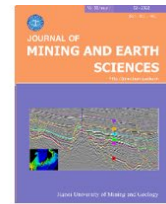




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



The applicability of steel slag for concrete lining in tunnels



Diep Tuan Tran ¹, Minh Tuan Tran ^{2,*}, Phong Duyen Nguyen ²

¹ Ho Chi Minh National Institute of Applied Mechanics and Informatics, Ho Chi Minh City, Vietnam

² Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15th Oct. 2021

Revised 23rd Jan. 2022

Accepted 09th Feb. 2022

Keywords:

Linings,
Precast concrete,
Self - Compacting Concrete (SCC),
Steel slag,
Tunnels.

ABSTRACT

Steel slag is a waste product of steel refineries. It is usually in the form of particles and fine particles, so it is easy to mix in concrete. It has also a high-density, easily sinks in the concrete mixture, and pass through the gaps between the steel bars. It is very good for application in Self - Compacting Concrete (SCC). This research shows that the obtained compressive strength of steel slag Self - Compacting Concrete are (29.3035.97) Mpa and (30.35÷37.37)Mpa with concrete M300 and M400 respectively. Elastic modulus of steel slag SCC M300 and M400 are 33.38 MPa and 38.58 MPa at the age of 28 days. The flexural tensile strength of samples of size B x H x L = 150 x 300 x 600 mm is 42.37 MPa and 46.9 MPa with the concrete M300 and M400 respectively. Received surface abrasion of samples contained from 0.34 and 0.30 g/cm³ with the steel slag SCC M300 and M400. The above values of steel slag SCC are equivalent or even higher than that of the conventional concrete. In addition, the workability of them is also higher than that of conventional concrete. Hence, steel slag SCC is completely applicable for concrete linings of underground constructions, especially those with long service life such as traffic tunnels, requiring with water and waterproof properties. It allows taking advantage of waste products, improving the environment in steel factory in Vietnam in general and of Ba Ria Vung Tau province in particular.

Copyright © 2022 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: tuanminhhumg@yahoo.com

DOI: 10.46326/JMES.2022.63(1).08



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Khả năng ứng dụng xỉ thép trong bê tông tự đầm cho kết cấu chống giữ công trình ngầm

Trần Tuấn Điệp¹, Trần Tuấn Minh^{2,*}, Nguyễn Duyên Phong²

¹ Viện Cơ học và tin học ứng dụng, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

² Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 15/10/2021

Sửa xong 23/01/2022

Chấp nhận đăng 09/02/2022

Từ khóa:

Bê tông đúc sẵn,

Bê tông tự đầm (SCC),

Đường hầm,

Vỏ chống,

Xỉ thép.

TÓM TẮT

Xỉ thép là sản phẩm phế thải ở các nhà máy luyện thép. Xỉ thép thường có dạng hạt, mịn nên dễ dàng trong quá trình trộn bê tông, có tỷ trọng lớn nên dễ chìm xuống dưới, đi qua các khoảng hở giữa cốt thép nên có khả năng rất tốt ứng dụng trong bê tông tự đầm (SCC). Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng độ bền nén của bê tông xỉ thép tự đầm thu được là $(29,30 \div 35,97)$ MPa và $(30,35 \div 37,37)$ MPa tương ứng với mác bê tông M300 và M400. Mô đun đàn hồi với bê tông xỉ thép tự đầm M300 và M400 là 33,38 MPa và 38,58 MPa ở tuổi 28 ngày. Độ bền kéo uốn của dầm bê tông xỉ thép tự đầm kích thước BxHxL = 150 x 300 x 600 mm là 42,37 MPa với mẫu M300 và 46,9 MPa mẫu M400. Độ mài mòn bề mặt mẫu 0,34 và 0,30 g/cm³ với mẫu bê tông xỉ thép có mác M300 và M400. Các giá trị trên đều tương đương và cao hơn với bê tông thông thường. Khả năng công tác của bê tông xỉ thép tự đầm cũng cao hơn bê tông thông thường. Do đó bê tông xỉ thép tự đầm hoàn toàn có khả năng ứng dụng cho kết cấu chống giữ các công trình ngầm, đặc biệt là các công trình ngầm có tuổi thọ lớn như các đường hầm giao thông, các công trình ngầm có yêu cầu cách nước, chống thấm để tận dụng các sản phẩm phế thải, cải thiện môi trường trong các nhà máy luyện thép tại Việt Nam nói chung và của tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu nói riêng.

© 2022 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Xỉ thép (Steel slag) là chất thải được sản sinh ra trong quá trình luyện thép từ các tạp chất khi đưa vào lò luyện thép. Trên thế giới, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng xỉ thép là chất thải không gây hại cho môi trường và được tái chế sử dụng cho

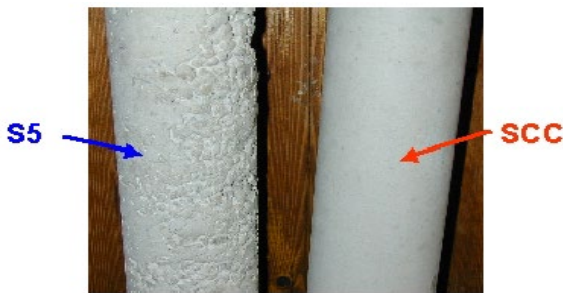
nhiều mục đích khác nhau. Hiện nay ở Việt Nam có hàng chục nhà máy luyện thép đang hoạt động và hàng chục nhà máy khác đang trong giai đoạn xây dựng hoặc lập dự án. Sản lượng thép hàng năm là khoảng hơn 10 triệu tấn và dự kiến lên khoảng 20 triệu tấn/năm. Lượng xỉ thải ra từ các nhà máy thông thường chiếm từ 10÷15% (Tô, 2012) khối lượng phôi thép ban đầu. Như vậy, có thể thấy rằng hàm lượng xỉ thép thải ra cũng chiếm một thị phần là rất lớn. Ở Việt Nam, xỉ thép vẫn được xem là chất thải rắn và cần phải được xử lý, thường là bằng cách chôn lấp.

