

**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 XI THÉP**

**Ngành: Cơ kỹ thuật
Mã ngành: 9520101**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2021

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật
Tp.HCM**

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

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Trường
học tại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày tháng năm 2021

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,," (in B), *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.

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Ngành công nghiệp thép giữ một vai trò rất quan trọng trong sự phát triển của một quốc gia. 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.

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 (chủ yếu là 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.

Vì vậy, đề tài luận án “Nghiên cứu ứng xử của cấu kiện bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu xỉ thép” nhằm nghiên cứu các tính chất cơ lý của xỉ thép, đề xuất phương pháp thiết kế cấp phối bê tông xỉ thép; Nghiên cứu ứng xử cơ học của bê tông xỉ thép cũng như các cấu kiện bê tông xỉ thép; Đồng thời xây dựng mô hình số giúp dự đoán cường độ nén và kéo của bê tông xỉ thép là hết sức cần thiết. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học trong việc sử dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông, góp phần làm phong phú chủng loại cốt liệu bên cạnh nguồn vật liệu xây dựng đá dăm truyền thống.

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 và thiết kế thành phần bê tông dùng cốt liệu lớn là xỉ thép
- Nghiên cứu ứng xử cơ học của bê tông xỉ thép
- Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép
- Dùng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng số ứng xử bê tông xỉ thép, cho phép dự đoán được ứng xử nén và kéo của bê tông xỉ thép.

3. Phạm vi nghiên cứu

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 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 cổ điển được đề xuất bởi Cundall & Strack [3];
- 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.

5. 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 LĨNH VỰC NGHIÊN CỨU

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

1.1.1. Tình hình nghiên cứu ở nước ngoài

1.1.1.1. 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 có những nghiên cứu về thành phần hóa của xỉ thép:

- Theo nghiên cứu của Ana Mladenović [4], thành phần hóa học của xỉ thép bao gồm các oxit chủ yếu Fe_xO_y , CaO, SiO_2
- Ivanka Netinger [5] 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
- Mohd. Rosli Hainin và cộng sự [6] 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

❖ Thành phần khoáng

Các nghiên cứu [4, 7] cho thấy thành phần khoáng chủ yếu của xi thép gồm:

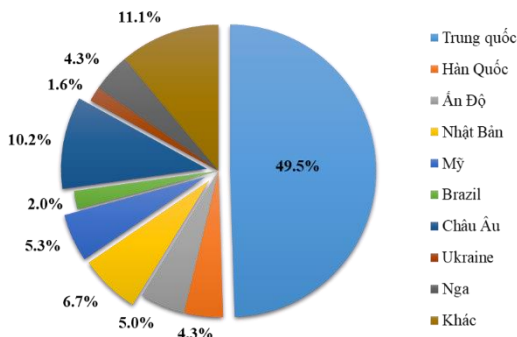
- + W: Wustite (FeO);
- + CS: Calcium Silicates ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S và $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_3S);
- + B: Brownmillerite ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$, C_4AF);
- + M: mayenite ($12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, C_{12}A_7);
- + P: Khe rỗng;
- + Thép (phần màu trắng).

1.1.1.2. Tính chất cơ lý của xi thép

Theo nghiên cứu của Gurmel [8], V. Maruthachalam [9], Tahir Sofilić [10], Maslehuddin [11], Verapathran Maruthachalam [12], H. Motz [13], Lykoudis [14] đã có những nghiên cứu về các tính chất vật lý của xi thép, trong đó một số nghiên cứu đã có những so sánh một số tính chất vật lý của xi thép với cốt liệu tự nhiên (Diabaz và Carbonate), kết quả cho thấy xi thép rất phù hợp để dùng làm vật liệu xây dựng.

1.1.1.3. Các nghiên cứu sử dụng xi thép làm cốt liệu lớn cho bê tông

Theo số liệu của Hiệp hội Thép Thế giới [15], sản lượng thép thô trên thế giới đạt 1620 triệu tấn trong năm 2015 (Hình 1.1). 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 xi 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.



Hình 1.1. Sản lượng thép thô trên toàn thế giới

M. Maslehuddin và các cộng sự [16] đã thực nghiệm trên nhiều loại cấp phối bê tông xi 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 trong đó cốt liệu thô được thay thế hoàn toàn bằng xi thép. M. Maslehuddin và các cộng sự [11] đã công bố một nghiên cứu khác về xi 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 xi thép so với bê tông cốt liệu đá vôi nghiền. Juan M. Manso và các cộng sự [17] đã thực hiện các nghiên cứu ứng dụng xi 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. 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. Jigar P.Patel [18] đã nghiên cứu thay thế một phần đá tự nhiên bằng xi thép (từ 25% đến 100%). Ioanna Papayianni và cộng sự [19] đã nghiên cứu sử dụng xi thép từ lò điện hồ quang trong sản xuất bê tông. Ivanka Netinger và cộng sự [20] đã dùng xi thép được lấy từ 2 bãi chôn lấp lớn nhất ở Croatia thay thế cho cốt liệu thô trong bê tông xi măng. Liu Chunlin và cộng sự [21] 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 xi thép làm cốt liệu nhỏ và lớn. Sang-Woo Kim và cộng sự [22] đã ước tính khả năng chịu uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu là xi thép. Sultan A. Tarawneh và cộng sự [23] ở đại học Jordan Mu'tah đã nghiên cứu ảnh hưởng của việc sử dụng xi thép kết hợp với cốt liệu đá vôi theo các tỷ lệ khác nhau. Hisham Qasrawi [24] đã nghiên cứu việc sử dụng xi thép để tăng cường tính chất cơ học của bê tông sử dụng vật liệu tái chế. Một nghiên cứu ở Qatar do Ramzi Taha và cộng sự [25] thực hiện, trong đó cốt liệu lớn của bê tông được thay thế bằng xi thép với nhiều tỷ lệ khác nhau: 100%, 75%, 50%, 25% và 0%. Amjad A. Sharba (2019) [26] cũng đã có những nghiên cứu về bê tông thép trong đó, tác giả sử dụng xi thép để thay thế cốt liệu tự nhiên trong bê tông M40. Trong nghiên cứu của V. Ducman [27], xi 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. Và bên cạnh việc ứng dụng cho bê tông thường, thì xi thép còn được nghiên cứu ứng dụng cho bê tông cường độ cao [28-31]

1.1.1.4. Nghiên cứu mô phỏng số

Phương pháp phần tử rời rạc được Cundall đề xuất lần đầu tiên vào năm 1971 được dùng cho cơ học đá [32]. Cùng với sự phát triển của khoa học máy tính, DEM đã dần được sử dụng rộng rãi cho rất nhiều loại vật liệu, trong đó có địa vật liệu như đất đá, bê tông.

Đã có nhiều phương pháp mô phỏng số được sử dụng để mô phỏng ứng xử của bê tông, bê tông cốt thép như: phương pháp phần tử hữu hạn, phương pháp phần tử rời rạc,... Các nghiên cứu về mô phỏng dầm bê tông, dầm bê tông cốt thép bằng phương pháp phần tử hữu hạn đã được thực hiện bởi các tác giả [33-35].

Để mô phỏng ứng xử của dầm bê tông cốt thép tác giả Wahalathantri.B.L và cộng sự [33] đề xuất mô hình quan hệ ứng suất biến dạng miền nén và sự phá hoại miền kéo. Ngoài ra, 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 [34]. Tác giả S.V.Chaudhari và cộng sự [35] đã sử dụng đồng thời mô hình phá hoại dẻo và mô hình vết nứt rời rạc để mô phỏng tính toán các cấu kiện chịu uốn qua đó so sánh sự chính xác của hai mô hình.

Việc nghiên cứu ứng xử của bê tông xi 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 xi thép là cần thiết. Bên cạnh đó, với những ưu điểm của mình, phương pháp phần tử rời rạc được lựa chọn là một phương pháp phù hợp để mô phỏng vật liệu bê tông nói chung và bê tông xi thép nói riêng trong nghiên cứu này.

1.1.2. Tình hình nghiên cứu ứng dụng xi thép ở trong nước

1.1.2.1. Các nghiên cứu về xi thép

Năm 2011, Bộ Xây dựng có văn bản về việc sử dụng xi thép như là một nguyên liệu: “Xi 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” [36].

Một số công trình nghiên cứu về xi thép cũng đã được tiến hành bao gồm: Nhóm nghiên cứu do Trần Văn Miên chủ trì [37-39], Nguyễn Văn Chánh, Nguyễn Vĩnh Phước [40].

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

Ở Việt Nam, phương pháp phần tử rời rạc còn khá mới mẻ và rất ít nghiên cứu sử dụng phương pháp này. Nguyễn Tiến Cường và cộng sự [41] 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 [42] 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.

1.1.3. Nhận xét:

Các nghiên cứu cũng cho thấy thành phần hoá học của xi thép bao gồm các oxit: CaO , Fe_xO_y , MgO , MnO_2 , SiO_2 và Al_2O_3 , $\text{MgO} \dots$ 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 xi thép và dao động tùy thuộc vào nguồn gốc xi thép nghiên cứu, loại thép sản xuất cũng như công nghệ luyện thép. Về tính chất cơ lý, ngoại trừ việc xi thép nặng hơn, độ rỗng lớn hơn nên độ hút nước cũng lớn hơn cốt liệu truyền thống thì các chỉ tiêu khác của xi thép gần như tương đồng với cốt liệu truyền thống.

Sự khác nhau về công nghệ luyện thép dẫn đến sự khác nhau về hàm lượng các oxit trong thành phần hoá cũng như tích chất cơ lý của xi thép.

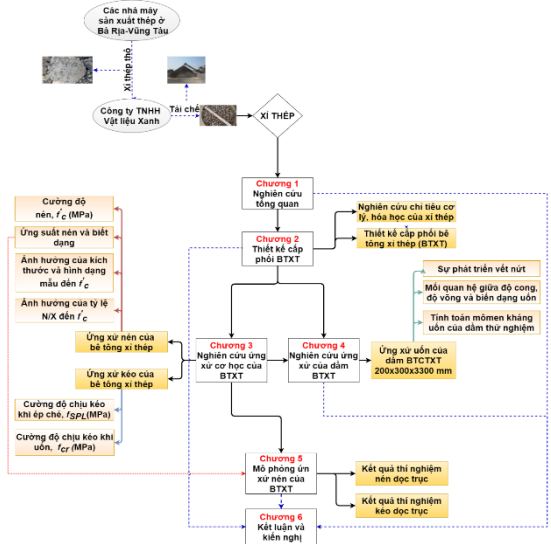
Chưa có nhiều nghiên cứu mô phỏng về bê tông xi thép mà chỉ tập trung vào mô phỏng bê tông cốt liệu đá truyền thống. Các mô hình mô phỏng chủ yếu dựa

trên phương pháp phân tử hữu hạn và còn nhiều hạn chế nhất định trong việc mô tả ứng xử cơ lý của bê tông. Do đó, dựa trên những ưu điểm của phương pháp phân tử rời rạc, trong nghiên cứu này đã được ứng dụng để mô phỏng ứng xử của bê tông xi thép.

1.2. Sơ đồ tổng quát của đề tài

Hình 1.2 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 xi thép và thiết kế thành phần bê tông dùng cốt liệu lớn là xi thép
- Chương 3: Nghiên cứu ứng xử cơ học của bê tông xi thép
- Chương 4: Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu lớn là xi thép
- Chương 5: Mô phỏng số ứng xử bê tông xi thép
- Chương 6: Kết luận và kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo



Hình 1.2. Sơ đồ tổng quát của đề tài

1.3. Kết luận Chương 1

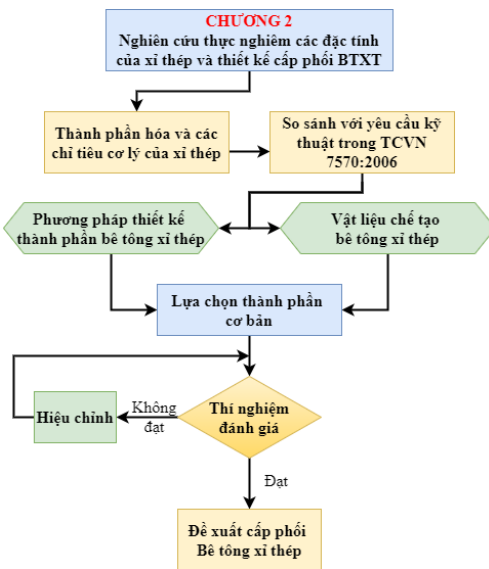
Sau khi nghiên cứu tổng quan về xi thép, có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Xi thép được nhiều nước trên thế giới nghiên cứu ứng dụng. Qua phân tích các kết quả nghiên cứu ở trên cho thấy: Xi thép có những đặc tính tương đồng với cốt liệu truyền thống như đá dăm, có thể sử dụng xi thép để thay thế cốt liệu lớn trong bê tông xi măng. Tuy nhiên, do khác nhau về công nghệ luyện thép, nguồn gốc xi thép nên tính chất cơ lý của xi thép cũng như tính chất cơ lý của bê tông xi thép có sự khác biệt trong các nghiên cứu ở trên;
- Ở Việt Nam, thời gian gần đây mới chỉ có các nghiên cứu bước đầu về khả năng sử dụng xi thép trong xây dựng. Các ứng dụng của xi thép còn rất hạn chế, khối lượng xi thép được đưa vào xử lý rất ít, chi chiếm gần

20% tổng lượng xỉ thép, chủ yếu để san lấp mặt bằng, làm móng các công trình nội bộ. Do đó, việc nghiên cứu sử dụng xỉ thép thay thế đá dăm làm cốt liệu lớn trong bê tông xi măng là một hướng đi đúng đắn. Điều này có ý nghĩa thiết thực, góp phần làm phong phú thêm chủng loại vật liệu xây dựng. Hạn chế được sự ảnh hưởng xấu đến môi trường, mang lại lợi ích kinh tế khi sử dụng xỉ thép..

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



Hình 2.2. Sơ đồ chương 2

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



Hình 2.1. Mẫu xỉ thép

Xỉ thép sử dụng làm thí nghiệm (Hình 2.1) là sản phẩm sau dây chuyền tái chế. Sản phẩm sau khi đưa về phòng thí nghiệm được sàng, rửa và sấy khô đến khối lượng không đổi trước khi đem đi thí nghiệm.

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 & KĐXD Miền Nam. Kết quả cho thấy xỉ thép trong nghiên cứu bao gồm các ôxit chủ yếu như CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe_xO_y tương tự như các nghiên cứu ở phần [4, 5, 43].

2.1.2. Các chỉ tiêu cơ lý

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 cho thấy xỉ thép nghiên cứu có sự khác biệt so với các nghiên cứu ở nước ngoài.

