghiên cứu

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm
Dmin-Dmax	mm	5-20
Khối lượng riêng	g/cm^3	3.56
Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	g/cm^3	3.32
Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa	g/cm^3	3.39
Độ hút nước	%	1.98
Khối lượng thể tích xốp	kg/m^3	1720
Độ rỗng giữa các hạt	%	48.2
Độ nén đập trong xi lanh	%	13.91
Mác xỉ thép xác định theo giá trị độ nén dập trong xi lanh	MPa	80

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm
Hệ số hóa mềm		0.94
Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	0.953
Độ hao mòn Los Angeles	%	21.36
Hàm lượng thoi dẹt	%	1.00
Tạp chất hữu cơ		Ngang màu chuẩn

Bảng 2.4: Thành phần hạt của xỉ thép nghiên cứu

Kích thước mắt sàng (mm)	Lượng sót tích lũy (%)
100	0.0
70	0.0
40	0.0
20	10.0
10	62.6
5	97.1
<5	100.0

Khi so sánh các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép và các yêu cầu kỹ thuật đối với cốt liệu lớn dùng chế tạo bê tông thông thường (có cấp độ bền từ B25 trở lên) theo TCVN-7570:2006 [89] (Bảng 2.5 và Bảng 2.6), nguồn xỉ thép này phù hợp để chế tạo bê tông xi măng từ cấp độ bền B25 trở lên.

Bảng 2.5: So sánh thành phần hạt của xỉ thép nghiên cứu với yêu cầu của TCVN-7570:2006 [89]

Kích thước mắt sàng (mm)	Lượng sót tích lũy (%)	
	TCVN 7570 : 2006 (D_{max}-D_{min}: 5-20)	Xỉ thép nghiên cứu
100	0	0.0
70	0	0.0
40	0	0.0
20	0-10	10.0
10	40-70	62.6
5	90-100	97.1
<5	-	100.0

Bảng 2.6: So sánh các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép nghiên cứu với yêu cầu của TCVN 7570:2006 [89]

Các chỉ tiêu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006	Đơn vị	Yêu cầu của TCVN 7570:2006	Xỉ thép nghiên cứu	Nhận xét
Dmin-Dmax	%		5-20	
Hàm lượng bụi, bùn, sét	MPa	≤ 1%	0.953	Đạt
Mác đá dăm xác định theo giá trị độ nén dập trong xi lanh	%	> 60-80MPa	80	Đạt
Độ hao mòn khi va đập Los Angele	%	≤ 50%	21.36	Đạt
Hàm lượng thoi dẹt	%	≤ 15%	1	Đạt
Tạp chất hữu cơ		Không thẫm hơn màu chuẩn	Ngang màu chuẩn	Đạt

2.2. Thiết kế thành phần bê tông

2.2.1. Phương pháp thiết kế thành phần bê tông

Các phương pháp thiết kế thành phần bê tông được sử dụng rộng rãi hiện nay bao gồm: Phương pháp ACI-211 của Viện Bê tông Mỹ [90]; Phương pháp theo Dreux-Goisse [91-93]; Phương pháp theo BolomeySkramteav [94]. Ở Việt Nam, cấp phối bê tông xi măng được thiết kế theo "Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại" do Bộ xây dựng ban hành theo Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD [95].

Các phương pháp thiết kế thành phần bê tông nêu trên đều là phương pháp lý thuyết kết hợp với thực nghiệm, dựa trên cơ sở lý thuyết thể tích tuyệt đối, có nghĩa là tổng thể tích tuyệt đối (hoàn toàn đặc) của vật liệu trong $1m^3$ bê tông thì bằng 1000 lít. Các phương pháp này chỉ khác nhau trong việc lựa chọn thành phần và tỷ lệ phối hợp giữa các loại vật liệu.

Do chưa có tiêu chuẩn hướng dẫn thiết kế cấp phối cho bê tông xỉ thép tại Việt Nam nên nghiên cứu này sử dụng chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại của Bộ Xây Dựng [95] để lựa chọn thành phần cơ bản cho bê tông xỉ thép. Sau đó dựa trên kết quả kiểm tra bằng thực nghiệm để có những đề xuất hiệu chỉnh phù hợp và thí nghiệm kiểm chứng lại cho bê tông xỉ thép.

2.2.2. Các yêu cầu thiết kế

Tiến hành thiết kế cấp phối bê tông xỉ thép có cường độ yêu cầu là 30 MPa, độ

sụt 6-8 cm, trong đó vật liệu bao gồm nước, chất kết dính là xi măng, cốt liệu nhỏ là cát và cốt liệu lớn được thay thế hoàn toàn bằng xỉ thép.

2.2.3. Vật liệu chế tạo bê tông xỉ thép

2.2.3.1. *Xi măng*

Trong phạm vi nghiên cứu của đề tài, sử dụng xi măng PCB40 Insee, các chỉ tiêu cơ lý của xi măng được trình bày trong Bảng 2.7.

Bảng 2.7: Các chỉ tiêu cơ lý của xi măng sử dụng

Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thí nghiệm	Kết quả thí nghiệm
Cường độ chịu nén 28 ngày (MPa)	TCVN 6016:2011 [96]	45.5
Khối lượng riêng (g/cm^3)	TCVN 4030:2003 [97]	3.09
Độ mịn Blaine (cm^2/g)	TCVN 4030:2003 [97]	3900
Lượng nước tiêu chuẩn (%)	TCVN 6017:2015 [98]	32.5
Thời gian đông kết (phút)	TCVN 6017:2015 [98]	
+ Bắt đầu		115
+ Kết thúc		200

2.2.3.2. *Cát*

Cát sử dụng trong nghiên cứu là cát sông được làm sạch, phơi khô, sàng lọc bớt hàm lượng hạt nhỏ, các chỉ tiêu cơ lý của cát được trình bày trong Bảng 2.8 và Bảng 2.9

Bảng 2.8: Các chỉ tiêu cơ lý của cát sử dụng

Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thí nghiệm [89]	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm
Mô đun độ lớn	TCVN 7572-2:2006		2.50
Khối lượng riêng	TCVN 7572-4:2006	g/cm^3	2.60
Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	TCVN 7572-4:2006	g/cm^3	2.43
Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa	TCVN 7572-4:2006	g/cm^3	2.49
Độ hút nước	TCVN 7572-4:2006	%	2.90
Khối lượng thể tích xốp	TCVN 7572-6:2006	kg/m^3	1545
Độ rỗng giữa các hạt	TCVN 7572-6:2006	%	36.4

Bảng 2.9: Thành phần hạt của cát

Kích thước mắt sàng (mm)	Lượng sót tích lũy (%)
5	100.0

Kích thước mắt sàng (mm)	Lượng sót tích lũy (%)
2.5	91.5
1.25	73.4
0.63	54.0
0.315	24.5
0.14	7.0
< 0.14	0.0

2.2.3.3. *Đá dăm*

Đá được sử dụng để đúc mẫu đối chứng được làm sạch, phơi khô. Các chỉ tiêu cơ lý của đá được trình bày trong Bảng 2.10 và Bảng 2.11.

Bảng 2.10: Các chỉ tiêu cơ lý của đá sử dụng

Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thí nghiệm [89]	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm
Dmin-Dmax	TCVN 7572-2:2006	mm	5-20
Khối lượng riêng	TCVN 7572-4:2006	g/cm^3	2.78
Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	TCVN 7572-4:2006	g/cm^3	2.61
Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa	TCVN 7572-4:2006	g/cm^3	2.67
Độ hút nước	TCVN 7572-4:2006	%	0.50
Khối lượng thể tích xốp	TCVN 7572-6:2006	kg/m^3	1415
Độ rỗng giữa các hạt	TCVN 7572-6:2006	%	45.8

Bảng 2.11: Thành phần hạt của đá dăm

Kích thước mắt sàng (mm)	Lượng sót tích lũy (%)
100	0.0
70	0.0
40	0.0
20	10.0
10	62.6
5	97.1
<5	100.0

2.2.3.4. *Xỉ thép*

Xỉ thép sử dụng làm thí nghiệm là sản phẩm sau khi được nghiền, khử từ tính từ nhà máy tái chế xỉ thép của công ty Trách nhiệm hữu hạn Vật Liệu Xanh. Các chỉ tiêu cơ lý của đá đã được trình bày trong Bảng 2.3 và Bảng 2.4

2.2.4. Lựa chọn thành phần thành phần bê tông thường sử dụng xỉ thép thay thế cốt liệu lớn

2.2.4.1. *Lựa chọn thành phần cơ bản*

Lựa chọn độ sụt 6-8 cm, cường độ bê tông yêu cầu 30 MPa. Vật liệu chế tạo hỗn hợp bê tông xỉ thép như nước, hàm lượng xi măng, cát, đá được lựa chọn tính toán theo [95] được trình bày chi tiết trong phụ lục. Kết quả lựa chọn thành phần cơ bản của bê tông xỉ thép được trình bày ở Bảng 2.12.

Bảng 2.12: Thành phần cơ bản của 1m^3 bê tông xỉ thép (kg)

Độ sụt yêu cầu (cm)	Cường độ bê tông yêu cầu (MPa)	Xi măng (kg)	Cát (kg)	Xỉ thép (kg)	Nước (lít)	Tỷ lệ N/X
6-8	30	370.98	729.55	1504.05	190.00	0.50

2.2.4.2. *Lập ba thành phần định hướng*

Các thành phần định hướng được trình bày ở Bảng 2.13 được lập như sau:

- Thành phần 1 (TP1) gọi là thành phần cơ bản đã tính ở phần 2.2.4.1 với kết quả ở Bảng 2.12;
- Thành phần 2 (TP2) có lượng xi măng tăng 10% so với lượng xi măng ở TP1, lượng nước như TP1, lượng đá, cát giảm bằng với thể tích xi măng tăng;
- Thành phần 3 (TP3) là thành phần giảm 10% xi măng so với lượng xi măng ở TP1, lượng nước như TP1, lượng đá, cát tăng bằng với thể tích xi măng giảm sao cho tỷ lệ Cát/(Cát+Đá) không đổi.

Bảng 2.13: Các thành phần định hướng

Thành phần	Xi măng (kg)	Cát (kg)	Xỉ thép (kg)	Nước (lít)	Tỷ lệ N/X
TP1	370.98	729.55	1504.05	190.00	0.50
TP2	408.08	717.00	1478.17	190.00	0.47
TP3	333.88	742.10	1529.92	190.00	0.57

2.2.5. Kiểm tra bằng thực nghiệm

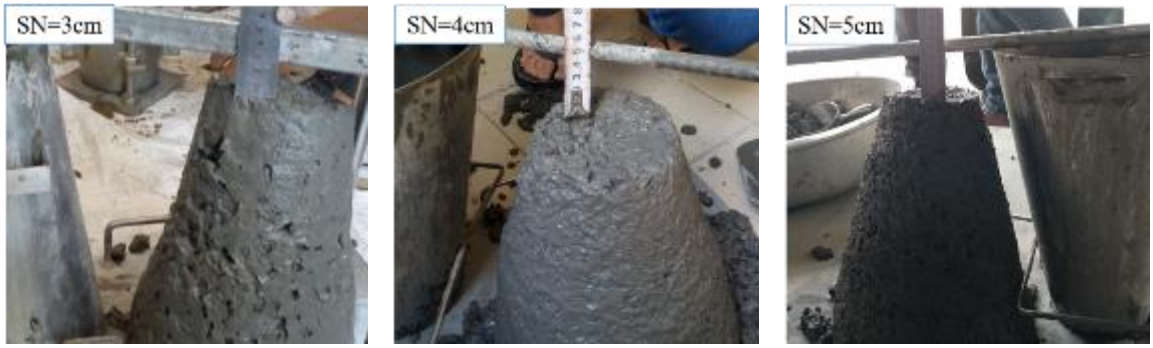
2.2.5.1. *Kiểm tra độ sụt*

Chuẩn bị, cân đong vật liệu theo Bảng 2.13 và trộn hỗn hợp bê tông theo TCVN 3105:1993 [99]. Tiến hành kiểm tra độ sụt của hỗn hợp bê tông

theo TCVN 3106:1993 [100]. Kết quả kiểm tra độ sụt quan sát được như trong Hình 2.3 như sau: cả 3 thành phần đều cho độ sụt (từ 3-5 cm) nhỏ hơn độ sụt yêu cầu (SN=6-8 cm). Nguyên nhân là do các hạt xỉ thép có cấu tạo rỗng tổ ong, độ hút nước lớn và khối lượng riêng của xỉ thép lớn hơn đá tự nhiên khoảng 23% nên bê tông dùng cốt liệu xỉ thép có độ linh động kém hơn. Để cải thiện độ sụt của bê tông xỉ thép, nghiên cứu này đề xuất việc điều chỉnh lượng nước sử dụng thông qua độ hút nước của cốt liệu như công thức (2.1).

$$N_{\text{hc}} = N_{tb} + H_p.XT \quad (2.1)$$

Trong đó: N_{hc} là lượng nước điều chỉnh; N_{tb} là lượng nước tra bảng theo [95]; H_p là độ hút nước của xỉ thép; XT là hàm lượng xỉ thép trong 1 m^3 bê tông



(a) Độ sụt của TP2 *(b) Độ sụt của TP1* *(c) Độ sụt của TP3*

Hình 2.3: Độ sụt của các thành phần bê tông trước khi hiệu chỉnh

Các thành phần định hướng sau khi điều chỉnh lượng nước được trình bày trong Bảng 2.14 được tính lại như sau:

- Thành phần 1: lượng nước tính lại theo công thức (2.1), lượng xi măng tăng lên để đảm bảo tỷ lệ N/X không đổi, lượng xỉ thép và cát tính lại theo [95];
- Thành phần 2 và 3 được lập tương tự như mục 0 dựa trên thành phần 1 đã điều chỉnh lượng nước.

Bảng 2.14: Các thành phần định hướng sau khi hiệu chỉnh lượng nước

Thành phần	Xi măng (kg)	Cát (kg)	Xỉ thép (kg)	Nước (lít)		Tỷ lệ N/X
				N_{tb}	$N_{đc}$	
TP1	427.85	714.07	1459.44	190.00	29.16	0.50
TP2	470.64	699.52	1429.69	190.00	28.57	0.46

TP3	385.07	728.63	1489.18	190.00	29.75	0.57

(a) Độ sụt của TP1 *(a) Độ sụt của TP2* *(c) Độ sụt của TP3*

Hình 2.4: Độ sụt của các thành phần bê tông sau khi hiệu chỉnh lượng nước

Kết quả kiểm tra độ sụt sau khi hiệu chỉnh lượng nước được trình bày ở Hình 2.4 cho thấy thành phần 1 và thành phần 3 có độ sụt (SN=6-8 cm) đảm bảo độ sụt yêu cầu.

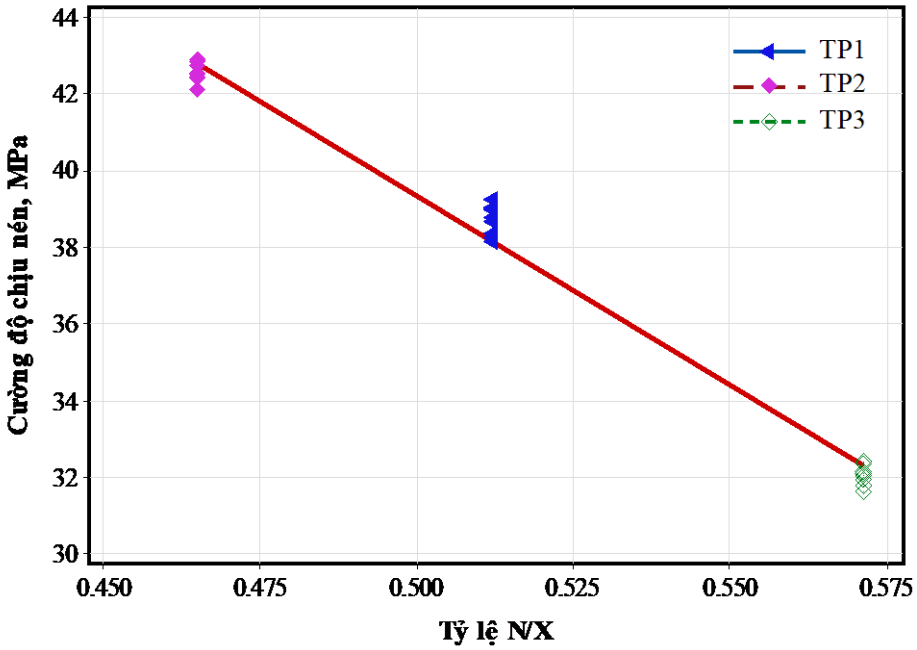
2.2.5.2. *Kiểm tra cường độ chịu nén.*

Ba tổ mẫu tương ứng với 3 thành phần ở Bảng 2.14 có kích thước 150x150x150 mm được đúc, bảo dưỡng theo TCVN 3105:1993 [99] và nén xác định cường độ nén ở tuổi 28 ngày theo TCVN 3118:1993 [101]. Kết quả được trình bày ở Bảng 2.15 và Hình 2.5.

Bảng 2.15: Kết quả kiểm tra bằng thực nghiệm

Ký hiệu bê tông	Độ sụt thực tế	Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hoà (kg/m^3)	Khối lượng thể tích ở trạng thái khô (kg/m^3)	Tải trọng cực hạn, P_{max} (kN)	Cường độ chịu nén của bê tông ở tuổi 28 ngày, f_c' (MPa)	Chênh lệch so với cường độ bê tông yêu cầu (%)
TP1_1	7	2759	2504	865.21	38.45	29
TP1_2	7	2743	2511	872.51	38.78	
TP1_3	7	2748	2515	874.53	38.87	
Trung bình		2750	2510	870.75	38.7	
Độ lệch chuẩn		*6.683*	*4.546*	*4.003*	*0.181*	

Ký hiệu bê tông	Độ sụt thực tế	Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hoà (kg/m^3)	Khối lượng thể tích ở trạng thái khô (kg/m^3)	Tải trọng cực hạn, P_{max} (kN)	Cường độ chịu nén của bê tông ở tuổi 28 ngày, f_c' (MPa)	Chênh lệch so với cường độ bê tông yêu cầu (%)
TP2_1	5	2754	2575	954.76	42.43	41.67
TP2_2	5	2765	2579	958.21	42.59	
TP2_3	5	2761	2586	955.78	42.48	
Trung bình		2760	2580	956.25	42.5	
Độ lệch chuẩn		*4.546*	*4.546*	*1.447*	*0.067*	
TP3_1	8	2715	2591	718.64	31.94	6.87
TP3_2	8	2722	2584	720.14	32.01	
TP3_3	8	2723	2595	725.27	32.23	
Trung bình		2720	2590	721.35	32.06	
Độ lệch chuẩn		*3.559*	*4.546*	*2.839*	*0.124*	



Hình 2.5: Biểu đồ quan hệ giữa cường độ chịu nén và tỷ lệ N/X

Kết quả kiểm tra cho thấy cả 3 thành phần đều có cường độ vượt cường độ bê tông yêu cầu, trong đó TP1 và TP2 cho cường độ nén cao hơn TP3 và lớn hơn cường độ bê tông yêu cầu 29% và 41.7%. TP3 có cường độ nén lớn hơn cường độ bê tông yêu cầu 6.87%. Trong 3 thành phần TP1, TP2, TP3 thì chỉ TP3 (thành phần có lượng xi măng giảm 10% so với thành phần cơ bản) là có kết quả đảm bảo vư ợ t mác bê tông yêu cầ u thiế t kế không quá 15% đồng thời đảm bảo yêu cầu độ sụt. Do đó, có thể lựa chọn TP3 làm kết quả của việc thiết kế cấp phối bê tông xỉ thép với cường độ yêu cầu 30 MPa.

2.2.6. Đề xuất hiệu chỉnh cấp phối và kiểm chứng

Qua kiểm tra thực nghiệm ở 0, cho thấy, để có thể áp dụng "Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại" theo Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD ngày 05/9/1998 của Bộ Xây Dựng [95] cho bê tông xỉ thép, công thức hiệu chỉnh hàm lượng xi măng cho bê tông xỉ thép (giảm 10% lượng xi măng tra bảng theo [95]) được đề xuất như sau:

$$X_{hc} = 0.9.X_{tt} \quad (2.2)$$

Trong đó: X_{tt} và X_{hc} là hàm lượng xi măng dùng cho một mét khối bê tông trước và sau khi điều chỉnh.

Với các công thức (2.1) và (2.2) đã đề xuất kết hợp với chỉ dẫn kỹ thuật [95], đề tài kiểm chứng một số cấp phối bê tông xỉ thép, kết quả được trình bày ở Bảng 2.16:

Bảng 2.16: Kết quả kiểm chứng cấp phối bê tông đề xuất (kg/m^3)

Ký hiệu	Cường độ bê tông yêu cầu (MPa)	Xi măng (kg)	Cát (kg)	Xỉ thép (kg)	Nước (lít)	Tỷ lệ N/X	Độ sụt thực tế (cm)	Cường độ nén ở tuổi 28 ngày (MPa)
CP20	20	290	803	1500	220	0.76	6-8cm	23.9
CP25	25	338	773	1485	219	0.65	6-8cm	28.5
CP30	30	385	742	1471	218	0.57	6-8cm	33.2
CP35	35	433	710	1458	219	0.50	6-8cm	39.1
CP40	40	480	678	1448	219	0.46	6-8cm	43.7

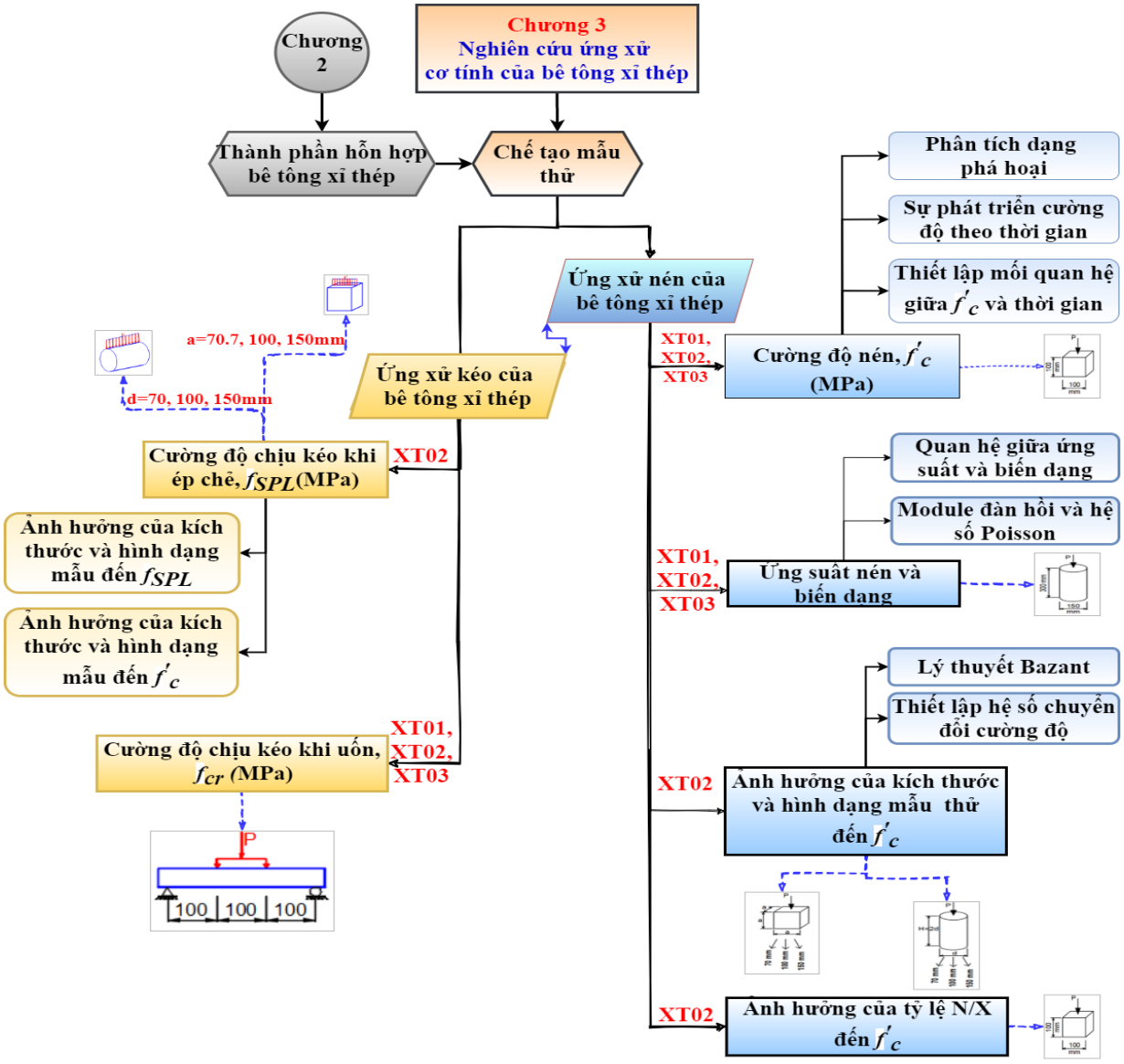
2.3. Kết luận Chương 2

- Xỉ thép có các chỉ tiêu cơ lý đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [89]. Do đó, có thể sử dụng xỉ thép để làm cốt liệu lớn để chế tạo bê tông xi măng.
- Có thể dùng chỉ dẫn kỹ thuật [95] do bộ Xây Dựng ban hành để thiết kế thành phần cơ bản của bê tông xỉ thép, tuy nhiên cần điều chỉnh lại lượng nước và xi măng theo công thức (2.1) và (2.2).

CHƯƠNG 3

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CƠ HỌC CỦA BÊ TÔNG XỈ THÉP

Khi sử dụng xỉ thép có nguồn gốc khác nhau thì tính chất cơ học của bê tông xỉ thép cũng cũng có sự khác nhau nhất định. Vì vậy, để có thể sử dụng xỉ thép chế tạo bê tông, áp dụng vào thực tiễn đòi hỏi phải có những nghiên cứu về ứng xử cơ tính cơ bản của bê tông xỉ thép như cường độ chịu nén, module đàn hồi và hệ số Poisson, cường độ chịu kéo…. Những nội dung nghiên cứu này được trình bày trong Chương 3, được tóm tắt trong sơ đồ ở Hình 3.1



Hình 3.1: Sơ đồ chương 3

3.1. Thiết kế thí nghiệm

3.1.1. Thành phần hỗn hợp bê tông

Ba loại cấp phối bê tông được sử dụng để nghiên cứu ứng xử nén là XT01, XT02, XT03 lần lượt có cường độ yêu cầu là 30, 35 và 40 MPa như đã trình bày ở Bảng 2.16, Chương 2. Bê tông đối chứng DC01, DC02 và DC03 là ba cấp phối bê tông dùng cốt liệu lớn là đá tự nhiên, được dùng để so sánh với bê tông xỉ thép. Thành phần của hỗn hợp bê tông DC01, DC02 và DC03 được lựa chọn dựa trên thành phần của bê tông xỉ thép XT01, XT02, XT03 như sau:

- Xi măng: bê tông đối chứng có lượng dùng xi măng X (kg) giống bê tông xỉ thép;
- Nước: bao gồm lượng nước tra N_{tb} bảng giống lượng nước tra bảng của bê tông xỉ thép và lượng nước bị cốt liệu lớn là đá dăm tự nhiên hút vào. Tỷ lệ N_{tb}/X của bê tông đối chứng và bê tông xỉ thép giống nhau;
- Lượng cát và đá của bê tông đối chứng tính toán theo chỉ dẫn thiết kế cấp phối bê tông xi măng [95].

Bảng 3.1: Thành phần hỗn hợp bê tông

Ký hiệu	Xi măng (kg)	Cát (kg)	Cốt liệu lớn (kg)	Nước (lít)
XT01	385	742	1471	218
XT02	437	723	1434	217
XT03	485	706	1399	217
ĐC01	385	668	1182	201
ĐC01	437	625	1170	201
ĐC01	485	681	1190	207

3.1.2. Chế tạo mẫu thử

3.1.2.1. *Mẫu thí nghiệm cường độ chịu nén*

Việc chuẩn bị mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu được thực hiện theo TCVN 3105-1993 [99]. Sử dụng các mẫu thử hình lập phương có kích thước 70.7x70.7x70.7mm, 100x100x100 mm, 150x150x150 mm và mẫu thử hình trụ có kích thước 70x140 mm, 100x200 mm, 150x300 mm (Hình 3.3) để xác định cường độ chịu nén ở các ngày tuổi khác nhau theo TCVN 3118-1993 [101]. Mỗi cấp phối XT01, XT02, XT03, DC01,

DC02 và DC03 được chuẩn bị số lượng mẫu thí nghiệm và tuổi ngày thí nghiệm được trình bày trong Bảng 3.2 và Bảng 3.3. Ngoài ra, để khảo sát sự ảnh hưởng của tỷ lệ nước trên xi măng (N/X) đến cường độ chịu nén của bê tông xỉ thép, chọn cấp phối XT02 có tỷ lệ N/X=0.57 đồng thời giữ nguyên lượng xi măng dùng, thay đổi lượng nước để tỷ lệ N/X thay đổi từ 0.3 đến 0.7 (xem chi tiết ở Bảng 3.4). Thiết lập thí nghiệm nén và uốn được lần lượt mô tả ở Hình 3.2 và Hình 3.3 .

Bảng 3.2: Số tổ mẫu và tuổi ngày thí nghiệm của mỗi cấp phối DC01, DC02, DC03

Tuổi BT / KT mẫu	Số lượng tổ mẫu thí nghiệm của mỗi cấp phối									Số tổ mẫu
	3 ngày	7 ngày	14 ngày	21 ngày	28 ngày	56 ngày	90 ngày	180 ngày	365 ngày	
100x100x100	2	3	3	3	3	3	3	3	3	27

Bảng 3.3: Số tổ mẫu và tuổi ngày thí nghiệm của mỗi cấp phối XT01, XT02, XT03

Tuổi BT / KT mẫu	Số lượng tổ mẫu thí nghiệm của mỗi cấp phối									Số tổ mẫu
	3 ngày	7 ngày	14 ngày	21 ngày	28 ngày	56 ngày	90 ngày	180 ngày	365 ngày	
70.7x70.7x70.7					9					3
100x100x100	3	3	3	3	9	3	3	3	3	27
150x150x150					9					3
70x40					9					3
100x200					9					3
150x300					9					3

Bảng 3.4: Số tổ mẫu dùng để khảo sát sự ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến cường độ bê tông xỉ thép ở tuổi 28 ngày

Tỷ lệ N/X / KT Mẫu	Số tổ mẫu thí nghiệm 9									Tổng số tổ mẫu
	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.57	0.60	0.65	0.70	
100x100x100	3	3	3	3	3	3	3	3	3	27

Hình 3.2: Thí nghiệm cường độ chịu nén

Hình 3.3: Mẫu thí nghiệm với các kích thước khác nhau

3.1.2.2. *Mẫu thí nghiệm Module đàn hồi và hệ số Poisson*

Các mẫu bê tông xỉ thép hình trụ có kích thước 150x300 mm (Hình 3.4) được chế tạo và bảo dưỡng theo tiêu chuẩn TCVN 3105-93 [99] để xác định module đàn hồi và hệ số Poisson theo tiêu chuẩn ASTM C469-14 [102] ở tuổi 28 ngày như Hình 3.5. Số lượng mẫu được chuẩn bị như Bảng 3.5.

Bảng 3.5: Số tổ mẫu dùng khảo sát module đàn hồi và hệ số Poisson ở tuổi 28 ngày

Cấp phối	Số viên mẫu mỗi tổ
XT01	5
XT02	5
XT03	5

Hình 3.4: Mẫu thí nghiệm

Hình 3.5: Thí nghiệm xác định module đàn hồi và hệ số poisson

3.1.2.3. *Mẫu thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ*

Để nghiên cứu ứng xử chịu kéo khi ép chẻ của bê tông xỉ thép, sử dụng cấp phối XT02 (Bảng 3.1), 6 nhóm mẫu bao gồm 3 nhóm hình lập phương (ký hiệu S-CU070, S-CU100, S-CU150) và 3 nhóm hình trụ (ký hiệu CY070, CY100, CY150) được chế tạo và bảo dưỡng đến tuổi 28 ngày theo TCVN 3105-1993 [99]. Kích thước, hình dáng và số lượng mẫu được thể hiện ở Bảng 3.6.

Bảng 3.6: Mẫu thí nghiệm cường độ ép chẻ ở tuổi 28 ngày

Ký hiệu mẫu	Kích thước (mm)	Số tổ mẫu
S-CU070	70.7×70.7×70.7	9
S-CU100	100×100×100	9
S-CU150	150×150×150	9
CY070	70×140	9
CY100	100×200	9
CY150	150×300	9

Các mẫu trụ được thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN-3120:1993 để xác định cường độ chịu kéo khi ép chẻ (Hình 3.6a). Các mẫu lập phương khi thí nghiệm theo TCVN-3120:1993 phải chuẩn bị gối truyền tải, do đó trong nghiên cứu này, để đơn giản việc thí nghiệm ép chẻ đối với mẫu lập phương, một thớt nén của máy sẽ tiếp xúc hoàn toàn với 1 mặt mẫu, thớt nén còn lại tiếp xúc với thanh thép cứng tròn trơn đặt trên mẫu như đề xuất của Zhang [103] (Hình 3.6b).

(a) Mẫu trụ *(b) Mẫu lập phương*

Hình 3.6: Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi ép chẻ

3.1.2.4. *Mẫu dầm bê tông xỉ thép*

Ba nhóm mẫu dầm bê tông xỉ thép ký hiệu là CSC1, CSC2, CSC3 có cấp phối tương ứng là XT01, XT02, XT03 (Bảng 3.1) với kích thước 100x100x400 mm (Hình 3.7), được chế tạo để xác định cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày và 56 ngày. Số lượng mẫu được trình bày ở Bảng 3.7

Bảng 3.7: Mẫu dầm bê tông xi măng dùng cốt liệu lớn là xỉ thép

Ký hiệu dầm	Kích thước (mm)	Số tổ mẫu	Tổng số viên mẫu
CSC1	100x100x400	3	9
CSC2	100x100x400	3	9
CSC3	100x100x400	3	9

Hình 3.7: Thí nghiệm cường độ kéo khi uốn với sơ đồ uốn 4 điểm

3.2. Ứng xử nén của bê tông xỉ thép

3.2.1. Cường độ chịu nén

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén (f_c') ở tuổi ngày (t) được trình bày trong Bảng 3.8 (mẫu thí nghiệm có kích thước 100x100x100 mm)

Bảng 3.8: Cường độ chịu nén ở các tuổi ngày khác nhau

Tuổi bê tông (ngày)	Cường độ chịu nén (MPa)					
	XT01	XT02	XT03	DC01	DC02	DC03
3	23.03	31.96	34.81	18.37	23.44	24.08
7	28.33	35.79	41.81	21.11	27.42	28.49
14	30.36	37.88	42.87	24.83	29.68	32.56
21	32.53	39.16	43.92	26.95	32.64	35.97
28	35.81	42.52	46.72	29.38	36.14	40.62
56	42.15	49.05	51.58	31.87	39.53	43.16
90	44.91	54.07	60.63	34.19	41.71	45.68
180	49.73	56.66	62.01	35.35	43.89	47.77
365	51.83	59.00	63.80	38.83	47.15	52.75

3.2.1.1. *Phân tích dạng phá hoại khi nén*

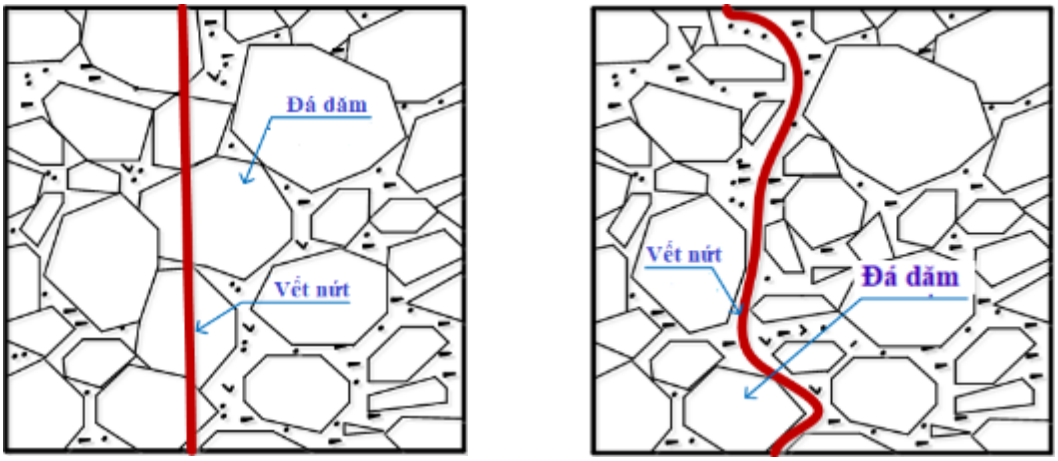
Hình 3.8 cho phép quan sát được các vết nứt xuất hiện trên bê tông xỉ thép và bê tông truyền thống sau khi bị phá hoại ở tuổi 28 ngày, có sự khác biệt rõ rệt giữa hai loại bê tông này. Mẫu bê tông đối chứng (Hình 3.8b) cho thấy sự phá hoại chỉ xảy ra theo biên cốt liệu, các hạt cốt liệu không bị phá vỡ [104], trong khi mặt phá hoại của bê tông xỉ thép lại cắt ngang các hạt cốt liệu xỉ thép (Hình 3.8a). Nguyên nhân có

thể được giải thích là do các hạt xỉ thép có cấu trúc rỗng tổ ong làm tăng mật độ pha hồ trong bê tông xỉ thép, cải thiện được liên kết giữa hồ và cốt liệu. Dạng phá hoại này tương tự với dạng phá hoại của bê tông cường độ cao sử dụng cốt liệu lớn là đá tự nhiên Hình 3.9. Điều này cũng giải thích cho kết quả cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày của bê tông xỉ thép lớn hơn bê tông đối chứng khoảng 20%.