*Tác giả liên hệ

E - mail: tuanminhhumg@yahoo.com

DOI: 10.46326/JMES.2022.63(1).08

Đây là một sự lãng phí rất lớn và gây nhiều nguy cơ về môi trường. Do đó, cần thiết phải có các nghiên cứu, tái chế xỉ thép thành nguồn nguyên vật liệu, góp phần giải quyết vấn đề môi trường và mang lại hiệu quả kinh tế cao. Okamura năm 1986 đã phát minh ra bê tông tự đầm trong quá trình nghiên cứu để tăng khả năng hoá lỏng của vữa bê tông. Theo nhóm tác giả, việc sử dụng bê tông tự đầm có các ưu điểm sau: cải thiện được độ bền và độ tin cậy, do đó chất lượng bê tông được tăng lên; không cần công tác đầm dùi, giảm được tiếng ồn, cải thiện được môi trường thi công; giảm thời gian thi công kết cấu nên tính kinh tế sẽ cao hơn; do vữa bê tông có tính linh động cao nên quá trình đổ vữa chống cố định kết cấu bê tông ít bị phân lớp, giảm tính co ngót, ít bị nứt nẻ sau khi đổ hơn so với bê tông thông thường; sử dụng bê tông tự đầm có tính linh động cao kết hợp với phụ gia hoá dẻo có khả năng tự thâm nhập vào các kẽ nứt khối đá xung quanh đường hầm và có khả năng tạo nên được vùng đất đá được gia cố rộng hơn bê tông thông thường, tăng bền cho khối đá và giảm tải cho vỏ chống cố định phía bên trong đường hầm. Bề mặt của kết cấu bê tông tự đầm nhẵn hơn vỏ chống thông thường (Hình 1).

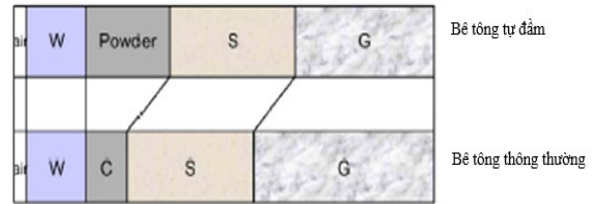


Hình 1. Bề mặt của bê tông truyền thống S5 và bê tông tự đầm SCC (Okamura & Ouchi, 2003).

Nói chung, bê tông tự đầm đã được phát triển theo ba hướng chủ yếu là: (1) bê tông tự đầm kiểu bột (thường là xi măng với bột đá) với lượng bột có trong 1 m³ vữa bê tông không quá 16% về thể tích; (2) bê tông tự đầm kiểu dẻo với việc sử dụng các chất phụ gia siêu dẻo tăng tính linh động của các hạt vữa trong hỗn hợp bê tông để đảm bảo dễ thi công, khối lượng phụ gia siêu dẻo trong loại bê tông này thường từ 300÷500 kg/m³; (3) bê tông tự đầm kết hợp của hai loại trên.

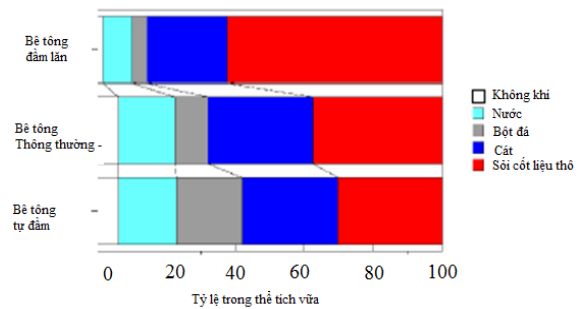
Vật liệu cho bê tông tự đầm theo thực tế thường sử dụng các loại xi măng hạt mịn, bột đá vôi, các phụ gia siêu dẻo. Xi măng thường dùng là

xi măng Puzolan giàu betonit hoặc các loại xi măng toả nhiệt. Các loại cốt liệu sử dụng thường là cát tự nhiên có kích thước 0÷4 mm với mô đun 2,80 và cuội sỏi có kích thước tự nhiên 4÷18 mm. Để tăng tính dẻo của bê tông tự đầm có thể sử dụng thêm polymer để tăng độ sụt của hỗn hợp vữa bê tông hoặc có thể sử dụng thêm tro bay, muối silic để tăng hoạt tính hoá dẻo và độ linh động của vữa bê tông. So sánh thành phần bê tông thường và bê tông tự đầm được mô tả như trong các Hình 2, 3.



Hình 2. So sánh thành phần hỗn hợp bê tông thường và bê tông tự đầm.