2.2. Thiết kế thành phần bê tông

Qua kiểm tra thực nghiệm, 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 [44] cho bê tông xi thép, công thức hiệu chỉnh lượng và nước hàm lượng xi măng cho bê tông xi thép (giảm 10% lượng xi măng tra bảng theo [44]) được đề xuất như sau:

$$N_{hc} = N_{tb} + H_p \cdot XT$$

$$X_{hc} = 0.9 \cdot X_{tt}$$

Bảng 2.1. Kết quả kiểm chứng cấp phối bê tông đề xuất (kg/m³)

Ký hiệu	Cường độ bê tông yêu cầu (MPa)	Xi măng (kg)	Cát (kg)	Xi 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

- Xi thép được tái chế từ các nhà máy sản xuất thép ở khu vực Bà Rịa Vũng Tàu bằng công nghệ điện hồ quang: có các chỉ tiêu cơ lý đáp ứng được câu kỹ thuật đối với cốt liệu lớn dùng chế tạo bê tông thông thường theo TCVN 7570:2006. Do đó, có thể sử dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn để chế tạo bê tông xi măng;
- Có thể dùng chỉ dẫn kỹ thuật [44] do Bộ Xây Dựng ban hành để lựa chọn thành phần cơ bản của bê tông xi thép tuy nhiên cần điều chỉnh lại lượng nước và xi măng.

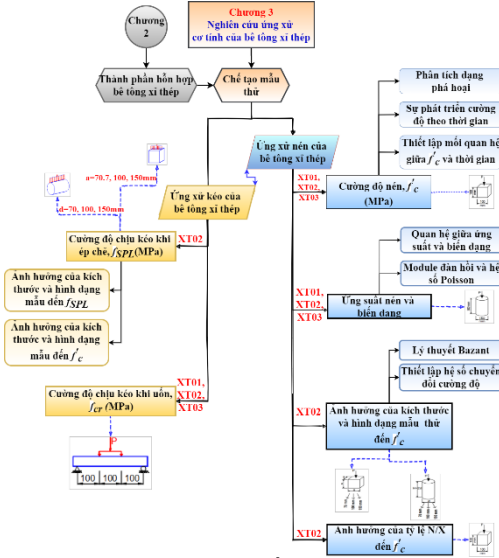
CHƯƠNG 3

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CƠ HỌC CỦA BÊ TÔNG XI THÉP

3.1. Thiết kế thí nghiệm

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 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 xi thép

3.1.1. Chế tạo mẫu thử



Hình 3.1. sơ đồ chương 3

3.2. Ứng xử nén của bê tông xi thép

3.2.1. Cường độ chịu nén



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



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

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 xi 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. Nguyên nhân có thể được giải thích là do các hạt xi thép có cấu trúc rỗng tổ ong làm tăng mật độ pha hồ trong bê tông xi thép, cải thiện được liên kết giữa hồ và cốt liệu



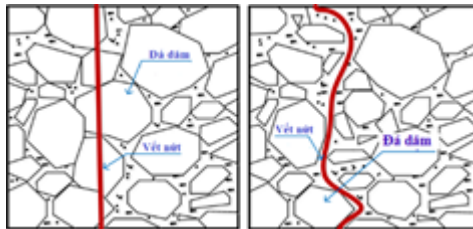
Hình 3.2. Thí nghiệm cường độ chịu nén



Hình 3.6. Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi ép chế

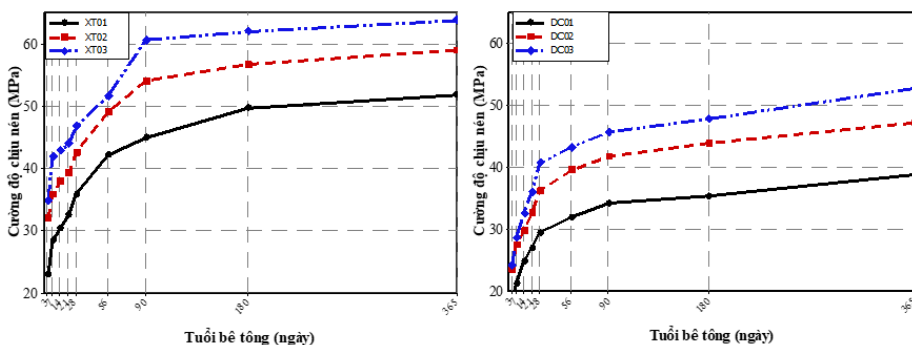


Hình 3.8. Mặt phá hoại của BTXT và DC



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.



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

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%

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

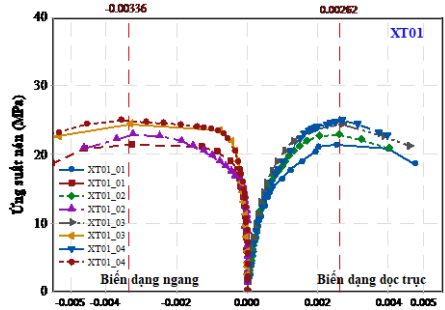
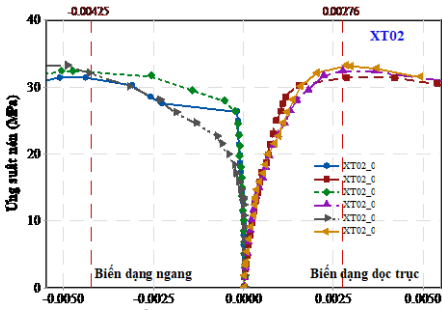
Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén của BTXT và tuổi của nó được xác định qua phương trình:

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

3.2.2. Ứng suất nén và biến dạng

3.2.2.1. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng

Khi bắt đầu tăng tải, độ dốc của đường cong biến dạng dọc trục thấp hơn so với đường cong biến dạng ngang ($\phi_a < \phi_b$), mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng quan sát được là tuyến tính. 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. Khi mẫu bị



phá hoại, biến dạng ngang phát triển nhanh và lớn hơn biến dạng dọc trục. So sánh với các mối quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông truyền thống, 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%).

3.2.2.2. Module đàn hồi và hệ số Poisson

Theo công thức của ACI, module đàn hồi của bê tông xi thép phụ thuộc vào cường độ chịu nén và khối lượng thể tích khô của nó theo công thức, với $k_E=0.043$.

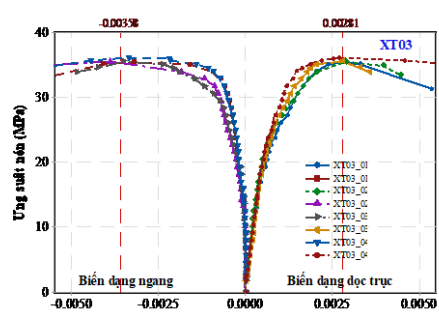
$$E = k_E * w_c^{1.5} * \sqrt{f'_c}$$

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

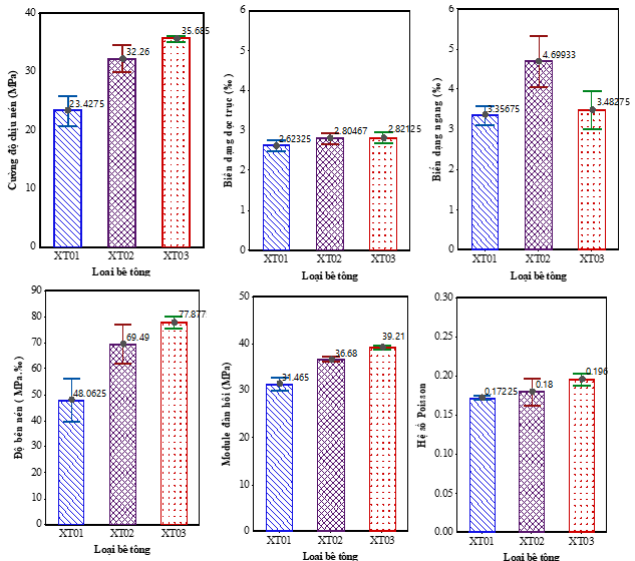
3.2.3.1. Lý thuyết Bazant

Công thức biểu diễn mối quan hệ giữa cường độ và kích thước mẫu theo luật hiệu ứng kích thước của Bazant:

Mối quan hệ giữa cường độ và kích thước mẫu theo luật hiệu ứng



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



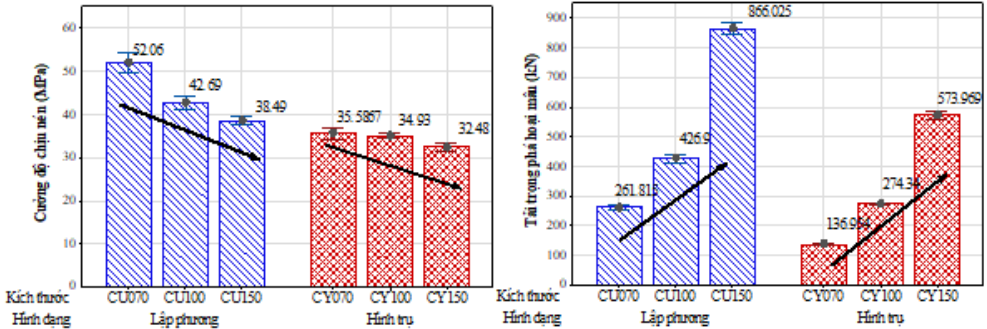
Hình 3.14. So sánh các thông số nén của mẫu bê tông xi thép

kích thước của Bazant được thiết lập cho mẫu lập phương và hình trụ của BTXT như sau:

$$\sigma_N = Bf_t \left(1 + \frac{D}{D_0}\right)^{-1/2}$$

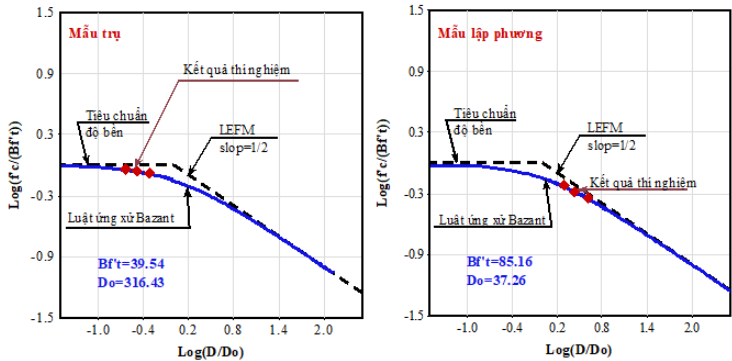
Kết quả cho thấy với cùng một hình dạng mẫu, khi kích thước của mẫu thí nghiệm tăng thì P_{max} tăng nhưng f'_c giảm, đây được gọi là hiện tượng hiệu ứng kích thước thường xảy ra trong vật liệu giòn hoặc nửa giòn

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Lập phương: } f'_c = 85.16 \left(1 + \frac{D}{37.26}\right)^{-1/2} \\ \text{Hình trụ: } f'_c = 39.54 \left(1 + \frac{D}{316.43}\right)^{-1/2} \end{array} \right.$$



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

Đồ thị về quy luật hiệu ứng kích thước cho bê tông xi 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 LFM hơn đường tiêu chuẩn độ bền, trong khi đó mẫu trụ cho kết quả thực nghiệm có xu hướng tiệm cận với tiêu chuẩn độ bền hơn.

3.2.3.2. Thiết lập hệ số chuyển đổi cường độ

Các hệ số chuyển đổi (λ) của BTXT được cho bởi bảng sau:

Bảng 3.1. Hệ số chuyển đổi cường độ nén của BTXT

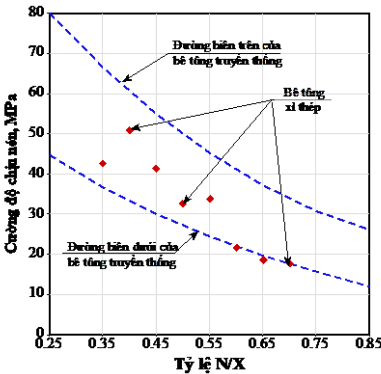
Loại bê tông	Hệ số chuyển đổi, $\lambda = \sigma_{cu}^{CU150} / \sigma_{cu}^{CSpe.type}$ Mẫu chuẩn 150x150x150mm					
	CU070	CU100	CU150	CY70	CY100	CY150
BTXT	0.74	0.90	1.00	0.99	1.08	1.18
BTTT[45]	0.85	0.91	1.00	1.16	1.17	1.20

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

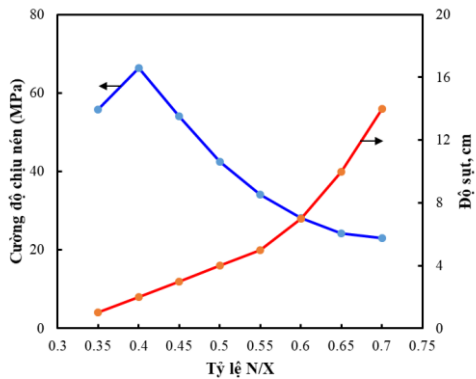
Kết quả thể hiện xu hướng chung tương tự như bê tông truyền thống là khi tỷ lệ N/X giảm thì độ sụt giảm và cường độ nén tăng

3.3. Ứng xử kéo của bê tông xi thép

3.3.1. Cường độ chịu kéo khi ép chế



Hình 3.20. Quan hệ giữa cường độ chịu nén và tỷ lệ N/X của BTXT và BTTT, sử dụng mẫu trụ 150x300 mm [1]

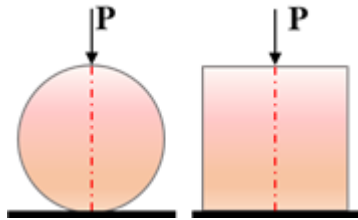


Hình 3.21. Ảnh hưởng của tỷ lệ X/N lên độ sụt và cường độ nén của BTXT ở tuổi 28 ngày, mẫu 100x100x100 mm

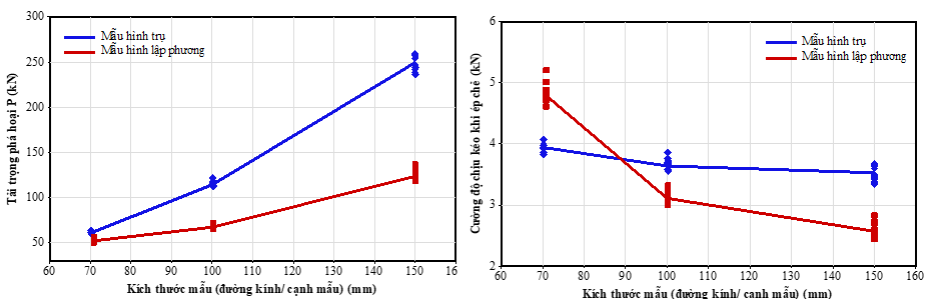
3.3.1.1. Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng mẫu thử đến cường độ kéo của BTXT khi bị ép chế

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

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



Hình 3.23. Hai phương pháp thí nghiệm kéo khi ép chế



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

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.