(a) Vết nứt cắt ngang hạt cốt liệu lớn trong bê tông xỉ thép

(b) Các vết nứt lan truyền theo biên các hạt cốt liệu trong bê đối chứng

Hình 3.8: Mặt phá hoại của bê tông xỉ thép và bê tông đối chứng



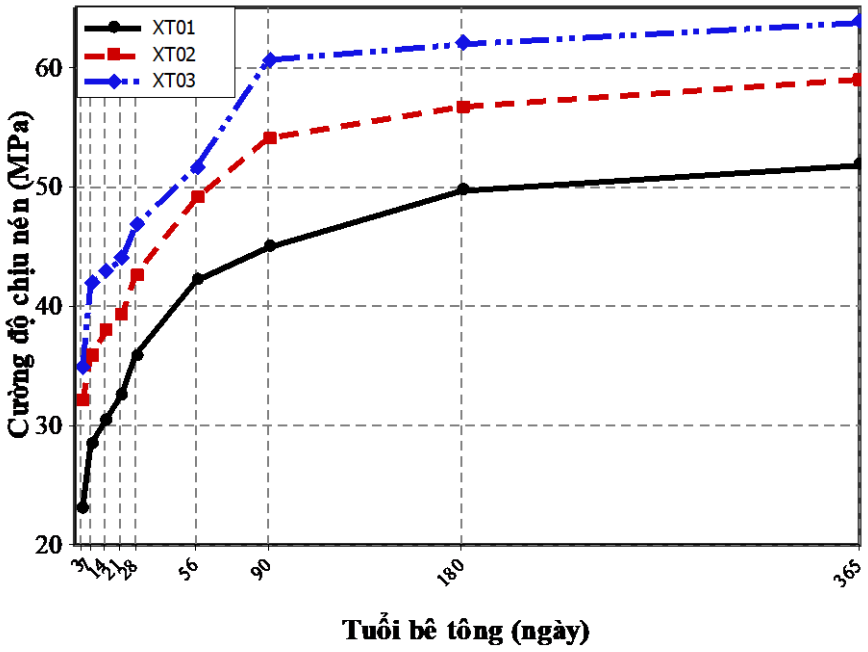
(a) Bê tông cường độ cao

(b) Bê tông thường [104]

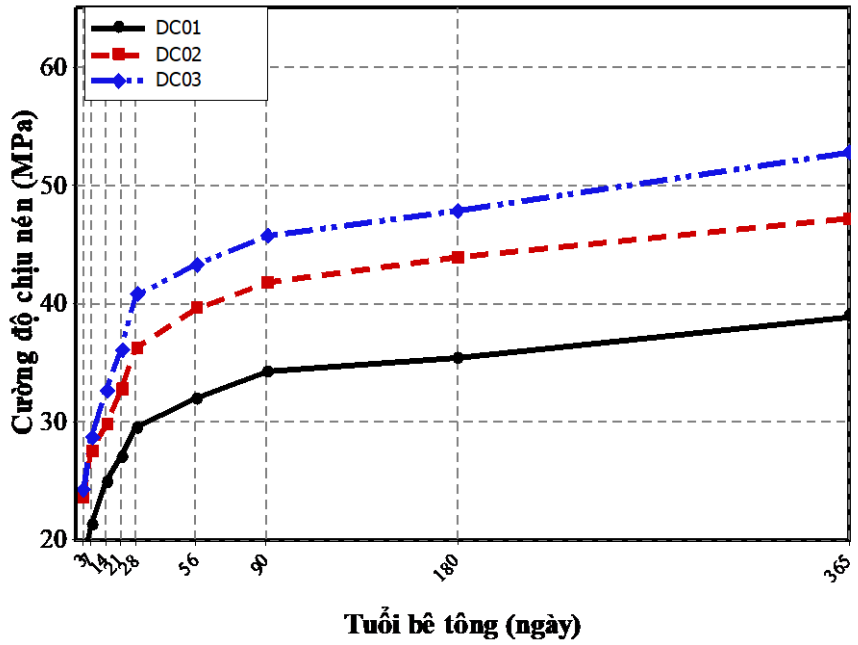
Hình 3.9: Các dạng phá hoại của bê tông dùng cốt liệu là đá tự nhiên

3.2.1.2. *Khảo sát sự phát triển cường độ chịu nén của BTXT theo thời gian.*

Quan hệ giữa cường độ chịu nén của bê tông và tuổi thí nghiệm được thể hiện trong Hình 3.10. Phần trăm cường độ chịu nén đạt được ở các ngày tuổi khác nhau so với cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày được thể hiện ở Hình 3.11.

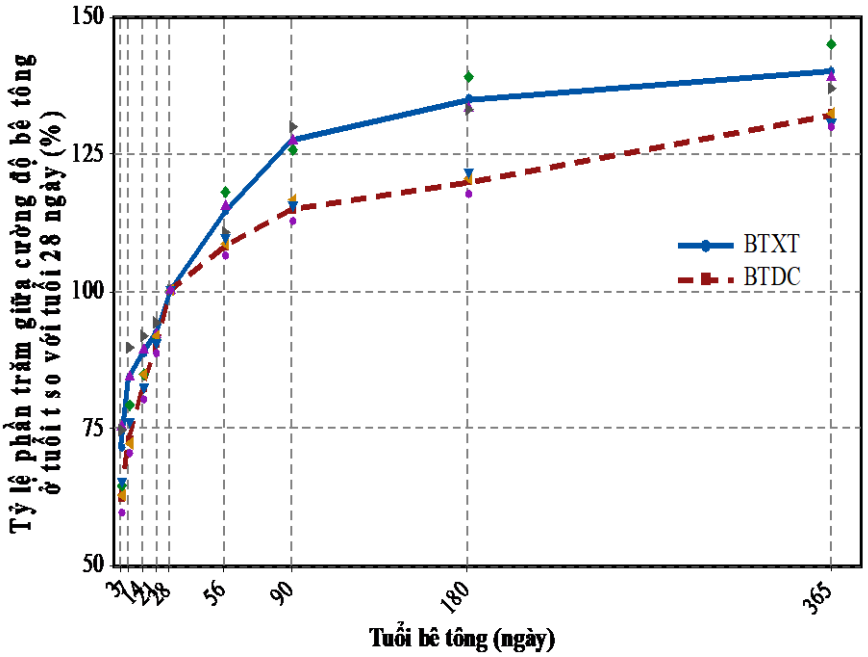


(a) Bê tông xỉ thép



(b) Bê tông đối chứng

Hình 3.10: Sự phát triển cường độ bê tông theo thời gian



Hình 3.11: Tỷ lệ phần trăm giữa cường độ bê tông ở tuổi t ngày so với tuổi 28 ngày

Hình 3.10 và Hình 3.11 cho thấy mối quan hệ giữa cường độ bê tông và thời gian có thể chia làm các giai đoạn khác nhau trong phạm vi tuổi bê tông từ 3-365 ngày.

Với BTXT, sự phát triển cường độ theo thời gian có thể chia làm 3 giai đoạn:

- Giai đoạn 1: từ 3 đến 7 ngày tuổi, tốc độ phát triển cường độ nhanh, tương ứng đạt khoảng 71% và 84% cường độ ở 28 ngày tuổi.

- Giai đoạn 2: từ 7 đến 28 ngày tuổi, tốc độ phát triển cường độ giảm so với giai đoạn 1.

- Giai đoạn 3: Sau 28 ngày, từ tuổi 56-90 ngày, cường độ vẫn tiếp tục tăng so với ở tuổi 28 ngày, cường độ ở tuổi 56 và 90 ngày tương ứng bằng khoảng 114% và 127% so với cường độ ở tuổi 28 ngày. Sau 90 ngày, cường độ bê tông vẫn phát triển tuy nhiên tốc độ phát triển giảm so với giai đoạn 56-90 ngày tuổi. Cường độ ở tuổi 365 ngày bằng 140% so với cường độ ở tuổi 28 ngày.

Với bê tông đối chứng, sự phát triển cường độ theo thời gian có thể chia làm 3 giai đoạn:

- Giai đoạn 1: từ 3-14 ngày tuổi, tốc độ phát triển cường độ lớn, cường độ ở tuổi 7 ngày đạt khoảng 72% cường độ ở tuổi 28 ngày (tương tự như kết quả của Steven H. Kosmatka [105] là 75%)

- Giai đoạn 2: từ 14-28 ngày tuổi, tốc độ phát triển cường độ giảm hẳn so với giai đoạn 1.

- Giai đoạn 3: sau 28 ngày tuổi, tốc độ phát triển cường độ giảm hơn so với giai đoạn 2, cường độ bê tông vẫn tiếp tục tăng nhưng có xu hướng ổn định dần, cường độ ở tuổi 56 và 90 ngày lớn hơn khoảng 8% và 14 % so với cường độ ở tuổi 28 (kết quả của Steven H. Kosmatka [105] là 10% và 15%). Sau 90 ngày tuổi, cường độ vẫn tăng nhưng tốc độ tăng chậm. Cường độ ở tuổi 365 ngày đạt 132% so với cường độ ở tuổi 28 ngày.

So sánh sự phát triển cường độ BTXT với bê tông đối chứng cho thấy, trước 28 ngày tuổi, tốc độ phát triển cường độ của hai loại bê tông là gần như là giống nhau, sau 28 ngày tuổi BTXT cho thấy sự phát triển cường độ có phần nổi trội hơn bê tông đối chứng. Ngoài ra, BTXT cũng cho thấy có cường độ tuổi 28 ngày cao hơn bê tông đối chứng khoảng 15%-21%.Nguyên nhân giải thích cho hiện tượng này là do BTXT được tạo bởi cốt liệu lớn là xỉ thép có các chỉ tiêu cơ lý vượt hẳn so với đá dăm. Ngoài ra, cốt liệu xỉ thép có cấu trúc rỗng cao hơn dẫn đến khả năng hấp thụ nước lớn, một hàm lượng nước nhất định tham gia thủy hóa triệt để hơn về sau, giúp BTXT tiếp tục phát triển cường độ sau 28 ngày tuổi mạnh hơn so với BTXM.

3.2.1.3. *Thiết lập mối quan hệ giữa cường độ chịu nén của BTXT và thời gian*

Để dự đoán giá trị cường độ của bê ông xỉ thép tại ngày tuổi bất kỳ, việc thiết lập mối quan hệ giữa cường độ và tuổi của bê tông xỉ thép là cần thiết. Dựa vào kết quả thực nghiệm (Hình 3.10), phương trình hàm hyperbol (3.1) được đề xuất để phù hợp với các điều kiện biên như sau:

- Khi tuổi thí nghiệm bằng 0 cường độ bê tông xỉ thép bằng 0;
- Khi tuổi thí nghiệm đạt đến vô cùng, cường độ nén tăng đến giá trị không đổi.

$$f_c'(t) = \frac{t}{at + b} \tag{3.1}$$

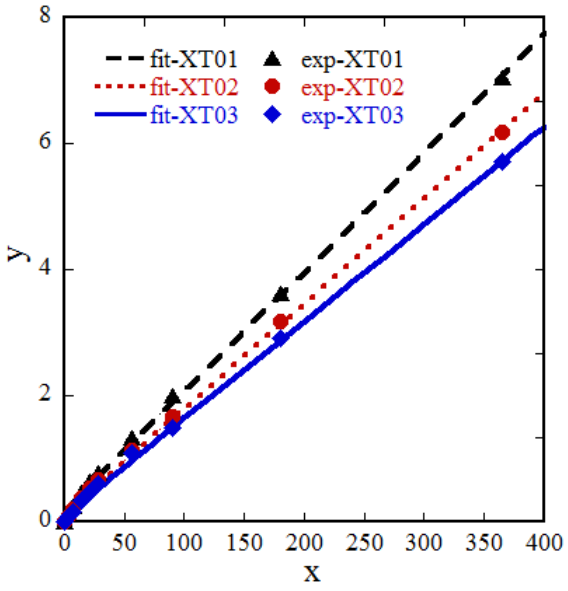
Trong đó, *a* và *b* là các hằng số, phụ thuộc vào tính chất của bê tông xỉ thép. Để xác định a và b, phương trình (3.1) được viết lại như sau:

$$\frac{t}{f_c'(t)} = at + b \tag{3.2}$$

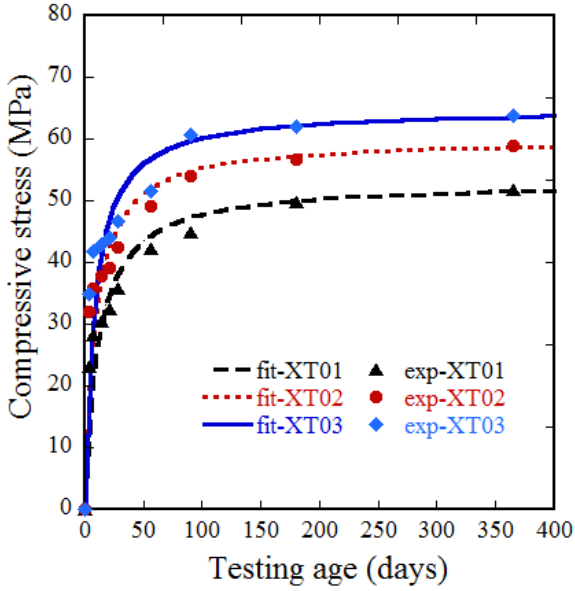
Đặt $= \frac{t}{f_c'(t)}$, $x = t$ thì phương trình (3.2) có thể xem là hồi quy tuyến tính và có dạng $y = ax + b$. Bằng phương pháp hồi quy tuyến tính bình phương nhỏ nhất để xác định giá trị a và b. Kết quả thể hiện ở phương trình (3.3) và Hình 3.12a. Từ kết quả này cũng xác định được mối quan hệ giữa cường độ chịu nén của bê tông và tuổi của nó thông qua phương trình (3.4) và Hình 3.12b.

$$\begin{cases} XT01: y = 0.019x + 0.026 \\ XT02: y = 0.017x + 0.145 \\ XT03: y = 0.015x + 0.121 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} XT01: f_c'(t) = \dfrac{t}{0.019t + 0.206} \\ XT02: f_c'(t) = \dfrac{t}{0.017t + 0.145} \\ XT03: f_c'(t) = \dfrac{t}{0.015t + 0.121} \end{cases} \quad (3.4)$$



(a) Hồi quy tuyến tính bình phương tối thiểu



(b) Đường cong sử dụng phương trình hyperbol

Hình 3.12: Quan hệ giữa cường độ chịu nén và thời gian theo phân tích hồi quy của ba cấp phối xỉ thép XT01, XT02, XT03

3.2.2. Ứng suất nén và biến dạng

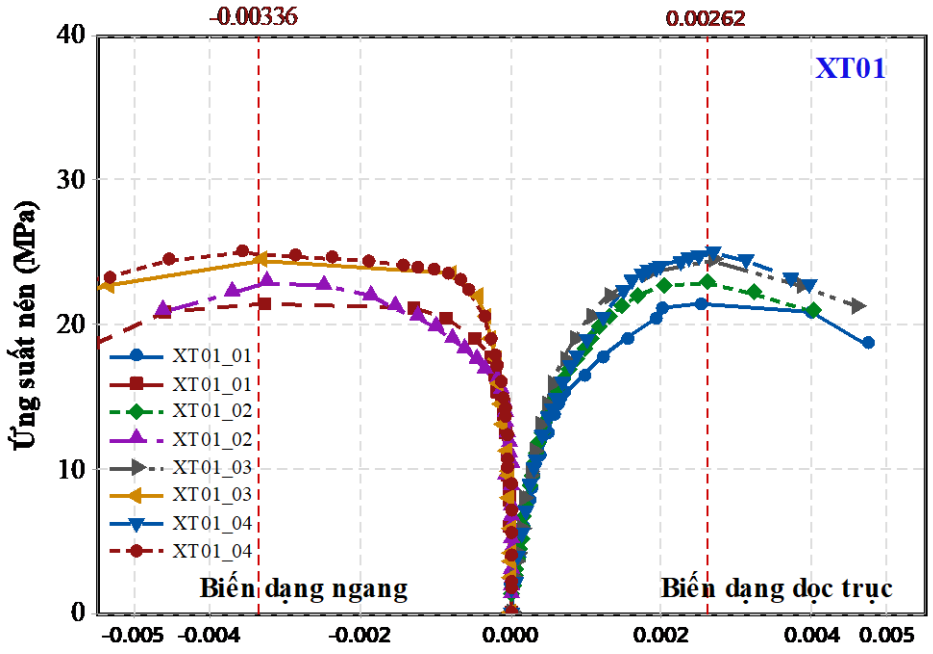
Kết quả thí nghiệm module đàn hồi và hệ số Poisson được trình bày trong Bảng 3.9.

Bảng 3.9: Kết quả thí nghiệm module đàn hồi và hệ số Poisson của BTXT

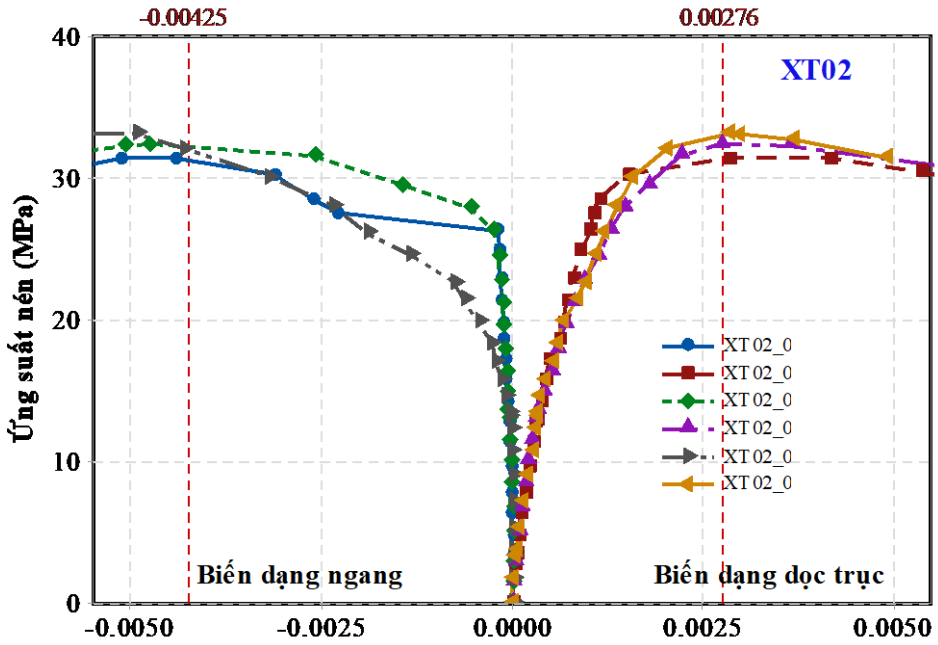
Cấp phối	Ký hiệu mẫu	Tải trọng phá hoại, kN P_{max}	Ứng suất phá hoại, MPa f_c'	Biến dạng ngang, ‰ ε_{lat}	Biến dạng dọc trục, ‰ ε_{axi}	Hệ số poisson ν_c	Module đàn hồi, Gpa E_c	Độ bền, MPa.‰ T_c
XT01	XT01_01	378.30	21.41	-3.282	2.509	0.171	30.35	40.94
	XT01_02	404.17	22.87	-3.260	2.610	0.174	31.24	47.47
	XT01_03	432.00	24.45	-3.307	2.681	0.173	31.78	52.35
	XT01_04	441.40	24.98	-3.578	2.693	0.171	32.49	51.49
	Giá trị trung bình	413.97	23.43	-3.357	2.623	0.172	31.47	48.06
	Độ lệch chuẩn	26.86	1.52	0.024	0.086	0.0019	0.72	5.203
XT02	XT02_02	553.70	31.33	-4.418	2.841	0.175	36.50	71.45
	XT02_03	571.60	32.35	-4.756	2.737	0.188	36.63	66.02
	XT02_04	585.00	33.10	-4.924	2.836	0.177	36.91	71
	Giá trị trung bình	570.10	32.26	-4.699	2.805	0.180	36.68	69.49
	Độ lệch chuẩn	15.70	0.889	0.258	0.059	0.0067	0.207	3.01
XT03	XT03_01	626.82	35.47	-3.193	2.882	0.193	38.93	77.61
	XT03_02	628.69	35.58	-3.877	2.899	0.193	39.06	79.86
	XT03_03	629.06	35.60	-3.504	2.807	0.195	39.34	77.58
	XT03_04	637.73	36.09	-3.357	2.697	0.203	39.51	76.46
	Giá trị trung bình	630.58	35.68	-3.483	2.821	0.196	39.21	77.88
	Độ lệch chuẩn	4.87	0.28	0.292	0.092	0.0048	0.266	1.42

Các giá trị ở Bảng 3.9 thể hiện cường độ chịu nén (f_c'), biến dạng ngang cực hạn (ε_{lat}) , biến dạng dọc trục cực hạn (ε_{axi}), hệ số Poisson (ν_c), module đàn hồi (E_c) và độ bền (T_c) của các mẫu bê tông xỉ thép XT01, XT02, XT03. Trong đó, biến dạng ngang và dọc trục cực hạn được xác định khi mẫu bị phá hoại tức cường độ nén đạt giá trị cực đại. Độ bền nén T_c được xác định là diện tích bên dưới đường cong ứng suất nén khi biến dạng dọc trục đạt cực hạn.

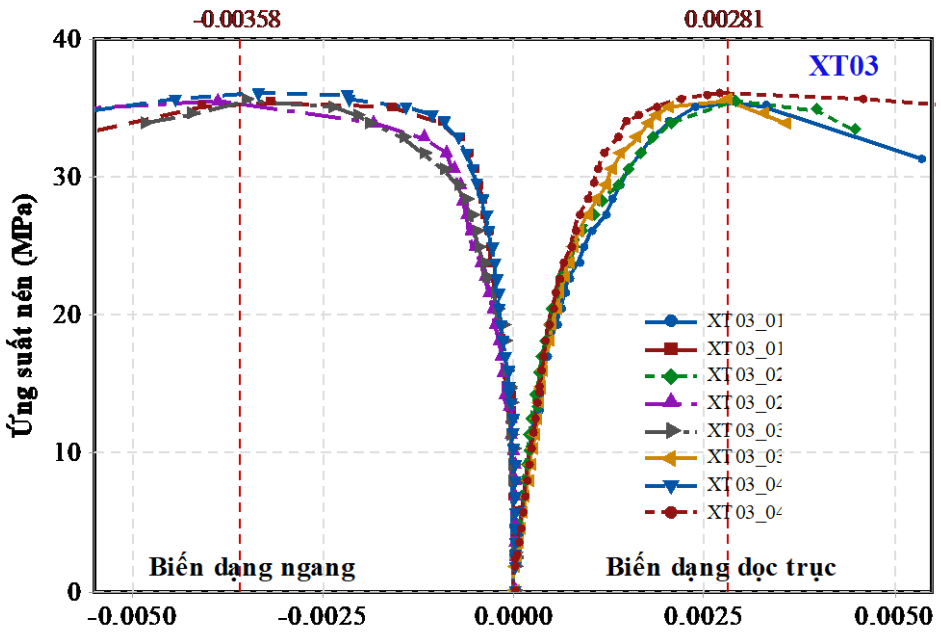
3.2.2.1. *Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng*



(a) Mẫu bê tông xỉ thép XT01



(b) Mẫu bê tông xỉ thép XT02



(c) Mẫu bê tông xỉ thép XT03

Hình 3.13: Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của 3 loại cấp phối BTXT

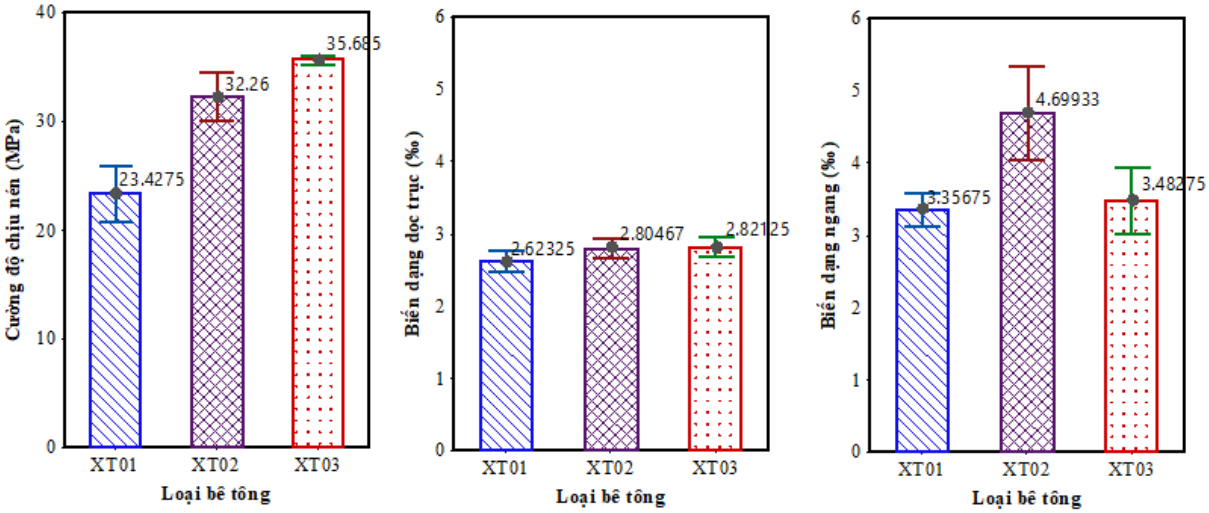
Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng được thể hiện ở Hình 3.13, trong đó đường phía bên phải biểu diễn biến dạng dọc trục, đường cong phía bên trái biểu diễn biến dạng ngang. Quan sát Hình 3.13a,b,c cho thấy:

- Khi bắt đầu tăng tải, độ dốc (biểu thị độ cứng của vật liệu) của đường cong biến dạng dọc trục thấp hơn so với đường cong biến dạng ngang ($\emptyset_a < \emptyset_b$), nghĩa là giá trị tuyệt đối của biến dạng ngang (có giá trị âm) nhỏ hơn biến dạng dọc trục (có giá trị dương), và mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng quan sát được là tuyến tính khi ứng suất bé hơn một phần ba ứng suất đỉnh.
- Khi tăng tải, ứng suất vượt quá khoảng 1/3 ứng suất đỉnh, đường quan hệ giữa ứng suất và biến dạng có dạng đường cong nhẹ chứng tỏ đã có sự xuất hiện của các vết nứt vi mô ở bên trong mẫu (chưa xuất hiện các vết nứt ở bên ngoài).
- Khi mẫu bị phá hoại, biến dạng ngang phát triển nhanh và lớn hơn biến dạng dọc trục.
- Đối với biến dạng dọc trục, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của bê tông xỉ thép là tuyến tính khi tăng tải đến giá trị ứng suất đạt khoảng 40% giá trị ứng suất phá hoại. Nếu tiếp tục tăng tải, vết nứt bắt đầu xuất hiện, bê tông làm

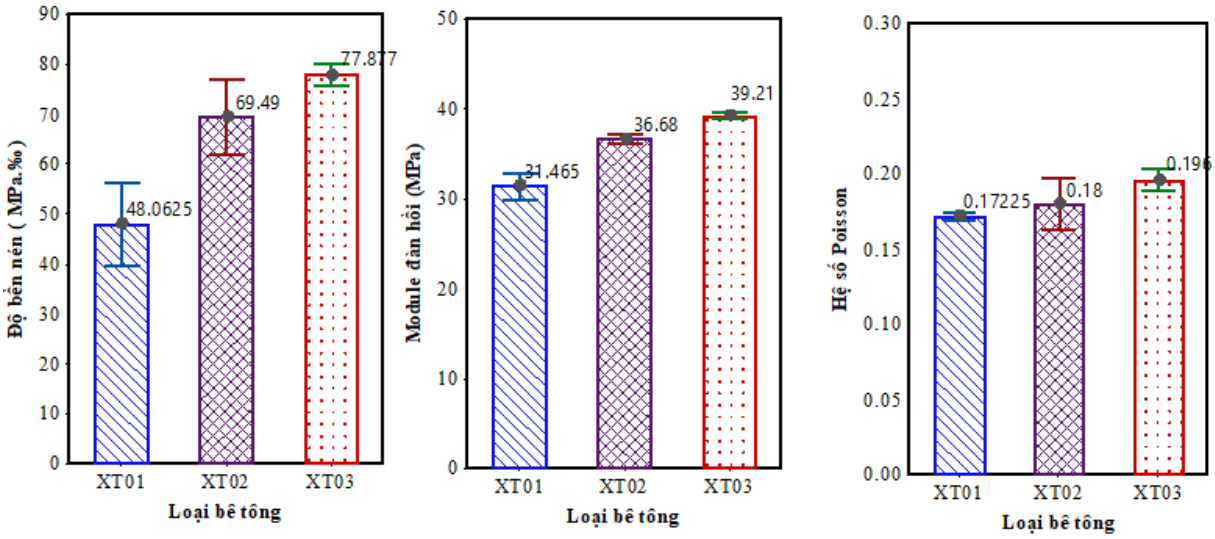
việc trong giai đoạn biến dạng dẻo, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng là phi tuyến. Biến dạng tương ứng lúc ứng suất cực đại khoảng 2.6-2.9‰.

- Đối với biến dạng ngang, trong giai đoạn đầu tăng tải, biến dạng ngang rất bé so với biến dang dọc trục, chỉ xuất hiện khi ứng suất đạt khoảng 20-30% ứng suất phá hoại. Tuy nhiên khi bê tông gần bị phá hoại, biến dạng ngang tăng rất nhanh, đạt khoảng 3 -4.7‰ tương ứng với ứng suất cực đại.

Việc so sánh các đặc trưng của cường độ chịu nén như Hình 3.14 cho thấy ngoại trừ biến dạng ngang cực hạn, các đặc trưng khác đều tăng khi tỷ lệ N/X giảm, tức các đặc trưng của mẫu bê tông xỉ thép XT01 lớn lớn XT02 và các đặc trưng của XT02 lớn hơn XT03 (Bảng 3.9). Cụ thể là các mẫu XT01, XT02, XT03 có các đặc trưng lần lượt là: cường độ chịu nén $f_c^{'}$ bằng 23.43, 32.26 và 35.68 MPa, biến dạng dọc trục cực hạn ε_{axi} đạt 2.62, 2.81 và 2.82 ‰; biến dạng ngang cực hạn ε_{lat} đạt 3.36, 4.70 và 3.48 ‰; độ bền nén T_c đạt 48.06, 69.49 và 77.88 MPa.‰; Module đàn hồi E_c lần lượt là 31.47, 36.68 và 39.21 GPa; hệ số Poisson ν_c tương ứng là 0.172, 0.180 và 0.196.



(a) Cường độ chịu nén *(b) Biến dang dọc trục cực hạn* *(c) Biến dang ngang cực hạn*



(d) Độ bền nén *(e) Module đàn hồi* *(f)* Hệ số Poisson

Hình 3.14: So sánh các thông số nén của mẫu bê tông xỉ thép

So sánh với các mối quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông truyền thống [106, 107], BTXT có ứng xử gần giống bê tông truyền thống trong thí nghiệm nén đơn, biến dạng dọc trục cực hạn của nó gần với giá trị của bê tông truyền thống (2-3‰).

Kết quả cũng cho thấy BTXT có giá trị ε_{lat} cao hơn ε_{axi} khoảng 1.23 đến 1.68 lần. Đối với BTXT, độ bền nén có giá trị nằm trong khoảng từ 46.92 đến 77.88 MPa.‰, giá trị này thấp hơn bê tông cốt sợi cường độ cao khoảng 1.5-3 lần [108] và thấp hơn so với bê tông cốt sợi cường độ siêu cao khoảng 5-8 lần [109].

3.2.2.2. *Module đàn hồi và hệ số Poisson*

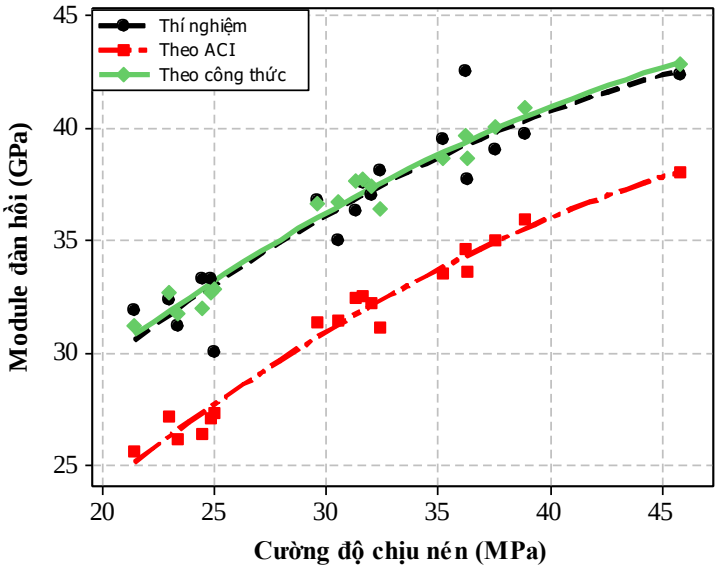
Kết quả trình bày ở Bảng 3.9 cho thấy module đàn hồi và hệ số Poisson là các thông số đặc trưng cho tính đàn hồi của bê tông xỉ thép, hệ số Poisson của các cấp phối BTXT có giá trị nằm trong khoảng từ 0.173 đến 0.196 phù hợp với bê tông truyền thống, có phạm vi (0.15-0.25) [110]. Theo công thức của ACI 318-14 [46], module đàn hồi của bê tông xỉ thép phụ thuộc vào cường độ chịu nén và khối lượng thể tích khô của nó theo công thức (3.5).

$$E = k_E * w_c^{1.5} . \sqrt{f_c'} \quad (3.5)$$

Trong đó, w_c là khối lượng thể tích của bê tông (kg/m^3), f_c là cường độ nén (MPa) được đo ở tuổi 28 ngày sử dụng mẫu trụ 150 × 300 mm, k_E=0.049.

Đối với ba cấp phối bê tông xỉ thép xỉ bằng thép, k_E= 0.049 được rút ra bằng

thực nghiệm (Hình 3.15).