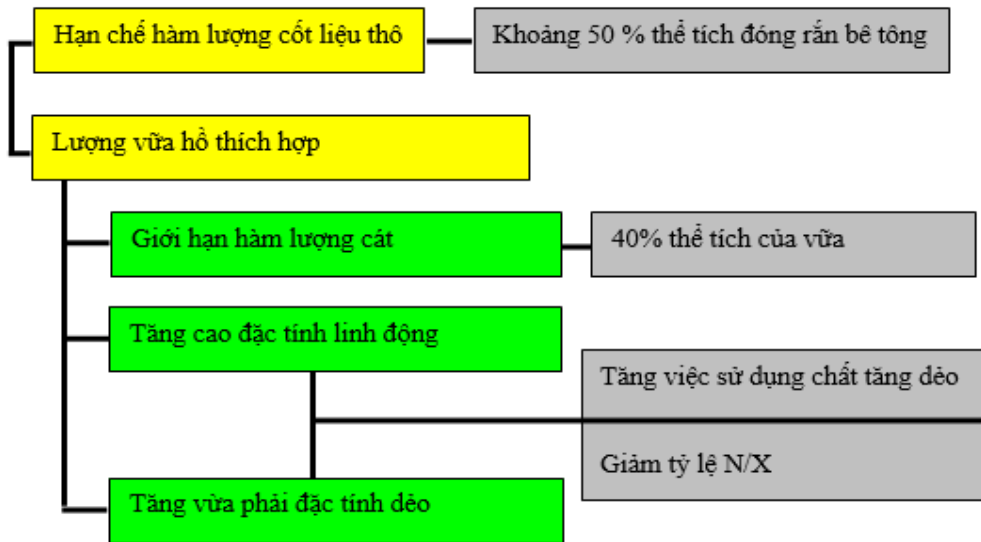
Air - không khí; W - nước; Powder - bột đá; C - cốt liệu thô; S - cát; G - cuội sỏi.



Hình 3. So sánh hỗn hợp trộn của bê tông tự đầm với các loại bê tông khác (Okamura & Ouchi, 2003).

Để chế tạo bê tông có khả năng tự đầm cao, theo nhóm nghiên cứu cần thực hiện theo sơ đồ như Hình 4 trên cơ sở hạn chế cốt liệu thô, tăng tính linh động của vữa bê tông.

Patel (2008) và Qasrawi (2018) đã công bố kết quả nghiên cứu các đặc tính hỗn hợp bê tông tự đầm với các tham số thiết kế cấp phối khác nhau. Các kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng thành phần cấp phối có thêm tro bay và tỷ lệ tối ưu cho cốt liệu lớn là đá 16 mm chiếm 60% khối lượng và đá 12,5 mm chiếm 40% khối lượng. Sugamata và nnk. (2003) đã công bố kết quả nghiên cứu các đặc tính hỗn hợp bê tông tự đầm với tham số độ lưu động vữa. Nghiên cứu với nội dung chính là thay đổi tỷ lệ cấp phối (7 cấp phối), từ đó đánh giá độ



Hình 4. Các phương pháp chế tạo bê tông có tính tự đầm cao.

lưu động của bê tông tự đầm thông qua chỉ số độ chảy xè của bê tông. Các tác giả Motz & Geiseler (2001) và Ozeki (1997) đã tiến hành nghiên cứu thiết kế thành phần cấp phối bê tông tự đầm ứng dụng cho các công trình dân dụng và công nghiệp. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, việc thay đổi thành phần cấp phối làm cho độ lưu hóa của bê tông thay đổi. Một cách tương đối độ chảy xè của bê tông có ảnh hưởng đến cường độ bê tông, độ chảy xè càng lớn thì cường độ bê tông có xu hướng giảm lại. Từ kết quả trên có thể sơ bộ chọn các hạng mục thi công phù hợp độ lưu động tương ứng. Tuy nhiên, qua tìm hiểu thấy rằng cũng rất ít các nghiên cứu trên thế giới về đánh giá khả năng ứng dụng xỉ thép vào chế tạo bê tông tự đầm chống giữ công trình ngầm để tận dụng nguồn xỉ thép phế thải ở các nhà máy cán thép.

Đã có nghiên cứu về bê tông xỉ thép ở Việt Nam. Nguyễn Văn Chánh năm 2009 đã tiến hành nghiên cứu cường độ chịu nén của bê tông xỉ thép thay thế hoàn toàn đá dăm và tăng xỉ thép lên 10%, 15%, 20%, 25%, 30% (Nguyễn, 2009). Tô Nữ Phương Nhi năm 2012 đã nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến độ bền của hỗn hợp bê tông xỉ thép ứng dụng trong xây dựng, cụ thể là làm bê tông trong xây dựng công trình đường giao thông (Tô, 2012). Nhóm tác giả đã nghiên cứu ảnh hưởng của xỉ thép đến các thông số sau: độ lưu động của hỗn hợp bê tông; khối lượng thể tích và độ hút nước của bê tông; sự phát triển của cường độ của bê tông; mô đun đàn hồi của bê tông; cường độ chịu kéo của bê tông;

tính thấm của bê tông; độ mài mòn của bê tông. Kết quả nghiên cứu cho thấy có thể sử dụng xỉ thép làm cốt liệu để chế tạo bê tông có cường độ 30 MPa, 40 MPa làm kết cấu mặt đường giao thông. Các tác giả Nguyễn (2010) và Mien (2014) cũng đã nghiên cứu tái chế xỉ lò từ nhà máy luyện thép để sử dụng làm vật liệu cho các lớp móng đường giao thông.

Thời gian gần đây, các nghiên cứu của Hoàng Phương Hoa và Nguyễn Thanh Lập năm 2011 đã tiến hành các nghiên cứu kỹ hơn về những tính chất cơ lý của SCC, áp dụng bảo đảm độ tin cậy và nâng cao hiệu quả kinh tế khi sử dụng bê tông tự đầm. Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả có liên quan mật thiết đến vấn đề về tiềm năng để sản xuất SCC sử dụng cốt liệu tại địa phương và các điều kiện môi trường trong khu vực. Cốt liệu có sẵn tại địa phương như các loại đá có nguồn gốc macma phun trào và thâm nhập. Cát được khai thác từ các sông có đặc điểm lẫn nhiều bùn sét. Khí hậu của vùng được đặc trưng bởi nhiệt độ và độ ẩm cao, ảnh hưởng của môi trường mặn,... (Hoàng & Nguyễn, 2011). Cũng liên quan đến các nghiên cứu về bê tông tự đầm, tác giả Hoàng (2008) đã nghiên cứu hoàn thiện công nghệ và thi công bê tông tự lèn trong xây dựng công trình thủy lợi. Tác giả Trương (2012) cũng đã tiến hành nghiên cứu công nghệ thi công bê tông cường độ cao theo phương pháp tự chèn cho các công trình thủy lợi - thủy điện. Nghiên cứu của Vũ (2011) cũng đã tiến hành nghiên cứu tính chất của bê tông tự lèn cát nghiền và đặc tính cơ lý của ván khuôn.