3.3.1.2. Thiết lập hệ số chuyển đổi

Hệ số chuyển đổi cường độ kéo khi ép chế có kích thước khác chuẩn về về mẫu chuẩn 150x300 mm

Bảng 3.2. Hệ số chuyển đổi cường độ kéo khi ép chế của BTXT

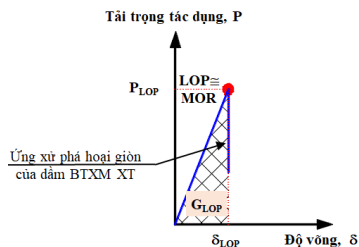
Ký hiệu mẫu	Mẫu chuẩn	Hệ số chuyển đổi, χ	
		Kết quả đề tài	Kadlecek và cộng sự [46]
S-CU070	150x150x150mm	0.54	0.62
S-CU100		0.82	0.9
S-CU150		1	1
CY070	150x300mm	0.9	0.87
CY100		0.95	0.91
CY150		1	1

3.3.2. Cường độ kéo khi uốn

Ứng xử của bê tông xi thép được cung cấp trong Hình 3.18, đây là ứng xử của bê tông khi bị phá hoại giòn. Hình 3.19 cho thấy bê tông xi thép ở tuổi 56 ngày có độ bền uốn hơn ở tuổi 28 ngày



Hình 3.28. Vết nứt của dầm bê tông xi thép trong sơ đồ uốn 4 điểm

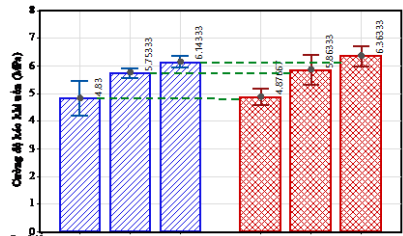


Hình 3.29. Quan hệ giữa tải trọng tác dụng và chuyển vị

3.4. Kết luận Chương 3.

Một số kết luận cho Chương 3 bao gồm:

- Sự phá hoại nén của bê tông xi thép xảy ra tương tự bê tông cường độ cao sử dụng cốt liệu là đá tự nhiên. Tuy nhiên, mặt phá hoại của BTXT có xu hướng cắt ngang qua các hạt cốt liệu xi thép do cấu trúc đặc thù của hạt cốt liệu xi thép;
- Bê tông xi thép có cường độ chịu nén phát triển rất nhanh trong thời gian đầu, ở 3, 7 ngày tuổi. Sau 28 ngày cường độ

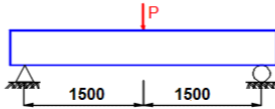
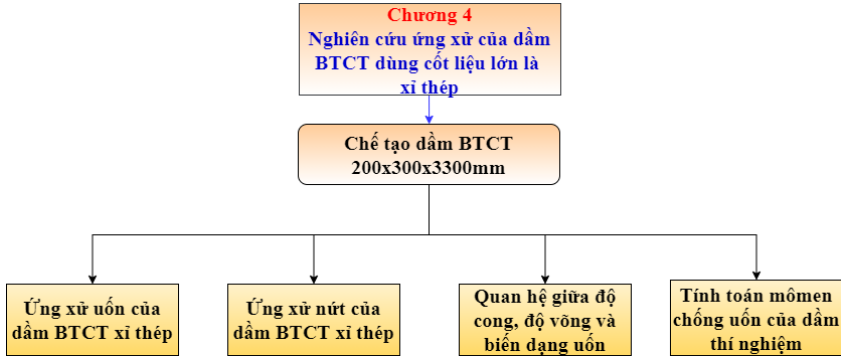


Hình 3.19. f_{cr} ở tuổi 28 và 56 ngày

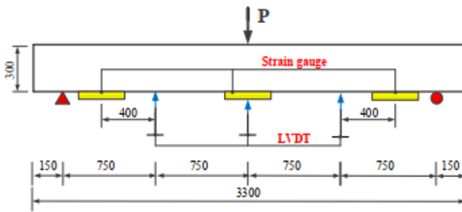
- nén vẫn tiếp tục phát triển đến tuổi khảo sát 365 ngày. Cường độ ở tuổi 7 và 28 bằng khoảng 55-66% và 69-73% cường độ ở tuổi 365 ngày.
- Biến dạng dọc trục cực hạn của bê tông xi thép nằm trong khoảng từ 2.60-2.82%. Biến dạng ngang cực hạn của bê tông xi thép cao hơn biến dạng dọc trục cực hạn của nó khoảng 1.23-1.68 lần. Module đàn hồi của bê tông xi thép có thể dự đoán khi biết cường độ chịu nén và khối lượng thể tích của nó,
- Trong phạm vi nghiên cứu của đề tài, cường độ chịu nén của BTXT bị ảnh hưởng bởi kích thước và hình dạng mẫu thí nghiệm. Hệ số chuyển đổi cường độ nén của bê tông xi 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 3.1;
- Mối quan hệ giữa tỷ lệ N/X và độ sụt, cường độ của bê tông xi 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 xi 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.
- Bê tông xi thép cho thấy cường độ chịu kéo khi ép chế phụ thuộc vào kích thước mẫu ở cả hai phương pháp ép chế theo đường sinh mẫu trụ hay cạnh mẫu lập phương. Hệ số chuyển đổi cường độ chịu kéo khi ép chế của bê tông xi thép khi thí nghiệm với các mẫu có hình dạng và kích thước khác mẫu chuẩn (mẫu hình trụ: 150x300 mm; mẫu lập phương: 150x150x150 mm) lấy theo Bảng 3.2;
- Cường độ uốn của bê tông xi 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 LỚN LÀ XỈ THÉP

4.1. Thiết kế thí nghiệm



Hình 4.1.. Sơ đồ thí nghiệm dầm BTCTXT



b. Sơ đồ thí nghiệm



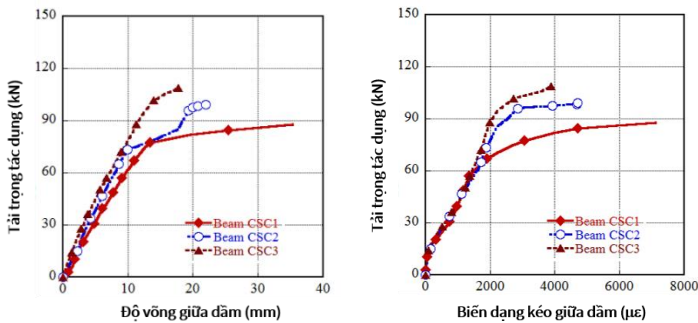
Hình 4.3 Thí nghiệm uốn 3 điểm với dầm BTCTXT

Hình 4.2. Cấu tạo dầm bê tông cốt thép

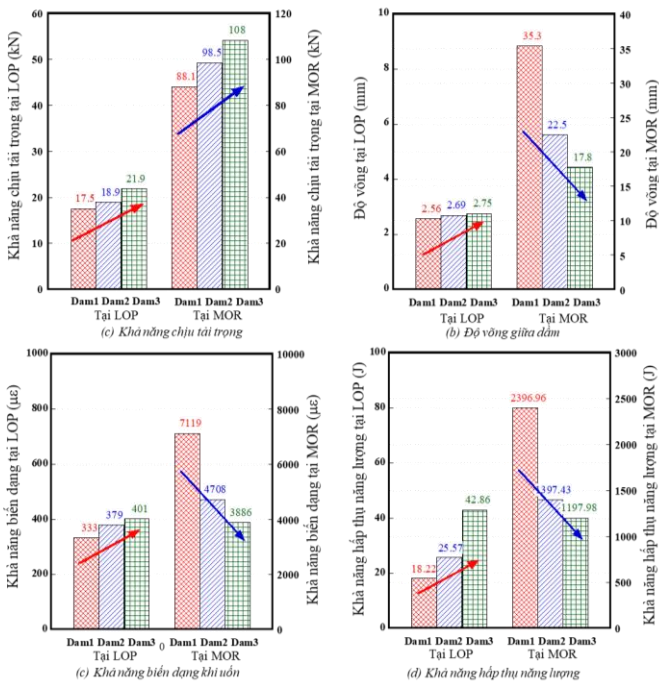
4.2. Kết quả thí nghiệm

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

Để so sánh, đánh giá ứng xử của dầm BTCTXT, các thông số uốn được xét đến tại điểm LOP và MOR.



Hình 4.4. Ứng xử uốn của dầm BTCTXT



Hình 4.5. So sánh khả năng kháng uốn của 3 dầm BTCTXT

4.2.2. Sự phát triển vết nứt trong các dầm BTCTXT

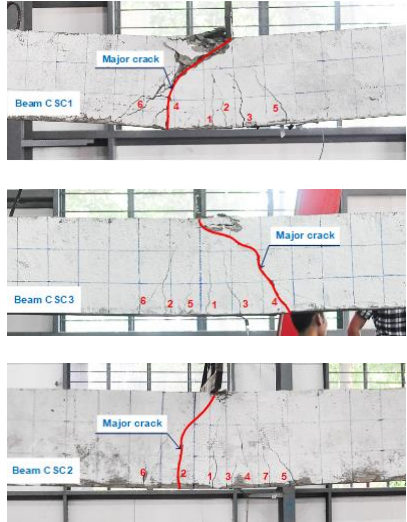
Hình 4.6 thể hiện trực quan hình dạng và sự phân bố vết nứt trên các dầm BTCTXT ở tải trọng phá hủy.

Quan sát Hình 4.5, 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.

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 tính toán f_{LOP} theo công thức:

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

f_{LOP} cao hơn nhiều so với f_{cr} (Bảng 4.1) 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 [47].



Hình 4.6. Phân bố vết nứt trong các dầm BTCTXT

Bảng 4.1. Độ bền uốn tại LOP của các dầm thử nghiệm

Loại dầm	P_{LOP} (kN)	E_C (GPa)	c tại LOP (mm)	I_{equi} (mm ⁴)	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

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

Bảng 4.2. So sánh biến dạng uốn tại LOP

Loại dầm	δ_{LOP} (mm)	Φ_{LOP} (1/m)	c (mm)	Biến dạng uốn tính toán tại LOP, ($\mu\epsilon$)	Biến dạng uốn thực nghiệm tại LOP, ($\mu\epsilon$)	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 4.3. So sánh biến dạng uốn tại MOR

Loại dầm	δ_{MOR} (mm)	Φ_{MOR} (1/m)	c tại MOR, c (mm)	Biến dạng uốn tính toán tại MOR, ($\mu\epsilon$)	Biến dạng uốn thực nghiệm tại MOR, ($\mu\epsilon$)	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

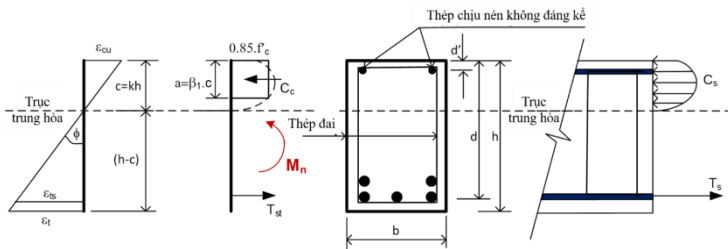
Bảng 4.2 và Bảng 4.3 trình bày biến dạng uốn tính toán và biến dạng uốn đo được từ thực nghiệm của dầm BTCTXT tại điểm LOP và MOR. Độ chênh lệch biến dạng uốn ở LOP và MOR giữa lý thuyết và thực nghiệm khá cao: 7-15% tại LOP và 17-20% tại MOR.

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

4.2.4.1. 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 4.7 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 xi thép được biến đổi tương đương thành một khối ứng suất hình chữ nhật với chiều rộng là $0.85f'_c$ và chiều cao là β_1c . Lực kéo của thép phải bằng lực nén của bê tông xi thép.

Mô men kháng uốn M_n và mômen thực nghiệm M_{exp} được trình bày ở Bảng 4.4 cho thấy giữa M_{exp} có giá trị lớn hơn M_n khoảng 1.1-1.3 lần.



Hình 4.7. Biểu đồ biến dạng và nội lực và lực kéo của thép trong tiết diện thẳng góc với trục dọc của dầm BTCTXT

Bảng 4.4. Bảng so sánh Moment lý thuyết và thực nghiệm

Loại dầm	f'_c (MPa)	β_1	c tại MOR (mm)	M_n (kN.m)	M_{exp} (kN.m)	Chênh lệch (%)
Dam1	22.91	0.85	82	61.72	67.75	9
Dam2	32.26	0.82	64	65.25	75.54	14
Dam3	35.68	0.80	60	66.08	83.03	20

4.2.4.2. Sức kháng cắt của dầm

Kết quả tính toán trình bày ở Bảng 4.8 cho thấy, nếu dùng hệ số số chiết giảm $\Phi = 0.75$ cho sức kháng cắt ($V_r = \Phi V_n$) theo ACI-318-14 thì V_r có giá trị nhỏ hơn V_n khoảng 0.86-0.92 lần tức 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 để thiết kế kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn xi thép, độ tin cậy và an toàn của thiết kế là chấp nhận được.

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

Loại dầm	f'_c (MPa)	V_u , (N)	θ (độ)	V_c , (N)	V_s , (N)	V_r , (kN)	Tỷ số V_n/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

4.3. Kết luận Chương 4

Qua các phân tích ở trên có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Sự gia tăng cường độ nén của bê tông xi thép tạo ra sự gia tăng tất cả các thông số uốn ở LOP bao gồm: 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 chỉ tạo ra sự gia tăng khả năng chịu tải ở MOR trong khi thông số uốn khác đều giảm.
- Các thông số uốn của dầm bê tông cốt thép dùng cốt liệu lớn là xi thép được thử nghiệm có ứng xử uốn tương tự dầm bê tông cốt thép truyền thống. Dưới tác dụng của tải trọng, có mối quan hệ đồng biến chặt chẽ giữa sự lan truyền vết nứt trong dầm, độ cong, độ võng và độ bèn uốn.
- Có thể tính toán kháng uốn dầm BTCTXT tương tự như dầm BTCT truyền thống.

CHƯƠNG 5

MÔ PHỎNG SỐ ỨNG XỬ BÊ TÔNG XI THÉP

5.1. Cơ sở lý thuyết

5.1.1. Phương pháp phần tử rời rạc

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 bởi Cundall [3]. Trong luận án này, tác giả chọn kiểu phần tử hình cầu không biến dạng để mô phỏng cho bê tông xi thép. Khi xem xét một mẫu vật liệu số với các phần tử rời rạc hình cầu chịu tác dụng của ngoại lực, thì quá trình tính toán mô phỏng sẽ được thực hiện theo các bước sau [48]:

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 tương tác pháp tuyến và 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.