Hình 3.15: Quan hệ giữa module đàn hồi và cường độ bê tông

Hình 3.15 cho thấy đường biểu diễn module đàn hồi của xỉ thép từ thực nghiệm và tính toán bằng công thức (3.5), với k_E=0.049 gần như trùng nhau. Do đó có thể sử dụng công thức (3.5), với giá trị hệ số k_E=0.049 đề xuất để dự đoán module đàn hồi cho BTXT.

3.2.3. Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng của mẫu thử đến cường độ chịu nén

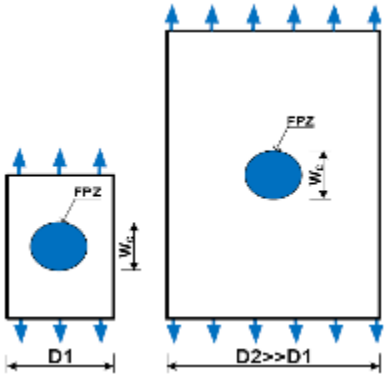
Hiệu ứng kích thước hay sự ảnh hưởng của kích thước cấu kiện đến các đặc trưng cơ học của bê tông đã được đề cập trong nhiều nghiên cứu [111-118]. Một nhóm mẫu gọi là "mẫu chuẩn" được định nghĩa trong các tiêu chuẩn về bê tông. Các kết quả thí nghiệm có được từ các mẫu thí nghiệm có kích thước khác mẫu chuẩn phải được quy đổi về mẫu chuẩn.

Nhiều lý thuyết đã được đề nghị để tính đến hiệu ứng kích thước mẫu đến cường độ như lý thuyết thống kê về sự phân bố phá hoại ngẫu nhiên Weibull [119], lý thuyết của Carpinterie (1984) liên quan đến các đặc điểm phá hủy của các mặt phá hủy, lý thuyết của Bazant [120] liên quan đến hiệu ứng kích thước và sự phát triển đường nứt, kết hợp với sự phân bố lại các ứng suất và giải phóng năng lượng tiêu tán gây ra bởi đường nứt. Trong các lý thuyết này, lý thuyết của Bazant được áp dụng rộng rãi trong thực tế.

Nguyễn Duy Liêm và cộng sự [115, 116] đã nghiên cứu sự phụ thuộc của cường độ chịu nén vào kích thước và hình dạng mẫu thí nghiệm thông qua hướng tiếp cận dựa trên năng lượng được giải phóng khi nứt trên nền tảng cơ học nứt, lý thuyết của Bazant là một điển hình. Phương pháp này sẽ được áp dụng để phân tích ứng xử cho bê tông xỉ thép.

3.2.3.1. *Lý thuyết Bažant*

Lý thuyết ảnh hưởng kích thước của Bažant đã biểu diễn phương pháp tiệm cận cố định cho vật liệu nửa giòn dựa trên lý thuyết cơ học phá hủy [120]. Theo lý thuyết này, sự ảnh hưởng kích thước liên quan đến việc giải phóng năng lượng dự trữ trước khi xuất hiện vết nứt. Sự lan truyền vết nứt liên quan đến vùng phá hủy (fracture process zone, FPZ) của vật liệu, được xác định là một vùng chịu ứng suất lớn dưới tác dụng của tải trọng trước khi xuất hiện và lan truyền các đường nứt lớn [121]. Vết nứt này có thể là do lỗ rỗng ở bề mặt hoặc các lỗ rỗng bên trong vật liệu tồn tại trong trong quá trình tạo mẫu. Khi có tải, ứng suất trong vùng phá hoại được phân bố lại với hiệu ứng dẻo, trong khi đó ở ngoài vùng phá hoại thì vật liệu vẫn đàn hồi. Do FPZ phụ thuộc vào vật liệu và không phụ thuộc vào kích thước của mẫu thí nghiệm nên kích thước của FPZ trong mẫu thí nghiệm không giống nhau. Hình 3.16 mô tả kích thước FPZ so với kích thước mẫu thí nghiệm, có ý nghĩa đối với mẫu thí nghiệm nhỏ nhưng không có ý nghĩa với mẫu thí nghiệm lớn và kết quả là mẫu thí nghiệm nhỏ có xu hướng tuân theo các tiêu chí về phá hoại dẻo, tức theo cường độ không đổi hay thay đổi ít.

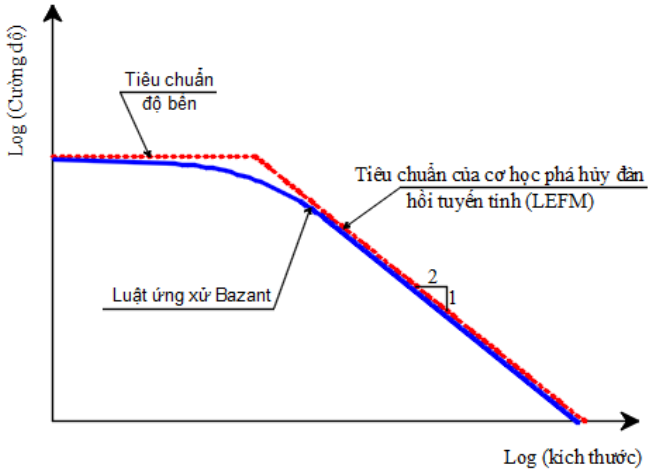


Hình 3.16: So sánh kích thước của FPZ so với kích thước mẫu thí nghiệm [120]

Tuy nhiên, lý thuyết ảnh hưởng kích thước của Bazant được thiết lập chủ yếu cho mẫu thí nghiệm chịu kéo và uốn. Kim và cộng sự [122] đã đề xuất sử dụng nó cho mẫu chịu tải trọng nén. Điều này cho thấy hầu hết các các mẫu nén bị phá hủy đều liên quan đến các vết nứt do kéo hoặc cắt cục bộ xảy ra tại khuyết tật bên trong vật liệu. Công thức (3.6) [123] biểu diễn mối quan hệ giữa cường độ và kích thước mẫu theo luật hiệu ứng kích thước của Bazant:

$$\sigma_N = Bf_t\left(1+\frac{D}{D_o}\right)^{-1/2} \tag{3.6}$$

Trong đó, D là kích thước đặc trưng của mẫu thí nghiệm, f_t là cường độ chịu kéo, σ_N cường độ nghiên cứu, D_o và B là các tham số vật liệu không phụ thuộc vào kích thước mẫu. D_o là đặc trưng của vật liệu giòn. Cường độ σ_N trong nghiên cứu này là cường độ chịu nén (f_c').



Hình 3.17: Mô tả lý thuyết ảnh hưởng kích thước Bazant lên cường độ [120]

Hình 3.17 biểu diễn lý thuyết ảnh hưởng kích thước Bazant dưới dạng logarit cho vật liệu nửa giòn. Đường nét đứt nằm ngang trong Hình 3.17 thể hiện tiêu chuẩn bền cho vật liệu dẻo, đường nén đứt với độ dốc $1/2$ thể hiện tiêu chuẩn của cơ học phá hủy đàn hồi tuyến tính (LEFM), áp dụng cho vật liệu phá hủy đàn hồi tuyến tính thuần túy. Theo lý thuyết ảnh hưởng kích thước của Bazant thì tiêu chuẩn phá hủy của vật liệu nửa giòn được thể hiện bằng đường cong liền. Đường cong này có xu hướng tiệm cận theo tiêu chuẩn độ bền với mẫu thí nghiệm có kích thước bé và có xu hướng tiệm cận theo tiêu chuẩn của LEFM với mẫu thí nghiệm có kích thước lớn.

Sử dụng cấp phối bê tông XT02 ở 28 ngày tuổi để nghiên cứu sự ảnh hưởng của

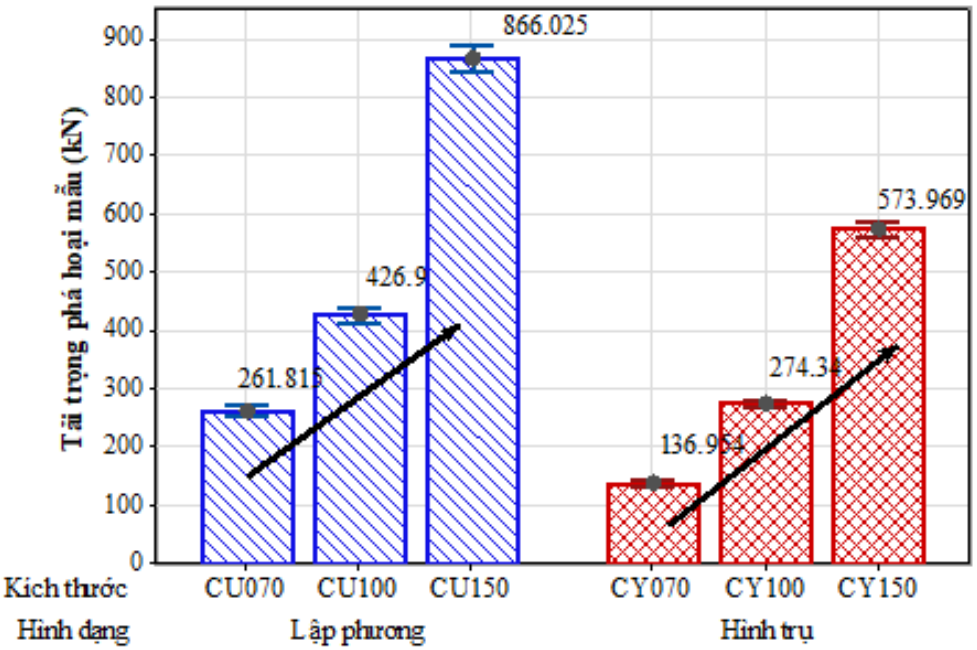
kích thước và hình dạng mẫu thử đến cường độ nén của BTXT. Kết quả thí nghiệm của 6 loại hình dáng và kích thước mẫu ở tuổi 28 ngày được tổng hợp ở Bảng 3.10. Giá trị tải trọng phá hoại P_{max} được biểu diễn ở Hình 3.18a và giá trị cường độ chịu nén f_c' được biểu diễn ở Hình 3.18b. Kết quả cho thấy với cùng một hình dạng mẫu, khi kích thước của mẫu thí nghiệm tăng thì P_{max} tăng nhưng f_c' giảm, đây được gọi là hiện tượng hiệu ứng kích thước thường xảy ra trong vật liệu giòn hoặc nửa giòn (quasi_brittle).

Bảng 3.10: Cường độ nén độ chịu nén của bê tông xỉ thép ở tuổi 28 ngày

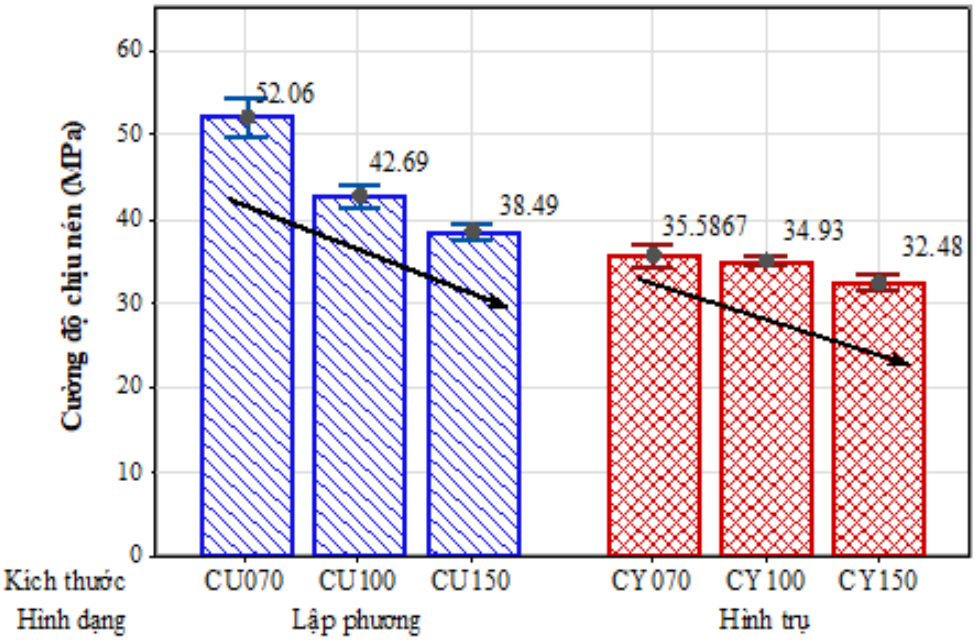
Hình dạng mẫu	Kích thước tổ mẫu	Ký hiệu tổ mẫu	Tải trọng phá hoại, P_{max} (kN)	Cường độ f_c' (MPa)
Hình lập phương	70.7×70.7×70.7 (CU070)	CU070_01	268.52	53.72
		CU070_02	245.18	49.05
		CU070_03	259.82	51.98
		CU070_04	253.02	50.62
		CU070_05	253.02	53.68
		CU070_06	268.32	50.15
		CU070_07	250.67	54.14
		CU070_08	270.62	57.45
		CU070_09	287.16	47.75
		Trung bình	261.82	52.06
		Độ lệch chuẩn	12.32	2.83
Hình lập phương	100×100×100 (CU070)	CU100_01	437.40	43.74
		CU100_02	425.00	42.50
		CU100_03	413.10	41.31
		CU100_04	432.80	43.28
		CU100_05	432.00	43.20
		CU100_06	426.60	42.66
		CU100_07	415.60	41.56
		CU100_08	462.60	46.26
		CU100_09	397.00	39.70
		Trung bình	426.90	42.69
		Độ lệch chuẩn	17.20	1.72
Hình lập phương	150×150×150 (CU150)	CU150_01	854.33	37.97
		CU150_02	854.33	37.97
		CU150_03	867.15	38.54
		CU150_04	883.13	39.25

Hình dạng mẫu	Kích thước tổ mẫu	Ký hiệu tổ mẫu	Tải trọng phá hoại, P_{max} (kN)	Cường độ f_c' (MPa)
		CU150_05	857.03	38.09
		CU150_06	901.58	40.07
		CU150_07	860.63	38.25
		CU150_08	905.63	40.25
		CU150_09	810.45	36.02
		Trung bình	866.03	38.49
		Độ lệch chuẩn	27.08	1.20
Hình trụ	Ø70×140 (CY70)	CY70_01	131.12	34.07
		CY70_02	136.70	35.52
		CY70_03	146.05	37.95
		CY70_04	135.93	35.32
		CY70_05	138.97	36.11
		CY70_06	142.89	37.13
		CY70_07	135.04	35.09
		CY70_08	141.01	36.64
		CY70_09	124.88	32.45
		Trung bình	136.95	35.59
		Độ lệch chuẩn	5.99	1.56
Hình trụ	Ø100×200 (CY100)	CY100_01	273.95	34.88
		CY100_02	266.49	33.93
		CY100_03	282.66	35.99
		CY100_04	273.55	34.83
		CY100_05	269.94	34.37
		CY100_06	268.06	34.13
		CY100_07	280.86	35.76
		CY100_08	275.44	35.07
		CY100_09	278.11	35.41
		Trung bình	274.34	34.93
		Độ lệch chuẩn	5.25	0.67
Hình trụ	Ø150×300 (CY150)	CY150_01	553.65	31.33
		CY150_02	571.67	32.35
		CY150_03	584.93	33.10
		CY150_04	564.43	31.94
		CY150_05	575.74	32.58
		CY150_06	569.37	32.22
		CY150_07	599.42	33.92

Hình dạng mẫu	Kích thước tổ mẫu	Ký hiệu tổ mẫu	Tải trọng phá hoại, P_{max} (kN)	Cường độ f_c' (MPa)
		CY150_08	601.89	34.06
		CY150_09	544.63	30.82
		Trung bình	573.97	32.48
		Độ lệch chuẩn	18.08	1.02



(a) Tải trọng phá hoại



(b) Cường độ chịu nén

Hình 3.18: Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và kích thước, hình dạng của mẫu

Công thức (3.6) có thể viết lại dưới dạng phương trình tuyến tính $y = ax + b$ như công thức (3.7):

$$\left(\frac{1}{\sigma_N}\right)^2 = \frac{1}{(B.f_t)^2 D_o} D + \frac{1}{(B.f_t)^2} \tag{3.7}$$

Trong đó, $y = (1/\sigma_N)^2 = (1/\mathrm{f}_c')^2$, $x = D$, $a = 1/[(B.f_t)^2 D_o]$.

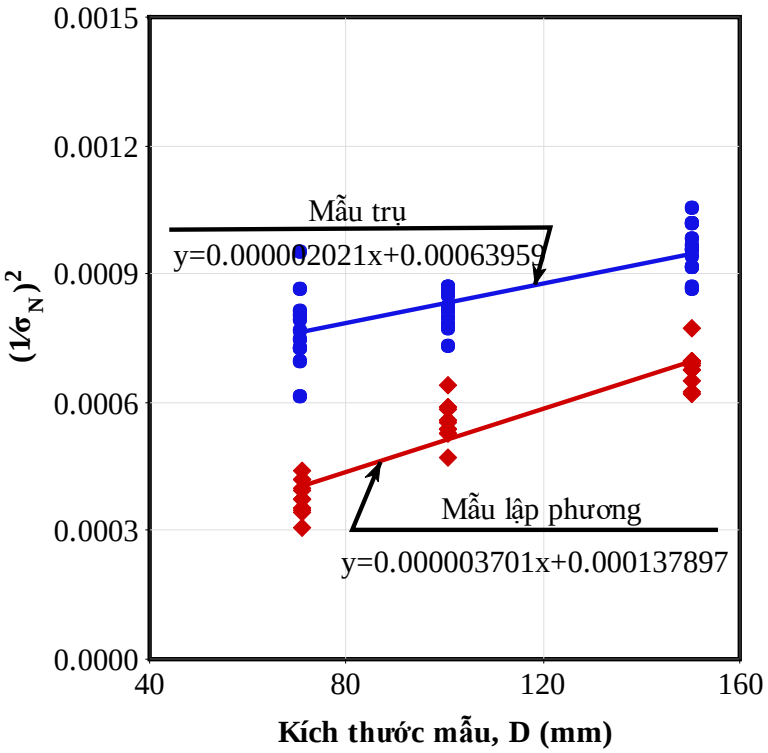
Áp dụng phương pháp bình phương tối thiểu cho 27 tổ mẫu lập phương và 27 tổ mẫu hình trụ, các hàm tuyến tính được thể hiện ở công thức (3.8):

$$\begin{cases} Lập\ phương: & y = 0.000003701x + 0.000137897 \\ Hình\ trụ: & y = 0.000002021x + 0.00063959 \end{cases} \tag{3.8}$$

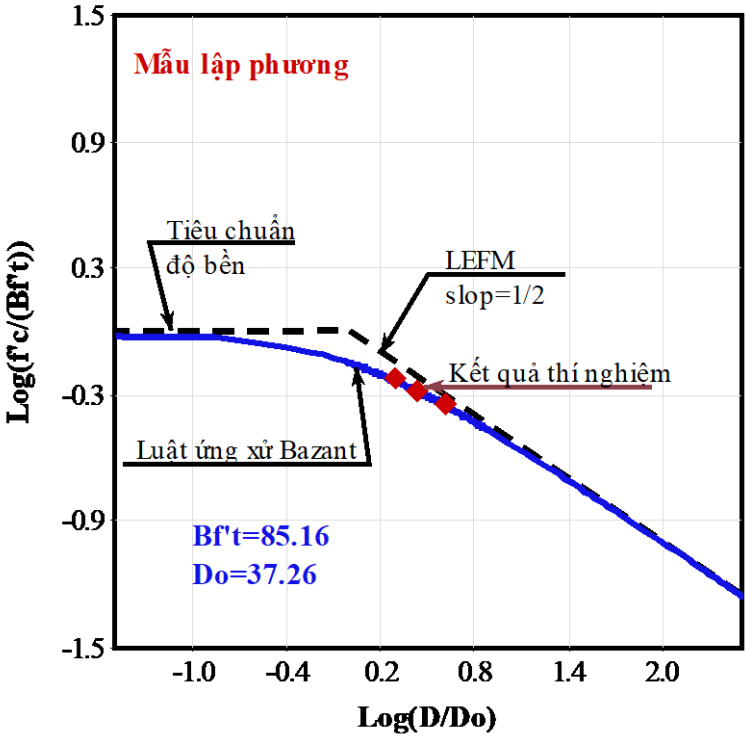
Công thức (3.9) biểu diễn luật hiệu ứng kích thước Bazant dùng cho bê tông xỉ thép với $D_o = 37.26$mm với mẫu hình lập phương và $D_o = 316.43$mm với mẫu hình trụ.

$$\begin{cases} Lập\ phương: & f_c' = 85.16\left(1 + \dfrac{D}{37.26}\right)^{-1/2} \\ Hình\ trụ: & f_c' = 39.54\left(1 + \dfrac{D}{316.43}\right)^{-1/2} \end{cases} \tag{3.9}$$

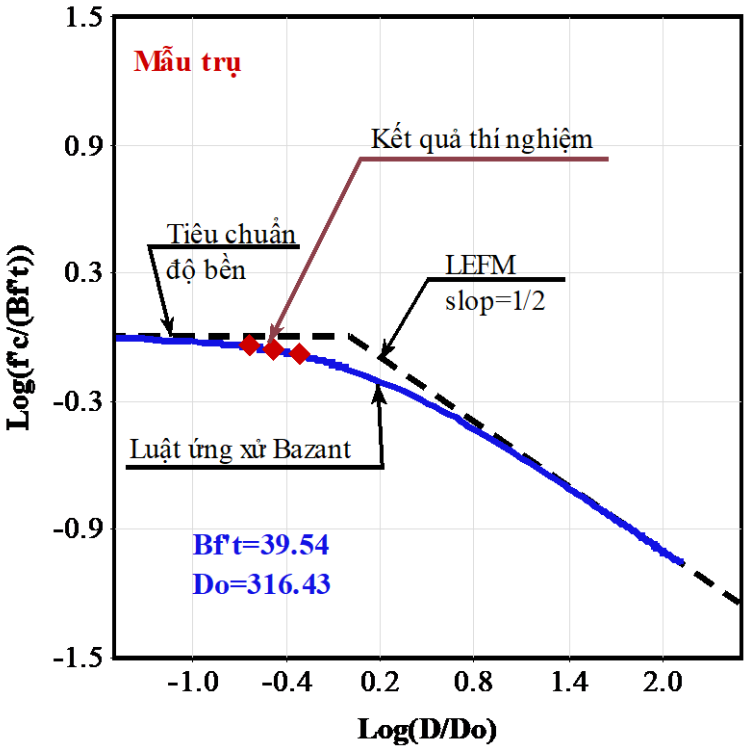
Do mẫu lập phương cho D_o nhỏ hơn, nên ảnh hưởng của kích thước lên cường độ nén đối với mẫu hình lập phương lớn mẫu hình trụ. Việc xác định thông số D_o và đồ thị về quy luật hiệu ứng kích thước cho bê tông xỉ thép được trình bày ở Hình 3.19 cho thấy khi kích thước mẫu tăng khoảng 2 lần thì cường độ nén của bê tông giảm khoảng 1.35 lần đối với mẫu lập phương và 1.19 lần đối với mẫu hình trụ. Các kết quả thực nghiệm của mẫu hình lập phương có xu hướng tăng về phía ứng xử nứt đàn hồi tuyến tính LEFM hơn đường tiêu chuẩn độ bền, cường độ nén có xu hướng giảm nhiều hơn khi kích thước mẫu tăng lên, mẫu lập phương thể hiện tính giòn rõ ràng hơn tính dẻo, trong khi đó mẫu trụ cho kết quả thực nghiệm có xu hướng tiệm cận với tiêu chuẩn độ bền, do đó cường độ có xu hướng giảm chậm hơn mẫu lập phương khi tăng kích thước mẫu, mẫu trụ cũng thể hiện tính dẻo rõ ràng hơn tính giòn.



(a) Xác định thông số vật liệu của luật hiệu ứng kích thước Bazant



(b) Luật hiệu ứng kích thước Bazant cho mẫu lập phương



(c) Luật hiệu ứng kích thước Bazant cho mẫu trụ

Hình 3.19: Áp dụng luật hiệu ứng kích thước Bazant cho bê tông xỉ thép

3.2.3.2. *Thiết lập hệ số chuyển đổi cường độ*

Để so sánh cường độ nén của các mẫu thí nghiệm có kích thước và hình dáng khác nhau thì việc quy đổi giá trị cường độ của các mẫu đó về mẫu có kích thước chuẩn là cần thiết. Trong thực tế, TCVN 3118-93 [101], tiêu chuẩn ACI 318-14 [46] có cung cấp các hệ số này cho bê tông truyền thống. Từ kết quả thực nghiệm ở Bảng 3.10, sử dụng mẫu lập phương có cạnh 150mm làm mẫu chuẩn, các hệ số chuyển đổi (λ) của bê tông xỉ thép được xác định bởi công thức (3.10). Kết quả trong Bảng 3.11 cho phép so sánh hệ số chuyển đổi của bê tông truyền thống và bê tông xỉ thép. Các hệ số của bê tông xỉ thép có phần nhỏ hơn so với bê tông truyền thống, nhưng sự khác biệt giữa chúng là tương đối nhỏ.

$$\lambda = \sigma_{cu}^{CU150} / \sigma_{cu}^{CSpe.type} \quad (3.10)$$

Trong đó: σ_{cu}^{CU150} là cường độ chịu nén của mẫu lập phương có cạnh 150mm, được xem là mẫu có kích thước và hình dạng chuẩn, $\sigma_{cu}^{CSpe.type}$ là cường độ chịu nén của mẫu có hình dạng và kích thước khác chuẩn

Bảng 3.11. Hệ số chuyển đổi cường độ nén của mẫu bê tông có kích thước không chuẩn về mẫu có kích thước chuẩn 150x150x150mm

Loại bê tông	Mẫu chuẩn	Hệ số chuyển đội, $\lambda = \sigma_{cu}^{CU150}/\sigma_{cu}^{CSpe.type}$					
		CU070	CU100	CU150	CY70	CY100	CY150
Bê tông xỉ thép (XT02)	150x150x150mm	0.74	0.90	1.00	0.99	1.08	1.18
Bê tông truyền thống [46]	150x150x150mm	0.85	0.91	1.00	1.16	1.17	1.20

3.2.4. Ảnh hưởng của tỷ lệ nước trên xi măng đến cường độ bê tông

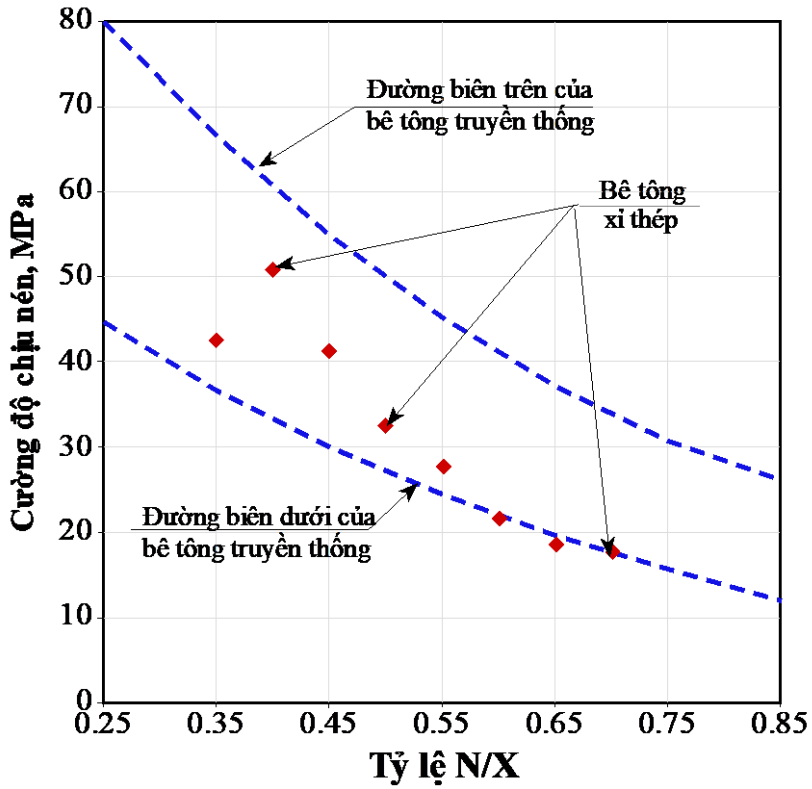
Tỷ lệ nước trên xi măng (N/X) có ảnh hưởng lớn đến cường độ của bê tông. Khi lượng nước quá nhiều tức tỷ lệ N/X quá lớn, sau khi thủy hóa lượng nước tự do tồn tại nhiều khi bay hơi sẽ để lại nhiều lỗ rỗng trong đá xi măng làm cường độ của đá xi măng giảm, nên cường độ bê tông cũng giảm. Ngược lại, khi lượng nước dùng quá ít, tức tỷ lệ N/X quá nhỏ thì không đủ nước để xi măng thuỷ hoá hoàn toàn nên cường độ đá xi măng giảm, nên cường độ bê tông cũng giảm. Nghiên cứu này sử dụng cấp phối XT02, giữ nguyên lượng xi măng, trong khi đó lượng nước dùng được thay đổi sao cho tỷ lệ N/X tăng từ 0.35 đến 0.7 nhằm khảo sát sự ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến cường độ chịu nén của BTXT. Kết quả thí nghiệm ở 28 ngày tuổi, với mẫu thí nghiệm có kích thước 100x100x100 mm được thể hiện Bảng 3.12.

Bảng 3.12: Cường độ chịu nén của bê tông xỉ thép ở 28 ngày tuổi khi tỷ lệ N/X thay đổi

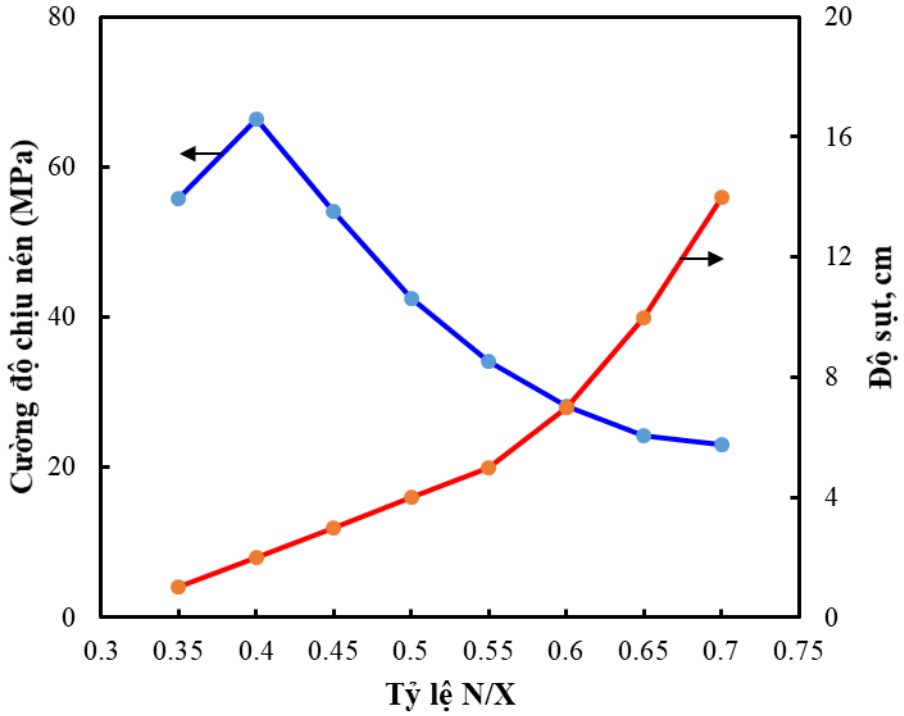
Tỷ lệ N/X	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Độ sụt (cm)	1	2	3	4	5	7	10	14
Cường độ chịu nén (MPa) mẫu 100x100x100 mm	55.81	66.45	54.10	42.52	36.32	28.11	24.27	23.08
Cường độ chịu nén (MPa) quy đổi về 150x300 mm	42.57	50.68	41.26	32.43	27.70	21.44	18.51	17.60

Hình 3.20 và Hình 3.21 trình bày ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến độ sụt và cường độ nén của bê tông xỉ thép ở tuổi 28 ngày. Kết quả thể hiện xu hướng chung tương tự như bê tông truyền thống là khi tỷ lệ N/X giảm thì độ sụt giảm và cường độ nén tăng. Tuy nhiên, cường độ nén tăng khi tỷ lệ N/X giảm từ 0.7 đến 0.4, khi tỷ lệ N/X nhỏ

hơn 0.4, cường độ có xu hướng giảm (nguyên nhân do tính công tác không đảm bảo để thi công, khó đầm nén). Khi so sánh mối quan hệ giữa cường độ nén với tỷ lệ N/X của bê tông xỉ thép với bê tông truyền thống, sử dụng vùng giới hạn được nghiên cứu bởi Kosmatka và cộng sự [105] được biểu diễn ở Hình 3.20. Vùng giới hạn này được xây dựng từ các mẫu bê tông hình trụ 150x300 mm, nên cường độ nén của mẫu bê tông xỉ thép 100x100x100 mm được chuyển sang mẫu trụ 150x300 mm theo hệ số đề xuất ở Bảng 3.11 và biểu diễn trên Hình 3.20. Hai nhóm mẫu bê tông với tỷ lệ N/X lần lượt là 0.6 và 0.65 có cường độ nén nằm sát biên dưới, và các nhóm mẫu còn lại có cường độ nén nằm giữa 2 đường giới hạn. Điều này chứng tỏ rằng, mối quan hệ giữa tỷ lệ X/N và cường độ nén của bê tông xỉ thép và bê tông truyền thống gần giống nhau.



Hình 3.20: Quan hệ giữa cường độ chịu nén và tỷ lệ X/N của BTXT và bê tông truyền thống, sử dụng mẫu trụ 150x300 mm [105]



Hình 3.21: Ảnh hưởng của tỷ lệ X/N lên độ sụt và cường độ nén của bê tông xỉ thép ở tuổi 28 ngày, mẫu 100x100x100 mm

3.3. Ứng xử kéo của bê tông xỉ thép

3.3.1. Cường độ chịu kéo trực tiếp và gián tiếp của bê tông

Để xác định cường độ chịu kéo có 3 phương pháp: phương pháp kéo dọc trục (kéo trực tiếp), phương pháp xác định cường độ chịu kéo thông qua thí nghiệm uốn, phương pháp xác định cường độ chịu kéo thông qua thí nghiệm ép chẻ. Thí nghiệm kéo trực tiếp thường sử dụng cho vật liệu thép, hiếm khi được sử dụng cho bê tông vì độ giòn của bê tông thường tạo ra hư hỏng cục bộ ở hai đầu của mẫu thử. Do đó, các thí nghiệm kéo gián tiếp bao gồm thí nghiệm kéo khi uốn và thí nghiệm ép chẻ phù hợp với bê tông.