Một nhóm nghiên cứu khác gồm (Trần, 2011; Lương, 2012; Cao, 2012) đã tiến hành nghiên cứu sử dụng xỉ thép làm phụ gia khoáng và tận dụng xỉ thép để thay thế vật liệu tự nhiên trong chế tạo bê tông tự đầm đồng thời phối hợp với hỗn hợp phụ gia khoáng xỉ lò cao - tro trấu và phụ gia siêu dẻo để chế tạo bê tông tự đầm, cường độ cao. Tuy nhiên, qua tìm hiểu thấy rằng cho đến nay chưa có một công trình nghiên cứu nào đề cập đến vấn đề ứng dụng xỉ thép trong chế tạo bê tông tự đầm trong chống giữ công trình ngầm ở Việt Nam. Các nghiên cứu về công nghệ thi công công trình ngầm có thể kể đến như (Nguyễn, 1997; 1998; 2012).

Khác với khi sử dụng trong các công trình trên bề mặt, bê tông dùng trong vỏ chống các công trình ngầm nằm bên dưới mặt đất, ngoài việc phải đảm bảo khả năng chịu tải cao còn phải chịu các tác dụng của môi trường nước ngầm, tính ăn mòn, môi trường vi khí hậu xung quanh vỏ chống. Điều kiện thi công vỏ chống chật hẹp, điều kiện bảo dưỡng cũng khác với trên bề mặt. Tại Việt Nam ngày nay, công nghệ vật liệu tiên bộ, bê tông cường độ cao, bê tông tự cảm ứng, bê tông thông minh,... đã được áp dụng trong xây dựng dân dụng và công nghiệp. Tuy nhiên, việc tìm kiếm giải pháp cải thiện tính chất bê tông công trình ngầm, tìm kiếm vật liệu mới, giảm tác động của phế phẩm công nghiệp, nông nghiệp đến môi trường đặc biệt là sản phẩm xỉ thép ở các nhà máy cán thép thì còn rất hạn chế. Điều này đòi hỏi trong thực tế lĩnh vực xây dựng công trình ngầm cần thiết phải có các nghiên cứu, thử nghiệm ứng dụng loại vật liệu này để chế tạo các kết cấu chống giữ công trình ngầm nhằm tận dụng xỉ thép thải ra từ các nhà máy, tránh tác động xấu đến môi trường và tăng được khả năng chịu lực của kết cấu công trình ngầm.

2. Chỉ tiêu cơ lý và thí nghiệm vật liệu bê tông xỉ thép tự đầm

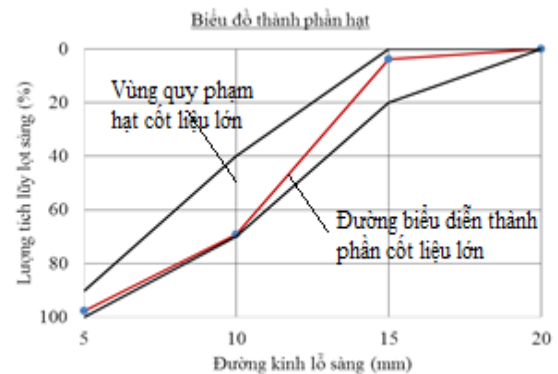
2.1. Xỉ thép

Xỉ thép dùng làm cốt liệu cho bê tông xi măng, bê tông nhựa và làm cấp phối thi công các công trình. Trong phạm vi bài báo này, các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép được nghiên cứu phục vụ cho mục đích làm cốt liệu cấp phối cho bê tông xi măng cho công trình ngầm. Thành phần hạt sử dụng trong nghiên cứu đảm bảo đáp ứng theo tiêu chuẩn TCVN 7572

- 06. Mẫu xỉ thép sau khi được lấy từ bãi chứa về được sấy khô đến khối lượng không đổi và để nguội đến nhiệt độ phòng thí nghiệm. Sau đó mẫu được lấy đến khối lượng cần thiết theo phương pháp chia tư. Khối lượng mẫu thí nghiệm phụ thuộc vào đường kính lớn nhất danh nghĩa D_{max} của mẫu. Đối với mẫu xỉ thép, chọn khối lượng mẫu thí nghiệm tối thiểu là 10 kg. Khối lượng riêng, khối lượng thể tích của xỉ thép được lấy phù hợp với tiêu chuẩn áp dụng trong nghiên cứu (TCVN 7572 - 4:2006). Kết quả xác định thành phần hạt cốt liệu lớn được mô tả trong Bảng 1 và Hình 5.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm thành phần hạt cốt liệu lớn.

Kích thước lỗ sàng, (mm)	Khối lượng tích lũy trên sàng, (g)	Phần trăm khối lượng tích lũy trên sàng, (%)	Phần trăm khối lượng lọt sàng tích lũy, (%)
20,0	0	0,00	100,00
15,0	210	3,85	96,15
10,0	3184	58,57	41,43
5	5308	97,64	2,36
<5	5436	100,00	0,00



Hình 5. Lượng tích lũy lọt sàng hạt xỉ thép.

Tổng hợp các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu lớn để chế tạo bê tông xỉ thép thông thường và bê tông xỉ thép tự đầm được tổng hợp như trong Bảng 2.