Sau khi vị trí mới của các phần tử rời rạc được xác định, vòng lặp tính toán quay lại bước 1 và tiếp tục cho đến khi quá trình mô phỏng kết thúc.

5.1.2. Mô hình ứng xử DEM cho bê tông xi thép

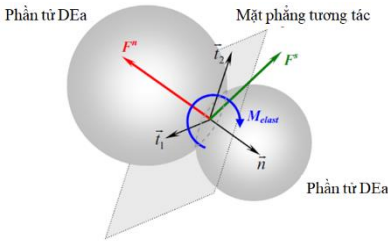
Với phương pháp phần tử rời rạc, mẫu bê tông xi thép được mô phỏng bằng tập hợp các phần tử rời rạc (DE) hình cầu có kích thước, có khối lượng và các DE này có thể tương tác với nhau tuân theo luật tương tác cục bộ. Các giả thuyết cơ bản của phương pháp được đề xuất:

- 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).

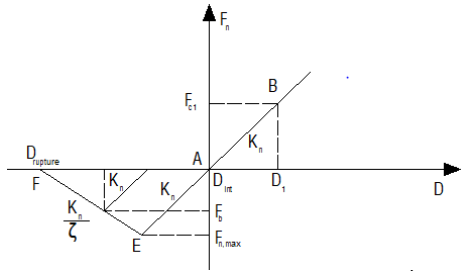
Khi bắt đầu quá trình mô phỏng, tương tác của phần tử rời rạc a lên phần tử b , không chỉ xác định khi 2 phần tử tiếp xúc với nhau, mà còn được kể đến khi

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:

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



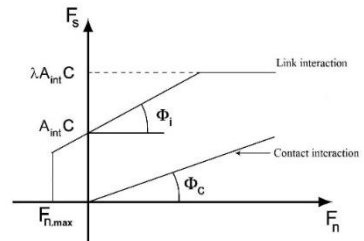
Hình 5.1. Tương tác giữa 2 phần tử và các thành phần lực tương tác



Hình 5.2. Luật tương tác pháp tuyến giữa hai phần tử rời rạc

5.1.3. 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 5.3). Theo tiêu chuẩn này, lực tương tác tiếp tuyến cực đại $F_{s,max}$ được đặc trưng bởi lực pháp 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 [48]. Các phần tử tương tác sẽ trượt lên nhau khi khi lực tương tác tiếp tuyến đạt giá trị cực đại $F_{s,max}$

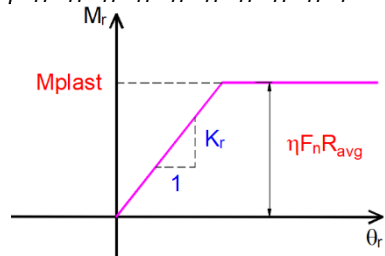


Hình 5.3. Tiêu chuẩn Mohr – Coulomb dùng trong mô hình [2][2][2][2][2][2][2][2][2][2]

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:

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

Mô hình ứng xử phần tử rời rạc này sẽ được đưa vào phần mềm mã nguồn mở YADE để mô phỏng ứng xử của bê tông xi thép.



Hình 5.4. Mô men chuyển tiếp giữa các phần tử tương tác

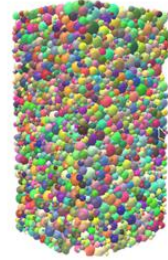
5.2. Xây dựng mẫu thí nghiệm số

Mẫu thí nghiệm số đề xuất là mẫu lăng trụ 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 5.5.

5.3. Thông số đầu vào của mô hình

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



Hình 5.5. Mẫu thí nghiệm số hình hộp chữ nhật được đề xuất.

Bảng 5.2. Giá trị góc ma sát và lực dính

Cấp phối	Lực dính, Pa C	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

5.4. Mô phỏng số

5.4.1. Thí nghiệm nén dọc trục

Điều kiện biên của thí nghiệm nén dọc trục được thể hiện trong Hình 5.6, 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 .



Hình 5.6. Điều kiện biên của thí nghiệm kéo, nén

5.4.2. Thí nghiệm kéo dọc trục

Điều kiện biên của thí nghiệm kéo dọc trục tương tự như thí nghiệm nén một trục.

5.4.3. Kết quả mô phỏng số

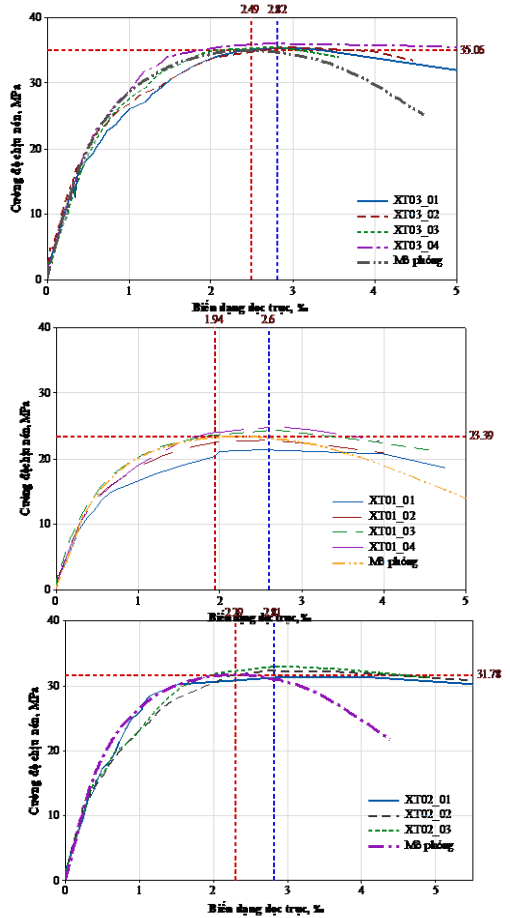
5.4.4. Kết quả thí nghiệm nén dọc trục:

5.4.4.1. The relationship between stress-strain.

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 xi 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): 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 xi thép trong giai đoạn này, khi vết nứt chưa xuất hiện, bê tông làm việc trong giai đoạn đàn hồi.

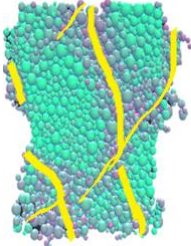
- Trong giai đoạn tiếp theo (tải trọng tăng cho đến khi trước khi bị phá hoại): vết nứt bắt đầu xuất hiện và phát triển, độ dốc của đường cong mô phỏng bắt đầu thay đổi, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng không còn là đường thẳng, kết quả mô phỏng phản ánh đúng xu hướng ứng xử của bê tông xi thép, tuy nhiên đường cong mô phỏng có sự lệch so với đường cong thực nghiệm. Biến dạng do thực nghiệm có phần lớn hơn nên độ dốc của đường cong thực nghiệm nhỏ hơn, đường cong thực nghiệm nằm ở dưới đường cong mô phỏng. Điều này cũng có thể giải thích được là do trong quá trình thí nghiệm, khi vết nứt xuất hiện sẽ có sự sai số nhất định do thiết bị đo.



Hình 5.10. So sánh quan hệ ứng suất và biến dạng dọc trục giữa thực nghiệm và mô phỏng (cấp phối XT01, XT02, XT03)

- Tại thời điểm mẫu bị phá hoại: tải trọng phá hoại trong thí nghiệm mô phỏng có độ lệch so với thực nghiệm tương đối nhỏ khoảng 2-5%, 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.

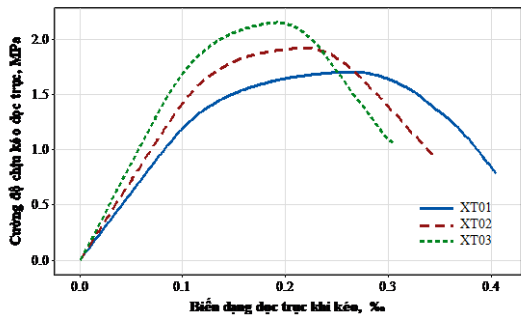
5.4.4.2. Sự phát triển vết nứt



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

5.4.5. Kết quả thí nghiệm kéo

Từ kết quả ở Hình 5.12 cho thấy cường độ kéo dọc trục do mô phỏng của các mẫu XT01, 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 5.3 . Kết quả cho thấy $K_{omp}=0.355-0.364$, trong khi giá trị này của bê tông truyền thống là $K_o=0.33$ [49] . 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



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

Bảng 5.3. 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

bê tông xi 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 xi thép khi không có kết quả thực nghiệm

5.5. Kết luận Chương 5

- Kết quả mô phỏng ứng xử của bê tông xi 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 xi 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 xi 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 xi 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 xi thép, tạo tiền đề cho việc ứng dụng mô hình này vào mô phỏng dự đoán kết cấu sử dụng bê tông xi thép

CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

6.1. Kết luận

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

- Khẳng định xi thép được tái chế từ các nhà máy sản xuất thép ở khu vực Bà Rịa Vũng Tàu bằng công nghệ điện hồ quang có các chỉ tiêu cơ lý đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của cốt liệu lớn dùng chế tạo bê tông xi măng có cấp độ bền từ B25 trở lên. Vì vậy, có thể dùng xi thép 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 để lựa chọn thành phần cấp phối bê tông xi thép như sau:

$$X_{hc} = 0.9 \cdot X_{tt}$$
$$N_{hc} = N_{tb} + H_p \cdot XT$$

- Có thể dự đoán cường độ của bê tông xi thép theo độ tuổi của nó bằng công thức sau:

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

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

$$E = k_E * w_c^{1.5} * \sqrt{f'_c}$$

- Đã thiết lập được hệ số chuyển đổi cường độ kéo khi ép chế của bê tông xi thép khi thí nghiệm với các mẫu có hình dạng và kích thước khác mẫu chuẩn (hình trụ: 150x300 mm; hình lập phương: 150x150x150mm);
- Đã xây dựng được mô hình phần tử rời rạc để mô phỏng ứng xử của bê tông xi thép. 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 việt 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 xi 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 xi thép trong thí nghiệm kéo – nén một trục, mô hình này cần được áp dụng để mô phỏng ứng xử của kết cấu bê tông xi thép như mô phỏng cho cấu kiện dầm, cột, nút khung và kết cấu móng, ...vv. Điều này là rất cần thiết cho công tác tính toán thiết kế, do đó cần 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.

REFERENCES

- [1] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese. *Design and Control of Concrete Mixtures*. Portland Cement Association, 2003.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] I. Netinger, M. J. Rukavina, and A. Mladenović, "Improvement of post-fire properties of concrete with steel slag aggregate," *Procedia Engineering*, vol. 62, p. 745-753, 2013.
- [6] 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.
- [7] T. Sofilić, A. Mladenović, 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.
- [8] 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.
- [9] V. Maruthachalam and M. Palanisamy, "High performance concrete with steel slag aggregate," p. 2014.
- [10] Tahir Sofilić, Ana Mladenović, 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.
- [11] 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.

- [12] Maruthachalam Verapathran and Palanisamy Murthi, "High performance concrete with steel slag aggregate," *Gradevinar*, vol. 66, p. 605-612, 2014.
- [13] H. Motz and J. Geiseler, "Products of steel slags an opportunity to save natural resources," *Waste management*, vol. 21, p. 285-293, 2001.
- [14] 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.
- [15] 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>
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Jigar P.Patel, "*Broader use of steel slag aggregates in concrete*". Masters of Science in Civil engineering, Cleveland State University, 2008.
- [19] Ioanna Papayianni and Eleftherios Anastasiou, "Utilization of Electric Arc Furnace Steel Slags in Concrete Products". *The 6th European Slag Conference*, Madrid, 2010, p.
- [20] I. Netinger, D. Bjegović, and G. Vrhovac, "Utilisation of steel slag as an aggregate in concrete," *Materials structures*, vol. 44, p. 1565-1575, 2011.
- [21] 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.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] V. Ducman and A. Mladenović, "The potential use of steel slag in refractory concrete," *Materials Characterization*, vol. 62, p. 716-723, 2011.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] V. Maruthachalam and M. Palanisamy, "High performance concrete with steel slag aggregate," *GRAĐEVINAR*, vol. 66, p. 605-612, 2014.
- [31] S. Y. Lee, H. V. Le, and D. J. Kim, "Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress," *Construction and Building Materials*, vol. 220, p. 149-160, 2019.
- [32] P. A. Cundall, "A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movement in Blocky Rock System," *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, p. 1971.
- [33] 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.

- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] "Văn bản số 31/BXD-VLXD," ed: Bộ xây dựng, ngày 07/6/2011.
- [37] 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.
- [38] Trần Văn Miên 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.

- [44] Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại, Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD, B. X. Dựng, Hà Nội, 1998.
- [45] "ACI 318-14, Building code requirements for structural concrete," p.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-14, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.

**MINISTRY OF EDUCATION AND TRAINING
HO CHI MINH CITY
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION**

NGUYEN THI THUY HANG

**STUDY ON BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE
USING STEEL SLAG AS COARSE AGGREGATE**

Major: Engineering mechanics

Major code: 9520101

SUMMARY OF DOCTORAL THESIS

HO CHI MINH CITY, AUGUST 2020

This work was done in the framework of a doctorate at **Ho Chi Minh city University of Technology and Education**

Supervisor 1: Assoc. Prof. Dr. Phan Duc Hung

Supervisor 2: Dr. Tran Van Tieng

Reviewer 1:

Reviewer 2:

Reviewer 3:

The thesis was defended in

University of Technology and Education

LIST OF PUBLICATIONS

Internationnal journals

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

Domestic journals

3. N. T. T. Hang, P. Đ. Hung, and M. H. Ha, "Determine the mechanical properties of concrete using steel slag as coarse aggregate," *Journal of Construction*, vol. 02, 2016.
4. T. V. Tieng, N. T. T. Hang, and P. Đ. Hung, "Using coupled fluid flow-The discrete element model for simulating of the behavior of unsaturated and saturated concrete," *Journal of Construction*, vol. 03/2016, 2016.

Internationnal conferences

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

INTRODUCTION

1. Research of topic

The steel industry plays a crucial role in the development of a sustainable society. It is most widely used in many fields, such as building, machine manufacturing, medical, security, defense, etc. Steel is widely used in industries, construction, manufacturing machinery, household goods, medicine, defense security, etc. In the early twenty century, the steel output increase rapidly.

In parallel to the development of the steel industry, steel slag, a byproduct of the steelmaking process, is created more and more. Particularly in the southern region (especially Ba Ria Vung Tau province), an estimation of 0.3-0.5 million tons of steel slag is discharged each year.