Hình 3.22 mô tả sự phân bố ứng suất khác nhau trên mặt cắt ngang của mẫu thí nghiệm kéo trực tiếp và gián tiếp. Trong đó, thí nghiệm kéo gián tiếp có cả hai thành phần ứng suất nén và ứng suất kéo phân bố trên mặt cắt ngang [124], trong khi thí nghiệm kéo trực tiếp chỉ có ứng suất kéo. Với sự hỗ trợ của giai đoạn nén, cường độ kéo gián tiếp sẽ cao hơn cường độ kéo trực tiếp [125]. Tham khảo ACI-318-14 [46], cường độ kéo trực tiếp (f_o), cường độ kéo khi uốn (f_{FLX}) và cường độ kéo khi ép chẻ

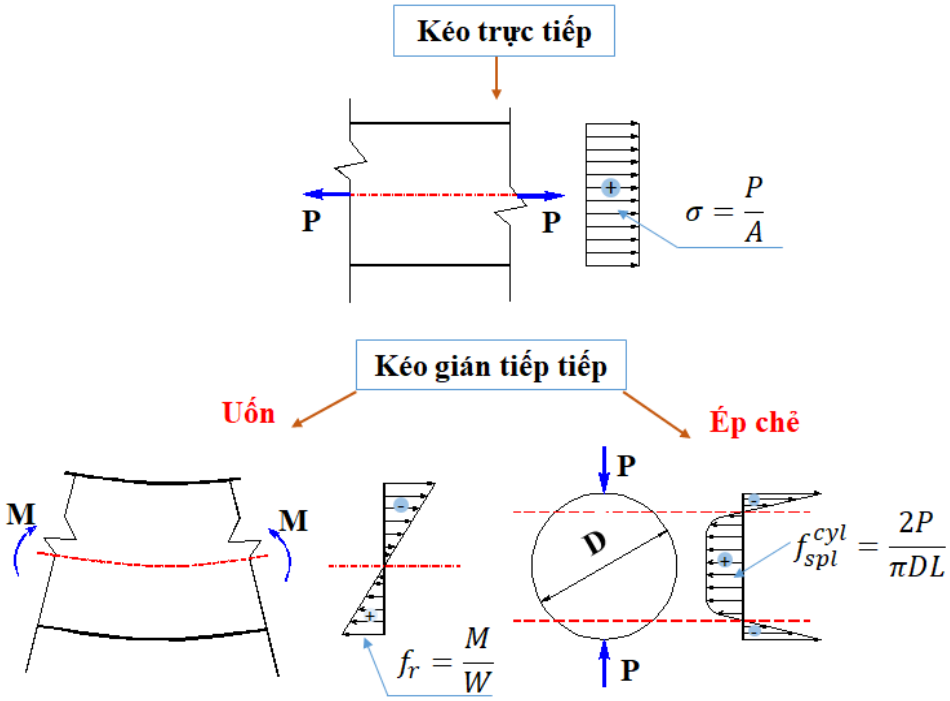
(f_{SPL}) có mối tương quan với độ bền nén (f_c') theo thang căn bậc hai, được đưa ra tương ứng bởi công thức (3.11), (3.12) và (3.13).

$$f_o = K_o\sqrt{f_c'} \quad (3.11)$$

$$f_{FLX} = K_{FLX}\sqrt{f_c'} \quad (3.12)$$

$$f_{SPL} = K_{SPL}\sqrt{f_c'} \quad (3.13)$$

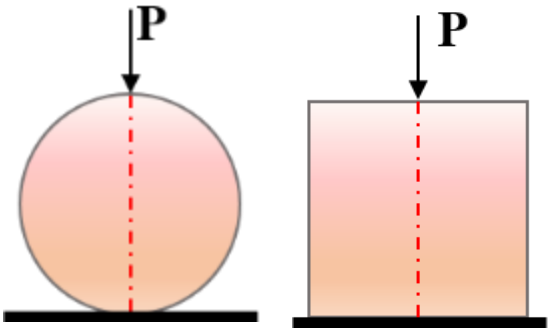
Đối với bê tông truyền thống, các hệ số trong công thức trên có quan hệ như sau: K_o= 0.33 <K_{SPL}= 0.56 <K_{FLX}= 0.62 [46].



Hình 3.22: Sự phân bố ứng suất khác nhau giữa kéo trực tiếp và kéo gián tiếp

3.3.2. Cường độ chịu kéo khi ép chẻ

Phương pháp đơn giản và đáng tin cậy nhất trong thí nghiệm kéo khi ép chẻ là sử dụng mẫu hình trụ, thí nghiệm này có có hệ số biến thiên thấp [126, 127]. Tuy nhiên, mẫu lập phương cũng có thể dùng trong thí nghiệm kéo khi ép chẻ của bê tông [103]. Trong đề tài này, cả hai phương pháp đều được thực hiện để so sánh, đánh giá.



Mẫu trụ Mẫu lập phương

Hình 3.23: Hai phương pháp thí nghiệm kéo khi ép chẻ mẫu bê tông

Hình 3.23 đã mô tả 2 cách thí nghiệm với 2 loại mẫu: hình trụ và hình lập phương. Khi lực nén (P) đạt đến trị số tối đa, mẫu thử sẽ bị phá hủy theo mặt phẳng thẳng đứng do ứng suất kéo phát sinh (vuông góc với lực P) vượt quá khả năng chịu kéo của vật liệu mẫu thử. Công thức (3.14) dùng để tính cường độ chịu kéo khi ép chẻ cho mẫu hình trụ (f_{SPL}^{cyl}) [124] và công thức (3.15) do Zhang và các đồng nghiệp [103] đề xuất dùng để tính cường độ chịu kéo khi ép chẻ cạnh mẫu lập phương (f_{SPL}^{sid}).

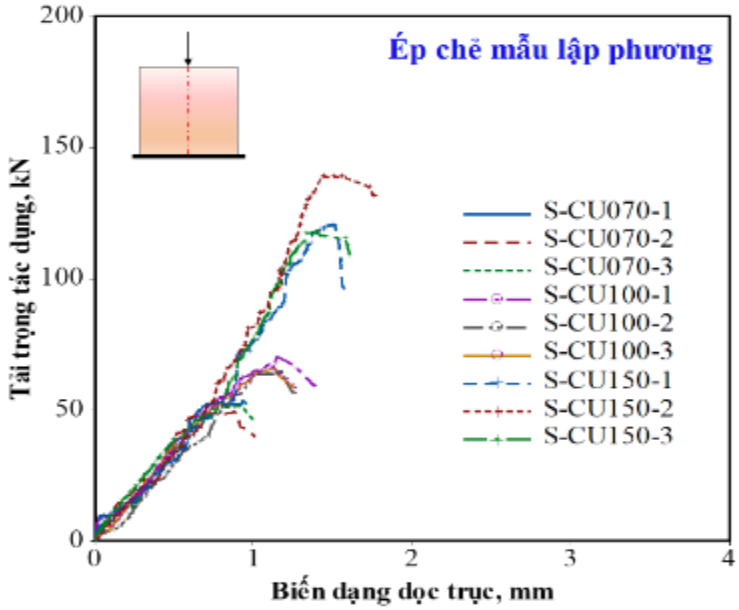
$$f_{SPL}^{cyl} = \frac{2P_{max}}{\pi DL} = 0.6366\frac{P_{max}}{DL} \quad (3.14)$$

$$f_{SPL}^{sid} = 0.73\frac{2P_{max}}{\pi DL} = 0.4647\frac{P_{max}}{D^2} \quad (3.15)$$

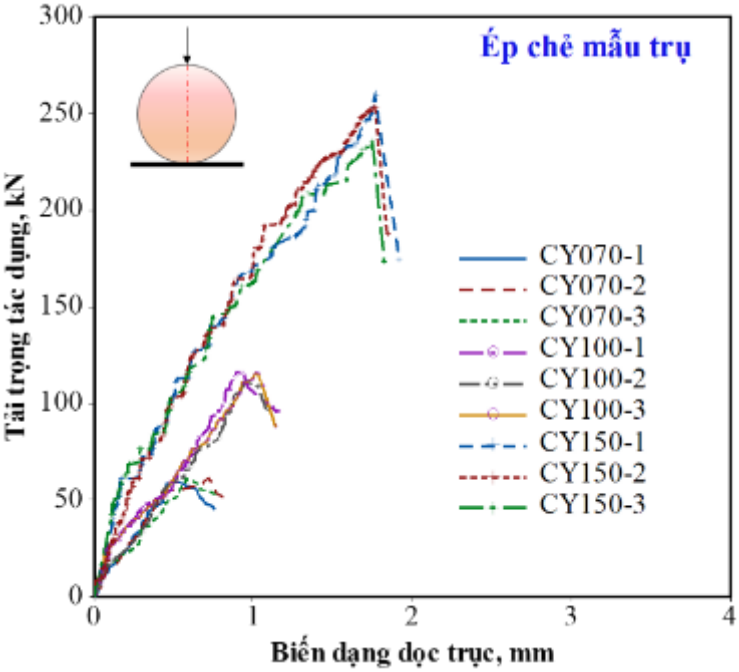
Trong đó, P là tải trọng tác dụng lớn nhất, D là đường kính của mẫu hình trụ hoặc cạnh của mẫu hình lập phương, L là chiều cao của mẫu hình trụ.

3.3.2.1. *Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng mẫu thử đến cường độ kéo của BTXT khi bị ép chẻ*

Hình 3.24a và Hình 3.24b biểu diễn đường cong quan hệ giữa tải trọng phá hoại và biến dạng tại đỉnh của các mẫu lập phương và mẫu hình trụ. Với các mẫu có kích thước lớn hơn cho thấy tải trọng phá hoại và độ cứng cao hơn thể hiện thông qua độ dốc của đường cong. Trong đó, các mẫu hình lập phương có sự chênh lệch về độ cứng nhỏ hơn, các mẫu hình trụ lại có sự chênh lệch về độ cứng lớn hơn.



(a) Mẫu lập phương



(b) Mẫu trụ

Hình 3.24: Quan hệ giữa tải trọng tác dụng và biến dạng dọc trục khi ép chẻ

Kết quả thí nghiệm về tải trọng phá hoại, cường độ chịu kéo khi ép chẻ được cung cấp ở Bảng 3.13. Hình 3.25a hiển thị ảnh hưởng của kích thước mẫu thử lên tải trọng đỉnh (tải trọng lớn nhất làm phá hoại mẫu) trong khi Hình 3.25b cho thấy ảnh hưởng của kích thước và hình dạng mẫu thử đối với cường độ chịu kéo khi ép chẻ được xác định từ công thức (3.14) và (3.15). Kết quả cho thấy các mẫu thử có kích

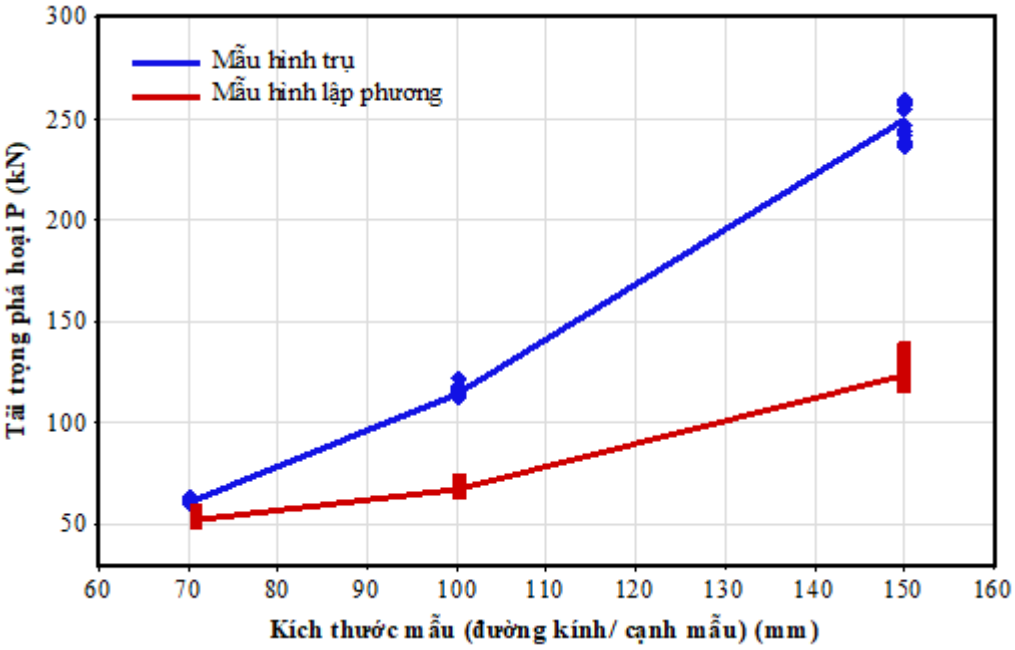
thước lớn hơn thì cường độ chịu kéo thấp hơn mặc dù tải trọng đỉnh cao hơn. Cường độ của mẫu lập phương bị suy giảm nhiều hơn so với mẫu hình trụ khi kích thước tăng lên. Hình 3.26 mô tả các vết nứt điển hình của các mẫu thử bị phá hủy sau khi ép chẻ. Các vết nứt vỡ lan truyền theo phương thẳng đứng dọc theo tải trọng tác dụng, bất kể hình dáng và kích thước mẫu.

Bảng 3.13: Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ

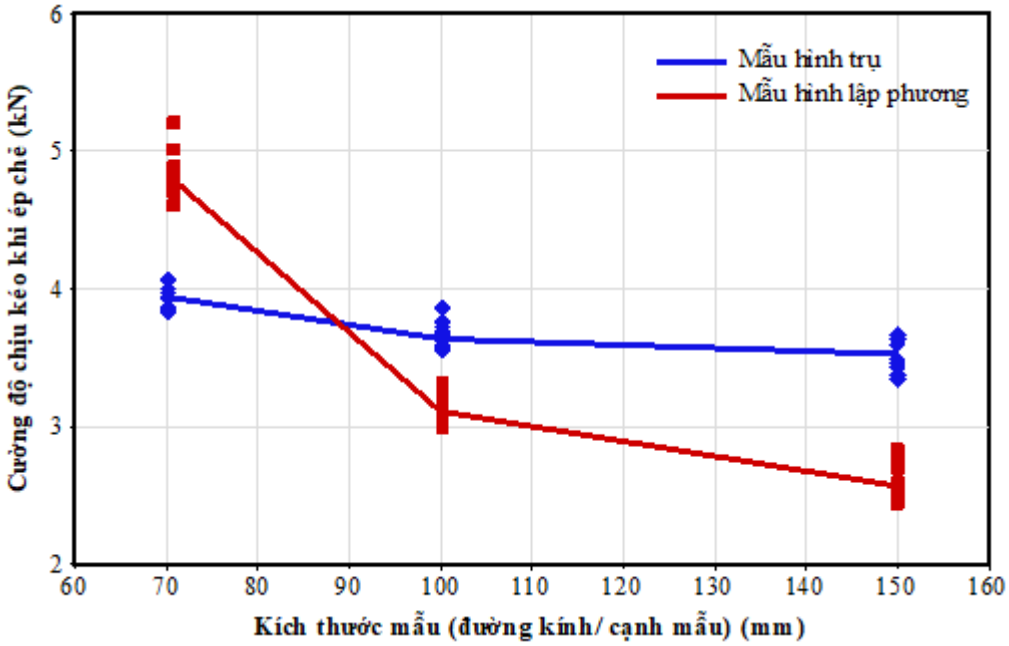
Kích thước mẫu	Ký hiệu mẫu	Tải trọng phá hoại, P_{max} (kN)	Cường độ kéo khi ép chẻ f_{SPL} (MPa)
70.7×70.7×70.7 (S-CU070	S-CU070-1	53.89	5.01
	S-CU070-2	49.48	4.60
	S-CU070-3	51.63	4.80
	S-CU070-4	50.77	4.72
	S-CU070-5	50.77	4.81
	S-CU070-6	51.74	5.21
	S-CU070-7	56.04	4.89
	S-CU070-8	52.60	4.73
	S-CU070-9	50.88	4.70
	Trung bình	51.98	4.83
	Độ lệch chuẩn	1.86	0.17
100×100×100 (S-CU100)	S-CU100-1	70.15	3.26
	S-CU100-2	64.34	2.99
	S-CU100-3	66.49	3.09
	S-CU100-4	64.77	3.01
	S-CU100-5	68.00	3.16
	S-CU100-6	67.14	3.12
	S-CU100-7	66.92	3.11
	S-CU100-8	69.08	3.21
	S-CU100-9	71.23	3.31
	Trung bình	67.57	3.14
	Độ lệch chuẩn	2.17	0.10
150×150×150 (S-CU150)	S-CU150-1	120.56	2.49
	S-CU150-2	120.56	2.49
	S-CU150-3	117.66	2.43
	S-CU150-4	124.92	2.58
	S-CU150-5	120.08	2.48
	S-CU150-6	136.54	2.82

Kích thước mẫu	Ký hiệu mẫu	Tải trọng phá hoại, P_{max} (kN)	Cường độ kéo khi ép chẻ f_{SPL} (MPa)
	S-CU150-7	121.05	2.50
	S-CU150-8	132.18	2.73
	S-CU150-9	129.76	2.68
	Trung bình	124.81	2.58
	Độ lệch chuẩn	6.15	0.13
Ø70×140 (CY070)	CY070-1	59.27	3.85
	CY070-2	61.42	3.99
	CY070-3	61.12	3.97
	CY070-4	59.42	3.86
	CY070-5	62.50	4.06
	CY070-6	59.42	3.86
	CY070-7	60.35	3.92
	CY070-8	60.65	3.94
	CY070-9	58.96	3.83
	Trung bình	60.35	3.92
	Độ lệch chuẩn	1.12	0.07
Ø100×200 (CY100)	CY100-1	116.56	3.71
	CY100-2	111.53	3.55
	CY100-3	115.61	3.68
	CY100-4	117.81	3.75
	CY100-5	112.47	3.58
	CY100-6	115.30	3.67
	CY100-7	114.99	3.66
	CY100-8	114.99	3.66
	CY100-9	121.27	3.86
	Trung bình	115.61	3.68
	Độ lệch chuẩn	2.69	0.09
Ø150×300 (CY150)	CY150-1	258.72	3.66
	CY150-2	253.77	3.59
	CY150-3	236.10	3.34
	CY150-4	241.75	3.42
	CY150-5	243.87	3.45
	CY150-6	258.72	3.66
	CY150-7	256.60	3.63
	CY150-8	245.99	3.48
	CY150-9	237.51	3.36

Kích thước mẫu	Ký hiệu mẫu	Tải trọng phá hoại, P_{max} (kN)	Cường độ kéo khi ép chẻ f_{SPL} (MPa)
	Trung bình	248.11	3.51
	Độ lệch chuẩn	8.49	0.12

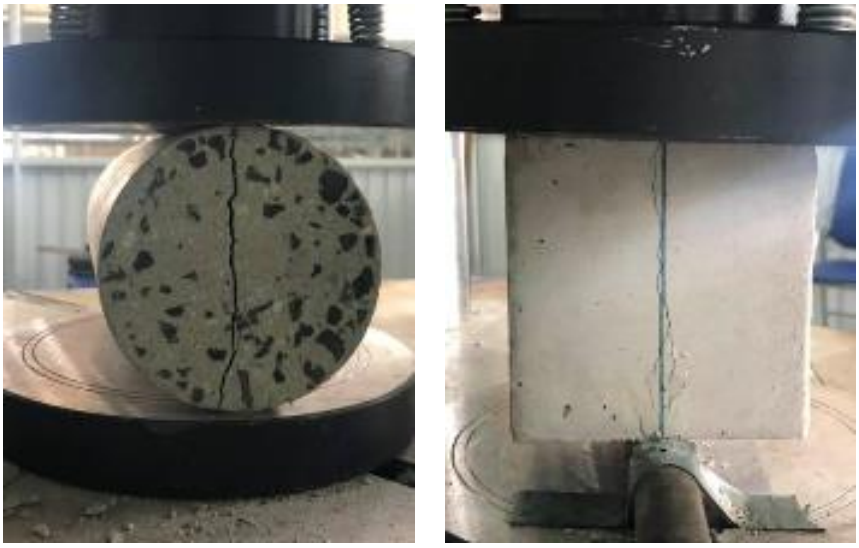


(a) Lực phá hoại lớn nhất



(b) Cường độ

Hình 3.25: Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng mẫu lên cường độ chịu kéo khi ép chẻ



(a) Mẫu trụ *(b) Mẫu lập phương*

Hình 3.26: Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi ép chẻ

3.3.2.2. *Thiết lập hệ số chuyển đổi*

Phân tích ở trên cho thấy sự ảnh hưởng của kích thước mẫu lên cường độ chịu kéo khi ép chẻ là đáng kể, do đó cần phải có một mẫu chuẩn và một hệ số để chuyển đổi các mẫu có kích thước không chuẩn về kích thước chuẩn. Trong nghiên cứu này, với mẫu trụ dùng mẫu CY150 làm mẫu chuẩn, với mẫu lập phương dùng mẫu S-CU150 làm mẫu chuẩn, cường độ chịu kéo của các mẫu khác chuẩn sẽ được quy đổi về mẫu chuẩn bằng cách sử dụng hệ số chuyển đổi (χ) được ra bởi công thức (3.16). Bảng 3.14 trình bày hệ số chuyển đổi của cường độ chịu kéo khi ép chẻ với mẫu chuẩn là CY150 và S-CU150 và hệ số chuyển đổi cường độ ép chẻ của bê tông xi măng theo nghiên cứu của Kadlecek và cộng sự [128]. Nhìn chung, các hệ số của bê tông xỉ thép chênh lêch không đáng kể so với hệ số chuyển đổi của bê tông xi măng.

$$\chi = f_{SPL}^{150} / f_{SPL}^{Spe.type} \quad (3.16)$$

Trong đó, f_{SPL}^{150} là cường độ kéo khi ép chẻ của bê tông xỉ thép với mẫu trụ đường kính 150mm hoặc mẫu lập phương cạnh 150mm, $f_{SPL}^{Spe.type}$ là cường độ kéo khí ép chẻ của mẫu có kích thước và hình dạng khác CY150 (với mẫu trụ) hoặc S-CU150 (với mẫu lập phương)

Bảng 3.14: Hệ số chuyển đổi cường độ kéo khi ép chẻ có kích thước khác chuẩn về về mẫu chuẩn (hình trụ: 150x300 mm; hình lập phương: 150x150x150mm)

Ký hiệu mẫu	Mẫu chuẩn	Hệ số chuyển đổi, χ	
		Kết quả đề tài	Kadlecek và cộng sự [128]
S-CU070	150x150x150mm	0.54	0.62
S-CU100		0.82	0.9
S-CU150		1	1
CY070	150x300mm	0.9	0.87
CY100		0.95	0.91
CY150		1	1

Theo tiêu chuẩn ACI 318-14 [46], cường độ ép chẻ của bê tông truyền thống có quan hệ với cường độ nén được trình bày ở công thức (3.13), hệ số quy đổi được kiến nghị cho bê tông truyền thống là K_{SPL}=0.56. (cả hai giá trị f_{SPL} và f_c' trong công thức (3.13) đều được xác định với mẫu trụ 150x300 mm ở 28 ngày tuổi). Đối với bê tông xỉ thép dùng cấp phối XT02, f_{SPL} =3.51MPa và f_c' =36.68MPa, do đó K_{SPL}=0.61 có giá trị xấp xỉ so với bê tông truyền thống. Tuy nhiên, để có thể khẳng định được thì cần phải nghiên cứu thêm nhiều loại cấp phối bê tông xỉ thép với số lượng lớn các mẫu thí nghiệm.

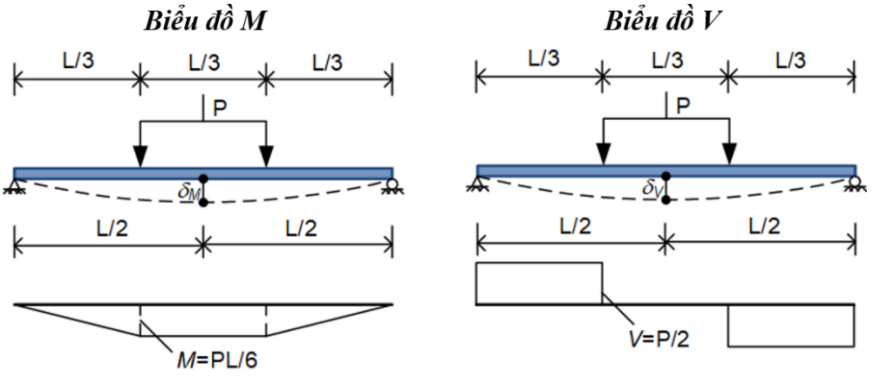
3.3.3. Cường độ kéo khi uốn

Với sơ đồ dầm có 2 lực tập trung tác dụng ở giữa (uốn 4 điểm_4PBT) theo ASTM D6272 [129]. Biểu đồ mô men và lực cắt của các sơ đồ này được trình bày trong Hình 3.27. Quan hệ giữa tải trọng và độ võng được trình bày ở Hình 3.28, trong đó mô tả quá trình phát triển các giai đoạn ứng xử của bê tông từ lúc bắt đầu chịu tải cho đến khi bị phá hoại hoàn toàn. Điểm giới hạn đàn hồi (LOP), là điểm mà tại đó xuất hiện vết nứt đầu tiên, nghĩa là giai đoạn từ điểm O đến điểm LOP, quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị là tuyến tính. Độ bền uốn tại LOP (f_{LOP}) được xác định bởi công thức (3.17) cho sơ đồ 4PBT. Bên cạnh đó, G_{LOP} biểu thị khả năng hấp thụ năng lượng của dầm khi chịu tác dụng của tải trọng tăng dần kèm theo sự thay đổi độ võng tương ứng từ 0 đến δ_{LOP}, được xác định bằng phần diện tích bên dưới đường cong thông qua công thức (3.18).

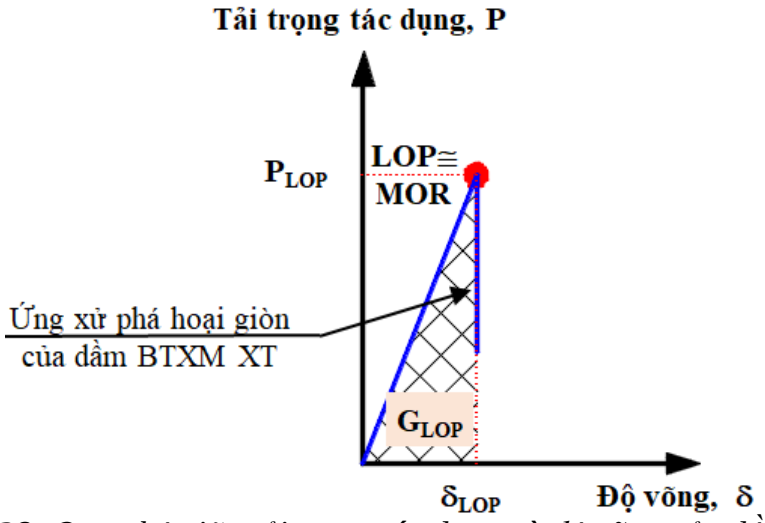
$$f_{\text{LOP}}^{\text{4PBT}} = \frac{M_{LOP}}{S} = \frac{P_{LOP}.L_{span}}{bh^2} \quad (3.17)$$

$$G_{LOP} = \int_{\delta=0}^{\delta=\delta_{LOP}} P(\delta)d\delta \quad (3.18)$$

Trong đó: L_{span}, b và h lần lượt là chiều dài nhịp, chiều rộng và chiều cao của mẫu thử uốn. P là tải tập trung tác dụng lên mẫu uốn.



Hình 3.27: Biểu đồ Moment và lực cắt của sơ đồ uốn 4 điểm



Hình 3.28: Quan hệ giữa tải trọng tác dụng và độ võng của dầm BTXT

(a) Vết nứt phá hủy *(b) Bề mặt phá hủy*

Hình 3.29: Vết nứt của dầm bê tông xỉ thép trong sơ đồ uốn 4 điểm

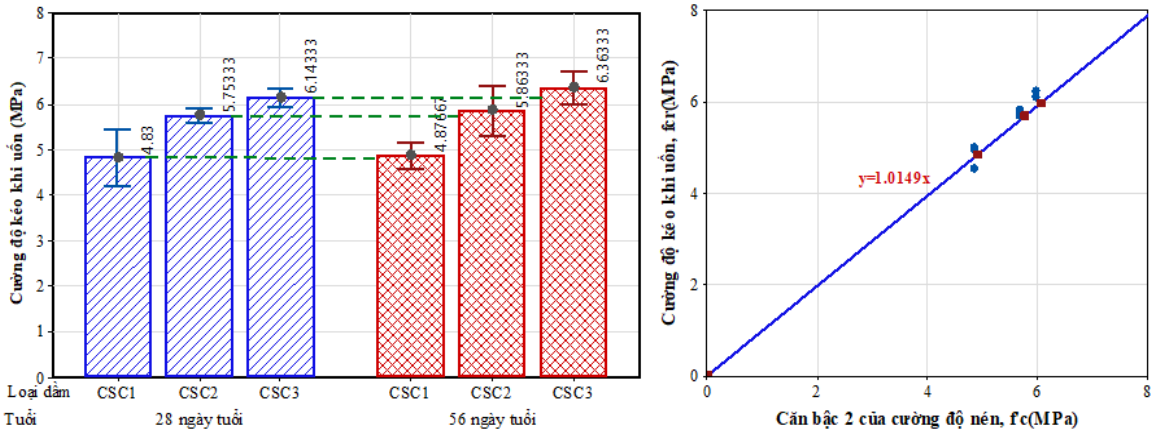
Ứng xử uốn của bê tông xỉ thép được cung cấp trong Hình 3.28 là ứng xử của bê tông khi bị phá hoại giòn. Sau giai đoạn ứng xử tuyến tính, các đường nứt ở phía trong bắt đầu xuất hiện và lan truyền bên trong cấu trúc bê tông, các đường nứt nhỏ bắt đầu tích lũy và tập trung cho đến khi mẫu bị phá hoại. Vết nứt điển hình của bê tông xỉ thép quan sát được mô tả ở Hình 3.29 với sơ đồ uốn 4 điểm, mẫu thử uốn có kích thước 100 x 100 x 300 mm (chiều rộng x chiều cao x chiều dài nhịp). Vết nứt đơn xuất hiện ở tất cả các mẫu thử và vết nứt này có xu hướng vuông góc với trục của dầm. Độ bền uốn f_{cr} (MPa) được tính toán bởi công thức (3.17) và trong trường hợp này $f_{cr} = f_{LOP} = f_{MOR}$ (phá hoại giòn). Kết quả tính toán f_{cr} của 3 dầm bê tông xỉ thép CSC1, CSC2 và CSC3 ở 28 và 56 ngày tuổi được trình bày trong Bảng 3.15.

Bảng 3.15: Độ bền uốn của dầm bê tông xỉ thép ở tuổi 28 và 56 ngày

Loại dầm	Ký hiệu mẫu	Thí nghiệm ở tuổi 28 ngày		Thí nghiệm ở tuổi 56 ngày	
		P_{max}(kN)	f_{cr} (MPa)	P_{max}(kN)	f_{cr} (MPa)
CSC1	Mẫu 1	16.54	4.96	15.96	4.79
	Mẫu 2	16.62	4.99	16.10	4.83
	Mẫu 3	15.13	4.54	16.71	5.01
	Trung bình	16.10	4.83	16.26	4.88
	Độ lệch chuẩn	*0.84*	*0.25*	*0.40*	*0.12*
CSC2	Mẫu 1	19.19	5.76	20.39	6.12
	Mẫu 2	18.93	5.68	19.27	5.78
	Mẫu 3	19.40	5.82	18.98	5.69
	Trung bình	19.17	5.75	19.55	5.86
	Độ lệch chuẩn	*0.23*	*0.07*	*0.74*	*0.22*
CSC3	Mẫu 1	20.33	6.10	21.39	6.42
	Mẫu 2	20.29	6.09	20.67	6.20
	Mẫu 3	20.79	6.24	21.56	6.47
	Trung bình	20.47	6.14	21.21	6.36
	Độ lệch chuẩn	*0.28*	*0.08*	*0.47*	*0.14*

Hình 3.30a cho thấy bê tông xỉ thép ở tuổi 56 ngày có độ bền uốn hơn ở tuổi 28 ngày. Sự gia tăng này hoàn toàn phù hợp với sự gia tăng của cường độ nén (f_c') cho trong Bảng 3.8. Theo ACI 318-14 [46], cường độ uốn của bê tông truyền thống sẽ tỷ lệ với căn bậc hai của cường độ nén, như được trình bày trong công thức (3.12) với hệ số K_{FLX}= 0.62, trong đó hệ số K_{FLX} được áp dụng cho mẫu nén hình trụ có kích

thước 150 × 300 mm (đường kính × chiều cao) và mẫu thử uốn lăng trụ có kích thước 150 × 150 × 450 mm (chiều rộng × chiều cao × chiều dài). Đối với các mẫu bê tông xỉ thép, K_{FLX}= 1,0149 được xác định bằng phương pháp hồi quy tuyến tính (Hình 3.30b), giá trị này cao hơn đáng kể so với giá trị của bê tông truyền thống. Sự khác biệt nhiều của K_{FLX} được cho là do hiệu ứng kích thước, mẫu thí nghiệm uốn trong nghiên cứu này có kích thước 100 × 100 × 300 mm, có thể tạo ra f_{cr} cao hơn so với f_{cr} của mẫu có kích thước 150 × 150 × 450 mm.



(a) f_{cr} ở tuổi 28 và 56 ngày *(b) Quan hệ f_{cr} và $\sqrt{f_c'}$ ở tuổi 28 ngày*

Hình 3.30: Phân tích độ bền uốn của bê tông xỉ thép

3.4. Kết luận Chương 3

Tính chất cơ học của bê tông xỉ thép được nghiên cứu ở hai vấn đề chính: ứng xử nén và ứng xử kéo gián tiếp. Các kết quả cho thấy bê tông xỉ thép có ứng xử gần giống với bê tông truyền thống. Một số kết luận cho Chương 3 bao gồm:

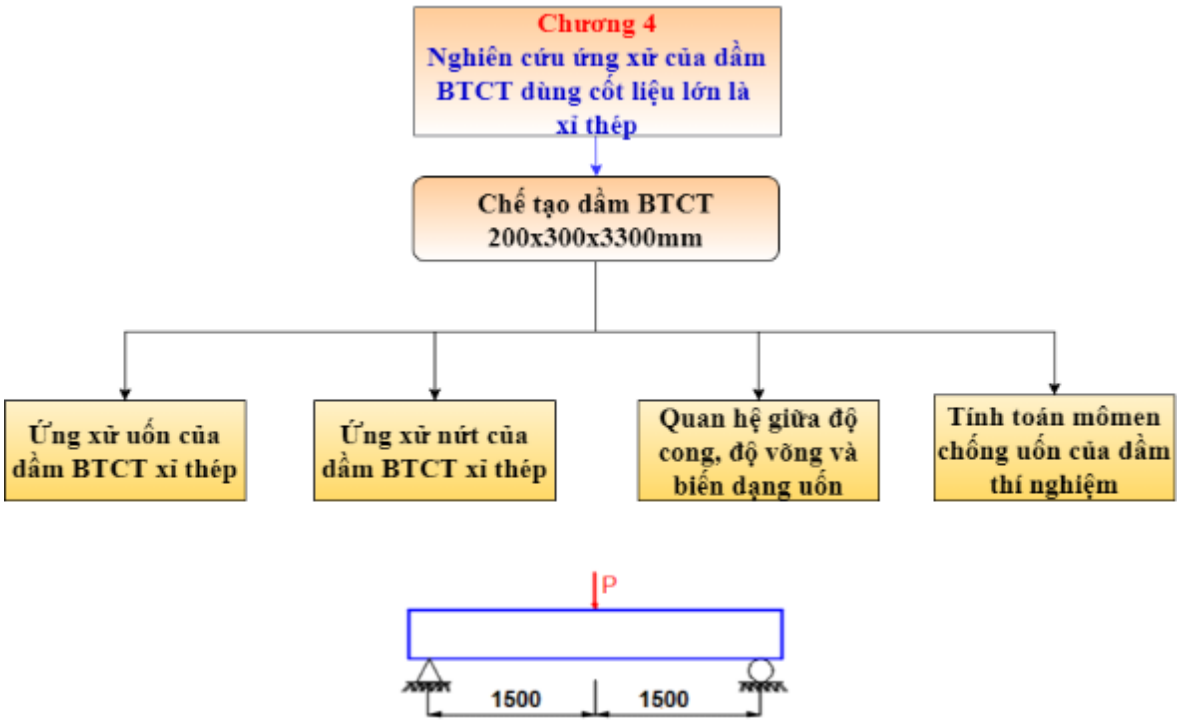
- Sự phá hoại nén của bê tông xỉ thép tương tự bê tông cường độ cao sử dụng cốt liệu là đá tự nhiên, mặt phá hoại của BTXT có xu hướng cắt ngang qua các hạt cốt liệu xỉ thép;
- Bê tông xỉ thép có cường độ chịu nén phát triển rất nhanh trong thời gian 3-7 ngày tuổi. Sau 28 ngày cường độ nén vẫn tiếp tục phát triển đến tuổi khảo sát 365 ngày. Cường độ ở tuổi 7 và 28 bằng khoảng 55-66% và 69-73% cường độ ở tuổi 365 ngày. Cường độ bê tông xỉ thép theo thời gian có thể được dự đoán qua các công thức đề xuất (3.4);

- Biến dạng dọc trục cực hạn của bê tông xỉ thép nằm trong khoảng từ 2.60-2.82%. Biến dạng ngang cực hạn của bê tông xỉ thép cao hơn biến dạng dọc trục cực hạn của nó khoảng 1.23-1.68 lần. Module đàn hồi của bê tông xỉ thép có thể dự đoán khi biết cường độ chịu nén và khối lượng thể tích của nó theo công thức đề xuất (3.5);
- Trong phạm vi nghiên cứu của đề tài, cường độ của BTXT bị ảnh hưởng bởi kích thước và hình dạng mẫu thí nghiệm;
- Hệ số chuyển đổi cường độ nén của bê tông xỉ thép khi thí nghiệm với các mẫu có hình dạng và kích thước khác mẫu chuẩn (mẫu hình lập phương: 150x150x150 mm) lấy theo Bảng 3.11. Hệ số chuyển đổi cường độ nén của mẫu bê tông có kích thước không chuẩn về mẫu có kích thước chuẩn 150x150x150mm;
- Mối quan hệ giữa tỷ lệ N/X và độ sụt, cường độ của bê tông xỉ thép tương tự như bê tông truyền thống: cường độ tăng khi tỷ lệ N/X giảm từ 0.7 đến 0.4, khi tỷ lệ N/X bé cần chú ý đến công tác bê tông để đảm bảo độ đặc chắc, đặc biệt đối với BTXT khi cấu trúc hạt xỉ thép có độ rỗng cao. Mối quan hệ giữa cường độ và tỷ lệ N/X cũng nằm trong đường biên giới hạn của bê tông truyền thống;
- Với bê tông xỉ thép, cho thấy cường độ chịu kéo khi ép chẻ phụ thuộc vào kích thước mẫu ở cả hai phương pháp ép chẻ theo đường sinh mẫu trụ hoặc theo cạnh mẫu lập phương. Hệ số chuyển đổi cường độ kéo khi ép chẻ của bê tông xỉ thép khi thí nghiệm với các mẫu có hình dạng và kích thước khác mẫu chuẩn (mẫu hình trụ: 150x300 mm) lấy theo Bảng 3.14;
- Cường độ uốn của bê tông xỉ thép tăng lên khi tuổi thử nghiệm tăng lên, phù hợp với sự tăng của cường độ nén.