2.2. Cát

Cát dùng chế tạo bê tông xỉ thép tự đầm là cát sạch, rỗng và có độ bền cao, hàm lượng bụi, bùn sét, chất hữu cơ và các hợp chất khác không vượt quá giới hạn cho phép.

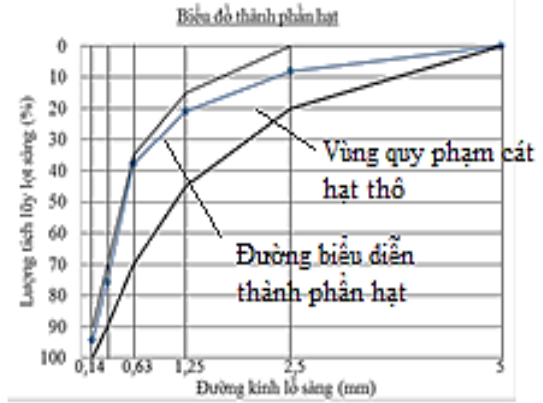
Trong nghiên cứu này đã sử dụng cát Tân Châu (Long Xuyên) với các tính chất vật lý của cát được thí nghiệm theo TCVN 7572 - 2:2006 đến TCVN7572 - 8:2006. Kết quả thí nghiệm với cát Tân Châu được liệt kê như trong Bảng 3, lượng tích lũy lọt sàng cát như Hình 6.

2.3. Xi măng

Xi măng dùng trong nghiên cứu được sử dụng là xi măng Holcim PC40 với các chỉ tiêu cơ lý được mô tả như trong Bảng 4.

Các chỉ tiêu cơ lý xi măng phù hợp với TCVN 6260 - 1997 xi măng poclăng hỗn hợp. Yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 141:2008.

2.4. Tro bay



Hình 6. Lượng tích lũy lọt sàng cát Tân Châu.

Tro bay sử dụng trong nghiên cứu là tro bay Phả Lại, loại F, có hàm lượng CaO<5%, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật được mô tả trong Bảng 5.

Bảng 2. Tổng hợp chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu lớn.

TT	Chỉ tiêu cơ lý	Đơn vị	Kết quả	Tiêu chuẩn áp dụng
1	Thành phần hạt	-	-	TCVN 7572-2006
2	Khối lượng riêng	g/cm ³	3,53	TCVN 7572-4:2006
3	Khối lượng thể tích khô	g/cm ³	3,37	TCVN 7572-4:2006
4	Khối lượng thể tích bão hòa nước	g/cm ³	3,41	TCVN 7572-4:2006
5	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1858	TCVN 7572-6:2006
6	Các chỉ tiêu hóa học			
	- Hàm lượng SiO ₂	%	13-19	ISO 2598-1:2007
	- Hàm lượng Al ₂ O ₃	%	6÷9	ISO 11535:2007
	- Hàm lượng FexOy	%	34÷39	ISO 11535:2007
	- Hàm lượng CaO	%	22÷29	ISO 11535:2007
	- Hàm lượng MgO	%	4÷13	ISO 11535:2007
7	Cường độ và hệ số hóa mềm			
	- Độ nén đập	%	9,17	TCVN 7572-11:2006
	- Hệ số hóa mềm	%	0,99	TCVN 7572-11:2006
	- Cường độ	MPa	133,33	TCVN 7572-11:2006
8	Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	0,00	TCVN 7572-13:2006
9	Độ hao mòn Los Angeles	%	21,66	TCVN 7572-12:2006
10	Hàm lượng bụi bẩn	%	0,05	TCVN 7572-8:2006

Bảng 3. Tính chất vật lý của cát Tân Châu.

Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thí nghiệm	Kết quả
Hàm lượng bùn, bụi, sét	TCVN 7572 - 8: 2006	0,68 %
Khối lượng thể tích xốp	TCVN 7572 - 6: 2006	1,472 g/cm ³
Khối lượng riêng	TCVN 7572 - 4: 2006	2,639 g/cm ³
Mô đun độ lớn	TCVN 7572 - 2: 2006	2,29
Độ hút nước	TCVN 7572 - 4: 2006	2,95
Thành phần hạt	TCVN 7572 - 2: 2006	Xem biểu đồ

2.5. Bột đá vôi CaCO_3

Một thành phần nữa cũng được sử dụng trong quá trình chế tạo bê tông xi thép trong nghiên cứu là bột đá vôi CaCO_3 để tăng khả năng linh động và độ bền của bê tông xi thép. Các tính chất và yêu cầu của bột đá vôi CaCO_3 được mô tả trong Bảng 6.

3. Thiết kế cấp phối bê tông xi thép

3.1. Thiết kế bê tông M300 và M400 thông thường

Các phương pháp thiết kế thành phần bê tông được sử dụng rộng rãi hiện nay là: phương pháp đo E của Ban môi trường Anh (The British

Department of the Environment); Viện bê tông Mỹ (The American Concrete Institute), phương pháp của Hội đồng bê tông Pooclăng (The New Zealand Portland Concrete Association); phương pháp Bôlômay - Ckramkaep (Nga). Các phương pháp trên đều là lý thuyết kết hợp với “thực nghiệm” dựa trên cơ sở lý thuyết “thể tích tuyệt đối”, có nghĩa là tổng thể tích tuyệt đối của vật liệu trong 1 m^3 bê tông thì bằng 1000 lít. Chúng chỉ khác nhau ở chỗ lựa chọn thành phần và tỷ lệ các cấp phối hạt cốt liệu. Trong khuôn khổ nghiên cứu này nhóm tác giả lựa chọn phương pháp Bôlômay - Ckramkaep (Liên Bang Nga.), kết quả tính toán được mô tả như trong Bảng 7.

Bảng 4. Chỉ tiêu cơ lý xi măng.