However, steel slag has not been reused which has increase steel manufacture cost, wasted storage place. Therefore, the aim of this thesis, "Study on behavior of reinforced concrete using steel slag as coarse aggregate", are to analyze and evaluate the properties of steel slag recycled from electric arc furnace (EAF) steelmaking factories in Phu My industrial zone, Ba Ria - Vung Tau. Specifically, assessing the effectiveness of researching the behavior of concrete and reinforced concrete beams using steel slag as coarse aggregate. Since the focus of this research is on laboratory tests and building the discrete element model to simulate the behavior of steel slag concrete. The research results have provided a catalyst for solving the problem of construction materials shortage.

2. Research objective

- Determine the chemical properties, physical and mechanical properties of steel slag materials in Ba Ria-Vung Tau
- Design of steel slag concrete mixes
- Experimental study on the mechanical behavior of steel slag concrete
- Experimental study on the behavior of reinforced concrete beams (200x300x3300mm)
- Apply a discrete model to analyze behavior for steel slag concrete

3. Research scope

Steel slag recycles of Green Material Limited Liability Company is used coarse aggregate for cement concrete and reinforced concrete beam.

4. Research approaches and methods

- Statistical and synthesis methods: collecting and analyzing studies of using steel slag for construction in the world;
- Experimental research method: Experimental research is conducted on laboratory samples based on current standards for traditional materials and concrete using traditional materials; Laboratory test results are

statistically processed and experimentally planned to ensure the necessary reliability.

- Digital method: Use the classic discrete element method proposed by Cundall and Strack [3].
- Method of analysis and comparison: Analysis and comparison of results from theory, experiments, and simulation by discrete element method to assess the sustainability and application of concrete using slag material in construction works

5. Structure of the thesis

The structure consists of 6 chapters:

- Chapter 1: Literature review
- Chapter 2: Study on steel slag properties and design of concrete mixtures using steel slag as coarse aggregate
- Chapter 3: Study on the mechanical behavior of steel slag concrete
- Chapter 4: Study on bending behavior of steel slag concrete beam
- Chapter 5: Simulation of steel slag concrete behavior using Discrete Element Method
- Chapter 6: Conclusions and recommendations

CHAPTER 1 LITERATURE REVIEW

1.1. Overview of research situation of steel slag in Vietnam and the world

1.1.1. Research results of steel slag in the world

1.1.1.1. Chemical properties

❖ *Chemical composition*

The chemical composition of steel slag depends on the steelmaking technology and determines the mechanical properties of steel slag. Many authors have researched the chemical composition of steel slag:

- According to Ana Mladenović [4], the main chemical composition of steel slag include CaO, SiO₂ và Fe_xO_y content of about 80%.
- Ivanka Netinger [5] compared the chemical composition of dolomite and two types of recycled steel slag from landfills in Sisak and Split, Croatia.
- Mohd. Rosli Hainin et al. [6] have an overview of the chemical composition of steel slag from EAF.

❖ *Mineral composition*

Mineral composition of steel slag include [4, 7]:

- + W: Wustite (FeO);
- + CS: Calcium Silicates (2CaO.SiO₂, C₂S và 3CaO.SiO₂, C₃S);
- + B: Brownmillerite (Ca₂(Al,Fe)₂O₅, C₄AF);
- + M: mayenite (12CaO.7Al₂O₃, C₁₂A₇);

1.1.1.2. Steel slag properties

The physical and mechanical properties of steel slag were researched by many scientists such as Gurmel [8], V. Maruthachalam [9], Tahir Sofilić[10], Maslehuddin [11], Verapathran Maruthachalam[12], H. Motz[13], Lykoudis [14], the physical and mechanical properties of steel slag were compared to natural aggregate, and the result shows that it can replace for construction material.

1.1.1.3. Research results of steel slag used as aggregate for concrete cement.

According to the World Steel Association data [15], world crude steel production reached 1620 million tons in 2015. As shown in (Figure 1.1), China, Europe, Japan, and the United States were the top four regions in the world's crude steel production, accounting for 71.7% of the total. Steel slag is primarily used in road construction, cement production, internal recycling, civil engineering, and agriculture

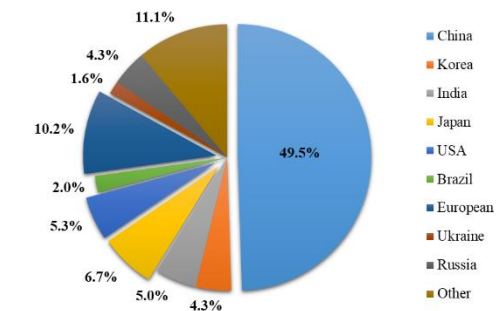


Figure 1.1. Crude steel in the world

M. Maslehuddin et al.. [16] evaluated the feasibility of using steel slag aggregates in concrete.

Steel slag aggregate concrete's strength and durability characteristics were compared with those of crushed limestone aggregate concrete. Steel slag aggregate concrete mixtures were made with steel slag aggregate to total aggregate ratios of 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, and 0.65. In another paper, M. Maslehuddin et al.. [11] announced the mechanical properties and durability of steel slag aggregate concrete compared to the crushed limestone stone aggregate concrete. Juan M. Manso et al. [17] describe the work carried out in the laboratory to produce concrete with good properties using oxidizing electric arc furnace slag as fine and coarse aggregate. Six experimental mixtures, M-1–M-6, were prepared. The tests being performed according to several ASTM standards: C642 (specific gravity, absorption, and voids), C39 (compressive strength), and C617 (capping the samples with sulfur mortar). Jigar P.Patel [18] studied the behavior of concrete and changes in the properties of concrete with steel slag aggregates by replacing the use of natural aggregates (from 25% to 100%). Ioanna Papayianni et al. [19] checked the suitability of steel slags for concrete production and developed concrete mixtures with a high volume of electric arc furnace steel slags. Ivanka Netinger et al. [20] investigate the possibility of utilizing steel slags produced in Croatian plants as a concrete aggregate. Liu

Chunlin et al. [21] show that the effect of using steel slag and scrap tire particles on the strength and volume deformation of concrete were preliminary studied to investigate the possibility of replacing the traditional aggregates for concrete production. Compressive and flexural strength and volume deformation of concrete containing EAF slag as aggregate or (and) scrap tire particles were investigated. Sang-Woo Kim et al. [22] estimated the flexural performance of reinforced concrete beams with electric arc furnace oxidizing slag aggregates. Sultan A. Tarawneh et al. [23] present an evaluation of the physical and mechanical properties and characteristics of steel slag aggregate concrete compared to the typical crushed limestone stone aggregate concrete. Hisham Qasrawi [24] studies the effect of using recycled concrete aggregate (RCA) or steel slag aggregate (SSA) on the properties of normal concrete. First, RCA and SSA properties have been determined and compared with those of normal aggregates. Later, RCA and SSA were introduced in concrete mixes. In these mixes, natural coarse aggregate is partly or replaced by RCA or SSA. Ramzi Taha et al. [25] presents the results obtained on the use of steel slag, gravel and gabbro in concrete. A total of nine concrete mixtures were prepared. One concrete mixture that contained 100% gabbro aggregate was considered as the control mix. Four concrete blends containing 100%, 75%, 50%, and 25% steel slag (by weight) were prepared as partial replacements of gabbro aggregates. Amjad A. Sharba (2019) [26] was carried out to study the effect of using steel slag (SS) and recycled concrete aggregate (RCA) as replacements for the natural aggregate in concrete. V. Ducman and A. Mladenović [27] proves that if the slag is previously heat treated up to 1000°C, it remains stable after subsequent heating can therefore be used in the refractory industry at temperatures of up to at least 1000°C . And besides the application for ordinary concrete, steel slag are also studied and applied to high strength concrete [28-31].

1.1.1.4. Numerical simulation

Cundall first proposed a numerical simulation study of the discrete element method in 1971 for use in rock mechanics [32]. Along with the development of computer science, DEM has gradually been widely used for many types of materials, including geomaterials such as soil and concrete [33-35].

There have been many numerical simulation methods used to simulate the behavior of concrete, reinforced concrete such as finite element method, discrete element method, etc. Studies on simulation of beams concrete, reinforced concrete beams by finite element method have been performed by many authors.

To simulate the behavior of reinforced concrete beams, Wahalathantri. B. L et al. [33] proposed a model of the stress-strain relationship between compression and tensile failure. In addition, the plastic failure model is used to simulate beams flexural strength and behavior analysis and failure of reinforced

concrete beams [34]. S.V. Chaudhari et al. [35] used the plastic failure model and the discrete crack model simultaneously to simulate and calculate the flexural members, thereby comparing the accuracy of the two models.

The study of steel slag concrete behavior is almost done only by experimental studies without many studies on numerical simulation. Therefore, the study of numerical simulation of the behavior of steel slag concrete is necessary. Besides, with its advantages, the discrete element method was chosen as a suitable method to simulate concrete materials in general and steel slag concrete in particular in this experiment.

1.1.2. Research results of steel slag in Vietnam

1.1.2.1. Study on steel slag

Studies on steel slag in 2011, the Ministry of Construction issued a document on the use of steel slag as a raw material: “Steel slag after recycling has the same chemical and mineral composition as the chemical and mineral composition of low-grade cement. When it was crushed smoothly and hydrated with water, it has hardening ability and strength. It is a source of raw materials to serve building materials such as cement additives, unburnt materials, and roads” [36]. Research on steel slag has also been conducted, including the research team led by Tran Van Mien [37-39], Nguyen Van Chanh, Nguyen Vinh Phuoc [40].

1.1.2.2. Studies on numerical simulation using discrete element method

The discrete element method is still relatively new in Vietnam, and very few studies use this method. Nguyen Tien Cuong et al. [41]. used the discrete element method to simulate some problems in soil mechanics. The study has shown the potential application of this method in numerical simulation of geosynthetic material behavior.

Tran Van Tieng et al. [42]– have developed a combined model including discrete element model and fluid model to simulate the behavior of wet and water-saturated concrete in the lower three-axis compression test with many different load levels.

1.1.3. Recommendation

Studies also show that the chemical composition of steel slag includes oxides: CaO, Fe_xO_y, MgO, MnO₂, SiO₂ and Al₂O₃, MgO, etc. in sustainable complexes, where the main components are CaO, SiO₂, and Fe_xO_y account for more than 80% of the total weight and fluctuate depending on the origin of research steel slag, the type of steel produced as well as the steelmaking technology. In terms of mechanical and physical properties, water absorption is also more remarkable than traditional reinforcement, except that the density and the void are higher and water absorption is also greater than traditional aggregate; the other indicators of steel slag are almost similar to traditional reinforcement. The difference in steel using technology leads to differences in the content of oxides

in the composition and the accumulation of mechanical and physical substances of steel slags. Some of the above studies show that there have not been many simulating studies on steel slag concrete but only focus on traditional concrete. At the same time, simulation models main based on the Finite Element Method, and there are many limitations in simulating the behavior of concrete.

1.2. Thesis structure

The thesis structure includes six chapters.

- Chapter 1: Literature review
- Chapter 2: Study on steel slag properties and design of concrete mixtures using steel slag as coarse aggregate
- Chapter 3: Study on the mechanical behavior of steel slag concrete
- Chapter 4: Study on bending behavior of steel slag concrete beam
- Chapter 5: Simulation of steel slag concrete behavior using Discrete Element Method
- Chapter 6: Conclusions and recommendations

1.3. Conclusion of Chapter 1

- Steel slag has been applied in many countries around the world, and the above studies show that steel slag properties are similar to traditional aggregates; it can replace coarse aggregates in concrete. However, due to differences in steelmaking technology and steel slag origin, the mechanical and physical properties of steel slag, as well as the steel slag concrete, have significant differences among the above studies

CHAPTER 2

STUDY ON STEEL SLAG PROPERTIES AND DESIGN OF CONCRETE MIXTURES USING STEEL SLAG AS COARSE AGGREGATE

2.1. The chemical, physical and mechanical properties of steel slag

Studied steel slag (Figure 2.1) is recycled by Green Material Limited Liability Company. Before being stored in the laboratory, it is sieved, washed, and dried to a non-changeable volume to be ready for the experiment.



Figure 2.1. Steel slag sample

2.1.1. Chemical composition

The chemical composition of steel slag is analyzed by the laboratory LAS.XD19. The results showed that

steel slag also included mainly oxides such as CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe_xO_y, similar to the chemical composition of steel slag in the studies in Chapter 1 ([4, 5, 43]).

2.1.2. The physical and mechanical properties of steel slag

The mechanical and physical indicators of steel slag are defined at the Laboratory of Materials, Ho Chi Minh City University of Technology and Education. Experimental results showed that its properties are different from overseas studies.

2.2. Design mixed steel slag concrete

2.2.1. Methods of concrete mix design

The study results in chapter 2 show that we can choose the composition of concrete according to decision No.778/1998/QD-BXD "Technical requirement of choosing the composition of normal concrete" issued by the Ministry of Construction [44]. Where the modified equation of water and cement were proposed as follows:

$$N_{hc} = N_{tb} + H_p \cdot XT$$

$$X_{hc} = 0.9 \cdot X_{tt}$$

Table 2.1. Propose the composition of steel slag concrete (kg/m³)

Series	Require compressive strength (MPa)	Cement (kg)	Fine aggregate (kg)	Steel slag aggregate (kg)	Water (l)	Ratio W/C	Slump (cm)	Compressive strength (MPa)
CP20	20	290	803	1500	220	0.76	6-8	23.9
CP25	25	338	773	1485	219	0.65	6-8	28.5
CP30	30	385	742	1471	218	0.57	6-8	33.2
CP35	35	433	710	1458	219	0.50	6-8	39.1
CP40	40	480	678	1448	219	0.46	6-8	43.7

2.3. Conclusion of Chapter 2

- The mechanical and physical properties of steel slag obtain for all specifications for the coarse aggregate of regular concrete and cement mortar according to TCVN 7570:2006. Therefore, it is possible to use steel slag as coarse aggregate of cement concrete.
- Technical instructions issued by the Ministry of Construction [44] can use to choose the composition of steel slag concrete. However, it is necessary to adjust the amount of water and cement.

CHAPTER 3

STUDY ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF STEEL SLAG CONCRETE

3.1. Experimental design

3.1.1. Specimens



Figure 3.2. Compressive strength test



Figure 3.6. Splitting tensile strength test



Figure 3.5. Test for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio



Figure 3.7. Test for flexural strength- 4 point bend.

3.2. The compressive behavior of steel slag concrete

3.2.1. Compressive strength

3.2.1.1. Failure surface of steel slag concrete

In Figure 3.8, there is a noticeable difference in the failure surfaces of steel slag and natural concrete. The failure surfaces in steel slag concrete propagated through the coarse aggregate, while failure surfaces in natural concrete propagated mainly along with the matrix-aggregate interface.