CHƯƠNG 4

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ UỐN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG CỐT LIỆU XỈ THÉP

Do phương pháp và quy trình thiết kế kết cấu bê tông cốt thép cho bê tông xỉ thép hiện chưa có, nên trong Chương 4, đề tài sử dụng các lý thuyết của dầm bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn ACI 318-14 [46] để phân tích ứng xử chịu uốn của dầm BTCT sử dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn (ký hiệu BTCTXT) với kích thước dầm 200x300x3300 mm. Nội dung của Chương 4 được mô tả tóm lược qua Hình 4.1. Thông qua việc chế tạo và thí nghiệm dầm BTCTXT, các vấn đề sẽ được làm rõ trong chương bao gồm: i) ứng xử uốn của dầm BTCTXT, ii) ứng xử nứt của dầm BTCTXT, iii) quan hệ giữa độ cong, độ võng và biến dạng uốn, và iv) tính toán mô men kháng uốn của dầm BTCTXT.



Hình 4.1: Sơ đồ thí nghiệm dầm BTCTXT

4.1. Cơ sở lý thuyết về ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép theo ACI 318-14

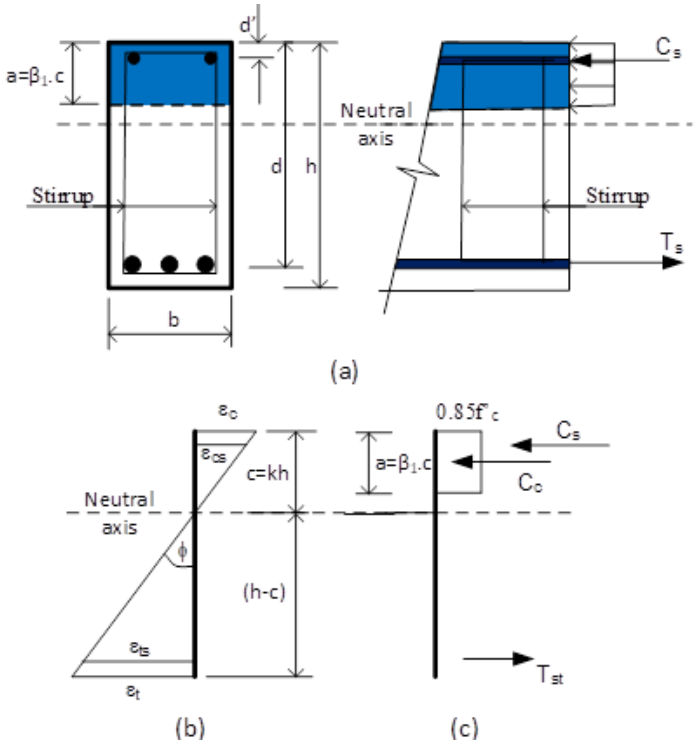
Xét một dầm giản đơn chịu mô men dương có tiết diện chữ nhật với chiều cao h, bề rộng b và thép thanh chịu kéo, nén (Hình 4.2). Hình 4.2c thể hiện việc đơn giản hóa khối ứng suất nén của bê tông như một hình chữ nhật. Vị trí trục trung hòa (NA) được xác định bởi công thức $c = kh$, độ cong của dầm (Φ) và khả năng chịu mô men danh định (M_n) được rút ra từ các phương trình cân bằng tĩnh học của các lực và mô men trên mặt cắt ngang như sau công thức (4.1), (4.2) và (4.3):

$$\sum C_i = \sum T_i \tag{4.1}$$

$$M_n = \sum T_i . y_{Ti} + \sum C_i . y_{Ci} \tag{4.2}$$

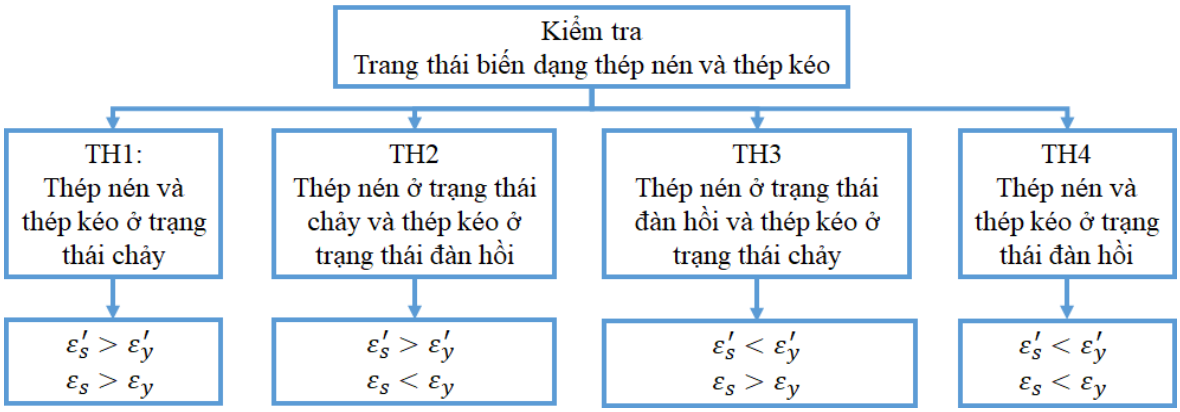
$$\Phi = \frac{\varepsilon_{ts}}{d - c} = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{0.003}{c} \tag{4.3}$$

Trong đó y_{Ti}, y_{Ci} lần lượt là khoảng cách từ trục trung hòa tới lực kéo tương đương T_i và lực nén tương đương C_i; Φ là độ cong tương ứng với mô men M_n, trong khi ε_{cu} là biến dạng tại đỉnh dầm.



Hình 4.2: Biểu đồ ứng suất, biến dạng và nội lực trên tiết diện thẳng góc với trục dọc của dầm BTCTXT

Hình 4.2 mô tả phân bố ứng suất, biến dạng và lực trong thép thanh trên mặt cắt ngang dầm, bao gồm cả thép thanh chịu kéo và chịu nén. Biến dạng nén giới hạn của bê tông xảy ra tại đỉnh dầm, ε_{cu}, được đề nghị bằng 0.003 khi phá hủy theo tiêu chuẩn ACI 318-14. Khi biến dạng nén trong bê tông đạt đến giới hạn 0.003, biến dạng tại cốt thép chịu kéo có thể xảy ra các trường hợp như mô tả trong Hình 4.3 [46, 130]. Tương ứng với các trường hợp này là các công thức (4.4)-(4.18) để kiểm tra biến dạng của thép chịu nén, thép chịu kéo và xác định vị trí trục trung hòa cùng mô men kháng uốn.



Hình 4.3. Các trạng thái của thép nén và kéo khi cường độ của bê tông đặt cực hạn

- Trường hợp 1: thép nén và thép kéo đều ở trạng thái chảy

$$0.85f_c'(\beta_1 c)b + A_s'f_y = A_s f_y \quad (4.4)$$

Kiểm tra biến dạng thép nén: $\varepsilon_s' = 0.003(c - d')/c > \varepsilon_y'$ (4.5)

Kiểm tra biến dạng thép kéo: $\varepsilon_s = 0.003(d - c)/c > \varepsilon_y$ (4.6)

Mô men kháng uốn: $M_n = A_s f_y(d - a/2) - A_s'f_y(d' - a/2)$ (4.7)

- Trường hợp 2: thép nén ở trạng thái chảy, thép kéo làm việc ở trạng thái đàn hồi

$$0.85f_c'(\beta_1 c)b + A_s'f_y = A_s E_s \varepsilon_s \quad (4.8)$$

Kiểm tra biến dạng thép nén: $\varepsilon_s' = 0.003(c - d')/c > \varepsilon_y'$ (4.9)

Kiểm tra biến dạng thép kéo: $\varepsilon_s = 0.003(d - c)/c < \varepsilon_y$ (4.10)

Mô men kháng uốn: $M_n = A_s E_s \varepsilon_s(d - a/2) - A_s'f_y(d' - a/2)$ (4.11)

- Trường hợp 3: thép nén ở trạng thái đàn hồi, thép kéo làm việc ở trạng thái chảy

$$0.85f_c'(\beta_1 c)b + A_s'E_s\varepsilon_s' = A_s f_y \quad (4.12)$$

Kiểm tra biến dạng thép nén: $\varepsilon_s' = 0.003(c - d')/c < \varepsilon_y'$ (4.13)

Kiểm tra biến dạng thép kéo: $\varepsilon_s = 0.003(d - c)/c > \varepsilon_y$ (4.14)

Mô men kháng uốn: $M_n = A_s f_y(d - a/2) - A_s'E_s\varepsilon_s'(d' - a/2)$ (4.15)

- Trường hợp 4: thép nén và thép kéo đều ở trạng thái đàn hồi

$$0.85f_c'(\beta_1 c)b + A_s'E_s\varepsilon_s' = A_s E_s \varepsilon_s \quad (4.16)$$

Kiểm tra biến dạng thép nén: $\varepsilon_s' = 0.003(c - d')/c < \varepsilon_y'$ (4.17)

Kiểm tra biến dạng thép kéo: $\varepsilon_s = 0.003(d - c)/c < \varepsilon_y$ (4.18)

Mô men kháng uốn: $M_n = A_s E_s \varepsilon_s(d - a/2) - A_s'E_s\varepsilon_s'(d' - a/2)$ (4.19)

Trong các công thức trên: A_s, A_s' lần lượt là diện tích của thép kéo và thép nén; f_y cường độ chảy của thép; $E_s, \varepsilon_s, \varepsilon_s'$ lần lượt là mô đun đàn hồi, biến dạng của thép kéo, biến dạng của thép nén.

4.2. Thiết kế thí nghiệm

4.2.1. Lựa chọn cấu tạo dầm và bố trí thí nghiệm

Để nghiên cứu ứng xử uốn của cấu kiện dầm BTCTXT, trong nghiên cứu này đã sử dụng 3 dầm BTCTXT có chiều dài toàn dầm 3300 mm, tiết diện hình chữ nhật bxh=200x300 mm, khoảng cách giữa 2 tâm gối 3000 mm. Ký hiệu các dầm là Dam1, Dam2, Dam3 với cấp phối bê tông tương ứng là XT01, XT02, XT03 (Bảng 3.1). Hình 4.4 mô tả thiết lập thí nghiệm cho dầm BTCTXT: một khung lớn của thiết bị truyền động thủy lực 50 tấn kết nối với bộ ghi dữ liệu di động với 30 kênh. Tất cả các thử nghiệm được kiểm soát với tốc độ dịch chuyển của pittông là 1,0 mm/phút. Độ võng và biến dạng kéo ở đáy dầm được đo bằng cảm biến đo biến dạng (LVDT) và lá điện trở (strain gauge). Cấu tạo dầm và sơ đồ bố trí cốt thép dầm được thể hiện ở Hình 4.5a như sau: thép chủ gồm 5 thanh cốt thép ϕ14 mm bố trí thớ dưới dầm; thớ trên gồm 2 thanh cốt thép ϕ12 mm; cốt thép đai ϕ6 mm cách khoảng 150 mm. Quy cách cốt thép của dầm được trình bày trong Bảng 4.1, hàm lượng cốt thép dọc của tiết diện dầm là 1.28%.

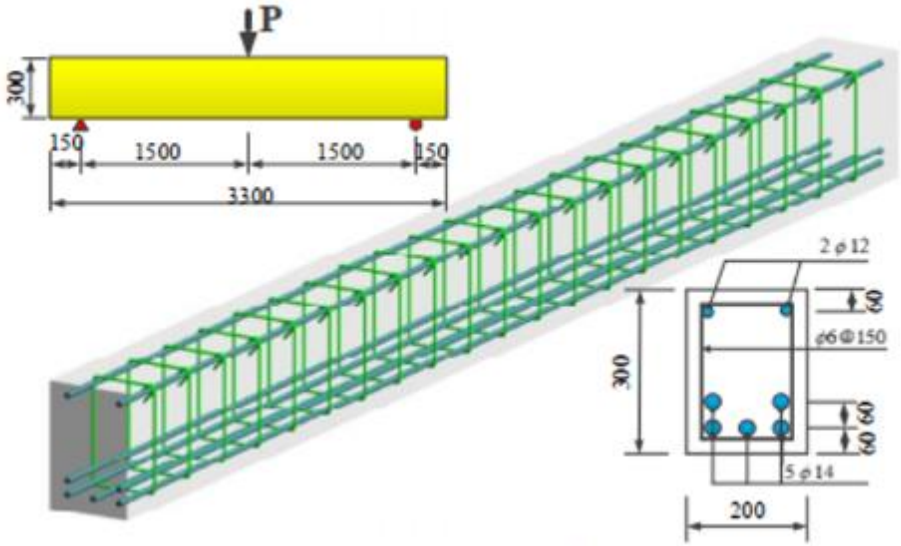
Để nghiên cứu ứng xử uốn của cấu kiện dầm, cả hai thí nghiệm uốn 3 điểm và 4 điểm được sử dụng. Mujika [131] cho rằng ảnh hưởng của sự thay đổi nhịp trong uốn 4 điểm sẽ lớn hơn trong uốn 3 điểm, đồng thời việc bố trí, thiết lập thí nghiệm theo sơ đồ 3 điểm được cho là dễ dàng và thuận tiện hơn so với sơ đồ 4 điểm [132].

Do vậy, trong nghiên cứu này, các dầm được thí nghiệm uốn theo sơ đồ uốn 3 điểm ở nhiệt độ và độ ẩm phòng thí nghiệm (nhiệt độ 28±5^{o}C, độ ẩm tương đối 70-80%). Sơ đồ bố trí LVDT và lá điện trở được thể hiện ở Hình 4.5b.

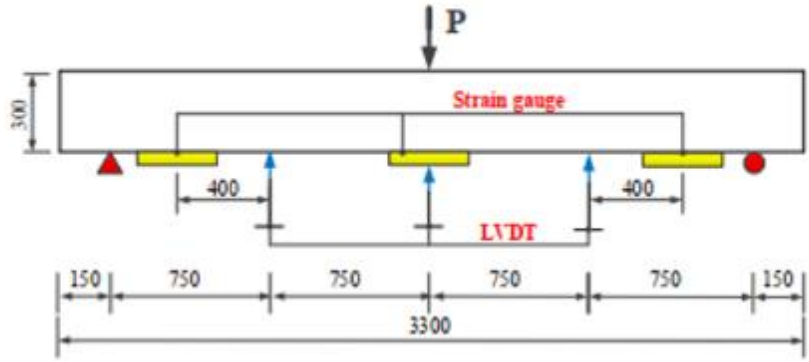
Bảng 4.1: Bảng quy cách thép sử dụng trong dầm bê tông cốt thép

Loại thép	Giới hạn chảy (MPa)	Giới hạn bền kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Quy cách
Ø6	240	380	200	Thép trơn
Ø12, Ø14	400	570	200	Thép gân

Hình 4.4: Thí nghiệm uốn 3 điểm với dầm BTCTXT



a. Sơ đồ bố trí cốt thép



b. Sơ đồ thí nghiệm

Hình 4.5: Cấu tạo dầm bê tông cốt thép

4.2.2. Phân tích trạng thái làm việc của dầm BTCTXT theo ACI 318-14

Kiểm tra trang thái của cốt thép khi bê tông đạt đến nén cực hạn theo sơ đồ Hình 4.3 cho thấy các dầm thí nghiệm Dam1, Dam2, Dam3 có $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ và $\varepsilon_s > \varepsilon_y$ (Bảng 4.2), nghĩa là thép nén ở trạng thái đàn hồi và thép kéo ở trạng thái chảy khi bị phá hoại (Trường hợp 3), đây là trường hợp mong muốn đạt được trong thực tế, nghĩa là việc lựa chọn cấu tạo cho các các dầm ở mục 4.2.1 là hợp lý theo [46, 130]. Dùng các công thức (4.12), (4.13) và (4.14) để kiểm tra và tính biến dạng của thép nén, thép kéo và vị trí trục trung hòa. Kết quả phân tích tính toán trạng thái của các dầm thí nghiệm được trình bày trong Bảng 4.2.

Bảng 4.2. Kết quả tính trục trung hòa và kiểm tra biến dạng của thép nén và thép kéo theo trường hợp 3

Dầm	A_s (cm^2)	A'_s (cm^2)	d' (cm)	d (cm)	f'_c (kN/cm^2)	β_1	c (cm)	ε'_s	ε_s
Dam1	7.70	2.26	6	24	2.291	0.85	8.2	0.000805	0.005415
Dam2	7.70	2.26	6	24	3.226	0.82	6.6	0.000265	0.007482
Dam3	7.70	2.26	6	24	3.568	0.80	6.3	0.000127	0.008014

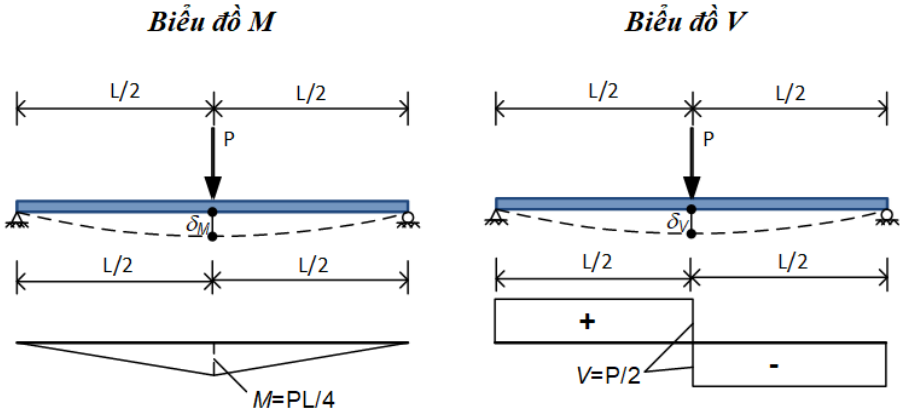
4.3. Kết quả thí nghiệm

4.3.1. Ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn là xỉ thép

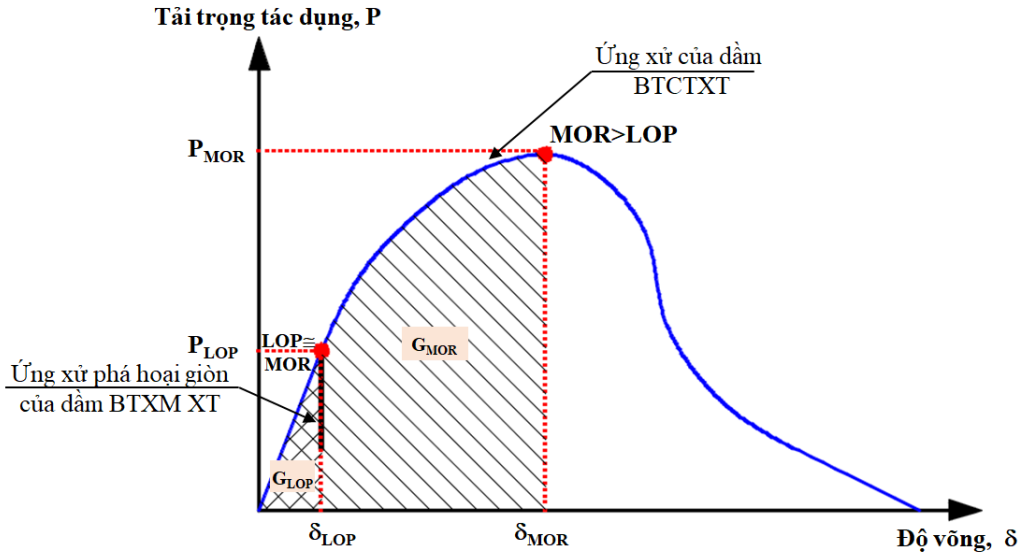
Với sơ đồ thí nghiệm dầm có một lực tập trung tác dụng ở giữa (uốn 3 điểm_3PBT) theo ASTM D790 [133]. Biểu đồ mô men và lực cắt của các sơ đồ này được trình bày trong Hình 4.6. Quan hệ giữa tải trọng và độ võng được trình bày ở Hình 4.7, mô tả quá trình phát triển các giai đoạn ứng xử của bê tông từ lúc bắt đầu chịu tải cho đến khi bị phá hoại hoàn toàn. Điểm giới hạn đàn hồi (LOP), là điểm mà tại đó xuất hiện vết nứt đầu tiên, nghĩa là giai đoạn từ điểm O đến điểm LOP, quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị là tuyến tính; MOR là điểm giới hạn bền uốn tại đó bê tông vùng nén đạt phá hoại, thép nén ở trạng thái đàn hồi và thép kéo ở trạng thái chảy, là đỉnh của đường cong. Độ bền uốn tại LOP (f_{LOP}) và độ bền uốn tại MOR (f_{MOR}) được xác định bởi công thức (4.20) cho sơ đồ 3PBT. Giá trị P_{LOP} và P_{MOR} trong công thức (4.20) lần lượt là tải trọng tương ứng với điểm giới hạn đàn hồi LOP và điểm giới hạn bền uốn MOR, được xác định từ thực nghiệm thông qua biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị. Bên cạnh đó, G_{LOP} và G_{MOR} biểu thị khả năng hấp thụ năng lượng của dầm khi chịu tác dụng của tải trọng tăng dần kèm theo sự thay đổi độ võng tương ứng từ 0 đến δ_{LOP}, và từ 0 đến δ_{MOR}, được xác định bằng phần diện tích bên dưới đường cong thông qua công thức (4.21)

$$\begin{cases} f_{\mathrm{LOP}}^{\mathrm{3PBT}} = \dfrac{M_{LOP}}{S} = \dfrac{1.5P_{LOP.}L_{span}}{bh^2} \\ f_{\mathrm{MOR}}^{\mathrm{3PBT}} = \dfrac{M_{MOR}}{S} = \dfrac{1.5P_{MOR.}L_{span}}{bh^2} \end{cases} \tag{4.20}$$

$$G_{MOR} = \int_{\delta=0}^{\delta=\delta_{MOR}} P(\delta)d\delta \tag{4.21}$$



Hình 4.6: Biểu đồ Moment và lực cắt của sơ đồ uốn 3 điểm



Hình 4.7: Đường cong điển hình biểu diễn quan hệ giữa tải trọng tác dụng và độ võng của dầm BTCTXT [134]

Để so sánh, đánh giá ứng xử của dầm BTCTXT, các thông số uốn được xét đến tại điểm LOP và MOR bao gồm: khả năng chịu tải tại LOP (P_{LOP}), độ võng giữa dầm tại LOP (δ_{LOP}), biến dạng giữa dầm tại LOP (ε_{LOP}), năng lượng hấp thụ tại LOP (G_{LOP}), khả năng chịu tải tại MOR (P_{MOR}), độ võng giữa dầm tại MOR (δ_{MOR}), biến dạng giữa dầm tại MOR (ε_{MOR}), năng lượng hấp thụ tại MOR (G_{MOR}).

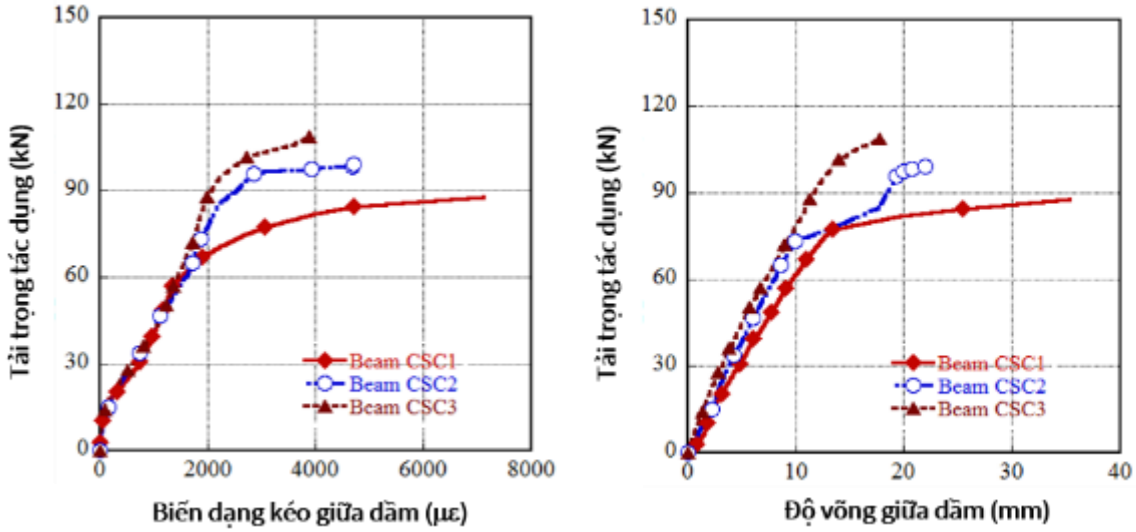
Hình 4.8b trình bày mối quan hệ giữa tải trọng và độ võng tại giữa dầm. Hình 4.8a thể hiện quan hệ giữa tải trọng và biến dạng kéo tại vị trí giữa dầm, cho thấy có sự gia tăng biến dạng đột ngột của cốt thép trong các dầm ở cấp tải xấp xỉ 15kN

(khoảng 15 - 18 % PMOR). Cấp tại này phù hợp với hầu hết các nghiên cứu liên quan đến ứng xử uốn của dầm BTCT. Sự gia tăng đột ngột biến dạng của cốt thép là dấu rất rõ cho sự xuất hiện vết nứt trong dầm, có nghĩa rằng dầm đã chuyển sang giai đoạn làm việc phi tuyến, từ đó có thể xác định được giá trị P_{LOP}. Các giá trị của thông số uốn lấy từ kết quả thí nghiệm được trình bày trong Hình 4.9.

Bảng 4.3 và Hình 4.9.

Bảng 4.3: Các thông số uốn của dầm bê tông cốt thép xỉ thép ở tuổi 28 ngày

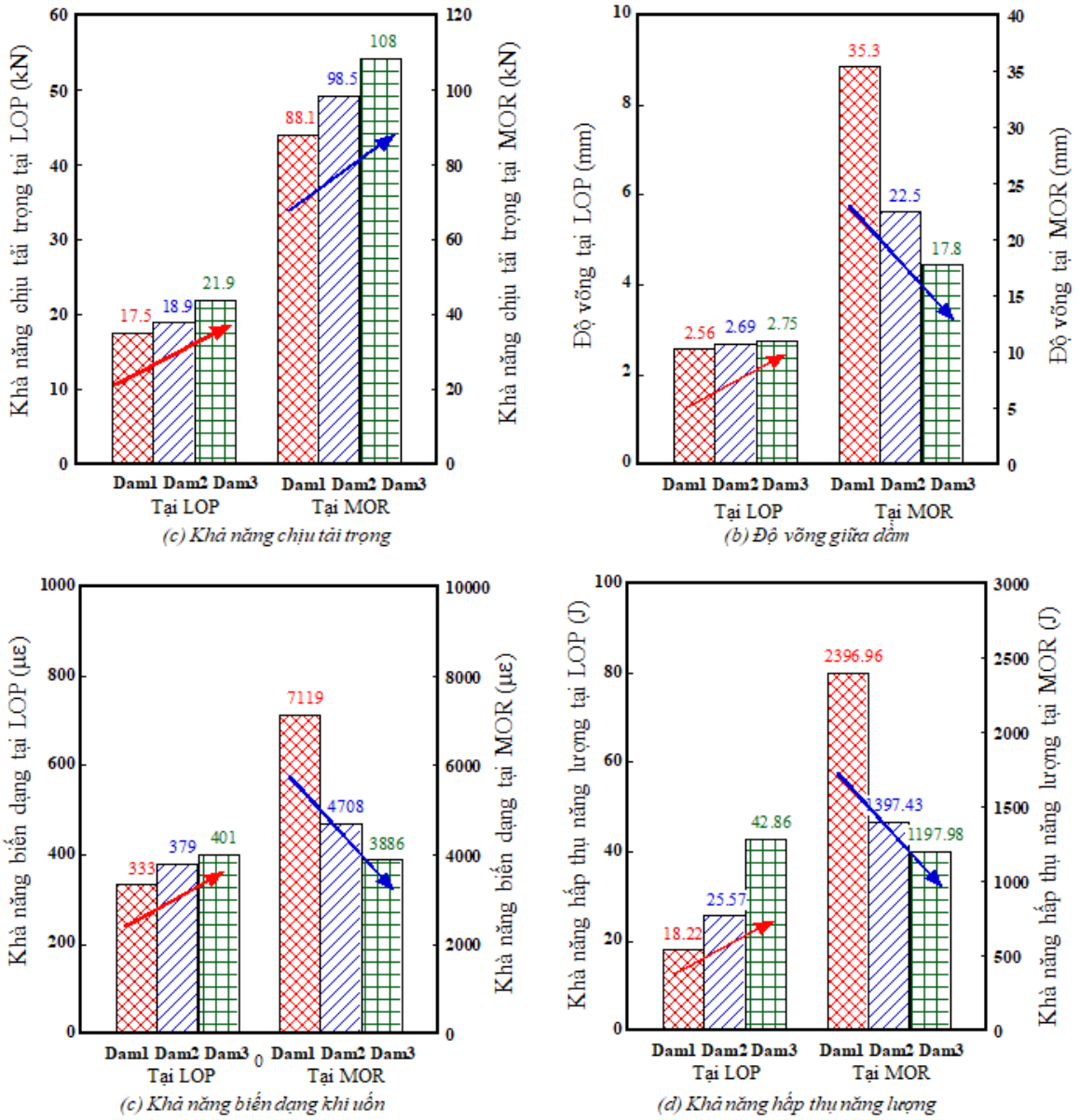
Loại dầm	Tải trọng tại LOP, P_{LOP} (kN)	Độ võng giữa dầm tại LOP δ_{LOP} (mm)	Biến dạng uốn tại LOP ε_{LOP} ($\mu\varepsilon$)	Năng lượng tại LOP, G_{LOP} (J)	Tải trọng tại MOR, P_{MOR} (kN)	Độ võng giữa dầm giữa dầm tại MOR δ_{MOR} (mm)	Biến dạng uốn tại MOR ε_{MOR} ($\mu\varepsilon$)	Năng lượng tại MOR, G_{MOR} (J)
Dam1	17.5	2.56	333	18.22	88.08	35.35	7119	2396.96
Dam2	18.9	2.69	379	25.57	98.47	22.48	4708	1397.43
Dam3	21.9	2.75	401	42.86	108.46	17.76	3886	1197.98



(a) Quan hệ giữa tải trọng và biến dạng ở giữa dầm

(b) Quan hệ giữa tải trọng và độ võng ở giữa dầm

Hình 4.8: Ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn là xỉ thép



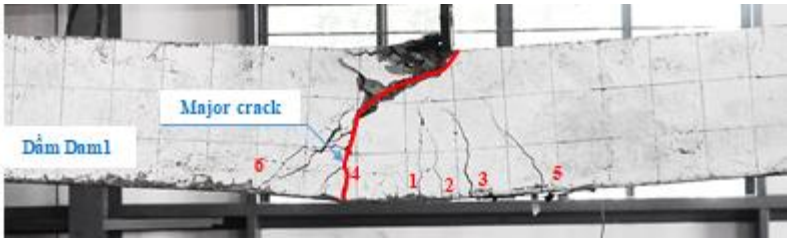
Hình 4.9: So sánh khả năng kháng uốn của 3 dầm BTCTXT

Quan sát Hình 4.9, tại LOP, các dầm dùng bê tông có cường độ nén cao hơn sẽ cho tất cả các thông số uốn cao hơn, tức là thông số uốn của dầm Dam1 có giá trị nhỏ nhất và thông số uốn của dầm Dam3 có giá trị lớn nhất. Tuy nhiên, tại MOR thì chỉ có tải trọng (P_{MOR}) tăng khi cường độ nén f_c' tăng, các tham số khác bao gồm δ_{MOR}, ε_{MOR}, G_{MOR} thì thể hiện xu hướng ngược lại. Điều này chứng tỏ rằng, dầm BTCTXT trở nên giòn hơn khi được chế tạo từ bê tông xỉ thép có cường độ nén cao hơn. Độ võng giữa dầm giảm khi cường độ bê tông xỉ thép tăng là do sự gia tăng mô đun đàn hồi của bê tông xỉ thép.

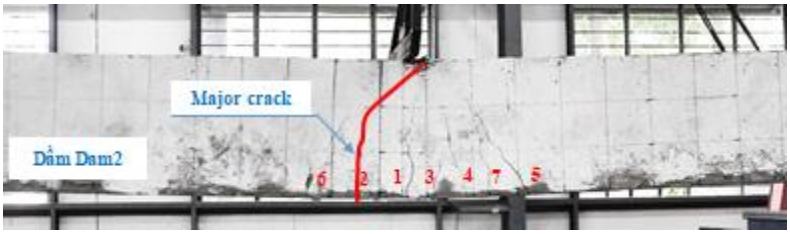
4.3.2. Sự phát triển vết nứt trong các dầm BTCTXT

Hình 4.10a,b,c thể hiện trực quan hình dạng và sự phân bố vết nứt trên các dầm BTCTXT ở tải trọng phá hủy. Vết nứt đầu tiên hình thành ở đáy dầm do ứng suất kéo uốn. Các vết nứt tiếp theo xuất hiện có xu hướng nghiêng ra xa vị trí giữa dầm hơn. Vết nứt chính (major crack) xuất hiện tại thời điểm mẫu bị phá hoại không phải là vết nứt đầu tiên, vết nứt này có dạng nghiêng lan truyền về vùng nén, nơi chịu tác dụng của tải trọng cực hạn, có thể nhận thấy đây là các vết nứt do phá hoại uốn-cắt (flexure-shear failure) [135, 136] gây ra, tức là sự phá hoại bắt đầu như một vết nứt do uốn và kết thúc bằng sự phá hủy của vết nứt do cắt của bê tông. Và, sự phá hoại này xảy ra tại các vị trí của dầm mà cả lực cắt và mômen uốn đều có giá trị lớn, tức ở khoảng giữa gối đỡ và nhịp giữa của dầm. Hay nói cách khác, các dầm BTCTXT thí nghiệm có dạng phá hoại là uốn-cắt đồng thời [135, 136].