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả	Phương pháp
1	Khối lượng riêng	g/cm^3	3,1	TCVN 4030:2003
2	Khối lượng thể tích	g/cm^3	1,07	TCVN 4030:2003
3	Lượng nước tiêu chuẩn	%	30,6	TCVN 6017:1995
4	Độ mịn (Còn lại trên sàng 0.08 mm)	%	1,02	TCVN 4030:2003
5	Thời gian bắt đầu đông kết	phút	121	TCVN 6017:1995
	Thời gian kết thúc đông kết	phút	179	
6	Cường độ nén mẫu thử			TCVN 6016:1995
	3 ngày	N/mm^2	27,3	
	28 ngày	N/mm^2	48,5	
7	Cường uốn mẫu thử			TCVN 6016:1995
	3 ngày	N/mm^2	6,51	
	28 ngày	N/mm^2	9,86	

Bảng 5. Chỉ tiêu yêu cầu của tro bay.

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Phương pháp thử
1	Chỉ số hoạt tính cường độ, phần trăm so với mẫu đối xứng	%		ASTM C311
	7 ngày	%	88,80	ASTM C109
	28 ngày	%	91,10	
2	Lượng nước yêu cầu,	%	95,00	ASTM C311
3	Độ nở trong Autoclave	%	0,06	ACTM C151
4	Độ mịn trên sàng 45 μm	%	28,00	Máy LS particle Size Analyzer
5	MKN (LOI)	%	3,44	ASTM C311
	Ấm (Moisture)	%	0,01	
6	SiO_2	%	57,34	TCVN 7131:2002
	Fe_2O_3	%	5,43	
	Al_2O_3	%	25,49	
	CaO	%	2,17	
7	SO_3	%	0,11	TCVN 6882:2001
	Hàm lượng kiềm thải sau 28 ngày	%		
	K_2O	%	0,40	
	Na_2O	%	0,02	Phương pháp thử

Bảng 6. Chỉ tiêu yêu cầu của bột đá vôi CaCO_3 .

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Phương pháp thử
Độ sáng	%	93	Minolta Testing Machine
Độ trắng	%	96	Minolta Testing Machine
D50	μm	$2,7 \pm 0,3$	Mastersizer Testing Machine
D97	μm	$17 \pm 0,2$	Mastersizer Testing Machine
Độ hấp thụ dầu	g/100g	23	Phân tích hóa học
Hàm lượng CaCO_3	%	≥ 98	TCXD VN 312:2004
Hàm lượng MgO	%	$\leq 0,4$	TCXD VN 312:2005
Hàm lượng Al_2O_3	%	$\leq 0,1$	TCXD VN 312:2006
Hàm lượng Fe_2O_3	%	$< 0,02$	TCXD VN 312:2007
Hàm lượng SiO_2	%	$\leq 0,1$	TCXD VN 312:2008
Trọng lượng riêng	g/cm ³	2,7	
Độ cứng	Moh	3	

Bảng 7. Kết quả tính toán thành phần cấp phối của bê tông xi thép thông thường.

Thành phần cấp phối bê tông	Thành phần vật liệu cho bê tông (1 m ³)				
	X (kg)	C (kg)	XT (kg)	N (kg)	PG (lít)
Độ ẩm thiết kế $W = 0\%$. Mark 50 MPa	500	630	1080	192	6
Hiệu chỉnh độ ẩm của $W_d = 0,31\%$ và $W_c = 6,35\%$. Mark 30 MPa	500	660	1105	170	6

3.2. Thiết kế cấp phối bê tông xi thép tự đầm M300 và M400

Bằng các tính toán tương tự có thể thu được thành phần cấp phối bê tông xi thép tự đầm như trong Bảng 8.

3.3. Chuẩn bị vật liệu chế tạo bê tông

Vật liệu chế tạo bê tông được chuẩn bị kỹ càng trước khi trộn. Cát, xi thép được kiểm tra độ ẩm trước khi trộn nhằm khống chế lượng nước trong quá trình chế tạo bê tông xi thép. Khối lượng vật liệu được tính toán cho 1 mẻ trộn bê tông dựa trên thành phần cấp phối đã được thiết kế từ trước. Quá trình cân và trộn xi thép cũng như cát và tro bay trong quá trình chế tạo bê tông tự đầm được mô tả trên các Hình 7÷10.

3.4. Xác định khả năng tự đầm

Để đánh giá khả năng tự đầm của bê tông sử dụng khuôn hình chữ U (U - Channel box) dựa trên thiết kế của người Nhật. Khuôn gồm 2 hộp chữ nhật nối vào nhau thành hình U, được phân cách bởi cửa chắn có thể rút ra được để cho hỗn hợp bê tông tự đầm chảy từ hộp nọ sang hộp kia qua cửa có các thanh cốt thép đặt ngay trước cửa.

Quá trình thí nghiệm được tiến hành như sau: ban đầu sử dụng giẻ ẩm lau sạch mặt bên trong

của khuôn hộp hình U. Sau đó để khuôn thử (U - Channel box) trên nền phẳng và tiến hành kiểm tra để đảm bảo cửa chắn dễ dàng mở. Bước tiếp theo là đổ đầy hỗn hợp bê tông tự đầm vào một bên hộp của khuôn, để khoảng 1 phút cho hỗn hợp tự dàn phẳng (Hình 11).

Tiến hành nhắc cửa chắn để hỗn hợp bê tông tự đầm chảy tự do qua khe các thanh cốt thép vào phần khuôn hộp bên cạnh. Khi hỗn hợp bê tông ngừng chảy, đo chiều cao của hỗn hợp bê tông chảy sang. Hỗn hợp bê tông tự đầm đạt yêu cầu về khả năng tự đầm khi: chiều cao điền đầy lớn hơn 32 cm. Kết quả thí nghiệm khả năng tự đầm bằng khuôn hình U chỉ ra chiều cao của hỗn hợp bê tông tự đầm chảy sang là 34 cm, chênh cao mặt bê tông tự đầm của hai phần khuôn là 1,5 cm.