Figure 3.8. Failure surface of steel slag and natural concrete

It can be explained that steel slag particles have a honeycomb structure. Hence, the connection with

cement mortar is improved so that failure surfaces pass through steel slag particles. The failure surfaces are very similar for both the steel slag concrete and the high-strength concrete using natural coarse aggregate (Figure 3.9)

3.2.1.2. Compressive strength development of concrete

Figure 3.10 shows that the

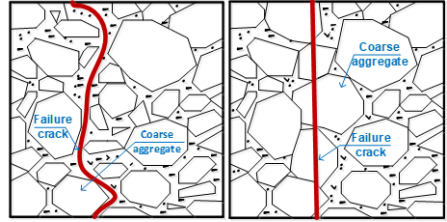


Figure 3.9. Failure surface of concrete using natural coarse aggregate

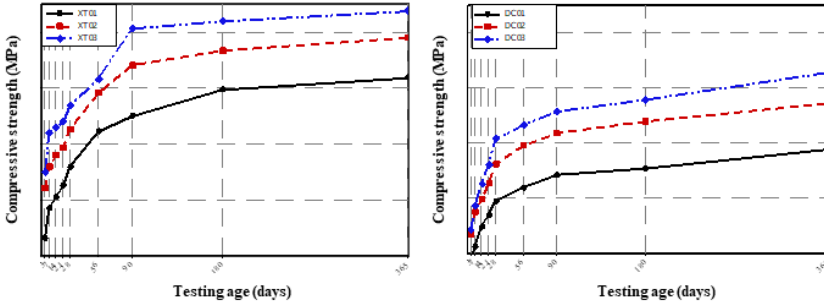


Figure 3.10. Relationship between compressive strength and testing age

compressive strength development of BTXT versus time can be extended as it is cured in standard conditions. After 28 days age, the rate of gain of steel slag concrete strength is better than natural concrete. In addition, the 28-day compressive strength of BTXT is about 15%-21% higher than traditional concrete

3.2.1.3. The relationship between compressive strength and age of BTXT

The relationship between compressive strength and age should be mathematically modeled:

3.2.2. Stress and strain

3.2.2.1. The relationship between stress and strain

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

Figure 3.13 presents the response curves of compressive stress versus axial strain together with compressive stress versus lateral strain of three steel-slag concretes XT01, XT02, XT03. As presented in Figure 3.13, at beginning of load, the slopes (also indicating stiffness of a material) of the axial responses were lower than those of the lateral responses ($\phi_a < \phi_b$), i.e., the absolute value of lateral strain (negative form in an expression) was smaller than axial strain (positive form in an expression), and, the linear relationship was observed at low-stress part, about one-third of the peak. Beyond the linear zone, the slope of the response curve was gentler and gentler owing to microcracks occurring. At failure, the lateral strain was higher than axial strain, regardless of the tested series.

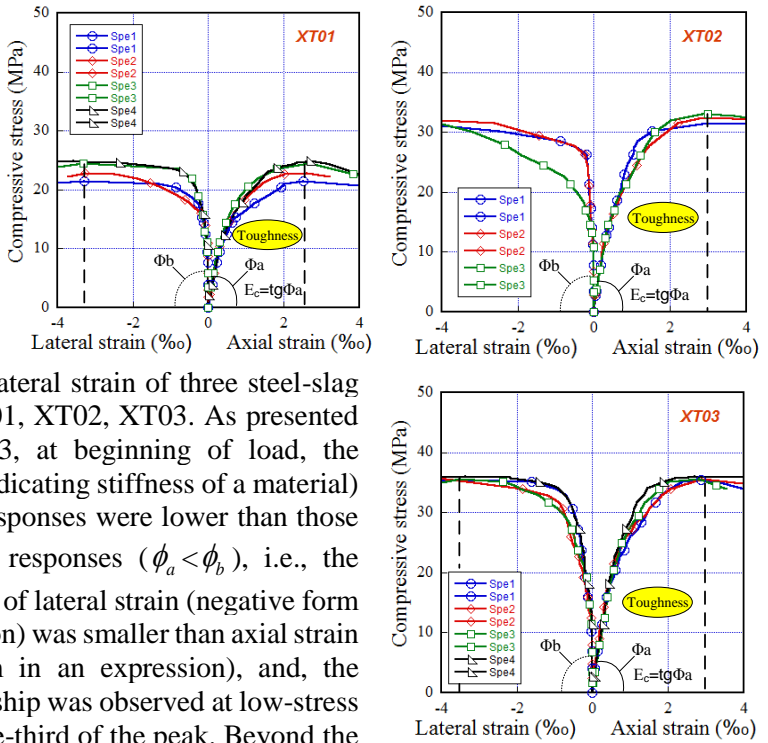


Figure 3.13. The relationship between stress and strain

3.2.2.2. Modulus and Poisson's ratio

According to ACI, modulus of elasticity of concrete could be related with compressive strength under square root proportionality, $k_E=0.043$

$$E = k_E * w_c^{1.5} * \sqrt{f'_c}$$

3.2.3. Size and shape-dependent compressive strength of the steel-slag concrete

3.2.3.1. Bažant's theory

The relationship between strength and specimen size according to Bažant's size effect law is performed by the equation:

$$\sigma_N = B f_t \left(1 + \frac{D}{D_o} \right)^{-1/2}$$

$$\text{Cube: } f'_c = 85.16 \left(1 + \frac{D}{37.26} \right)^{-1/2}$$

$$\text{Cylinder: } f'_c = 39.54 \left(1 + \frac{D}{316.43} \right)^{-1/2}$$

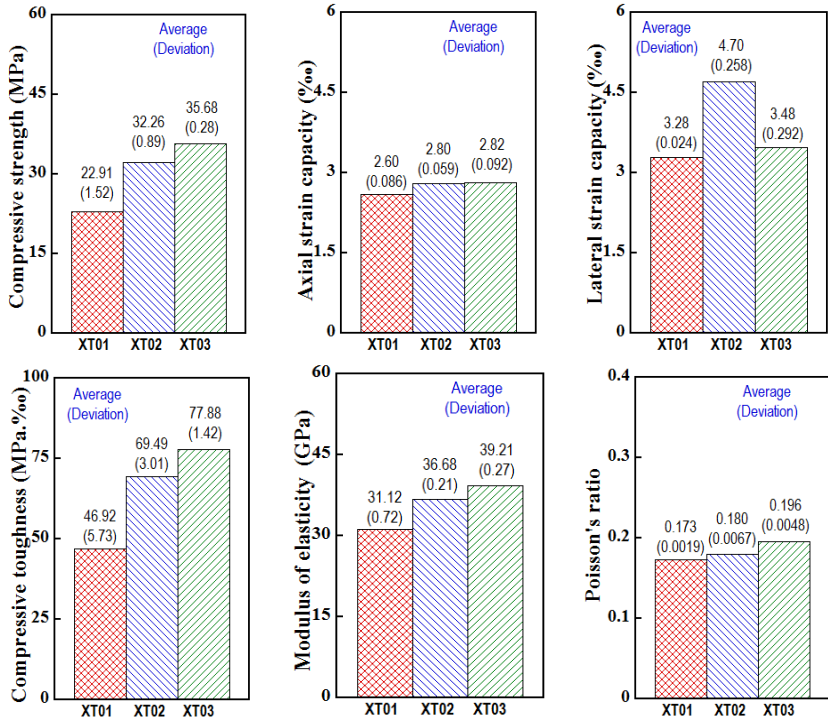


Figure 3.14. Comparison of compressive parameters at 28-day age of three BTXT

The equation described Bažant's size effect law using the steel-slag concrete with $D_o=37.26\text{mm}$ for cube specimen and $D_o=316.43\text{mm}$ for cylinder specimen:

Since the cube specimen produced the lower D_o , the significance of size effect using cube specimen was greater than that using cylinder specimen. Figure 3.18 presents the attainment of D_o and the graphs of Bažant's size effect law for the steel-slag concrete. The experimental data for both cube and cylinder specimen were in the transition between plastic zone and LEFM zone, however, the measured data of the cube specimen were nearer the line of LEFM than the line of strength criterion.

Figure 3.19 displays the compressive force and strength value. There was a converse trend in these two figures: as the size of the specimen increased 2 times with the same shape, the compressive force increased 1.91 times with cube-shaped specimen and 1.51 times with cylinder-shaped specimen, but the compressive strength decreased 1.35 times with cube-shaped specimen and 1.09 times with cylinder-shaped specimen.

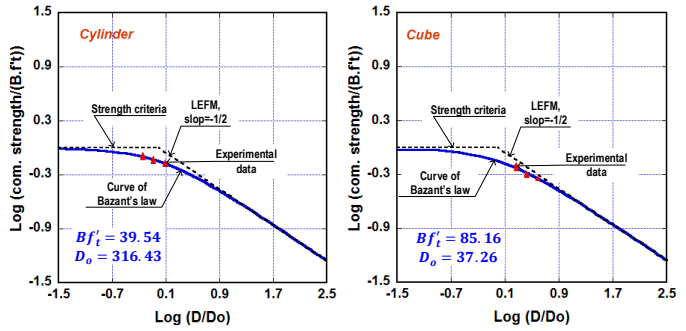


Figure 3.18. Applying Bazant's size effect law for the BTXT

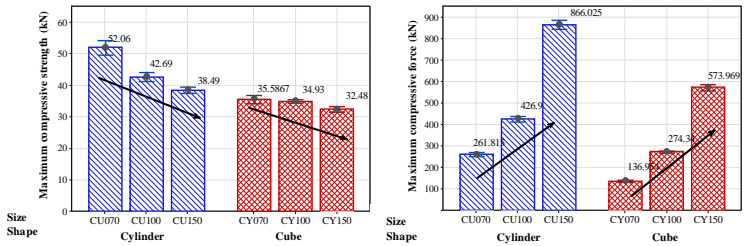


Figure 3.19. Dependence of compressive strength at 28-day age upon specimen size and shape

the compressive strength decreased 1.35 times with cube-shaped specimen and 1.09 times with cylinder-shaped specimen. This was called a phenomenon of size effect often occurring in brittle or quasi-brittle materials.

3.2.3.2. Deriving conversion factors for the compressive specimens using the steel-slag concrete with various sizes and shapes

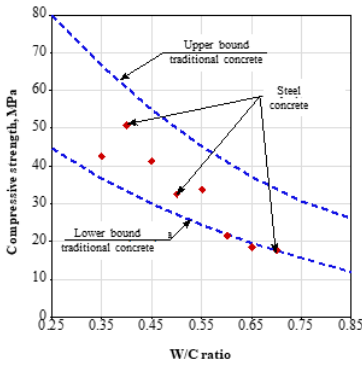
The conversion factors (λ) of the steel-slag concrete were presented follow in the table below:

Table 3.1. Conversion factors in compressive strength using various specimen types

Concrete type	Conversion factors, $\lambda = \sigma_{cu}^{CU150} / \sigma_{cu}^{CSpe.type}$ Standard specimen 150x150x150mm					
	CU070	CU100	CU150	CY70	CY100	CY150
Steel slag concrete	0.74	0.90	1.00	0.99	1.08	1.18
Traditional concrete [45]	0.85	0.91	1.00	1.16	1.17	1.20

3.2.4. Effect of the added water amount on compressive strength of steel-slag concrete

The relationship between compressive strength and W/C of the BTXT is similar to traditional concrete.



Hình 3.20. Relationship between 28-day compressive strength and cement/water ratio of BTXT in comparison with traditional concrete using cylinder specimens of 150x300 mm [2]

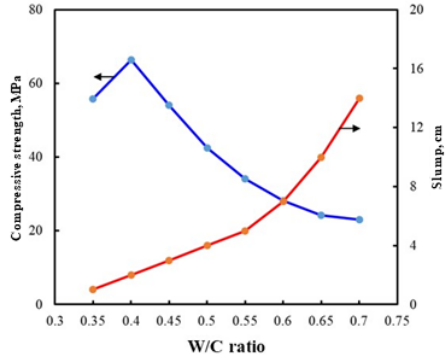


Figure 3.21. Effect of cement/water ratio on slump and compressive strength of the BTXT at 28-day age using cube specimens

3.2.4.1. Influence of specimen size and shape on splitting resistances of steel slag concrete

A contrasting tendency was observed between them and the size-dependent splitting strength was explored for both cylinder splitting specimen and side-cube splitting specimen: the larger-sized specimens produced the lower splitting strength despite the higher peak load.

3.2.4.2. Conversion factors for splitting specimens of BTXT with different specimen types

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

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

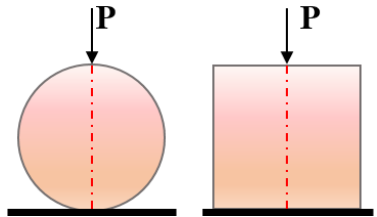


Figure 3.23. Two of testing methods for splitting tension

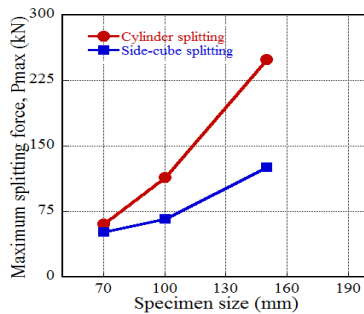
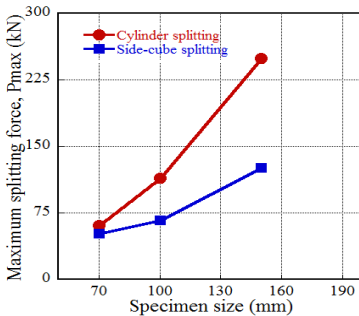


Figure 3.25. Influence of specimen size and shape on cylinder and side-cube splitting resistances

The splitting strength of various series would be compared with that of CY150 using conversion factors (χ)

Table 3.2. Conversion factors for splitting & compressive strength of BTXT with various splitting series

Testing type	Standard specimen	Conversion factor, χ	
		Experiment result	Kadlecek et al..[46]
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

3.2.5. Flexural strength of plain

The typical flexural behavior of the plain BTXTs was provided in Figure 3.29 for plain concrete with brittle failure. Figure 3.17 shows the typical crack of BTXTs under 4-PBT, the flexural specimen was 100x100x300 mm (widthxheightxspan-length). As shown in Figure 3.17, only a single crack occurred in all tested specimens, and the crack surface was perpendicular to the neutral axis.