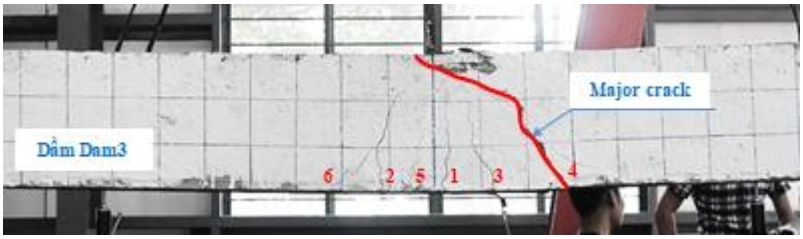
Ứng xử của dầm BTCTXT được mô tả ở trên tương tự như ứng xử của dầm BTCT dùng cốt liệu truyền thống (Hình 4.10d) trong một nghiên cứu của NCS [137] và trong nghiên cứu của tác giả Vũ Hồng Nghiệp [138]: vết nứt do uốn xuất hiện đầu tiên tại cấp tải trọng P_{LOP} ở vị trí giữa dầm và dầm bị phá hoại do vết nứt xiên gây ra bởi tác dụng ban đầu của moment uốn, sau đó phát triển bởi tác dụng đồng thời của moment và lực cắt.



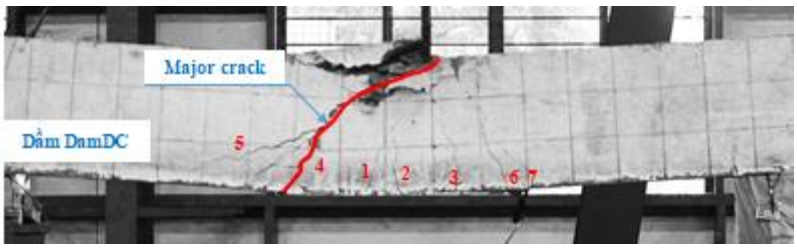
(a) Dầm Dam1



(b) Dầm Dam2



(c) Dầm Dam3



(d) Dầm DamDC [137]

(a), (b), (c): Dầm BTCT XT; (d): Dầm BTCT dùng cốt liệu truyền thống

Hình 4.10: Phân bố vết nứt trong các dầm

Theo lý thuyết thì độ bền uốn của dầm bê tông cốt thép tại LOP (f_{LOP}) bằng độ bền uốn của dầm bê tông thường (f_{cr}). Do đó, có thể sử dụng công thức (4.22) để tính toán f_{LOP} và kết quả được trình bày trong Bảng 4.4. Theo Bảng 4.4, f_{LOP} cao hơn nhiều so với f_{cr} trong Bảng 3.15. Điều này có thể lý giải là do sự hiện diện của cốt thép đã giúp hạn chế sự hình thành vết nứt từ các lỗ rỗng trong bê tông [139].

$$f_{LOP} = \frac{M_{LOP}}{W_{equi}} = \frac{P_{LOP}.S.(h-c)}{4.I_{equi}} \quad (4.22)$$

Trong đó, I_{equi} là mômen quán tính tương đương của tiết diện, được coi là độ cứng chung của cốt thép và bê tông quy đổi theo mô đun đàn hồi, c là khoảng cách từ thớ chịu nén ngoài cùng đến trục trung hòa.

Bảng 4.4: Độ bền uốn tại LOP của các dầm thử nghiệm

Loại dầm	Tải trọng tại LOP, P_{LOP} (kN)	Mô đun đàn hồi của BTXT, E_C (GPa)	Vị trí trục trung hòa tại LOP, c (mm)	Moment quán tính tương đương, I_{equi} (mm^4)	Độ bền uốn tại LOP, f_{LOP} (MPa)
Dam1	17.5	31.47	154	485489664	3.94
Dam2	18.9	36.68	154	479599077	4.33
Dam3	21.9	39.21	153	477293816	5.05

4.3.3. Mối quan hệ giữa độ cong, độ võng và biến dạng uốn

Theo lý thuyết đàn hồi tuyến tính, độ võng giữa dầm trong sơ đồ uốn ba điểm phụ thuộc vào mô men, lực cắt và có quan hệ với độ cong thông qua công thức (4.23) [125, 140].

$$\delta_{mid} = \delta_M + \delta_V = \frac{\Phi S^2}{12}\left[1 + \frac{2(1+\nu)}{\psi}\left(\frac{h}{S}\right)^2\right] \tag{4.23}$$

$$\delta_{mid} = \frac{1.036\Phi S^2}{12} \approx 0.1\Phi S^2 \tag{4.24}$$

$$\Phi = \frac{\varepsilon_t}{(h-c)} = \frac{M}{E_c I} \tag{4.25}$$

Trong đó, M_0: Mô men tại tiết diện x do lực đơn vị tác dụng theo hướng chuyển vị cần xác định trên chiều dài nhịp S; V_0: là lực cắt trong tiết diện x do lực đơn vị, đặt tại tiết diện cần xác định độ võng, tác dụng theo phương độ võng; Φ và γ lần lượt là độ cong và biến dạng cắt của dầm; ν là hệ số Poisson, ψ là hệ số cắt, h là chiều cao của dầm, S là chiều dài nhịp của dầm.

Với vật liệu bê tông $\nu = 0.2$, tiết diện hình chữ nhật $1/\psi = 1.5$, tỷ số $h/S = 0.1$ thì công thức (4.23) có thể viết lại thành công thức (4.24), công thức này cũng áp dụng cho ứng xử phi tuyến vì độ võng bây giờ chỉ phụ thuộc vào tiết diện của dầm. Mặt khác, công thức (4.24) cũng cho thấy độ võng do lực cắt tương đối nhỏ, chỉ chiếm 3.6% độ võng do mô men. Bên cạnh đó, độ cong theo lý thuyết Euler-Bernoulli [141] được tính bằng tỷ số giữa biến dạng uốn (ε_t) tại đáy dầm và khoảng cách từ trục trung hòa đến bề mặt đáy như công thức (4.25). Hình 4.7 hiển thị sơ đồ quan hệ giữa độ cong, biến dạng uốn và độ cứng của dầm tại mặt cắt bị nứt ($E_{CSC}I_{crack}$) hoặc độ cứng của dầm ở mặt cắt không bị nứt ($E_{CSC}I_{uncrack}$) [142].

Hình 4.11 minh họa độ cong, biến dạng uốn và độ cứng của dầm BTCTXT khi xuất hiện nứt. Nứt là nguyên nhân chính làm tăng độ cong của dầm: vết nứt làm giảm độ cứng của dầm và tăng độ võng, ngay cả trong trường hợp tải trọng tác dụng không tăng. Vị trí của trục trung hòa (c) có thể được xác định như sau:

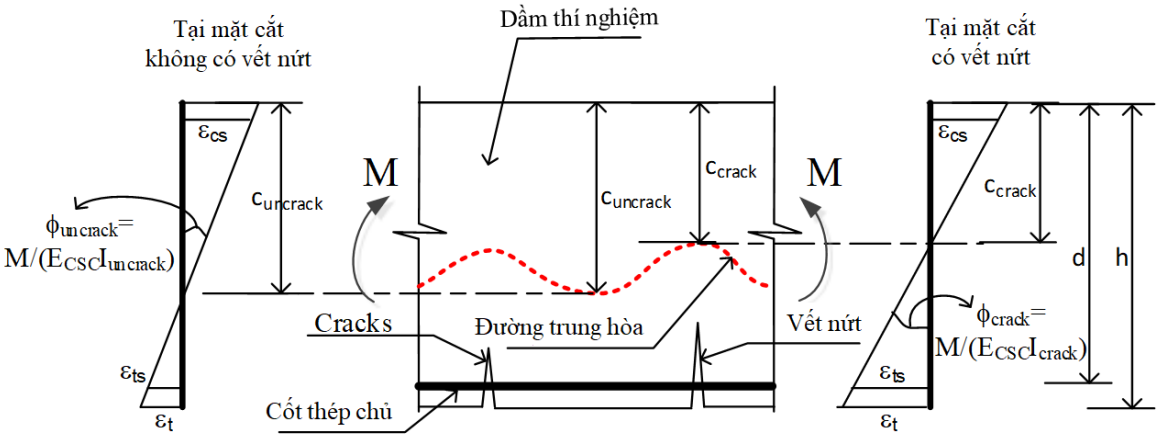
- Trong trường hợp bê tông vùng kéo chưa bị nứt (tại điểm LOP) $c = c_{uncrack}$: Vị trí trục trung hòa lúc này có thể xác định bằng phương trình cân bằng

mômen tĩnh của diện tích bê tông và diện tích cốt thép quy đổi về diện tích bê tông tương đương theo công thức (4.26), với $n = E_s/E_b$ là tỷ lệ mô đun đàn hồi của thép và bê tông

- Trường hợp bê tông vùng kéo xuất hiện vết nứt (tại điểm MOR) $c = c_{crack}$: Vị trí trục trung hòa lúc này có thể xác định bằng cách cân bằng tĩnh học các lực tác dụng lên tiết diện, là nghiệm dương của phương trình (4.27) được suy ra từ (4.12).

$$c_{uncrack} = h - \frac{bh^2/2 + (n-1)dA_s + (n-1)dA_s}{bh + (n-1)A_s} \quad (4.26)$$

$$(0.85f_c'\beta_1 b)c_{crack}^2 + \left(A_s'E_s - A_s f_y\right)c_{crack} - 0.003A_s'E_s d' = 0 \quad (4.27)$$



Hình 4.11: Độ cong, biến dạng uốn và độ cứng của dầm BTCTXT khi xuất hiện vết nứt [138]

Bảng 4.5: So sánh biến dạng uốn tại LOP

Loại dầm	Độ võng giữa dầm tại LOP, δ_{LOP} (mm)	Độ cong tại LOP, Φ_{LOP} (1/m)	Vị trí trục trunng hòa tại LOP, $c_{uncrack}$ (mm)	Biến dạng uốn tính toán tại LOP ($\mu\varepsilon$)	Biến dạng uốn thực nghiệm tại LOP ($\mu\varepsilon$)	Chênh lệch (%)
Dam1	2.56	0.00284	154	439	333	24
Dam2	2.69	0.00299	154	438	379	13
Dam3	2.75	0.00306	153	448	401	11

Bảng 4.6: So sánh biến dạng uốn tại MOR

Loại dầm	Độ võng giữa dầm tại MOR, δ_{MOR} (mm)	Độ cong tại MOR, Φ_{MOR} (1/m)	Vị trí trục trunng hòa tại MOR, c_{crack} (mm)	Biến dạng uốn tính toán tại MOR ($\mu\varepsilon$)	Biến dạng uốn thực nghiệm tại MOR ($\mu\varepsilon$)	Chênh lệch (%)
Dam1	35.35	0.0393	82	8563	7119	17
Dam2	22.48	0.0250	64	5895	4690	20
Dam3	17.76	0.0197	60	4736	3886	18

Bảng 4.5 và Bảng 4.6 trình bày biến dạng uốn tính toán và biến dạng uốn đo được từ thực nghiệm của dầm BTCTXT tại điểm LOP và MOR. Biến dạng uốn tính toán được xác định thông qua công thức (4.24) và (4.25), trong khi đó biến dạng uốn đo được lại được xác định trực tiếp từ thực nghiệm. Độ chênh lệch biến dạng uốn ở LOP và MOR giữa lý thuyết và thực nhiệm khá cao: 11-24% tại LOP và 17-20% tại MOR. Nguyên nhân được cho là do vị trí trục trung hòa không chính xác, được xác định bằng cách sử dụng các thông số nén như mô đun đàn hồi, cường độ chịu nén. Mặc dù có nhiều khác biệt về biến dạng uốn thông qua các thí nghiệm, tuy nhiên kết quả nghiên cứu đã làm rõ mối quan hệ giữa độ cong, độ võng và biến dạng uốn, qua đó có thể dự đoán một đại lượng khi biết hai đại lượng còn lại.

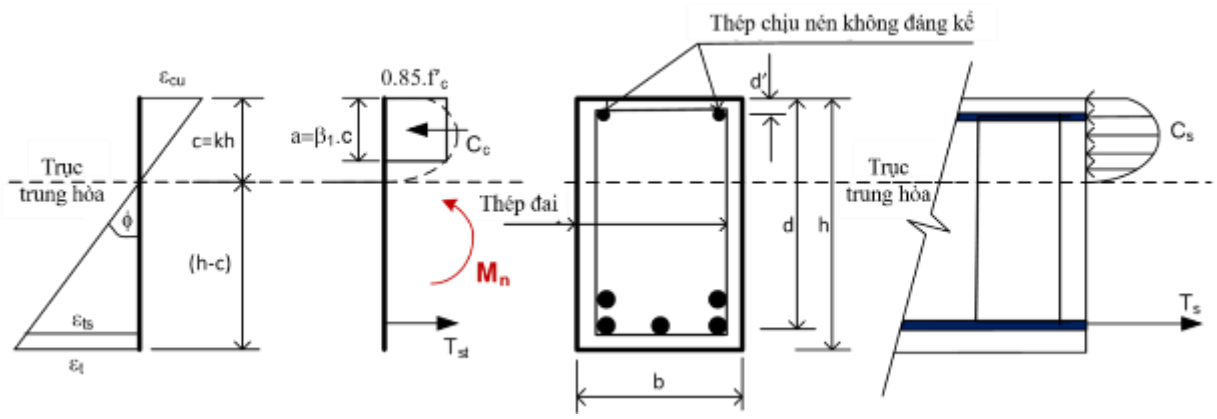
4.3.4. Tính toán mô men kháng uốn và sức kháng cắt của dầm thí nghiệm

Theo phân tích ở mục 4.3.2, dầm BTCTXT bị phá hoại do uốn-cắt đồng thời nên cần kiểm tra sức kháng uốn và sức kháng cắt của dầm.

4.3.4.1. *Mô men kháng uốn*

Mô men kháng uốn danh định của các dầm BTCT được xác định dựa vào tính chất của vật liệu thành phần, gồm vật liệu bê tông và thép dọc. Hình 4.12 trình bày sơ đồ phân bố ứng suất và biến dạng, lực kéo của thép trong tiết diện vuông góc với trục dọc của dầm. Cốt thép chịu nén ở thớ trên được coi là không đáng kể do nó nhỏ hơn nhiều so với cốt thép chịu kéo thớ dưới. Khối ứng suất nén của bê tông xỉ thép được xét tương đương thành một khối ứng suất hình chữ nhật với chiều rộng là $0.85f_c'$ và chiều cao là $\beta_1 c$ (hệ số β_1=0.85 đối với bê tông có cường độ nén $f_c' \leq 28$ MPa, với bê tông có f_c' cao hơn 28 MPa, giá trị sẽ giảm liên tục 0.05 cho mỗi cấp giảm 7

MPa, và không được nhỏ hơn 0.65 [46]) . Lực kéo của thép cân bằng với hợp lực nén của vùng bê tông xỉ thép chịu nén.



Hình 4.12: Biểu đồ ứng suất, biến dạng và nội lực trên tiết diện thẳng góc với trục dọc của dầm BTCTXT [138]

Trục trung hòa ban đầu được xác định bằng phương trình cân bằng lực (4.27). Khả năng chịu moment M_n được xác định bằng cách sử dụng phương trình cân bằng mô men (4.15).

Mômen thực nghiệm (M_{exp}) là tổng mô men do trọng lượng bản thân của dầm (M_{SW}) và mô men do tải trọng cực hạn tác dụng (M_p). M_{exp} được xác định theo công thức (4.28).

$$M_{exp} = M_{sw} + M_p = \frac{qL_{span}^2}{8} + \frac{P_{max}L_{span}}{4} \quad (4.28)$$

Kết quả tính toán được trình bày ở Bảng 4.7 cho thấy M_{exp} có giá trị lớn hơn M_n khoảng 1.1-1.3 lần. Độ chênh lệch giữa tính toán và thực tế không lớn lắm, khoảng từ 9%-20%, điều này chứng tỏ rằng có thể áp dụng tiêu chuẩn ACI-318-14 [46] để thiết kế dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn xỉ thép; độ tin cậy và an toàn của thiết kế là chấp nhận được.

Bảng 4.7: So sánh Moment lý thuyết và thực nghiệm

Loại dầm	Cường độ chịu nén, f_c' (MPa)	β_1	Vị trí trục trung hòa tại MOR, c (mm)	Mô men kháng uốn, M_n (kN.m)	Mô men thực nghiệm, M_{exp} (kN.m)	Chênh lệch (%)
Dam1	22.91	0.85	82	61.72	67.75	9

Loại dầm	Cường độ chịu nén, f_c' (MPa)	β_1	Vị trí trục trung hòa tại MOR, c (mm)	Mô men kháng uốn, M_n (kN.m)	Mô men thực nghiệm, M_{exp} (kN.m)	Chênh lệch (%)
Dam2	32.26	0.82	64	65.25	75.54	14
Dam3	35.68	0.80	60	66.08	83.03	20

4.3.4.2. *Sức kháng cắt của dầm*

Theo phân tích ở mục 4.3.2, dầm BTCTXT bị phá hoại uốn-cắt, do đó trong mục này sức kháng cắt của dầm theo tính toán lý thuyết và thực nghiệm sẽ được so sánh, đánh giá. Về tổng thể, có hai thành phần vật liệu tham gia sức kháng cắt của dầm, bao gồm: bê tông và cốt thép (cốt thép dự ứng lực, cốt thép dọc chịu kéo, cốt thép đai, cốt thép xiên được uốn lên từ các cốt thép dọc chịu kéo). Đối với dầm BTCTXT được nghiên cứu trong đề tài này, vật liệu kháng cắt gồm bê tông xỉ thép và cốt thép đai. Theo ACI 318-14 [46], sức kháng cắt danh định tại mặt cắt đang xét V_n được tính theo công thức (4.29) sẽ bằng tổng lực kháng cắt do bê tông V_c (4.30) (theo 22.5.5.1, ACI 318) và lực kháng cắt do cốt thép đai V_s (4.31) (theo 22.5.10.5.4, ACI 318)

$$V_n = V_c + V_s \tag{4.29}$$

$$V_c = \frac{2\lambda\sqrt{f_c'}b_v d_v}{6}\ (psi)\ hay\ V_c = \frac{0.166\lambda\sqrt{f_c'}b_v d_v}{6}\ (MPa) \tag{4.30}$$

$$V_s = \frac{A_v f_v d_v (sin\alpha + cos\alpha)}{s} \tag{4.31}$$

Trong đó, A_v, f_v lần lượt là diện tích và giới hạn chảy của cốt đai; d_v là chiều cao tính toán của tiết diện dầm $d_v = \max(0.9d, 0.72h)$; s là khoảng cách giữa các cốt thép đai, λ là hệ số điều chỉnh, với bê tông thường, λ = 1 (theo 19.2.4.2 ACI 318); $\alpha = 90^0$ là góc nghiêng của cốt thép đai. Lưu ý rằng sức kháng cắt V_c theo ACI-318 là công thức thực nghiệm, khi xử lý thống kê đã xét đến tính an toàn.

Theo sơ đồ thí nghiệm 3PBT mô tả ở Hình 4.6, sức kháng cắt thực nghiệm V_u sẽ bằng phân nửa tải tập trung lớn nhất tại MOR, tức là $V_u = P_{MOR}/2$ (lực cắt do trọng lượng bản thân dầm xem như nhỏ so với lực cắt do tải tập trung gây ra nên bỏ qua).

Kết quả tính toán trình bày ở Bảng 4.8 cho thấy V_u có giá trị nhỏ hơn V_n khoảng 1.07-1.15 lần. Khi thiết kết cấu theo ACI-318-14 [44], nếu dùng hệ số số chiết giảm $\Phi = 0.75$ cho sức kháng cắt ($V_r = \Phi V_n$) thì kết quả tính toán V_r thiên về an toàn so với kết quả thí nghiệm V_u. Như vậy có thể áp dụng tiêu chuẩn ACI-318-14 [46] để thiết kế kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn xỉ thép, độ tin cậy và an toàn của thiết kế là chấp nhận được.

Bảng 4.8. So sánh sức kháng cắt lý thuyết và thực nghiệm

Loại dầm	Cường độ chịu nén, f_c' (MPa)	Lực cắt tính toán do ngoại tải V_u, (N)	Góc nghiêng θ (độ)	Lực cắt trong bê tông V_c, (N)	Lực cắt trong thép đai V_s, (N)	Sức kháng cắt theo ACI 318 V_r, (kN)	Tỷ số V_r/V_u
Dam1	22.91	44040	45	34325	19543	40401	0.92
Dam2	32.26	49235	45	40731	19543	45206	0.92
Dam3	35.68	54230	45	42836	19543	46784	0.86

4.4. Kết luận Chương 4

Trong phạm vi nghiên cứu của đề tài, dựa vào các phân tích ở trên có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Sự gia tăng cường độ nén của bê tông xỉ thép tạo ra sự gia tăng các thông số uốn ở LOP như: khả năng chịu tải, độ võng giữa dầm, biến dạng uốn giữa dầm và khả năng hấp thụ năng lượng. Tuy nhiên, tại MOR, sự gia tăng cường độ nén của bê tông chỉ tạo ra sự gia tăng khả năng chịu tải, trong khi các thông số uốn khác đều giảm.
- Dạng phá hoại của dầm BTCTXT tương tự như dầm BTCT dùng cốt liệu truyền thống, đó là dạng phá hoại uốn-cắt đồng thời
- Các thông số uốn của dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn là xỉ thép được thử nghiệm có ứng xử uốn tương tự dầm bê tông cốt thép truyền thống. Dưới tác dụng của tải trọng, các thông số uốn có mối quan hệ đồng biến chặt chẽ giữa sự lan truyền vết nứt trong dầm, độ cong, độ võng và sức kháng mô men.
- Có thể sử dụng lý thuyết tính toán khả năng kháng uốn và kháng cắt của dầm BTCT truyền thống cho dầm BTCTXT.

CHƯƠNG 5
MÔ PHỎNG SỐ ỨNG XỬ BÊ TÔNG XỈ THÉP

Bên cạnh việc nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử của bê tông xỉ thép. Luận án này còn thực hiện việc xây dựng và hiệu chỉnh luật ứng xử nhằm ứng dụng cho việc mô phỏng tính toán số ứng xử của bê tông xỉ thép. Mô hình mô phỏng số sẽ được xây dựng dựa trên nền tảng phương pháp phần tử rời rạc. Mô hình số ban đầu sẽ được ứng dụng để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép trong thí nghiệm nén – kéo một trục. Khả năng của mô hình số sẽ được kiểm chứng thông qua việc so sánh kết quả mô phỏng với với kết quả thực nghiệm. Kết quả mô phỏng số sẽ được phân tích dưới dạng mối quan hệ ứng suất – biến dạng và cả sự phát triển vết nứt bên trong mẫu vật liệu.

5.1. Cơ sở lý thuyết

5.1.1. Khái niệm

Phương pháp phần tử rời rạc (DEM) là một phương pháp số dùng để tính toán mô phỏng vật liệu rời, địa vật liệu đã được đề xuất lần đầu tiên bởi Cundall [2]. Phương pháp phần tử rời rạc đã được các nhà khoa học trên thế giới ứng dụng để mô phỏng cho rất nhiều loại vật liệu khác nhau như: bê tông, đất đá, mô phỏng dòng chảy của chất lỏng, mô phỏng dòng vật liệu rời trữ trong các silo như ngũ cốc và mô phỏng các loại vật liệu bột (Hình 5.1). Với phương pháp phần tử rời rạc, vật liệu sẽ được mô phỏng thành tập hợp các phần tử rời rạc có dạng hình cầu, hoặc hình đa diện, hoặc hình đĩa, có thể cứng tuyệt đối hoặc biến dạng được và các phần tử này này độc lập với nhau. Với việc mô tả vật liệu là một môi trường rời rạc theo đúng bản chất của vật liệu, phương pháp phần tử rời rạc có thể mô phỏng ứng xử của của vật liệu, hay ứng xử của kết cấu, hay cấu kiện kết cấu sử dụng vật liệu đó đúng với ứng xử cơ học thực tế của chúng.

Hình 5.1: Các vật liệu rời trong mô phỏng DEM [143]

5.1.2. Cơ sở lý thuyết của phương pháp DEM..

Phương pháp phân tử rời rạc dựa trên định luật Newton về chuyển động giữa các phân tử và quan hệ giữa lực-chuyển động khi các phần tử tương tác với nhau. Phương pháp này xét miền phân tích là tập hợp các hạt riêng rẽ, gọi chung là các phân tử không liên tục. Vật liệu sẽ được mô phỏng thành tập hợp những hạt hình cầu, hoặc hình đa diện, hoặc hình đĩa, có thể cứng tuyệt đối hoặc biến dạng.

Khi các phần tử tương tác sẽ xuất hiện lực tương tác giữa chúng, các phần tử có sự dịch chuyển đến vị trí mới. Cơ sở của phương pháp là thành lập và giải các phương trình chuyển động của phần tử. Chuyển vị của các phân tử cùng các điều kiện tương tác giữa chúng được xác định và cập nhật liên tục theo từng bước thời gian. Việc dò tìm vị trí mới của các phần tử là điểm mấu chốt của phương pháp. Chuyển động của các phân tử được biểu diễn bởi các phương trình cân bằng và được giải liên tục cho đến khi thỏa mãn điều kiện biên.

Quá trình mô phỏng bắt đầu bằng việc đặt tất cả các phân tử vào vị trí nhất định kèm theo vận tốc ban đầu của các phân tử. Sau đó, các lực tương tác tác dụng lên mỗi phân tử được tính từ số liệu ban đầu theo định luật vật lý cơ bản. Ở mỗi bước thời gian, công việc tính toán gồm các bước cơ bản như sau [82]:

1. Xác định tương tác giữa các phần tử rời rạc ở từng bước thời gian, tương tác giữa các hạt được xác định thông qua hệ số khoảng cách tương tác, hệ số này phụ thuộc đặc tính của từng loại vật liệu. Sau mỗi bước thời gian vị trí các phần tử được

tính toán lại, và từ đó khoảng cách giữa các phần tử sẽ thay đổi và như vậy sẽ xác định lại tương tác.

2. Sau khi vị trí tương tác mới được xác định thì từ sự thay đổi khoảng cách giữa hai phần tử tương tác so với khoảng cách ban đầu, lực tương tác sẽ được xác định bằng cách sử dụng luật tương tác cục bộ giữa các phần tử. Lực tương tác này gồm các thành phần lực tương tác pháp tuyến, lực tương tác tiếp tuyến và mô men.

3. Tính tổng lực tương tác tác dụng lên các phần tử rời rạc, lực tổng này bao gồm các lực tương tác từ tất cả các tương tác mà phần tử tham gia.

4. Tích phân phương trình 2 Newton để tìm ra vị trí mới cho các phần tử, ở đây chuyển vị xoay của các phần tử cũng xem xét đến.

5. Lặp lại các bước từ 2 đến 5 cho đến khi quá trình mô phỏng kết thúc.

5.2. Mô hình ứng xử DEM cho bê tông xỉ thép

5.2.1. Giả thuyết của phương pháp

Phương pháp phần tử rời rạc sử dụng kiểu phần tử hình cầu không biến dạng đã được sử dụng trong mô phỏng ứng xử của bê tông, bê tông cốt thép [66, 81, 144]. Trên cơ sở những nghiên cứu này, phương pháp phần tử rời rạc được lựa chọn là phương pháp số để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép trong luận án này. Với phương pháp phần tử rời rạc, mẫu bê tông xỉ thép được mô phỏng bằng tập hợp các phần tử rời rạc (DE) hình cầu có kích thước, có khối lượng và các DE này có thể tương tác với nhau, tuân theo luật tương tác cục bộ dạng quan hệ lực-chuyển vị. Các giả thuyết cơ bản của phương pháp được đề xuất:

- Các phần tử rời rạc được xem là không biến dạng được;
- Tương tác theo hình thức xâm nhập vào nhau giữa hai phần tử;
- Luật tương tác cục bộ cho phép sự xâm nhập vào nhau của các phần tử tương tác là rất bé so với kích thước của phần tử;
- Tất cả các phần tử là hình cầu, ngoại trừ các phần tử đặc biệt để áp dụng điều kiện biên (phần tử tường biên).

5.2.2. Điều kiện tương tác

Với mô hình phần tử rời rạc, khi bắt đầu quá trình mô phỏng, tương tác của phần tử rời rạc *a* lên phần tử *b*, không chỉ xác định khi 2 phần tử tiếp xúc với nhau, mà còn

được xác định khi khoảng cách giữa chúng nhỏ hơn so với bán kính tương tác, được điều chỉnh bởi hệ số γ, hai phần tử tương tác trong điều kiện (5.1) [66]:

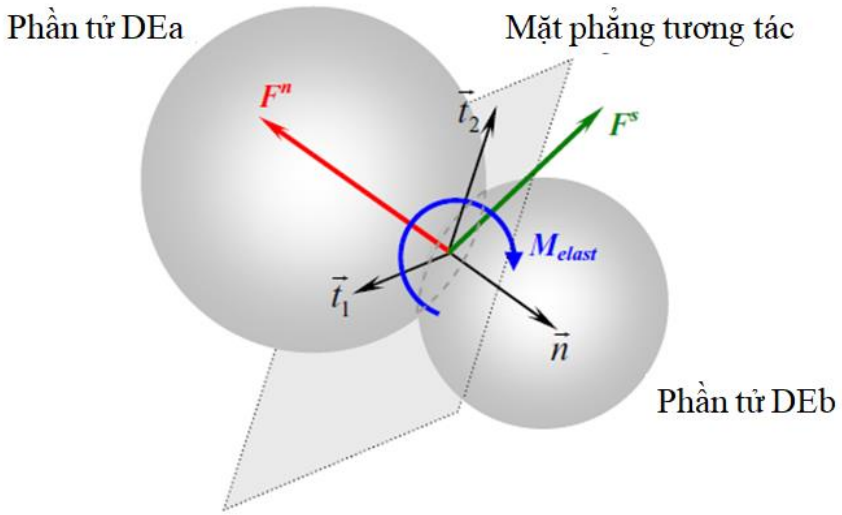
$$D_{ab} \leq \gamma(R_a + R_b) \quad (5.1)$$

Trong đó: R_a và R_b, lần lượt là bán kính của hai phần tử rời rạc a và b, D_{ab} là khoảng cách nối từ tâm của phần tử a và phần tử b. Giá trị của γ được lựa chọn sao cho số tương tác trên một phần tử rời rạc là 12, sự lựa chọn này đã được nghiên cứu bởi các tác giả trước đây [66]. Với sự lựa chọn này, mô đun đàn hồi của mẫu vật liệu, đại lượng phụ thuộc vào độ cứng của các tương tác, được kiểm soát một cách dễ dàng.

5.2.3. Luật tương tác cục bộ

Trong mô hình này có hai dạng tương tác, tương tác ma sát – dính (link interaction) và tương tác thuần túy ma sát (contact interaction), dạng tương tác đầu tiên được hình thành khi quá trình mô phỏng bắt đầu là tương tác ma sát-dính. Trong quá trình mô phỏng sẽ có các tương tác mới được hình thành do sự dịch chuyển của các phần tử, kiểu tương tác thứ hai này là tương tác thuần tuý ma sát (thuần túy tiếp xúc) (contact interaction) không có lực dính [66] vì thực tế ứng xử của bê tông xỉ thép thì vữa xi măng giữa các cốt liệu đã bị phá hủy.

Trong quá trình mô phỏng, sau khi các tương tác được hình thành, luật tương tác cục bộ sẽ được áp dụng để xác định lực tương tác lên các phần tử. Với một tương tác giữa hai phần tử (DE) *a và b*, véc tơ lực tương tác *F* thể hiện sự tác động của DE *a* lên DE *b* có thể phân tích thành một véc tơ lực pháp tuyến F_n và một véc tơ lực tiếp tuyến F_s (Hình 5.2), các véc tơ lực này được xác định dựa vào chuyển vị pháp tuyến của của tương tác và gia số chuyển vị tiếp tuyến tương đối thông qua các độ cứng pháp tuyến K_n, và độ cứng tiếp tuyến K_s [66]



Hình 5.2: Tương tác giữa 2 phần tử và các thành phần lực tương tác

Các độ cứng K_n theo phương pháp tuyến và độ cứng K_s theo phương tiếp tuyến và được xác định như sau [66]:

$$\begin{cases} K_n = 2E\dfrac{R_a R_b}{(R_a + R_b)} \\ K_s = \alpha K_n \end{cases} \tag{5.2}$$

Trong đó, R_a và R_b lần lượt là bán kính của 2 phần tử rời rạc a và b; E mô đun đàn hồi của phần tử rời rạc, giá trị mô đun này được lấy theo mô đun đàn hồi của vật liệu từ thí nghiệm thực nghiệm; α hệ số độ cứng tiếp tuyến

5.2.3.1. *Lực tương tác pháp tuyến*

Độ lớn F_n của lực theo phương pháp tuyến, được xác định bằng việc cập nhật luật ứng xử (tương tác) cục bộ thông qua hệ số độ cứng K_n . Trong luận án này, luật ứng xử đàn hồi được hiệu chỉnh và đưa vào sử dụng (Hình 5.3). Luật ứng xử cục bộ này có thể được chia thành hai phần, phần kéo và phần nén. Khi các phần tử tương tác tiến gần nhau (có nghĩa đang trong giai đoạn chịu nén) tương tác được xem như thuần túy đàn hồi, F_n được xác định bởi:

$$F_n = K_n\left(D_{eq} - D_{ab}\right) \tag{5.3}$$

Trong đó F_n là lực tương tác pháp tuyến, D_{eq} và D_{ab} lần lượt là khoảng cách ban đầu và khoảng cách hiện tại giữa hai $DE\ a$ và $DE\ b$.

Khi các phần tử tương tác dịch chuyển ra xa nhau (có nghĩa là tương tác đang

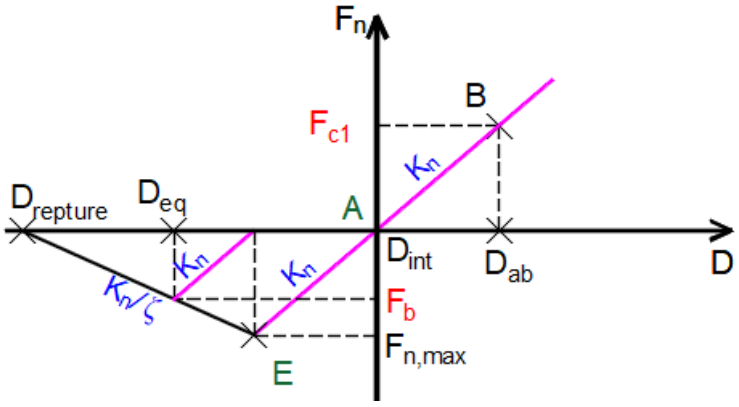
chịu lực kéo), bê tông hay bê tông xỉ thép thể hiện một ứng xử mềm hóa khi đạt giới hạn về cường độ, do đó, độ cứng tương tác sẽ được hiệu chỉnh bởi hệ số mềm hoá ζ khi lực pháp tuyến đạt đến giá trị cực đại $F_{n,max}$. Việc hiệu chỉnh này giúp mô phỏng được ứng xử của vật liệu sau khi đạt đỉnh về ứng suất. Lực pháp tuyến trong giai đoạn này được xác định như sau:

$$F_n = \left(D_{ab} - D_{rupture}\right)\frac{K_n}{\zeta} \tag{5.4}$$

$$F_{n,max} = -CA_{int} \tag{5.5}$$

Trong đó $D_{rupture}$ là khoảng cách giới hạn tương tác giữa hai phần tử, khi khoảng cách giữa hai phần tử vượt quá giá trị này thì tương tác sẽ bị phá hủy; D_{init} là khoảng cách ban đầu của 2 phần tử khi tương tác vừa mới hình thành; C là lực dính đơn vị của các phần tử; A_{int} là diện tích tương tác giữa 2 phần tử.