3.5. Đúc mẫu và bảo dưỡng

Công tác chuẩn bị khuôn và đúc mẫu được thực hiện với các khuôn mẫu hình trụ với kích thước (150x300) mm cho thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi, cường độ chịu nén (Hình 12). Khuôn mẫu dầm với kích thước (150x150x600) mm sử dụng cho thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông (Hình 13). Thí nghiệm xác định độ mài mòn của bê tông trong phòng thí nghiệm sử dụng mẫu lập phương. Việc bảo dưỡng mẫu được thực hiện tương tự như bê tông thông



Hình 7. Xỉ thép trộn trong bê tông.



Hình 8. Cát trộn bê tông xỉ thép tự đầm.



Hình 9. Bột đá vôi và tro bay trộn bê tông.



Hình 10. Kết quả kiểm tra độ chảy xòe.



Hình 11. Đổ đầy hỗn hợp bê tông tự đầm xỉ thép vào một bên hộp.



Hình 12. Chuẩn bị khuôn mẫu hình trụ.



thường, sau khi mẫu đổ được tháo khuôn thì các mẫu được tiến hành ngâm trong nước tại bể bảo dưỡng của phòng thí nghiệm Công ty Cổ phần Viện cơ học ứng dụng.

4. Thí nghiệm kiểm tra các đặc tính cơ học của bê tông xỉ thép tự đầm

Để tính toán và kiểm tra cường độ chịu nén của bê tông tự đầm, trong nghiên cứu đã sử dụng tiêu chuẩn thí nghiệm TCVN3118 - 1993 về xác định độ bền của mẫu bê tông. Phương pháp này dùng để xác định cường độ nén mẫu bê tông hình trụ theo các tiêu chuẩn Mỹ (ASTM C192, ASTM C 617, ASTM C39). Công tác thí nghiệm kiểm tra cường độ của bê tông xỉ thép tự đầm được thực hiện tại phòng thí nghiệm Kiểm định tại Công ty cổ phần Viện cơ học ứng dụng, giấy chứng nhận

phòng thí nghiệm 1194 /GCN - BXD mã số phòng thí nghiệm: LAS - XD 1857.

4.1. Công tác nén mẫu đo độ bền nén

Quá trình nén ép từng mẫu được thực hiện trên máy ép thủy lực Controls của Ý. Vận hành máy cho mặt trên của mẫu nhẹ nhàng tiếp cận với thớt trên của máy. Tiếp đó tăng tải liên tục với vận tốc không đổi và bằng $6 \pm 4 \text{ daN/cm}^2/\text{s}$ cho tới khi mẫu bị phá hoại. Không được điều chỉnh tốc độ trong thời gian mẫu đang biến hình nhanh ngay trước khi vỡ. Dùng tốc độ gia tải nhỏ đối với các mẫu bê tông có cường độ thấp, tốc độ gia tải lớn đối với các mẫu bê tông cường độ cao. Ghi lại lực khi mẫu bị phá hoại và ghi lại cả dạng phá hoại mẫu. Hình ảnh mẫu bị phá huỷ được mô tả như Hình 14.

Bảng 8. Kết quả tính toán thành phần cấp phối của bê tông xi thép tự đầm.

Vật liệu	Xi măng (kg)	Xi Thép (kg)	Cát (kg)	Bột tro bay (kg)	Bột đá vôi (kg)	Phụ gia (%)	Nước (lít)
M400	470	1033	825	53	117	1,20%	170
M300	415	1065	832	53	117	1,2%	170



Hình 13. Đúc mẫu với khuôn mẫu tạo đầm.



Hình 14. Nén mẫu trong phòng thí nghiệm.

4.2. Đánh giá cường độ chịu nén

Sau khi làm các thí nghiệm xác định độ bền mẫu, thu được bảng tổng hợp các kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén như trong Bảng 9.

Quan sát kết quả trên Bảng 9 thấy rằng, bê tông xi thép tự đầm có cường độ đảm bảo và hoàn toàn đáp ứng được các công trình ngầm, công trình thủy công cấp thông thường (Mức trên M250 có $R_n > 15$ MPa) (TCVN 5574 - 2012).

4.3. Xác định mô đun đàn hồi

Mô đun đàn hồi của mẫu bê tông xi thép tự đầm được xác định dựa theo tiêu chuẩn TCVN 5276: 1993 quy định phương pháp thử cường độ lăng trụ, mô đun đàn hồi khi nén tĩnh của bê tông nặng.

Sử dụng máy nén thủy lực Controls và biến dạng kế để xác định cường độ chịu nén của bê tông theo TCVN 3118: 1993. Sơ đồ máy nén và bộ gá xác định mô đun đàn hồi được mô tả trong Hình 15.

Chọn các thang lực thích hợp của máy để khi nén giá trị tải lớn nhất dự kiến sẽ sử dụng nằm trong khoảng 20÷80% tải trọng tối đa của thang lực.

Xác định cường độ lăng trụ (RLT). Bằng cách dùng 3 viên mẫu, đo kích thước tiết diện chịu nén và gia tải phá hoại từng mẫu như thử cường độ chịu nén của bê tông theo TCVN 3118: 1993 (Đã xác định trong mục 4.2).