Figure 3.28. Typical crack under 4-PBT using 100x100x300 mm specimen

3.3. Conclusion of Chapter 3

The observations and conclusions can be summarized from test results as follows:

- The compression infestation of steel slag concrete occurs similarly to high-strength concrete using reinforcement as natural stone. However, the destructive side of BTXT tends to cut through steel slag reinforced particles due to the specific structure of steel slag grains;
- The compressive strength of steel slag concrete develops quickly at 3 and 7 days age and estimates to be about 75% of the 28-day strength. After 28 days

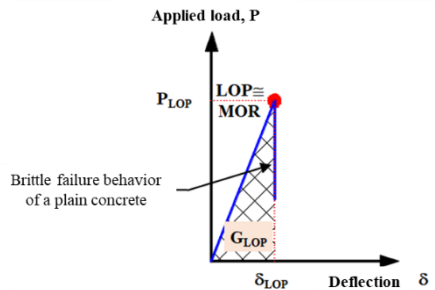


Figure 3.28. Typical load versus deflection response of concrete

age, it continues to gain to 365 days ages. The 7-day and 8-day strengths are 55-66 % and 69-73 % of 365-day strength, respectively;

- The axial strain capacities of the steel lag concrete were between 2.60 and 2.82 %. The lateral strain capacities of the steel-slag concrete were higher than axial strain capacities from 1.23 to 1.68 times. The derived Poisson's ratios and moduli of elasticity of the steel slag concrete were usual in comparison with traditional concrete;

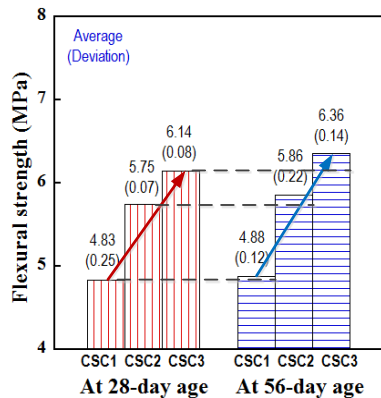


Figure 3.17. f_{cr} at 28 and 56 days age

- The studied steel-slag concrete demonstrated apparent size effects on compressive strength in cube and cylinder specimens, i.e., the smaller specimen would produce a higher compressive strength. The conversion factors for compressive strength using different sizes and shapes of the steel-slag concrete were explored;
- The slump value of the steel-slag concrete decreased with increasing water/cement ratio while its compressive strength was different: it increased with decreasing of cement/water from 0.7 to 0.4 and decreased after that, the optimal water/cement was 0.4 to get the highest strength. The relationship between compressive strength and water/cement ratio of the steel-slag concretes was almost inside the bound zone of traditional concrete;
- The coarse steel slag concrete exhibited clearly size-dependent splitting strength, for both side-cube splitting specimens and cylinder splitting specimens. In addition, the conversion factors for splitting strength were derived for various splitting series; they were useful in translating the splitting strength from one to others quickly;
- The plain coarse steel slag concrete flexural strength increased with increasing testing age and was suitable with compressive strength. The derived conversion factors for flexural strength were somewhat the same as that of traditional concrete.

CHAPTER 4

STUDY ON BENDING BEHAVIOR OF STEEL SLAG CONCRETE BEAM

4.1. Design of experiment

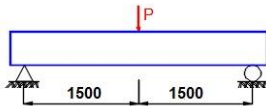
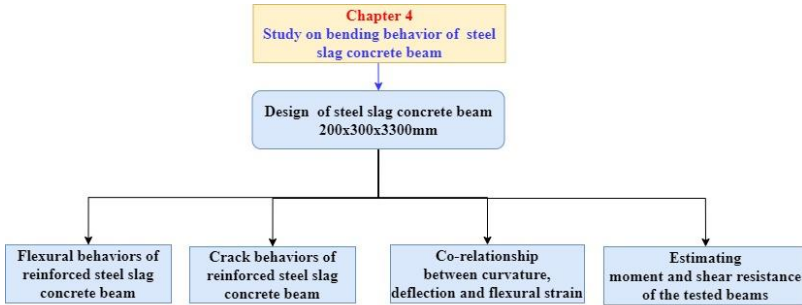


Figure 4.1. Experimental diagram

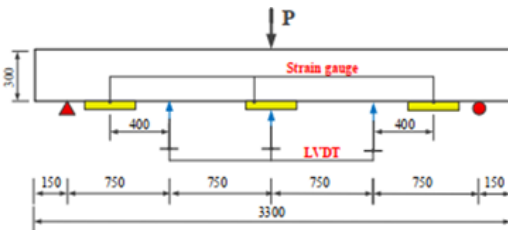


Figure 4.3 Photos of test setup

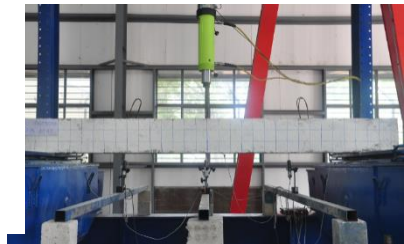


Figure 4.2. Structure of reinforced steel slag concrete beams

4.2. Experimental results

4.2.1. Flexural behaviors of reinforced steel slag concrete beam

The flexural parameters would be evaluated at LOP and The flexural parameters evaluate flexural behaviors of reinforced steel slag concrete beam would be valuated at LOP and MOR .

Figure 4.5 presents the comparison of flexural resistances of three reinforced BTXT beams. As shown in Figure 4.5, at LOP, the higher

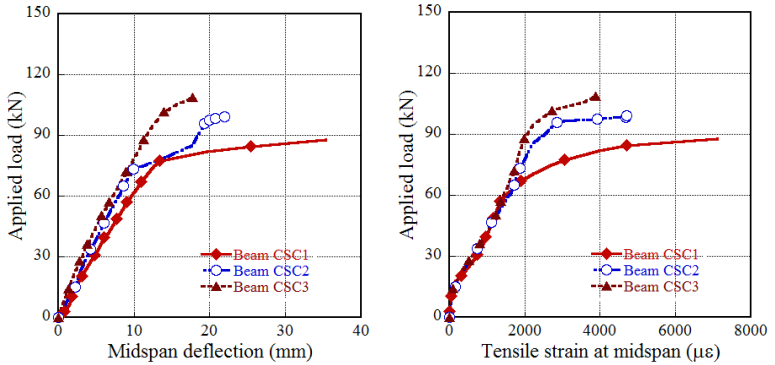
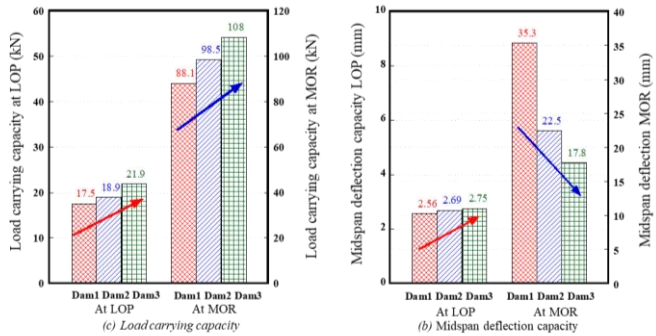
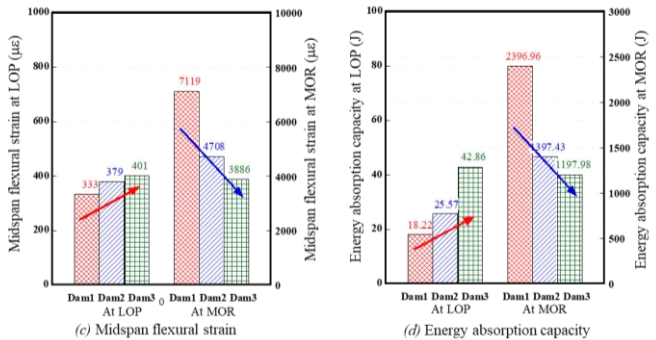


Figure 4.4. Flexural behaviors of BTCTXT

compressive strength of BTXTs produced the higher values of all flexural parameters, i.e., the order of beam type in terms of all flexural parameters were as follows: Dam1<Dam2<



Dam3. However, at MOR, only P_{MOR} increased with increasing of f'_c , other parameters including δ_{MOR} , ϵ_{MOR} , G_{MOR} , exhibited the opposite trend, i.e.,



the order of beam type in terms of δ_{MOR} , ϵ_{MOR} , G_{MOR} were ranked as follows: Dam1<Dam2< Dam3

Figure 4.5. Comparison of flexural resistances of three reinforced BTXT beams

4.2.2. Crack patterns of the tested beams

Figure 4.6 displays the crack distribution in the tested beams.

The flexural strength of reinforced concrete beam at LOP (f_{LOP}) would be theoretically equal to flexural strength of plain concrete, f_{cr} . The f_{LOP} can computer by the equation below and then summarized in Table 4.1:

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

The derived f_{LOP} were much higher than f_{cr} at 28-day age presented in Table 4.1. This could be attributed that the presence of steel bar helped limit the crack initiation from the air hole embedded in concrete [47].

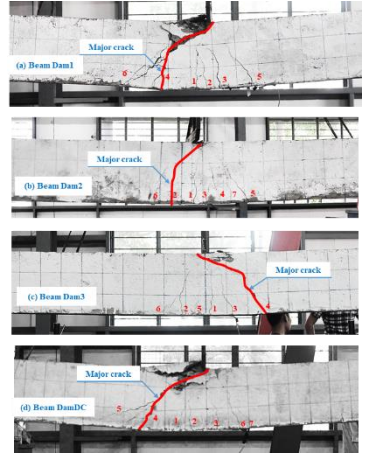


Figure 4.6. Crack distribution in three reinforced CSC beams

Table 4.1. Determination of flexural strength at LOP of the tested beams

Beam name	P_{LOP} (kN)	E_C (GPa)	c at LOP (mm)	I_{equi} (mm ⁴)	f_{LOP} (MPa)
Dam1	57.28	31.12	153	481328912	13.16
Dam2	73.36	36.68	152	475762177	17.10
Dam3	87.96	39.21	152	473745984	20.62

4.2.3. Co-relationship between curvature, deflection and flexural strain

Table 4.2. Comparative flexural strain at LOP

Beam name	δ_{LOP} (mm)	Φ_{LOP} (1/m)	c at LOP, (mm)	Derived flexural strain at LOP, ($\mu\epsilon$)	Measured flexural strain at LOP, ($\mu\epsilon$)	Difference (%)
Dam1	9.08	0.0101	153	1488	1341	10
Dam2	9.90	0.0110	152	1627	1872	15
Dam3	11.25	0.0125	152	1851	1980	7

Table 4.3. Comparative flexural strain at MOR

Beam name	δ_{MOR} (mm)	Φ_{MOR} (1/m)	c at MOR, (mm)	Derived flexural strain at MOR, ($\mu\epsilon$)	Measured flexural strain at MOR, ($\mu\epsilon$)	Difference (%)
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

Tables 4.2 & 4.3 supply the comparative flexural strain of the BTXTs at LOP and MOR, respectively. The differences of flexural strain at LOP and MOR according to theory and experiment were rather high: 7-15% at LOP and 17-20% at MOR.

4.2.4. Estimating moment resistance of the tested beams

The nominal moment resistance (M_n) of each tested beam was estimated based on the material properties. Figure 4.7 displays the stress and strain distribution, the force of tensile steel along the depth of cross section. The compressive steel could be negligible owing to its much smaller than that of tensile steel. The compressive stress block of CSC was equivalently transfigured to a rectangular stress block with a magnitude of $0.85f'_c$ and depth of $\beta_1 c$. The force of tensile steel must be equal to the force of compressive CSC.

The differences of the M_{exp} and M_n were observed to be 9-20%, the true M_{exp} were always higher than the M_n about 1.1-1.3 times.

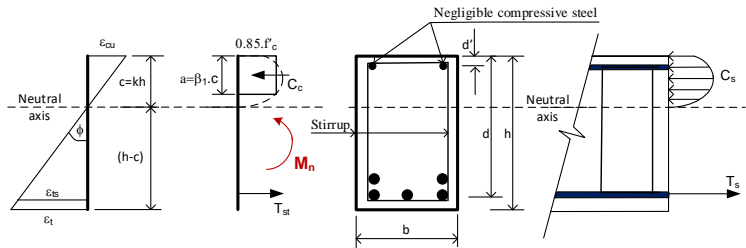


Figure 4.7. Force of tensile steel, stress and strain distribution along the depth of section

Table 4.4. Comparative flexural moments

Beam name	f'_c (MPa)	β_1	c at MOR (mm)	M_n (kN.m)	M_{exp} (kN.m)	Difference (%)
Dam1	22.91	0.85	93	61.72	67.75	9
Dam2	32.26	0.82	68	65.25	75.54	14
Dam3	35.68	0.85	64	66.08	83.03	20

4.3. Conclusions of Chapter 4

Based on the above analysis can make some conclusions as follows:

- The increase of compressive strength of coarse steel slag concretes increased all flexural parameters at LOP, including load carrying capacity, midspan deflection capacity, midspan flexural strain and energy absorption capacity. However, at MOR, the increase of compressive strength generated the increase of load carrying capacity at MOR only but the decrease of other flexural parameters.
- The flexural parameters of the tested reinforced concrete beams using coarse steel slag were generally consistent with the theory for traditional concrete. Under loading, there was a strong co-relationship between the initiation and propagation of the crack, curvature, deflection, and flexural strength.
- The theories of traditional concrete and reinforced concrete beams can be applied for steel slag concrete and reinforced steel-slag concrete beams. Therefore, in case their design, construction, and acceptance standards have not been issued, the standards of traditional concrete and reinforced concrete beam can be applied for steel slag concrete and reinforced steel slag concrete beam.

CHAPTER 5

SIMULATION OF STEEL SLAG CONCRETE BEHAVIOR

5.1. Theoretical basis

5.1.1. Discrete Element Method

Cundall first developed the discrete element method (DEM), a numerical method that simulates granular material and geo-materials [3]. In this thesis, undistorted spherical elements were used to simulate steel slag concrete. The simulating process includes four steps [48]:

1. Determine interaction force between the discrete elements in each time step: interaction force involves elements in contact and elements that are separated by a distance smaller than an interaction radius controlled by a ratio γ . After each time step, the location and distance of elements were computed, and interaction forces also were determined.

2. After the new interaction position is updated, the interaction force will be determined using the local constitutive law between two elements. The interaction force consists of the normal, shear force, and moment.

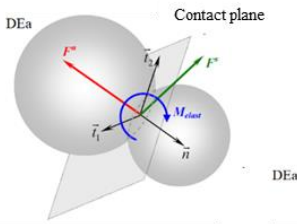
3. Calculate the total of force component interaction forces on the elements.

4. Apply Newton's second law to integrated to find the new element positions. This process is repeated until the simulation is finished.