Tương tác giữa hai phần tử chỉ phá huỷ trong giai đoạn chịu kéo khi: $D_{ab} > D_{rupture}$ lúc này các lực tương tác sẽ hoàn toàn mất đi.



Hình 5.3: Luật tương tác pháp tuyến giữa hai phần tử rời rạc.

5.2.3.2. *Lực tương tác tiếp tuyến*

Lực tương tác tiếp tuyến được tính toán theo phương pháp đề xuất bởi Hart và cộng sự [66]. Phương pháp này được áp dụng cho cả hai loại tương tác, tương tác có tính dính và tương tác thuần túy tiếp xúc. Véc tơ lực tương tác tiếp tuyến F_s được tính toán bởi sự cập nhật hướng tương tác phụ thuộc vào hướng của đường nối tâm của hai phần tử tương tác với nhau, cộng thêm gia số của véc tơ lực tiếp tuyến ΔF_s, như sau:

$$F_s(i) = F_s^{rot2} + \Delta F_s \quad (5.6)$$

Trong đó, F_s^{rot2} là véc tơ hiện tại (bước thứ i) của véc tơ $F_s(i-1)$ đã được kể đến sự dịch chuyển của tương tác. Nó được tính ở 2 bước thời gian và có kể đến sự thay đổi hướng của pháp tuyến của tương tác, theo trình tự sau:

$$F_s^{rot1} = F_s(i-1) - F_s(i-1) \wedge n_{i-1} \wedge n_i \quad (5.7)$$

Gia tốc xoay trung bình theo phương pháp tuyến mới cũng được kể đến:

$$F_s^{rot2} = F_s^{rot1} - F_s^{rot1} \wedge \dot{\omega} dt \quad (5.8)$$

Với $\dot{\omega} = \frac{1}{2}(\dot{\omega_a} + \dot{\omega_b})$, trong $\dot{\omega}_a$ và $\dot{\omega}_b$ là gia tốc xoay của phần tử a và b.

Số gia của véc tơ lực tiếp tuyến được xác định như sau:

$$\Delta F_s = K_s \Delta U_s \quad (5.9)$$

Trong đó: ΔU_s là gia số véc tơ chuyển vị tiếp tuyến giữa các vị trí của điểm tương tác của 2 phần tử sau một bước thời gian Δt. ΔU_s bằng không khi tương tác mới hình thành và sẽ được tính sau đó theo vận tốc tương đối của tương tác V_s^c:

$$V_s^c = V_{b/a} - (V_{b/a} * n_i) n_i \quad (5.10)$$

Trong đó, $V_{b/a}$là vận tốc của phần tử b so với phần tử a, được tính bởi:

$$V_{b/a} = V_b^{Gb} + P_\alpha G_b \wedge \omega_b - V_a^{Ga} + P_\alpha G_a \wedge \omega_a \quad (5.11)$$

Với P_α là điểm tương tác. Như vậy ΔU_s sẽ được tính theo biểu thức sau:

$$\Delta U_s = V_s^c \, dt \quad (5.12)$$

5.2.4. Tiêu chuẩn phá hủy

Để mô phỏng ứng xử trượt giữa các phần tử rời rạc, tiêu chuẩn Mohr – Coulomb hiệu chỉnh được sử dụng (Hình 5.4). Theo tiêu chuẩn này, lực tương tác tiếp tuyến cực đại $F_{s,max}$ được đặc trưng bởi lực pháp tuyến cực đại $F_{n,max}$, lực dính C, góc ma sát tương tác Φ_c và góc nội ma sát Φ_i giữa các phần tử tương tác [82]. Các phần tử tương tác sẽ trượt lên nhau khi lực tương tác tiếp tuyến đạt giá trị cực đại $F_{s,max}$. Trong tiêu chuẩn này, hệ số λ được đưa vào để kiểm soát giới hạn trượt của các tương tác ma sát dính (link interaction) nhằm gia tăng biến dạng hông của mẫu, là thành phần quan trọng trong sự chuyển đổi nén – nở của biến dạng thể tích của mẫu. Lực tiếp tuyến cực đại được xác định như sau:

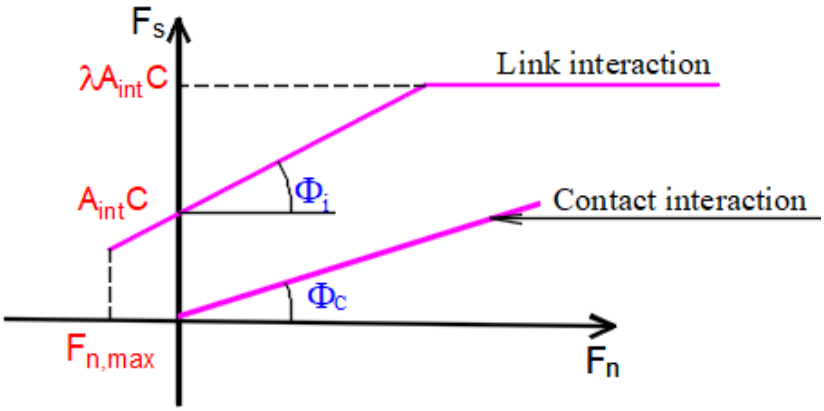
- Tương tác ma sát – dính

$$\begin{cases} F_{s,max} = F_n tan\Phi_i + CA_{int} \text{ khi } F_n tan\Phi_i < (\lambda - 1)CA_{int} \\ F_{s,max} = \lambda\, CA_{int} \text{ khi } F_n tan\Phi_i \geq (\lambda - 1)CA_{int} \end{cases} \quad (5.13)$$

- Tương tác thuần túy tiếp xúc

$$F_{s,max} = F_n tan\Phi_c \quad (5.14)$$

Với $A_{\text{int}} = \pi\left(\min\left(R_a, R_b\right)\right)^2$ là diện tích bề mặt tương tác, C là lực dính.



Hình 5.4: Tiêu chuẩn Mohr – Coulomb dùng trong mô hình [66]

5.2.5. Luật chuyển tiếp mô men

Khi sử dụng các phần tử hình cầu để mô phỏng cho vật liệu, nếu để các phần tử được xoay một cách tự do thì khả năng chịu trượt, cắt của mẫu vật liệu số thường rất nhỏ so với ứng xử thực tế của vật liệu [66]. Do đó, để có thể mô tả chính xác hiện tượng trượt của vật liệu, thì tương tác giữa các phần tử sẽ chuyển tiếp một mô men (Hình 5.5). Mô men này kiểm soát quá trình lăn của các phần tử khi có sự xuất hiện của chuyển vị trượt giữa hai phần tử với nhau. Với luật chuyển tiếp mô men, giới hạn trượt sẽ gia tăng và góc ma sát của vật liệu trong mô phỏng có thể đạt đến giá trị thực nghiệm. Giá trị mô men chuyển tiếp này phụ thuộc vào sự xoay tương đối của hai phần tử tương tác. Giá trị mô men trong giai đoạn đàn hồi được tính như sau:

$$M_{elast} = \sum \theta_r K_r \quad (5.15)$$

$$K_r = \beta_r \frac{EI_f}{R} \quad (5.16)$$

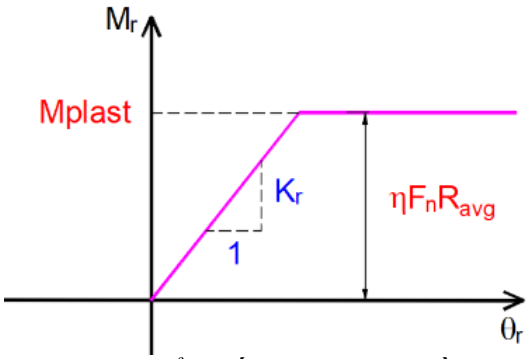
Trong đó, K_r là độ cứng xoay giữa các phần tử được xác định theo công thức (5.16), θ_r là góc xoay tương đối giữa hai phần tử; β_r là hệ số độ cứng xoay; E là mô đun Young của phần tử rời rạc, I_f là mô men quán tính của tiết diện tương tác

$$I_f = \frac{\pi\left[\min\left(R_a, R_b\right)^4\right]}{2} \tag{5.17}$$

Trong luật mô men chuyển tiếp được sử dụng, ứng xử dẻo xuất hiện khi mô men đạt giá trị đàn hồi cực đại, và ứng xử dẻo này là ứng xử dẻo lý tưởng với mô men dẻo lý tưởng được tính như sau [66]:

$$M_{plast} = \eta F_n R_{avg} \tag{5.18}$$

Trong đó, η là hệ số không thứ nguyên được dùng cho mômen dẻo và R_{avg} là bán kính trung bình của hai DE [66].



Hình 5.5: Mô men chuyển tiếp giữa các phần tử tương tác [66]

Mô hình ứng xử phần tử rời rạc này sẽ được đưa vào phần mềm mã nguồn mở YADE [145] để chạy các thí nghiệm mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép.

5.3. Xây dựng mẫu thí nghiệm số

Kế thừa các nghiên cứu trước đây về mô phỏng vật liệu bằng phương pháp phần tử rời rạc và đặc biệt là nghiên cứu của tác giả Tran [66] về việc mô phỏng ứng xử của mẫu bê tông dưới tác dụng của tải trọng ba trục, mẫu bê tông xỉ thép trong nghiên cứu này được mô hình hóa bằng tập hợp các phần tử rời rạc hình cầu. Việc lựa chọn các thông số của mẫu thí nghiệm số (độ lớn hạt, kích thước mẫu, độ rỗng,…) dựa trên các thông số của mẫu thực nghiệm và kích thước cốt liệu cũng như độ rỗng của mẫu thực nghiệm nhằm mục đích có thể thể hiện được ứng xử của bê tông xỉ thép.

Khi mô phỏng vật liệu bê tông, để tiện lợi trong việc thiết lập hình học cũng như thuận tiện trong việc lập trình tính toán, hình dạng của các phần tử rời rạc được lựa chọn là hình cầu [146]. Do đó, trong nghiên cứu này mẫu thí nghiệm số được đề xuất là mẫu hình hộp chữ nhật có tỷ lệ giữa cạnh và chiều cao là 1: 2, kích thước 150x150x300 mm chứa 10000 phần tử rời rạc hình cầu như Hình 5.6. Các phần tử rời rạc này có đường kính nằm trong phạm vi D_{min}=5 mm và D_{max}= 20 mm, được phân bố một cách ngẫu nhiên. Việc lựa chọn mẫu thí nghiệm số khác với mẫu thực nghiệm là hình trụ giúp việc thực hiện các thí nghiệm mô phỏng, dẫn hướng thì nghiệm bằng chuyển vị của các tường biên của mẫu dễ dàng hơn. Sự sai khác này, theo nghiên cứu [66, 146] ảnh hưởng không đáng kể đến kết quả mô phỏng nếu ma sát của các phần tử và tường biên của mẫu xem như bằng không.

Hình 5.6: Mẫu thí nghiệm số hình hộp chữ nhật được đề xuất

Có 3 mẫu thí nghiệm số được tạo thành tương ứng với 3 cấp phối bê tông là XT01, XT02, XT03 của mẫu thực nghiệm để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép.

5.4. Thông số đầu vào của mô hình

Kết quả thực nghiệm ở Chương 3 sẽ là cơ sở cho quá trình xác định thông số đầu vào của mô hình. Các thông số đầu vào cho mô hình phần tử rời rạc để mô phỏng ứng xử của bê tông đã được đề xuất bởi nhiều nghiên cứu trước đây [144]. Trong nghiên cứu này, một số thông số cơ bản của luật ứng xử (α, ζ, λ, β_r, η) được tham khảo từ nghiên cứu của Tran và cộng sự [66], trong đó:

- Các hệ số α, β_r là các hệ số điều chỉnh độ cứng tương tác giữa các phần tử rời rạc, độ cứng này được dựa trên vữa xi măng liên kết giữa các cốt liệu lớn, do đó về bản chất có sự tương đồng giữa 2 loại bê tông thường và bê tông xỉ thép.
- Thông số λ là thông số điều chỉnh của tiêu chuẩn Mohr-Coulomb thể hiện sự trượt của các phần tử rời rạc trong trường hợp tương tác có lực dính điều này tương ứng với sự trượt của các hạt cốt liệu trong môi trường vữa xi măng của mẫu thực nghiệm. Do đó, dù hình dạng của cốt liệu xỉ thép hay đá dăm có khác nhau nhưng trong trường hợp này sự trượt chủ yếu phụ thuộc vào sự phá hủy của môi trường vữa xi măng do đó có thể tham khảo các thông số này từ bê tông thường.
- Thông số η là thông số điều chỉnh giá trị mômen dẻo giữa các phần tử rời rạc để kiểm soát sự lăn của các phần tử rời rạc hình cầu, sự kiểm soát này nhằm đảm bảo góc ma sát của vật liệu số đạt được giá trị của vật liệu thực nghiệm. Tuy nhiên trong nghiên cứu này, chưa đánh giá thông số góc ma sát của vật liệu nên thông số nuy chưa được xác định một cách chính xác. Thông số η được tham khảo từ luật ứng xử của bê tông thường với mục đích kiểm soát sự lăn nhằm tăng khả năng chịu cắt của mẫu thí nghiệm số.
- Thông số η nhằm thể hiện sự mềm hóa ở giai đoạn post peak, tuy nhiên trong thí nghiệm thực nghiệm trên bê tông xỉ thép, giai đoạn mềm hóa sau đỉnh chưa được ghi nhận một cách rõ ràng nên thông số này cũng chưa được đánh giá một cách chính xác từ sự khác nhau giữa bê tông thường và bê tông xỉ thép

Quá trình xác định thông số trong nghiên cứu này chủ yếu là xác định các thông số vật liệu như góc ma sát, mô đun đàn hồi, lực dính đơn vị,…Trong đó, mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của các phần tử rời rạc sẽ được lấy theo giá trị module đàn hồi và hệ số Poisson của mẫu bê tông xỉ thép được xác định ở Chương 3 theo tiêu chuẩn ASTM C469-14 [102] (như Bảng 5.1). Các thông số khác của mô hình như góc ma sát và lực dính giữa các phần tử sẽ được xác định dựa trên việc mô phỏng các thí nghiệm nén một trục.

Bảng 5.1. Thông số đầu vào của mô hình lấy từ kết quả thực nghiệm

Cấp phối	Khối lượng, w_c kg/m^3	Hệ số poisson, ν_c	Module đàn hồi, E_c (GPa)
XT01	2539.20	0.173	31.12
XT02	2574.69	0.180	36.68
XT03	2602.40	0.196	39.21

Hiện nay, việc thực hiện thí nghiệm nén ba trục cho bê tông, bê tông xỉ thép ở Việt Nam là rất hạn chế, do đó các thông số lực dính C và góc ma sát φ của bê tông xỉ thép không được xác định từ thực nghiệm. Để có cơ sở cho việc xác định các thông số này, luận án này đã tham khảo các nghiên cứu có trước về cách xác định thông số cho mô hình rời rạc của bê tông xi măng [66, 144, 147]. Các thông số φ, C của mô hình rời rạc sẽ được xác định tương ứng với các cấp phối khác nhau để đưa vào mô phỏng. Giá trị khởi điểm của φ, C sẽ được chọn dựa trên sự tham khảo các tài liệu [66, 144, 147]. Trong quá trình hiệu chuẩn và xác định thông số, thông số nào được hiệu chuẩn thì các thông số còn lại được giữ cố định. Quá trình hiệu chuẩn thông số này dựa trên sự so sánh kết quả mô phỏng với kết quả thực nghiệm của thí nghiệm nén một trục. Cường độ trong thí nghiệm nén một trục là cơ sở để hiệu chuẩn các giá trị C và góc ma sát φ. Các giá trị C và góc ma sát của mô hình phân tử rời rạc cho các cấp phối XT01, XT02 và XT03 được thể hiện trong Bảng 5.2

Bảng 5.2: Giá trị góc ma sát và lực dính

Cấp phối	Lực dính C, Pa	Góc ma sát φ, (°)
XT01	$0.1.10^6$	5.71
XT02	$0.5.10^6$	5.71
XT03	$0.9.10^6$	5.71

5.5. Mô phỏng số

Sau khi hoàn thành việc tạo mẫu vật liệu, xác định và hiệu chuẩn thông số mô hình như đã trình bày ở phần trên, mô hình phần tử rời rạc sẽ được ứng dụng để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép trong thí nghiệm kéo – nén một trục. Trong các thí nghiệm này, để đảm bảo tính ổn định, biên trên của mẫu thí nghiệm sẽ được áp chuyển vị và biên dưới của mẫu số sẽ cố định. Quá trình mô phỏng sẽ được thực hiện trong

phần mềm mã nguồn mở Yade [145] sau khi đã tích hợp luật ứng xử cục bộ đề xuất ở trên.

Hình 5.7: Điều kiện biên của thí nghiệm kéo, nén

5.5.1. Thí nghiệm nén dọc trục

Điều kiện biên của thí nghiệm nén dọc trục được thể hiện trong Hình 5.7, trong đó chuyển vị được áp ở biên trên $\varepsilon_{trên}$ và biên dưới cố định ứng với mọi bước thời gian trong quá trình mô phỏng số.

Mẫu thí nghiệm số có 4 mặt hông, những mặt hông này sẽ không bị giới hạn chuyển vị để cho mẫu thí nghiệm số được phép nở hông trong quá trình mô phỏng. Thí nghiệm mô phỏng dừng lại khi mẫu thí nghiệm số bị phá hoại, kết quả thí nghiệm được thể hiện qua biểu đồ mối quan hệ giữa σ_1-ε_1.

5.5.2. Thí nghiệm kéo dọc trục

Điều kiện biên của thí nghiệm kéo dọc trục tương tự như thí nghiệm nén một trục. Mẫu thí nghiệm số có 4 mặt hông, những mặt hông này sẽ không bị giới hạn chuyển vị để cho mẫu thí nghiệm số được phép biến dạng hông trong quá trình mô phỏng. Thí nghiệm mô phỏng dừng lại khi mẫu thí nghiệm số bị phá hoại.

5.6. Kết quả mô phỏng số

Kết quả mô phỏng số của các thí nghiệm sẽ được đánh giá dựa trên quan hệ σ_1-ε_1 và được so sánh với kết quả thực nghiệm trên mẫu bê tông xỉ thép cho các cấp phối khác nhau. Sự so sánh này nhằm đánh giá khả năng của mô hình phần tử rời rạc trong

mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép. Bên cạnh đó, kết quả mô phỏng còn được xem xét về sự hình thành và phát triển vết nứt trong mẫu số.

5.6.1. Kết quả thí nghiệm nén dọc trục:

5.6.1.1. *Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng dọc trục*

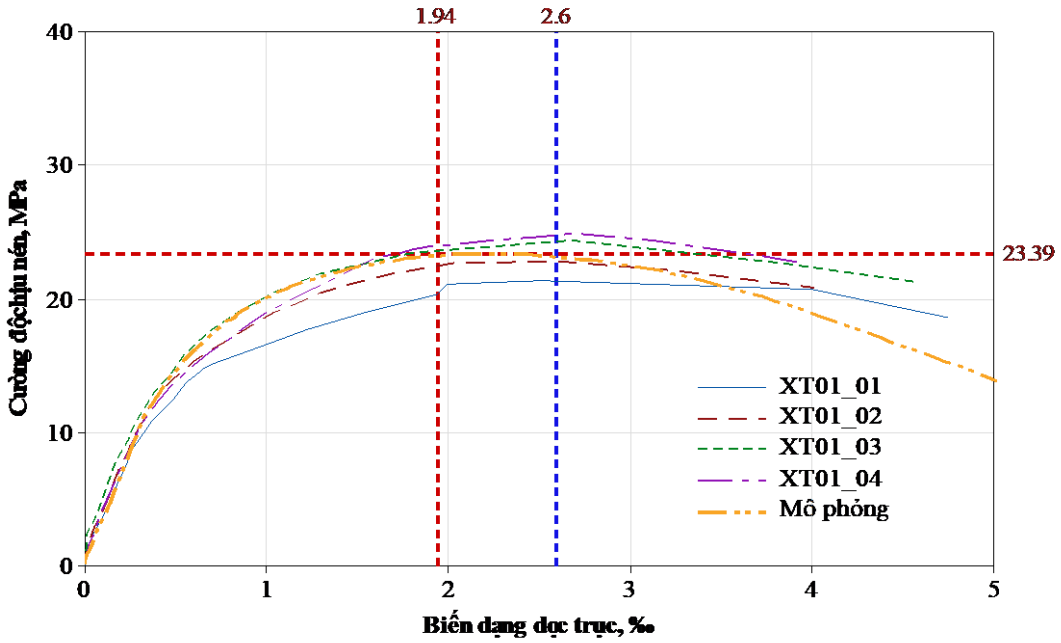
Kết quả thí nghiệm nén của các mẫu thể hiện trong Bảng 5.3 và các biểu đồ ở Hình 5.8, Hình 5.9 và Hình 5.10

Bảng 5.3: Kết quả mô phỏng ứng xử mẫu bê tông xỉ thép

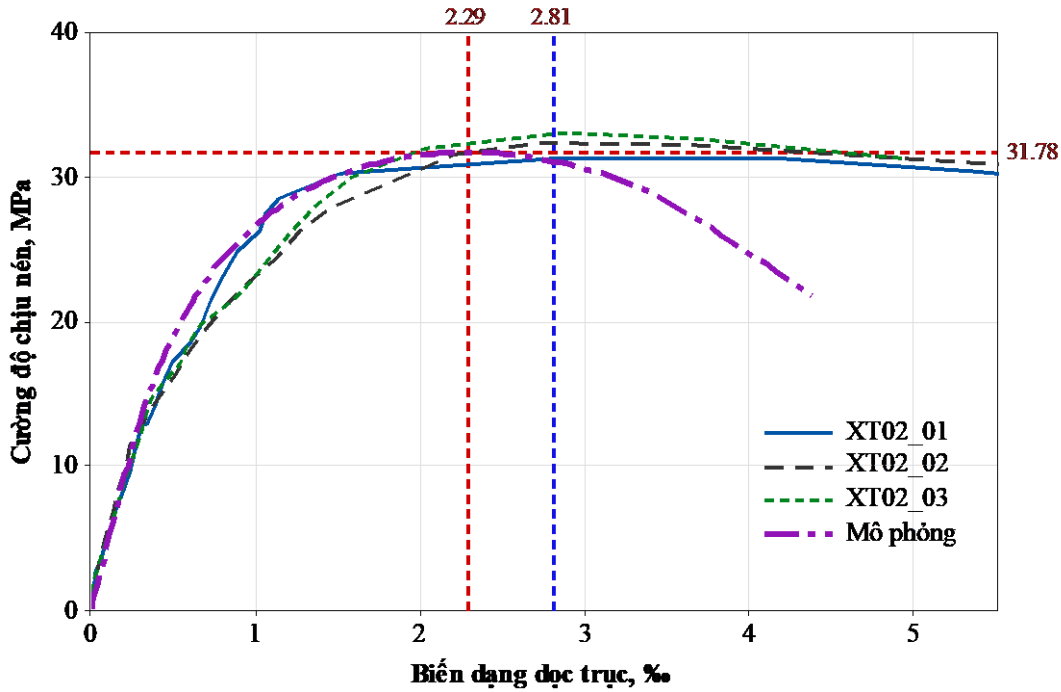
Cấp phối	Ứng suất nén cực hạn (MPa)	Biến dạng cực hạn (‰)
XT01	23.39	1.94
XT02	31.78	2.29
XT03	35.06	2.49

Bảng 5.4: So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

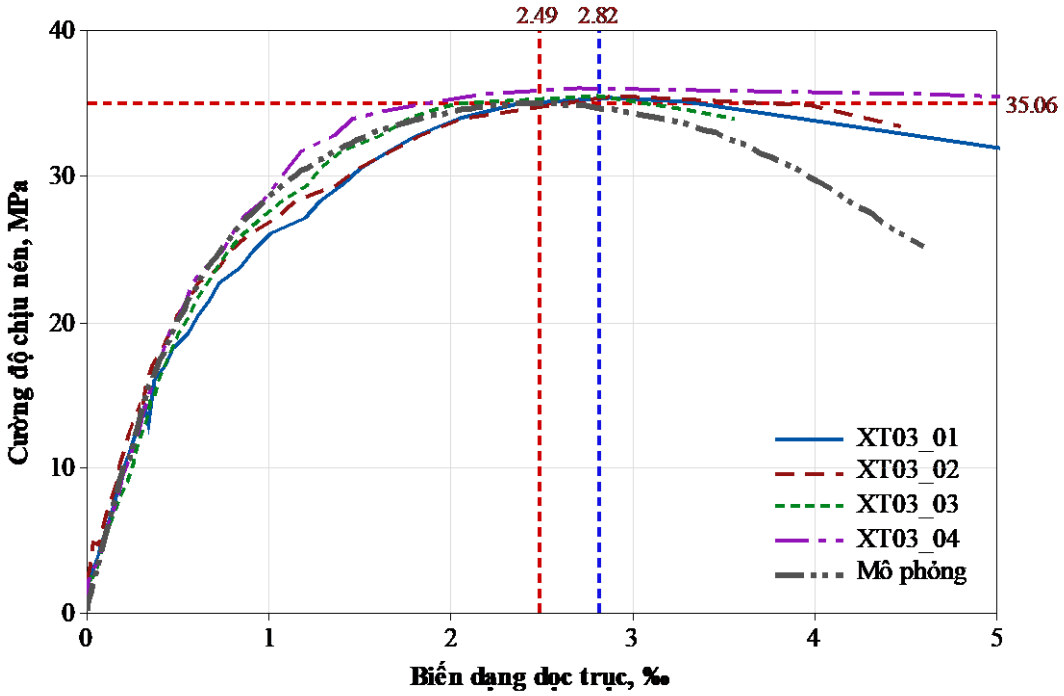
Cấp phối	Ký hiệu mẫu	Ứng suất nén cực hạn mô phỏng, (MPa)	Ứng suất nén cực hạn thực nghiệm (MPa)	Độ lệch (%)
XT01	XT01_01	23.39	21.41	8.47
	XT01_02		22.87	2.22
	XT01_03		24.45	4.53
	XT01_04		24.98	6.80
	Trung bình		23.43	5.50
	Độ lệch chuẩn		1.62	2.72
XT02	XT02_02	31.78	31.33	3.13
	XT02_03		32.35	1.75
	XT02_04		33.1	3.38
	Trung bình		32.26	2.61
	Độ lệch chuẩn		15.34	0.72
XT03	XT03_01	35.06	35.47	2.03
	XT03_02		35.58	2.05
	XT03_03		35.6	1.52
	XT03_04		36.09	2.51
	Trung bình		35.68	2.03
	Độ lệch chuẩn		0.28	0.40



Hình 5.8: So sánh quan hệ ứng suất và biến dạng dọc trục giữa thực nghiệm và mô phỏng_ cấp phối XT01



Hình 5.9: So sánh quan hệ ứng suất và biến dạng dọc trục giữa thực nghiệm và mô phỏng_ cấp phối XT02



Hình 5.10: So sánh quan hệ ứng suất và biến dạng dọc trục giữa thực nghiệm và mô phỏng_ cấp phối XT04

Hình 5.8, Hình 5.9 và Hình 5.10 thể hiện đường quan hệ giữa ứng suất và biến dạng dọc trục của mẫu thí nghiệm thực tế và mẫu thí nghiệm số với 3 cấp phối XT01, XT02, XT03. Kết quả mô phỏng ứng xử mẫu bê tông xỉ thép tương đồng so với kết quả thực nghiệm:

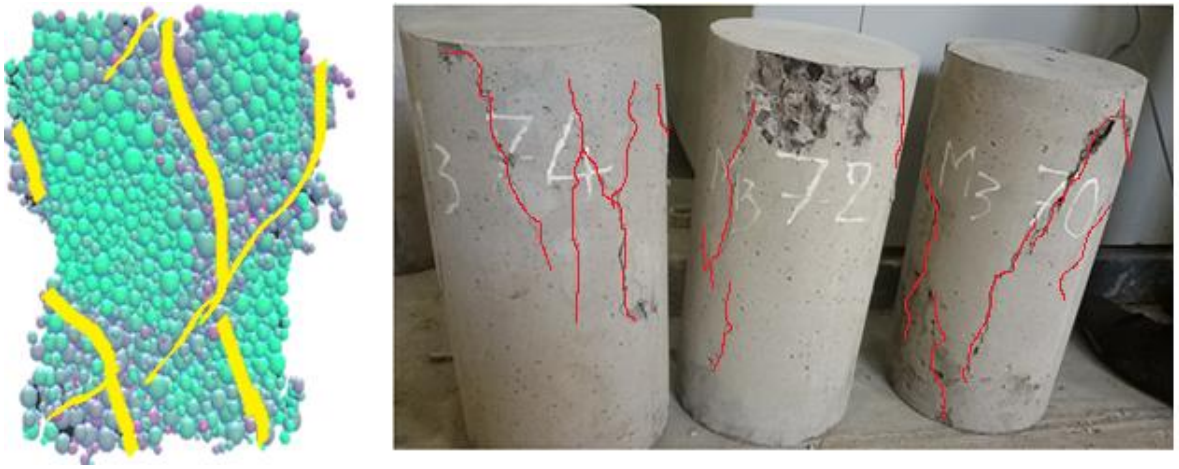
- Trong giai đoạn đầu (tải trọng tăng từ 0 đến khoảng 1/3 tải trọng cực hạn): có thể gọi đây là giai đoạn đàn hồi, khi đường cong mô phỏng là đường thẳng, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng là quan hệ tuyến tính, đường mô phỏng gần như trùng với đường cong thực nghiệm. Như vậy, đường cong mô phỏng đã mô tả đúng ứng xử của mẫu bê tông xỉ thép trong giai đoạn này, khi vết nứt chưa xuất hiện, bê tông làm việc trong giai đoạn đàn hồi.
- Trong giai đoạn tiếp theo (tải trọng tăng cho đến trước khi bị phá hoại): độ dốc của đường cong mô phỏng bắt đầu thay đổi, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng không còn là đường thẳng, kết quả mô phỏng phản ánh đúng xu hướng ứng xử của bê tông xỉ thép. Ứng xử của thí nghiệm mô phỏng cho thấy đây là giai đoạn không đàn hồi trước giới hạn phá hoại khi các đường nứt nhỏ bắt đầu xuất hiện và lan truyền trong cấu trúc bê tông. Tuy nhiên đường cong mô

phỏng có sự lệch so với đường cong thực nghiệm. Biến dạng do mô phỏng nhỏ hơn nên độ dốc của đường cong thực nghiệm trong giai đoạn này lớn hơn, đường cong mô phỏng nằm ở trên đường cong thực nghiệm. Điều này cũng có thể giải thích được là do trong quá trình thí nghiệm, khi vết nứt lan truyền và xuất hiện trên bề mặt sẽ có sự sai số nhất định do thiết bị đo.

- Tại thời điểm mẫu bị phá hoại: do các sai số xuất hiện ở giai đoạn trên làm cho tải trọng trong thí nghiệm mô phỏng có độ lệch so với thực nghiệm, trung bình khoảng 5.5% đối với cấp phối XT01, 2.61% đối với cấp phối XT02 và 2.03% đối với cấp phối XT03 (Bảng 5.4). Mặc dù độ lệch này có giá trị khoảng 2%-5%, tuy nhiên giá trị tải trọng phá hoại do mô phỏng vẫn nằm trong khoảng giữa giá trị nhỏ nhất và giá trị lớn nhất của kết quả thực nghiệm. Điều này cho thấy ứng xử của mẫu thí nghiệm số phù hợp với mẫu thực nghiệm.
- Sau khi mẫu bị phá hoại là giai đoạn ứng xử mềm: đối với mẫu thực nghiệm, các vết nứt nhỏ tập trung lại, tạo thành vùng tập trung phá hủy, bê tông bị mềm hóa, độ cứng giảm mạnh. Điều này cũng xảy ra tương tự trong thí nghiệm mô phỏng, tuy nhiên do vết nứt xuất hiện lớn nên chênh lệch biến dạng giữa mô phỏng và thực nghiệm tương đối lớn. Sau thời điểm phá hoại sự chênh lệch này ghi nhận được càng lớn hơn.

5.6.1.2. *Sự phát triển vết nứt*

Ngoài quan hệ ứng xuất và biến dạng, kết quả mô phỏng số còn cho phép quan sát sự xuất hiện, phát triển và hướng lan truyền vết nứt trong mẫu thí nghiệm. Các vết nứt trong mẫu thí nghiệm số hình thành do sự đứt gãy của các tương tác giữa các DE và sự tương tác giữa các DE chỉ bị phá hủy trong trường hợp chịu kéo (các DE chuyển dịch rời xa nhau). Khi bắt đầu xuất hiện vết nứt, các phần tử DE chuyển từ màu xanh sang màu tím, qua quan sát cho thấy các phần tử DE màu tím bắt đầu xuất hiện bên trong, tại trọng tâm của mẫu thí nghiệm số, sau đó bắt đầu lan tỏa ra bên ngoài theo hướng xiên. Sự phát triển vết nứt trong mẫu số dường như tương đồng với vết nứt quan sát được trên mẫu thực nghiệm.



Hình 5.11: Quan sát vết nứt trên mẫu thí nghiệm số và mẫu thí nghiệm thực nghiệm

5.6.2. Kết quả thí nghiệm kéo

Cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông xỉ thép rất khó xác định, trong phần thực nghiệm của tác giả ở Chương 3 chỉ có kết quả cường độ chịu kéo gián tiếp thông qua thí nghiệm uốn và ép chẻ. Do đó, kết quả mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép khi kéo dọc trục là một đóng góp quan trọng trong việc nghiên cứu ứng xử của bê tông xỉ thép. Quan hệ giữa ứng suất kéo và biến dạng dọc trục của cấp phối XT01, XT02, XT03 lần lượt được thể hiện ở Hình 5.12.

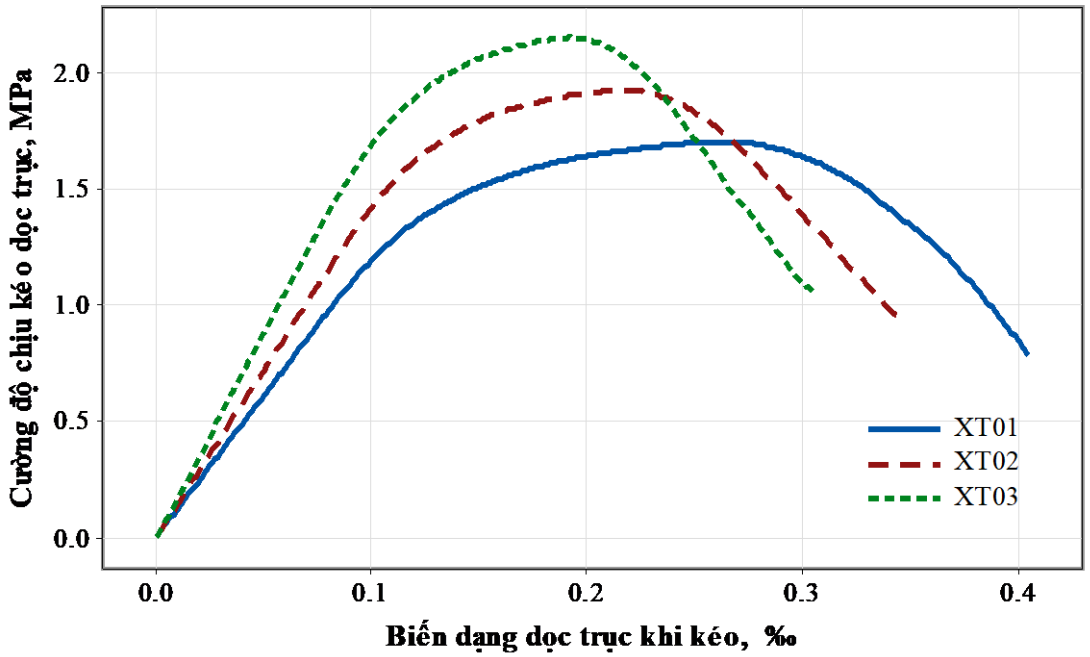
Từ kết quả ở Bảng 5.5, cho thấy cường độ kéo dọc trục do mô phỏng của các mẫu XT02, XT02, XT03 có giá trị từ 1.70 MPa đến 2.15 MPa. Thiết lập các tỷ số K_{omp} giữa cường độ kéo dọc trục so với căn bậc hai của cường độ nén từ kết quả mô phỏng như Bảng 5.6. Kết quả cho thấy K_{omp}=0.355-0.364, trong khi giá trị này của bê tông truyền thống là K_o=0.33 (3.11) [46] . Như vậy, mặc dù không có số liệu thực nghiệm về kéo trực tiếp, nhưng qua so sánh hệ số K_o có thể nhận xét rằng kết quả mô phỏng ứng xử kéo dọc trục của mẫu bê tông xỉ thép phù hợp với ứng xử chung của bê tông xi măng, kết quả tương tự như bê tông dùng cốt liệu tự nhiên, do đó có thể dùng kết quả mô phỏng này để dự đoán cường độ chịu kéo của mẫu bê tông xỉ thép khi không có kết quả thực nghiệm.