5.1.2. DEM model of steel slag concrete

With the DEM, the concrete sample is simulated by the set of discrete spheres element. They have weight and can interact follow Interaction law:

- Discrete elements that are non-deformable;
- Interaction in the form of intrusion between two components;
- With local interaction law, the penetration into each other of interactive elements are minimal compared to the size of them;
- All elements are spheres, except the special elements used to describe the boundary condition (boundary elements)



Figures 5.1. Interaction between two elements

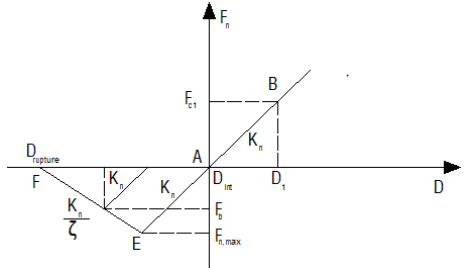


Figure 5.2. Normal interaction force between two discrete elements

In the present model, the initial elastic interaction force, which represents the action of element a on element b, does not only involve elements in contact but elements which are also separated by a distance smaller than an interaction radius controlled by a ratio γ defined by:

5.1.3. Destruction standard

A modified Mohr-Coulomb model has been used to model the nonlinear behavior of the steel slag concrete. For a given interaction, the maximum normal interaction force $F_{n,max}$ is defined as a function of the tensile strength σ_T , which is equal to cohesion C . The maximum shear interaction force $F_{s,max}$ is characterized by the normal force F_n , the cohesion C , it contacts frictional angle Φ_c and the internal frictional angle Φ_i .

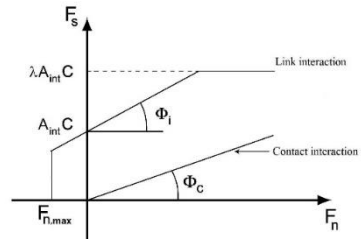


Figure 5.3. Mohr – Coulomb standard [1]

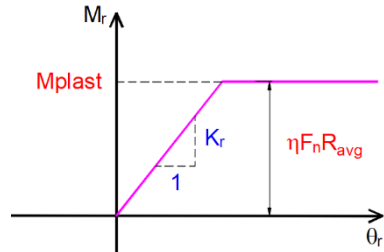


Figure 5.4. Transmit moment law

According to transmit moment law, plastic behavior appears when the moment reaches the maximum elastic value. At that time, it is ideal plastic behavior with the ideal plastic moment.

This discrete element model has been implemented in the open source code Yade.

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

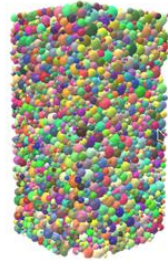


Figure 5.5. Numerical specimen

5.2. Numerical specimen

A numerical specimen is created with dimensions of $150 \times 150 \times 300$ mm and a diameter-height ratio of 1:2. The number of elements in the sample is 10,000 spherical elements.

5.3. Model parameters

Table 5.2. The local parameters of the discrete element model

Series	Density, w_c kg/m ³	Poisson ratio, ν_c	Elastic modulus, E_c (GPa)
XT01	2539.20	0.173	31.12
XT02	2574.69	0.180	36.68
XT03	2602.40	0.196	39.21

Table 5.3. The frictional and cohesion

Series	C (Pa)	φ (°)
XT01	$0.1 \cdot 10^6$	5.71
XT02	$0.5 \cdot 10^6$	5.71
XT03	$0.9 \cdot 10^6$	5.71

5.4. Numerical simulations

5.4.1. Uni-axial compressive test

The boundary condition of uni-axial compressive tests shows in Figure 5.6. The transverse is applied at the upper boundary, and the lower boundary is fixed for every step during simulating.

The numerical specimen has four sides that are not limited to transverse so that The numerical specimens can be unconfined during simulation. The simulation experiment stops when the numerical specimen is failed. The results are shown in the diagram of the relationship between $\sigma_1 - \varepsilon_1$.

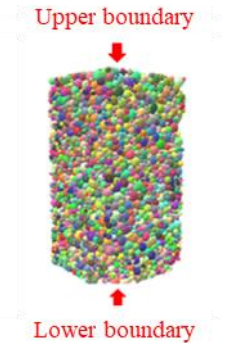


Figure 5.6. Boundary condition

5.4.2. Uni-axial tensile test

The boundary conditions of uni-axial tensile test are similar to the uni-axial compressive test.

5.4.3. Simulation results

5.4.4. Results of uni-axial compressive test:

5.4.4.1. The relationship between stress-strain

Figure 5.7 shows the stress–axial strain curves of numerical and experimental tests with two types of gradations XT01, XT02, XT03, respectively. The simulation results show that:

- In the first phase (the stress increases 0 to about 1/3 of the maximum stress), the numerical curve is a straight line, the relationship between stress and strain is linear. In this phase, the simulation curve is identical to the experimental curves. Thus, the numerical model correctly describes the behavior of cement concrete when cracks have not appeared yet—the concrete works in the elastic phase.
- In the next phase (the stress increases until the peak stress): the cracks begin to appear and develop. The slope of simulation curves starts to change, and the relationship between stress and strain is not linear. The numerical results correctly reflect the trend of concrete’s behavior. It can also explain that there will be some errors during the experiment when the crack appears due to the measuring.
- When the sample failed: the destructive load in the simulation experiment had a relatively small deviation with the experiment of about 2-5%. However, the deformation difference between the simulation and the experiment was

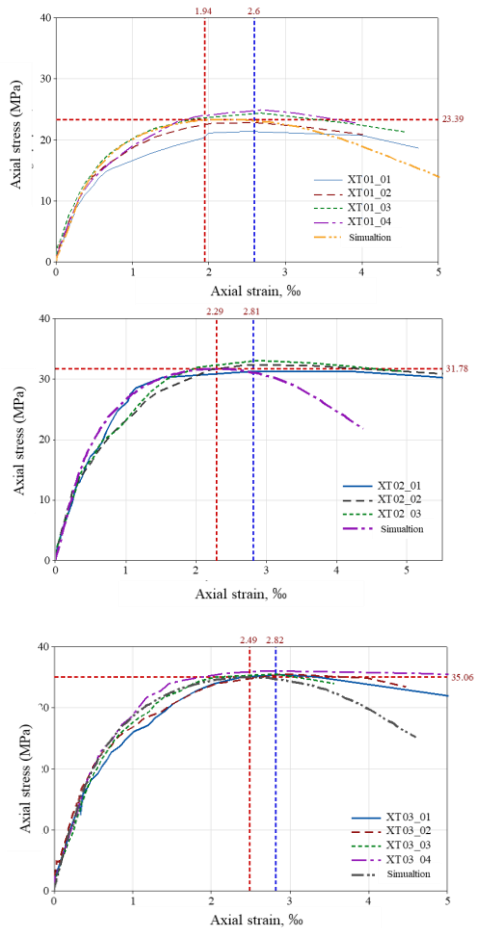


Figure 5.10. The axial stress vs axial strain curves of experiment and simulation tests of steel slag concrete

relatively significant due to the large cracks. After failure, this deviation note greater.

5.4.4.2. Cracks development



Figure. 5.11. The cracks in the numerical sample and experimental specimens

5.4.5. Results of uni-axial tensile test

The results in Figure 5.12 show the axial tensile strength of simulation specimens (XT02, XT02, XT03) valued from 1.70 MPa to 2.15 MPa. The ratios between axial tensile strength and square of compressive strength from the simulation K_{omp} and ACI K_o are present in Table 5.3. Compare $K_{omp}=0.355-0.364$ to $K_o =0.33$ [49] can remark that although there are no experimental data on the direct tensile test, the simulation results of the steel slag concrete specimens are consistent with the general behavior of traditional concrete, the result is similar to concrete using natural aggregate. Therefore, this simulation can use to predict the direct tensile strength of steel slag concrete specimens when there are no experimental results.

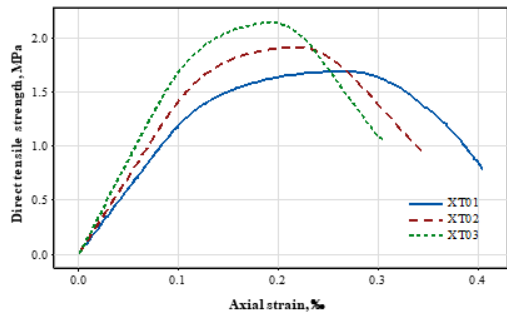


Figure 5.12. The axial tensile stress vs axial strain curves of simulation tests of steel slag concrete

Table 5.3. Compare the axial tensile strength of simulation vs experiment

Series	f'_{cmp} (MPa)	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

5.5. Result of chapter 5

- The simulation result of axial compression and tensile tests of steel slag concrete are similar to the experimental results, with a difference of about 2-5%. This result proves that the numerical model correctly described the behavior of steel slag concrete, which sets the ground for further simulation studies such as numerical simulation for beams, columns, frame nodes, reinforced concrete foundations, etc.
- Simulation results of axial compression test allow to determine the failure stress of steel slag concrete, and at the same time observe the development and propagation of cracks. It is the advantage of the discrete element method over other methods. The discrete element method can describe the material's behavior after the appearance of a crack and when the failure has occurred entirely.
- Simulation results of the axial tensile test allow predicting the axial tensile strength of steel slag concrete when the axial tensile tests in the experiment are challenging to perform.
- The simulation results have confirmed the ability of the discrete element model in simulating the behavior of steel slag concrete, creating a premise for applying this model to simulate and predict steel slag concrete structures' behavior.

CHAPTER 6

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

6.1. Conclusions

The thesis results provide some information:

- Studied steel slag obtain for all specifications for the coarse aggregate of regular concrete and cement mortar according to TCVN 7570:2006. Therefore, it is possible to use steel slag as coarse aggregate of cement concrete;
- Technical instructions issued by the Ministry of Construction can use to choose the composition of steel slag concrete. However, it is necessary to adjust the amount of water and cement:

$$\begin{aligned}X_{hc} &= 0.9.X_{tt} \\ N_{hc} &= N_{tb} + H_p.XT\end{aligned}$$

- Can predict the compressive strength of steel slag concrete according to its age by the formula:

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

- The conversion factors for compressive strength using different sizes and shapes of the steel slag concrete were explored (cube: 150x150x150 mm);
- Predict the elastic module of steel slag concrete through its density and compressive strength:

$$E = k_E * w_c^{1.5} * \sqrt{f'_c}$$

- The conversion factors for compressive strength using different sizes and shapes of the steel-slag concrete were explored;
- The discrete element method is proposed to simulate the behavior of steel slag concrete. This result proves that the numerical model correctly through comparing experiments. On the other hand, The discrete element method is more advantageous than the other methods because it can describe the material's behavior after the appearance of a crack and when the failure has occurred entirely; Simultaneously, it can predict the axial tensile strength.
- The behavior of reinforced concrete beams using coarse steel slag aggregate is similar to traditional beams. The failure type of BTCTXT is flexure-shear.

6.2. Recommendations

- The discrete element model has been verified by simulating the behavior of steel slag concrete in the uniaxial tensile and compression test. This model should be applied to simulate the behavior of the structures using steel slag concrete as simulating for girder, column, frame node, foundation structure, etc. It is essential for designing, so further research and development are needed;
- This thesis is mainly focusing on experimental laboratories, further research about the experimental fields to provide a better understanding of using steel slag as coarse aggregate in the industries.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerckhoff, and William C. Panarese. *Design and Control of Concrete Mixtures*. Portland Cement Association, 2003.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] I. Netinger, M. J. Rukavina, and A. Mladenović, "Improvement of post-fire properties of concrete with steel slag aggregate," *Procedia Engineering*, vol. 62, p. 745-753, 2013.
- [6] 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.
- [7] T. Sofilić, A. Mladenović, 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.
- [8] 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.
- [9] V. Maruthachalam and M. Palanisamy, "High performance concrete with steel slag aggregate," p. 2014.
- [10] Tahir Sofilić, Ana Mladenović, 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.
- [11] 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.
- [12] Maruthachalam Verapathran and Palanisamy Murthi, "High performance concrete with steel slag aggregate," *Gradevinar*, vol. 66, p. 605-612, 2014.
- [13] H. Motz and J. Geiseler, "Products of steel slags an opportunity to save natural resources," *Waste management*, vol. 21, p. 285-293, 2001.
- [14] 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.
- [15] 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>
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Jigar P.Patel, "*Broader use of steel slag aggregates in concrete*". Masters of Science in Civil engineering, Cleveland State University, 2008, p.
- [19] Ioanna Papayianni and Eleftherios Anastasiou, "Utilization of Electric Arc Furnace Steel Slags in Concrete Products". *The 6th European Slag Conference*, Madrid, 2010, p.
- [20] I. Netinger, D. Bjegović, and G. Vrhovac, "Utilisation of steel slag as an aggregate in concrete," *Materials structures*, vol. 44, p. 1565-1575, 2011.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] A. A. Sharba, "The efficiency of steel slag and recycled concrete aggregate on the strength properties of concrete," *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 23, p. 4846-4851, 2019.
- [27] V. Ducman and A. Mladenović, "The potential use of steel slag in refractory concrete," *Materials Characterization*, vol. 62, p. 716-723, 2011.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] V. Maruthachalam and M. Palanisamy, "High performance concrete with steel slag aggregate," *GRAĐEVINAR*, vol. 66, p. 605-612, 2014.
- [31] S. Y. Lee, H. V. Le, and D. J. Kim, "Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress," *Construction and Building Materials*, vol. 220, p. 149-160, 2019.
- [32] P. A. Cundall, "A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movement in Blocky Rock System," *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, p. 1971.
- [33] 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.

- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] About: advice on the solution to recycling steel slag from Electric Arc Furnaces into construction materials, materials for road construction to limit resource exploitation and protect the environment, Document No.31/BXD-VLXD, date 07/6/2011.
- [37] 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.
- [38] T. V. Mien and T. N. P. Nhi, "Study on the properties of concrete using steel slag.," *Journal of Construction*, vol. 7, p. 125-128, 2014.
- [39] T. V. Mien. "Project: Research on Utilizing industrial waste slag from steel mills to produce pavement bricks for the development of environmentally friendly infrastructure". Faculty of Civil Engineering, Bach Khoa University, 2012.
- [40] N. V. Phuoc, L. T. D. Hanh, H. N. Minh *et al.*, "Recycle Electric Arc Furnace steel slag as a cement mineral additive," *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, vol. 2, p. 49-57, 2014.
- [41] N. T. Cuong, V. T. M. Y, and D. T. T. Huong, "Discrete Element Method – DEM and apply for numerical simulation in Soil Mechanics". *The ninth national Conference on Mechanics*, Hanoi, 2012, p.
- [42] T. V. Tieng, N. T. T. Hang, and P. D. Hung, "Using coupled fluid flow-The discrete element model for simulating of the behavior of

- unsaturated and saturated concrete," *Journal of Construction*, vol. 03/2016, p. 226-230, 2016.
- [43] 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.
- [44] Technical requirement of choosing the composition of normal concrete, Decision No.778/1998/QD-BXD, M. o. Construction, Hanoi, 1998.
- [45] "ACI 318-14, Building code requirements for structural concrete," p.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] T. V. Tieng and N. V. Binh, "Build a numerical model to simulate soil behavior by Discrete Element Method (DEM)," *Journal of Construction*, vol. 08/2017, p. 2017.
- [49] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-14, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.