Bảng 5.5: Kết quả mô phỏng kéo dọc trục

Ký hiệu mẫu	Ứng suất kéo cực hạn (MPa)	Biến dạng tại đỉnh (‰)
XT01	1.70	0.264
XT02	1.92	0.217
XT03	2.15	0.192

Bảng 5.6: So sánh kết quả kéo dọc trục do mô phỏng với thực nghiệm

Ký hiệu mẫu	Cường độ nén f'_{cmp} (MPa)	Cường độ kéo dọc trục f_{omp} (MPa)	$K_{omp} = \frac{f_{omp}}{\sqrt{f'_{cmp}}}$
XT01	23.16	1.70	0.355
XT02	31.37	1.92	0.345
XT03	34.96	2.15	0.364



Hình 5.12: Quan hệ giữa ứng suất kéo và biến dạng dọc trục trong thí nghiệm mô phỏng kéo dọc trục mẫu thí nghiệm số XT01, XT02, XT03

5.7. Kết luận Chương 5

- Kết quả mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép trong thí nghiệm nén và kéo dọc trục tương đồng với kết quả thực nghiệm, sai số khoảng 2-5%. Kết quả này chứng tỏ rằng mô hình số đã mô tả được ứng xử của bê tông xỉ thép, điều này

tạo tiền đề cho các nghiên cứu mô phỏng kế tiếp như mô phỏng số cho cấu kiện dầm, cột, nút khung và kết cấu móng BTCT...

- Kết quả mô phỏng về thí nghiệm nén dọc trục cho phép xác định được ứng suất phá hoại của bê tông xỉ thép, đồng thời quan sát được quá trình phát triển và lan truyền vết nứt. Đây chính là ưu điểm của phương pháp phần tử rời rạc so với các phương pháp khác, với phương pháp phần tử rời rạc việc mô tả ứng xử của vật liệu sau khi xuất hiện vết nứt và khi sự phá hủy đã xuất hiện hoàn toàn có khả năng thực hiện được.
- Kết quả mô phỏng về thí nghiệm kéo dọc trục cho phép dự đoán cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông xỉ thép khi các thí nghiệm về kéo dọc trục trong thực tế khó thực hiện.
- Các kết quả mô phỏng đã khẳng định được khả năng của mô hình phần tử rời rạc trong mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép, tạo tiền đề cho việc ứng dụng mô hình này vào mô phỏng dự đoán kết cấu sử dụng bê tông xỉ thép.

CHƯƠNG 6

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

6.1. Kết luận và đánh giá kết quả

Kết quả nghiên cứu của đề tài cung cấp các thông tin hữu ích như sau:

- Xỉ thép nghiên cứu có các chỉ tiêu cơ lý đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật của cốt liệu lớn dùng để chế tạo bê tông xi măng có cấp độ bền từ B25 trở lên. Vì vậy, xỉ thép có thể dùng để thay thế đá dăm làm cốt liệu lớn cho bê tông xi măng;
- Đề xuất các công thức hiệu chỉnh lượng nước và xi măng khi áp dụng chỉ dẫn kỹ thuật của Bộ Xây dựng để thiết kế thành phần cấp phối bê tông xỉ thép như sau:

  $X_{hc} = 0.9.X_{tt}$

  $N_{\mathrm{hc}} = N_{tb} + H_p.XT$

- Đề xuất công thức dự đoán cường độ chịu nén của bê tông xỉ thép theo ngày tuổi như sau:

$$\begin{cases} XT01: f_c'(t) = \dfrac{t}{0.019t + 0.206} \\ XT02: f_c'(t) = \dfrac{t}{0.017t + 0.145} \\ XT03: f_c'(t) = \dfrac{t}{0.015t + 0.121} \end{cases}$$

- Đã thiết lập được hệ số chuyển đổi cường độ nén của bê tông xỉ thép khi thí nghiệm với các mẫu có hình dạng và kích thước khác mẫu chuẩn (hình lập phương: 150x150x150 mm);
- Đề xuất công thức dự đoán được module đàn hồi của bê tông xỉ thép khi biết khối lượng thể tích và cường độ nén như sau:

  $E = k_E * w_c^{1.5}.\sqrt{f_c'}$ (với k_E=0.049)

- Đã thiết lập được hệ số chuyển đổi cường độ kéo khi ép chẻ của bê tông xỉ thép khi thí nghiệm với các mẫu có hình dạng và kích thước khác mẫu chuẩn (hình trụ: 150x300 mm; hình lập phương: 150x150x150mm);

- Mô hình phần tử rời rạc đã được xây dựng để mô phỏng ứng xử của bê tông xỉ thép. Kết quả đã khẳng định được tính đúng đắn của mô hình thông qua việc so sánh với kết quả thực nghiệm. Bên cạnh đó, mô hình phần tử rời rạc còn cho thấy tính ưu việc trong việc mô phỏng sự phá hủy của vật liệu thông qua quan sát được quá trình phát triển, lan truyền vết nứt và cho phép dự đoán cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông xỉ thép khi các thí nghiệm về kéo dọc trục trong thực tế khó thực hiện;
- Dầm BTCTXT có ứng xử tương tự dầm BTCT dùng cốt liệu truyền thống, dạng phá hoại của dầm là uốn-cắt đồng thời;
- Có thể áp dụng các lý thuyết của bê tông và dầm bê tông cốt thép truyền thống cho BTXT và dầm BTCTXT. Do đó, trong trường hợp các tiêu chuẩn thiết kế, tính toán cũng như thi công và nghiệm thu của BTXT và dầm BTCTXT chưa được ban hành thì có thể áp dụng các tiêu chuẩn của bê tông và dầm bê tông cốt thép truyền thống cho BTXT hay dầm BTCTXT.

6.2. Kiến nghị

- Với mô hình phần tử rời rạc đã được kiểm chứng thông qua việc mô phỏng ứng xử bê tông xỉ thép trong thí nghệm kéo – nén một trục, mô hình này cần được áp dụng để mô phỏng ứng xử của kết cấu bê tông xỉ thép như mô phỏng cho cấu kiện dầm, cột, nút khung và kết cấu móng...Điều này là rất cần thiết cho công tác tính toán thiết kế, do đócần tiếp tục thực hiện nghiên cứu và phát triển.
- Nghiên cứu, chủ yếu tập trung thực nghiệm ở trong phòng thí nghiệm, cần có những nghiên cứu triển khai thực nghiệm ở công trình thực tế là hướng kiến nghị cho các nghiên cứu tiếp theo.

DANH MỤC CÔNG BỐ KHOA HỌC

Kết quả từ luận án này được trình bày tại các hội nghị quốc gia, quốc tế cũng như được công bố trên các tạp chí trong nước và quốc tế

TẠP CHÍ QUỐC TẾ

1. T.-T.-H. Nguyen, H.-H. Mai, D.-H. Phan, and D.-L. Nguyen, "Responses of Concrete Using Steel Slag as Coarse Aggregate Replacement under Splitting and Flexure," *Sustainability*, vol. 12, no. 12, p. 4913, 2020.
2. T.-T.-H. Nguyen, D.-H. Phan, H.-H. Mai, and D.-L. Nguyen, "Investigation on Compressive Characteristics of Steel-Slag Concrete," *Materials*, vol. 13, no. 8, p. 1928, 2020.

TẠP CHÍ TRONG NƯỚC

3. N. T. T. Hằng, P. Đ. Hùng, and M. H. Hà, "Xác định các đặc trưng cơ học của bê tông sử dụng xỉ thép như cốt liệu lớn," *Tạp chí Xây Dựng*, vol. 02, 2016.
4. T. V. Tiếng, N. T. T. Hằng, and P. Đ. Hùng, "Sử dụng mô hình kết hợp lưu chất – phần tử rời rạc trong mô phỏng ứng xử của bê tông ẩm bão hòa nước," *Tạp chí Xây Dựng*, vol. 03/2016, 2016.

HỘI NGHỊ QUỐC TẾ

5. N. T. T. Hang, N. X. Khanh, and T. V. Tieng, "Discrete Element Modeling of Steel Slag Concrete," in *International Conference on Engineering Research and Applications*, 2018, pp. 284-290: Springer.
6. T. V. Tieng, N. T. T. Hang, and N. X. Khanh, "Compressive Behavior of Concrete: Experimental Study and Numerical Simulation Using Discrete Element Method," in *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development*, Cham, 2021, pp. 570-579: Springer International Publishing.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Tổng quan tình hình sử dụng công nghệ trong các nhà máy sản xuất thép tại Việt Nam (2019). *https://tapchiduan.info/tong-quan-tinh-hinh-su-dung-cong-nghe-trong-cac-nha-may-san-xuat-thep-tai-viet-nam/*

[2] Cundall P A and Strack O D L, 1979, 29 (1): 47–65, "A discrete element model for granular assemblies," *Geotechnique*, vol. 29, p. 47–65, 1979.

[3] A. T. Tran, G. H. Tran, N. T. H. Nguyen *et al.*, "Characterization of carbonated steelmaking slag and its potential application in construction," *VN. Jour. Sci.Tech*, vol. 57, p. 61, 2019.

[4] "Bản Tin Vật liệu xanh," ed: Công ty TNHH Vật liệu lanh, 2012.

[5] "Chỉ dẫn kỹ thuật – Xỉ gang và xỉ thép sử dụng làm vật liệu xây dựng," ed. Việt Nam: Bộ Xây dựng 2017.

[6] A. Mladenović, "Application of steel slag aggregate in road construction". *ARCHES and SPENS Final Seminar*, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, 2009, p. 1-50.

[7] R. Alizadeh, M. Chini, P. Ghods *et al.*, "Utilization of electric arc furnace slag as aggregates in concrete–environmental issue". in Proceedings of the *Proceedings of the 6th CANMET/ACI international conference on recent advances in concrete technology. Bucharest, Romania*, 2003, p. 451-464.

[8] I. Netinger, M. J. Rukavina, and A. Mladenovič, "Improvement of post-fire properties of concrete with steel slag aggregate," *Procedia Engineering*, vol. 62, p. 745-753, 2013.

[9] M. R. Hainin, M. M. A. Aziz, Z. Ali *et al.*, "Steel Slag as A Road Construction Material," *Jurnal Teknologi*, vol. 73, p. 33-38, 2015.

[10] J. Waligora, D. Bulteel, P. Degrugilliers *et al.*, "Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags," *Materials Characterization* vol. 61, p. 39-48, 2010.

[11] W. Xuequan, Z. Hong, H. Xinkai *et al.*, "Study on steel slag and fly ash composite Portland cement," *Cement Concrete Composites*, vol. 29, p. 1103-1106, 1999.

[12] M. Barra, E. Ramonich, and M. Munoz, "Stabilization of soils with steel slag and cement for application in rural and low traffic roads". in Proceedings of the *Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation ApplicationsUniversity of New Hampshire, Durham*, 2001, p. 423–432.

[13] M. Luxán, R. Sotolongo, F. Dorrego *et al.*, "Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace," *Cement Concrete Composites*, vol. 30, p. 517-519, 2000.

[14] J. M. Manso, J. A. Polanco, M. Losanez *et al.*, "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate," *Cement Concrete Composites*, vol. 28, p. 528-534, 2006.

[15] C. Shi, "Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, p. 230-236, 2004.

[16] Tossavainen, Mia, Fredrik Engstrom *et al.*, "Characteristics of steel slag under different cooling conditions," *Waste management 27,* vol. 10, p. 1335-1344., 2007.
[17] P. Tsakiridis, G. Papadimitriou, S. Tsivilis *et al.*, "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production," *Journal of Hazardous Materials,* vol. 152, p. 805-811, 2008.
[18] T. Sofilić, A. Mladenovič, and U. Sofilić, "Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production," *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management,* vol. 19, p. 148-157, 2011.
[19] M. Nicolae, I. Vîlciu, and F. Zaman, "X-ray diffraction analysis of steel slag and blast furnace slag viewing their use for road construction," *UPB Scientific Bulletin Series B,* vol. 69, p. 99-108, 2007.
[20] GR. Qian, DD. Sun, JH. Tay *et al.*, "Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag," *British ceramic transactions,* vol. 101, p. 159-164, 2002.
[21] J. Geiseler, "Use of steelworks slag in Europe," *Waste Management,* vol. 16, p. 59-63, 1996.
[22] S. G. Gurmel, J. F.-H. Richard, and J. James. "The utilisation of recycled aggregates generated from highway arisings and steel slag fines". Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Birmingham, 2004.
[23] V. Maruthachalam and M. Palanisamy, "High performance concrete with steel slag aggregate," *GRAĐEVINAR,* vol. 66, p. 605–612, 2014.
[24] Tahir Sofilić, Ana Mladenovič, and U. Sofilić, "Characterization of the EAF steel slag as aggregate for use in road construction". in Proceedings of the *CISAP4, 4th International Conference on Safety & Environment in Process Industry*, 2010, p. 117-123.
[25] M. Maslehuddin, A. M. Sharif, M. Shameem *et al.*, "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 17, p. 105-112, 2003.
[26] H. Motz and J. Geiseler, "Products of steel slags an opportunity to save natural resources," *Waste management,* vol. 21, p. 285-293, 2001.
[27] S. Lykoudis and I. Liapis, "Egnatia Odos, the 670 km project and EAF slag". *Ferrous Slag–Resource Development for an Environmentally Sustainable World*, Proceedings of the 6th European Slag Conference, Madrid, Spain, EUROSLAG Publication 2010, p. 335-346.
[28] Steel statistical year book 2016 (2016). World Steel Association. *https://www.worldsteel.org/zh/dam/jcr:37ad1117-fefc-4df3-b84f-6295478ae460/Steel+Statistical+Yearbook+2016.pdf*
[29] Production and uses of steel slag in Japan (2016). Nippon Slag Association. *http://www.slg.jp/pdf/Steel%20Slag%202016FY.pdf*

[30] *Euroslag Association. "Position paper on the status of ferrous slag"*, (2012). http://projects.gibb.co.za/Portals/3/App%20J13_Position_Paper_April_2012.pdf.
[31] H. G. Van Oss, "Slag-iron and steel," *US geological survey minerals yearbook*, vol. 1, p. 85-115, 2003.
[32] J. Guo, Y. Bao, and M. Wang, "Steel slag in China: Treatment, recycling, and management," *Waste management*, vol. 78, p. 318-330, 2018.
[33] H. Qasrawi, "The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment," *Construction Building Materials*, vol. 54, p. 298-304, 2014.
[34] M. Maslehuddin, A. M. Sharif, M. Shameem *et al.*, "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes," *Construction building materials*, vol. 17, p. 105-112, 2003.
[35] H. Qasrawi, F. Shalabi, and I. Asi, "Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate," *Construction Building Materials*, vol. 23, p. 1118-1125, 2009.
[36] M. Ameri, H. Shahabishahmiri, and S. Kazemzadehazad, "Evaluation of the use of steel slag in concrete". in Proceedings of the *ARRB Conference, 25th, 2012, Perth, Western Australia, Australia*, 2012, p.
[37] G. Wang, "Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate," *Construction Building Materials*, vol. 24, p. 1961-1966, 2010.
[38] Q. Wang, P. Yan, J. Yang *et al.*, "Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete," *Construction Building Materials*, vol. 47, p. 1414-1420, 2013.
[39] M. Maslehuddin, M. Shameem, M. Ibrahim *et al.*, "Performance of steel slag aggregate concretes," in *Exploiting Wastes in Concrete*: Thomas Telford Publishing, 1999, pp. 109-119.
[40] J. M. Manso, J. J. Gonzalez, and J. A. Polanco, "Electric arc furnace slag in concrete," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 16, p. 639-645, 2004.
[41] J. P. Patel, "*Broader use of steel slag aggregates in concrete*". Masters of science in civil engineering. Cleveland State University 2008.
[42] Ioanna Papayianni and Eleftherios Anastasiou, "Utilization of Electric Arc Furnace Steel Slags in Concrete Products". *The 6th European Slag Conference*, Madrid, 2010, p.
[43] I. Netinger, D. Bjegović, and G. Vrhovac, "Utilisation of steel slag as an aggregate in concrete," *Materials structures*, vol. 44, p. 1565-1575, 2011.
[44] Liu Chunlin, Zha Kunpeng, and Chen Depeng, "Possibility of Concrete Prepared with Steel Slag as Fine and Coarse Aggregates: A Preliminary Study," *Procedia Engineering*, vol. 24, p. 412 – 416, 2011.
[45] Sang-Woo Kim, Yong-Jun Lee, and Kil-Hee Kim, "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Electric Arc Furnace Slag Aggregates," *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 11, p. 138, 2012.

[46] ACI Committee 318, ""Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI-318:)"," vol. ACI 318-11, ed. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2011.
[47] S. A. Tarawneh, E. S. Gharaibeh, and F. M. Saraireh, "Effect of using steel slag aggregate on mechanical properties of concrete," *American Journal of Applied Sciences,* vol. 11, p. 700, 2014.
[48] Hisham Qasrawi, "The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggreg," *Construction and Building Materials,* vol. 54, p. 298–304, 2014.
[49] R. Taha, N. Al-Nuaimi, A. Kilayli *et al.*, "Use of local discarded materials in concrete," *International Journal of Sustainable Built Environment,* vol. 3, p. 35-46, 2014.
[50] A. A. Sharba, "The efficiency of steel slag and recycled concrete aggregate on the strength properties of concrete," *KSCE Journal of Civil Engineering,* vol. 23, p. 4846-4851, 2019.
[51] V. Ducman and A. Mladenovič, "The potential use of steel slag in refractory concrete," *Materials Characterization,* vol. 62, p. 716-723, 2011.
[52] J. Liu and R. Guo, "Applications of steel slag powder and steel slag aggregate in ultra-high performance concrete," *Advances in Civil Engineering,* vol. 2018, p. 2018.
[53] X. Zhang, S. Zhao, Z. Liu *et al.*, "Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness," *Construction Building Materials,* vol. 214, p. 28-36, 2019.
[54] H. Beshr, A. A. Almusallam, and M. Maslehuddin, "Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 17, p. 97-103, 2003.
[55] R. Alizadeh, M. Chini, P. Ghods *et al.*, "Utilization of Electric Arc Furnace Slag as Aggregates in Concrete". in Proceedings of the *6th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, Bucharest, Romania, 2013, p. 451-464.
[56] Y. Biskri, D. Achoura, N. Chelghoum *et al.*, "Mechanical and durability characteristics of High Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates," *Construction Building Materials,* vol. 150, p. 167-178, 2017.
[57] Saaid I. Zaki, Ibrahim M. Metwally, and Sameh A. El-Betar, "Flexural Behavior of Reinforced High-Performance Concrete Beams Made with Steel Slag Coarse Aggregate," *International Scholarly Research Network,* vol. 2011, p. 10, 2011.
[58] W. B. Lankananda, T. DP, C. THT *et al.*, "A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS". in Proceedings of the *Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing*, 2011, p. 260-264.

[59] D. Sihua, Q. Ze, and W. Li, "Nonlinear analysis of reinforced concrete Beam bending failure experimentation based on ABAQUS". in Proceedings of the *First International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy*, 2015, p. 439-443.
[60] S.V.Chaudhari and M.A.Chakrabarti, "Modeling of concrete for nonlinear analysis using finite element code ABAQUS," *International Journal of Computer Applications*, vol. 44, p. 14-18, 2012.
[61] N. Đ. Đức and Đ. N. Mai, "Sức bền vật liệu và kết cấu," ed: NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2011.
[62] P. A. Cundall, "A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems". in Proceedings of the *International Symposium on Rock Mechanics*, 1971, p. 2-8.
[63] S. Sinaie, "Application of the discrete element method for the simulation of size effects in concrete samples," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 108, p. 244-253, 2017.
[64] S. Sinaie, T. D. Ngo, and V. P. Nguyen, "A discrete element model of concrete for cyclic loading," *Computers & Structures*, vol. 196, p. 173-185, 2018.
[65] J. Kozicki and J. Tejchman, "Simulations of fracture processes in concrete using a 3D lattice model". in Proceedings of the *Computational Fracture and Failure of Materials and Structures* 2007, p. 62-63.
[66] T. Tran, F. V. Donzé, and P. Marin, "A discrete element model of concrete under high triaxial loading," *Cement Concrete Composites*, vol. 33, p. 936-948, 2011.
[67] M. Viktor, G. Annika, K. Knut *et al.*, "Simulation of fresh concrete flow using Discrete Element Method (DEM): theory and applications," *Materials*, vol. 47, p. 615-630, 2014.
[68] N. Michał and J. Tejchman, "Modelling of concrete behaviour in uniaxial compression and tension with DEM," *Granular Matter*, vol. 17, p. 145-164, 2015.
[69] R. Hart, P. A. Cundall, and J. Lemos, "Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part II. Mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks". in Proceedings of the *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1988, p. 117-125.
[70] F. Alonso-Marroquín, I. Vardoulakis, H. J. Herrmann *et al.*, "Effect of rolling on dissipation in fault gouges," *Physical Review E*, vol. 74, p. 3-13, 2006.
[71] S. Potapov, A. Masurel, P. Marin *et al.*, "Mixed DEM/FEM modeling of advanced damage in reinforced concrete structures," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 143, p. 4-16, 2017.
[72] A. Antoniou, "*Discrete element modeling of concrete structures under impact*". PhD dissertation. Université Grenoble Alpes, 2018.
[73] F. Donze, S.-A. Magnier, L. Daudeville *et al.*, "Numerical Study of Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 125, p. 1154-1163, 1999.

[74] V/v: Xin ý kiến về giải pháp tái chế xỉ thép từ lò điện hồ quang thành vật liệu xây dựng, vật liệu làm đường giao thông hạn chế khai thác tài nguyên và bảo vệ môi trường, Văn bản số 31/BXD-VLXD, ngày 07/6/2011.
[75] T. V. Mien. "Đề tài: Nghiên cứu tận dụng xỉ thải công nghiệp của các nhà máy luyện thép để sản xuất gạch lát vỉa hè phục vụ phát triển cơ sở hạ tầng thân thiện với môi trường". Khoa Kỹ thuật xây dựng, Đại học Bách Khoa, 2012.
[76] N. V. Phước, L. T. D. Hạnh, H. N. Minh *et al.*, "Tái chế xỉ thép lò hồ quang điện làm thành phần phụ gia khoáng xi-măng," *Tạp chí KHCN Xây dựng* vol. 2, p. 49-57, 2014.
[77] Trần Văn Miền and Tôn Nữ Phương Nhi, "Nghiên cứu các tính chất của bê tông sử dụng cốt liệu xỉ thép," *Tạp chí Xây dựng*, p. 125-128, 2014.
[78] T. V. Mien, N. V. Chanh, T. Nawa *et al.*, "Properties of high strength concrete using steel slag coarse aggregate," *The IES Journal Part A: Civil Structural Engineering*, vol. 2, p. 202-214, 2009.
[79] L. N. H. Phương and T. A. Tuấn, "Tổng quan sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng ứng suất có hiệu trong đất chưa bão hòa," *Tạp chí Giao thông vận tải*, p. 2019.
[80] N. T. Cường, V. T. M. Ý, and D. T. T. Hương, "Phương pháp phần tử rời rạc (Discrete Element Method – DEM) và ứng dụng để mô phỏng số trong Cơ học đất". *Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ IX*, Hà Nội, 2012, p. 25-32.
[81] T. V. Tiếng, N. T. T. Hằng, and P. Đ. Hùng, "Sử dụng mô hình kết hợp lưu chất – phần tử rời rạc trong mô phỏng ứng xử của bê tông ẩm bão hòa nước," *Tạp chí Xây Dựng*, vol. 03/2016, p. 226-230, 2016.
[82] T. V. Tiếng and N. V. Bình, "Xây dựng mô hình số nhằm mô phỏng ứng xử của đất bằng phương pháp phần tử rời rạc(DEM)," *Tạp chí Xây Dựng*, vol. 08/2017, p. 2017.
[83] Ivanka Netinger, Marija Jelčić Rukavina, Marijana Serdar *et al.*, "Steel slag as a valuable material for concrete production," *Technical Gazette*, vol. 21, p. 1081 -1088, 2014.
[84] T. V. Miền and T. N. P. Nhi, "Nghiên cứu các tính chất của bê tông sử dụng cốt liệu xỉ sắt," *Tạp chí Xây Dựng*, vol. 7, p. 125-128, 2014.
[85] Bụi lò tồn đọng không nơi xử lý (2013). *https://plo.vn/thoi-su/chat-thai-doc-hai-nganh-thep-di-dau-bai-1-bui-lo-ton-dong-khong-noi-xu-ly-292954.html*
[86] Bà Rịa – Vũng Tàu: Chật vật bài toán xử lý xỉ thép (2018). *https://baotainguyenmoitruong.vn/ba-ria-vung-tau-chat-vat-bai-toan-xu-ly-xi-thep-238151.html*
[87] K. Ziauddin, M. Hadeel, A.-O. Khalaf *et al.*, "Review of steel slag utilization in Saudi Arabia," *The 6 Saudi Engineering Conference, KFUPMth*, vol. 3, p. 369–381, 2003.
[88] P. Ziemkiewicz and J. Skousen, "Steel Slag in Acid Mine Drainage Treatment and Control," *Journal American Society of Mining and Reclamation*, vol. 1999, p. 651-656, 1999.
[89] Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử, TCVN 7572:2006, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2006.

[90] Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI 211.1-91, American Concrete Institute, 1991.
[91] F.-y. LIN and K. HU, "The Design of Concrete Mix by the DREUX-GORISSE Method," *Yunnan Water Power*, p. 63-67, 2013.
[92] L. N. S Yousfi, M. Saidani, and H. Hadjab, "The use of the dreux-gorisse method in the preparation of concrete mixes: an automatic approach," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 15, p. 79-94, 2014.
[93] A. Merida, F. Kharchi, and R. Chaid, "Measure of the Chloride Permeability of the Pozzolana concrete in Sulphate Middle," *Procedia-Social Behavioral Sciences*, vol. 195, p. 2668-2674, 2015.
[94] P. D. Hữu, N. X. Quảng, and M. Đ. Lộc, "Vật liệu xây dựng," ed: NXB Giao thông vận tải, 2008.
[95] Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại, Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD, B. X. Dựng, Hà Nội, 1998.
[96] Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ, TCVN 6016:2011, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2011.
[97] Xi măng - Phương pháp xác định độ mịn, TCVN 4030:2003, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2003.
[98] Xi măng - Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích, TCVN 6017:2015, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2015.
[99] Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng - lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử, TCVN 3105 : 1993, Bộ Khoa học và Công nghệ, 1993.
[100] Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt, TCVN 3106 : 1993, Bộ Khoa học và Công nghệ, 1993.
[101] Bê tông nặng-Phương pháp xác định cường độ nén, TCVN 3118 : 1993, Bộ Khoa học và Công nghệ, 1993.
[102] Standard test method for static modulus of elasticity Poisson's ratio of concrete in compression, ASTM C469-14, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2014.
[103] H. Zhang, B. Šavija, and E. Schlangen, "Combined experimental and numerical study on micro-cube indentation splitting test of cement paste," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 199, p. 773-786, 2018.
[104] Phạm Duy Hữu. *Bê tông cường độ cao và chất lượng cao*. NXB Xây dựng, 2008.
[105] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese. *Design and Control of Concrete Mixtures*. Portland Cement Association, 2003.
[106] Joseph F. Lamond and James H. Pielert. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International, 2006.
[107] Stress-Strain Behaviour of Concrete School of Civil Engineering, Purdue University. http://www.theconcreteportal.com/cons_rel.html
[108] D. L. Nguyen, D. K. Thai, T. T. Ngo *et al.*, "Weibull modulus from size effect of high-performance fiber-reinforced concrete under compression and flexure," *Cons Build. Mater*, vol. 226, p. 743-758, 2019.

[109] D. L. Nguyen and D. J. Kim, "Sensitivity of various steel-fiber types to compressive behavior of ultra–high–performance fiber–reinforced concretes". in Proceedings of the *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC* Montpellier, France, 2017, p. 45 - 52.
[110] A. Rađenović, J. Malina, and T. Sofilić, "Characterization of ladle furnace slag from carbon steel production as a potential adsorbent," *Advances in Materials Science Engineering,* vol. 2013, p. 2013.
[111] Z. P. Bažant, "Size effect on structural strength: a review," *Archive of Applied Mechanics,* vol. 69, p. 703-725, 1999.
[112] Z. Bazant, J.-H. Kim, I. Daniel *et al.,* "Size effect on compression strength of fiber composites failing by kink band propagation," *International Journal of Fracture,* vol. 95, p. 103-141, 1999.
[113] Z. P. Bažant and Y. Xiang, "Size effect in compression fracture: splitting crack band propagation," *Journal of engineering mechanics,* vol. 123, p. 162-172, 1997.
[114] D. Mordehai, S.-W. Lee, B. Backes *et al.,* "Size effect in compression of single-crystal gold microparticles," *Acta Materialia,* vol. 59, p. 5202-5215, 2011.
[115] D. L. Nguyen, D. J. Kim, G. S. Ryu *et al.,* "Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete," *Composites Part B: Engineering,* vol. 45, p. 1104-1116, 2013.
[116] D. L. Nguyen, G. S. Ryu, K. T. Koh *et al.,* "Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete," *Composites Part B: Engineering,* vol. 58, p. 279-292, 2014.
[117] J. Song, D. L. Nguyen, C. Manathamsombat *et al.,* "Effect of fiber volume content on electromechanical behavior of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites," *Journal of Composite Materials,* vol. 49, p. 3621-3634, 2015.
[118] D.-L. Nguyen, D.-K. Thai, and D.-J. Kim, "Direct tension-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes," vol. 52, p. 121-134, 2017.
[119] W. Weibull. *A Statistical Theory of the Strength of Materials*. Generalstabens litografiska anstalts förlag, 1939.
[120] Z. P. Bažant, "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal," *Journal of Engineering Mechanics,* vol. 110, p. 518-535, 1984.
[121] J. Fládr, I. Broukalová, and P. And Bílý, "Determination of Conversion Factors for Compressive Strength of HPFRC Measured on Specimens of Different Dimensions". in Proceedings of the *AFGC-ACI-fib-RILEM International Symposium*, Bagneux, France, 2013, p. 731-738.
[122] J.-K. Kim and S.-T. Yi, "Application of size effect to compressive strength of concrete members," *Sadhana*, vol. 27, p. 467, 2002.
[123] Z. P. Bazant and J. Planas. *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. CRC press, 1997.

[124] D. G. Badagha and C. K. Modhera, "Experimental Approach to Enhance the Indirect Split Tensile Strength for Cylindrical and Cubic Specimen for Various Fibrous Mortars under Different Environment Conditions," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, p. 1-7, 2015.
[125] D.-L. Nguyen, D.-K. Thai, and D. J. Kim, "Direct tension-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 52, p. 121-134, 2017.
[126] D. J. Hannant, K. J. Buckley, and J. Croft, "The effect of aggregate size on the use of the cylinder splitting test as a measure of tensile strength," *Matériaux et Construction*, vol. 6, p. 15-21, 1973.
[127] F. A. Oluokun, E. G. Burdette, and J. H. Deatherage, "Splitting Tensile Strength and Compressive Strength Relationships at Early Ages," *Materials Journal*, vol. 88, p. 115-121, 1991.
[128] V. Kadleček and S. Modrý, "Size effect of test specimens on tensile splitting strength of concrete: General relation," *Materials and Structures*, vol. 35, p. 28-34, 2002.
[129] D6272–10: Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four Point Bending, A. International, West Conshohocken, PA, 2010.
[130] N. D. Liêm, "Sức kháng uốn của dầm btct theo tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ tcvn 11823-5:2017 với nhiều trường hợp cốt thép thanh chịu kéo và nén. . T6/2016, tr 69-72," *Tạp chí Giao thông vận tải*, vol. 59, p. 89-82, 2018.
[131] F. Mujika, "On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests," *Polymer Testing*, vol. 25, p. 214-220, 2006.
[132] M. Yokesh and J. A. Christadoss, "Study of shear behavior of sandwich wall panel," *International Advanced Research Journal in Science*, vol. 5, p. 39-47, 2018.
[133] Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, ASTM D790, ASTM International, West Conshohocken. PA, 1997.
[134] T. T. Truyền and N. X. Huy. *Phá hủy, rạn nứt bê tông cơ học và ứng dụng*. Nhà xuất bản Xây dựng, 2011.
[135] D.-L. Nguyen, V.-T. Tran, N.-T. Tran *et al.*, "Evaluating Load-Carrying Capacity of Short Composite Beam Using Strain-Hardening HPFRC," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, p. 1410-1423, 2021.
[136] Phùng Ngọc Dũng and L. T. T. Hà, "Phân tích và thiết kế dầm bê tông cốt thép chịu uốn trên tiết diện nghiêng theo ACI 318, EUROCODE 2 VÀ TCVN 5574: 2012," *Tạp chí KHCN Xâ dựng*, vol. 3/2014, p. 63-72, 2014.
[137] Nguyễn Thị Thuý Hằng, Nguyễn Hồng Vũ, Phan Đức Hùng *et al.*, "Ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép cốt liệu xỉ thép," *Người Xây Dựng*, p. 2015.
[138] V. H. Nghiệp. *Thiết kế kết cấu bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn ACI 318 – 2014*. NXB Giao thông vận tải, 2017.
[139] D. L. Nguyen, D. J. Kim, and D. K. Thai, "Enhancing Damage-Sensing Capacity of Strain-Hardening Macro-Steel Fiber-Reinforced Concrete by

Adding Low Amount of Discrete Carbons," *Materials (Basel)*, vol. 12, p. 2019.
[140] Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép, TCVN 5574:2018, Viện Khoa học Công nghệ Xây, 2018.
[141] S. Timoshenko. *History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures*. Courier Corporation, 1983.
[142] S. U. Pillai and D. Menon. *Reinforced concrete design*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2003.
[143] J. Feng, X. Zhang, T. Li *et al.*, "Simulation and Analysis of Movement of Alfalfa Seeds in the Air Screen Cleaner on EDEM". in Proceedings of the *2015 ASABE Annual International Meeting*, 2015, p. 1.
[144] S. Hentz, L. Daudeville, and F. V. Donzé, "Identification and validation of a discrete element model for concrete," *Journal of engineering mechanics*, vol. 130, p. 709-719, 2004.
[145] YADE-Open Source Discrete Element Method *https://yade-dem.org/doc/*
[146] S. Sinaie, A. Heidarpour, X.-L. Zhao *et al.*, "Effect of size on the response of cylindrical concrete samples under cyclic loading," vol. 84, p. 399-408, 2015.
[147] N. T. T. Hang, N. X. Khanh, and T. V. Tieng, "Discrete Element Modeling of Steel Slag Concrete". in Proceedings of the *International Conference on Engineering Research and Applications*, 2018, p. 284-290.