Để xác định mô đun đàn hồi (E_0) tiến hành đặt từng mẫu vào trong máy nén. Đặt tải tạo ứng suất ban đầu bằng khoảng 0,5 daN/cm² lên mẫu. Ghi lại

giá trị đồng hồ đo ở cả 4 mặt đứng của viên mẫu. Tăng tải lên mẫu với tốc độ 6 ± 4 daN/cm²/s cho tới khi đạt ứng suất thử bằng khoảng 1/3 giá trị cường độ lăng trụ xác định ở mục xác định ở mục 4.2. Giữ tải ở ứng suất này 60 giây và đọc giá trị đồng hồ đo ở cả 4 mặt trong khoảng 30 giây nữa. Mô đun đàn hồi khi nén tĩnh của bê tông được xác định từ các giá trị của các mẫu theo TCVN 3118: 1993. Sau khi thí nghiệm và tính toán thu được tổng hợp kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi như Bảng 10.

So sánh mô đun đàn hồi của bê tông xi thép thường và bê tông xi thép tự đầm (Bảng 10) thấy rằng, mô đun đàn hồi bê tông xi thép tự đầm và bê tông nặng thông thường B30-B45 ($E_b = 32,5 \times 10^3 \div 37,5 \times 10^3$ MPa) (TCVN 5574-2012) là xấp xỉ nhau. Do đó, tính đàn hồi bê tông xi thép tự đầm hoàn toàn đáp ứng được cho các vỏ chống các công trình ngầm thông thường.

4.4. Đánh giá cường độ chịu kéo uốn

Để xác định độ bền chịu uốn của bê tông xi thép tự đầm, sử dụng máy thử uốn Controls tại phòng thí nghiệm. Sơ đồ đặt đầm và thiết bị đo cường độ kéo uốn được mô tả như trong Hình 16.

Chuẩn bị mẫu thử uốn theo nhóm mẫu. Mỗi nhóm mẫu gồm 3 đầm. Khi sử dụng các đầm bê tông cắt từ kết cấu nếu không có đủ 3 đầm thì được phép lấy 2 đầm làm một nhóm mẫu thử.

Việc lấy mẫu hỗn hợp bê tông, đúc, bảo dưỡng khoan cắt bê tông và chọn kích thước thanh đầm để làm mẫu thử phải được tiến hành theo TCVN 3105: 1993.

Bảng 9. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén.

Loại bê tông	Tuổi (ngày)	Mẫu	Kích thước		Lực nén max (kN)	Cường độ (MPa)	Kết quả (MPa)
			D (mm)	H (mm)			
Bê tông M300	7	M1	150	300	514	29,09	29,30
		M2			516	29,20	
		M3			523	29,60	
	14	M1	150	300	603	34,12	34,18
		M2			608	34,41	
		M3			601	34,01	
	28	M1	150	300	632	35,76	35,97
		M2			636	35,99	
		M3			639	36,16	
Bê tông M400	7	M1	150	300	538	30,44	30,35
		M2			532	30,11	
		M3			539	30,50	
	14	M1	150	300	602	34,07	34,22
		M2			609	34,46	
		M3			603	34,12	
	28	M1	150	300	654	37,01	37,37
		M2			668	37,80	
		M3			659	37,29	



Hình 15. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi.



Hình 16. Máy uốn dầm của hãng Controls.

Bảng 10. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi.

Loại bê tông	Ngày tuổi (Ngày)	Mẫu	Kích thước		Mô đun $\times 10^3$ (MPa)	Kết quả $\times 10^3$ (MPa)
			B (mm)	H (mm)		
Bê tông M300	28	M1	150	300	33,52	33,38
		M2			33,37	
		M3			33,24	
Bê tông M400	28	M1	150	300	38,48	38,58
		M2			38,76	
		M3			38,50	

Tiêu chuẩn để xác định cường độ chịu uốn của bê tông là viên mẫu dầm kích thước 150 x 150 x 600 mm. Các viên mẫu kích thước khác kích thước viên chuẩn sau khi thử uốn phải được tính đổi kết quả thử về cường độ kéo khi uốn của viên chuẩn.

Đo các kích thước tiết diện chịu uốn của mẫu chính xác tới 1 mm. Kích thước mỗi chiều của tiết diện được tính bằng trung bình số học của hai

đường trung bình trên hai mặt đối diện tạo ra chiều dõ. Chọn thang lực uốn thích hợp để khi thử, tải trọng phá hoại nằm trong khoảng 20÷80% tải trọng cực đại của máy.

Đối với mẫu thử uốn, đặt mẫu lên máy uốn sao cho hướng tác dụng của lực song song với mặt

hở của viên dầm bê tông khi đổ. Sai lệch vị trí đặt lực các khoảng cách giữa hai gối tựa và hai gối truyền tải không được vượt quá 0,5 mm. Trục dọc của dầm thép ngang, dầm thép phụ phải cùng nằm trên một mặt phẳng.

Giữa các gối truyền lực và mặt trên của mẫu cho phép đặt các tấm đệm bằng gỗ dán 3 lớp dày 4 ± 1 mm, rộng 15 ± 2 mm, dài bằng chiều rộng mẫu thử để lực tác dụng được truyền đều lên mẫu thử. Uốn mẫu bằng cách tăng tải liên tục lên mẫu với tốc độ không đổi và bằng $0,6 \pm 0,4$ daN/cm²/s cho tới khi gãy mẫu. Lực tối đa đạt được khi thử uốn là tải trọng uốn gãy mẫu. Hình ảnh quá trình thí nghiệm và mẫu dầm bị gãy được mô tả như Hình 17. Tập hợp kết quả cường độ chịu uốn của mẫu dầm bê tông xi thép tự đầm được mô tả trong Bảng 11, bê tông xi thép thông thường Bảng 12.

Quan sát kết quả thấy rằng cường độ bê tông chịu uốn của bê tông tự đầm xi thép tương đương (thậm chí còn cao hơn) với cường độ bê tông xi thép thông thường ở cùng cường độ thiết kế. Vì vậy, hoàn toàn có khả năng sử dụng được trong các công trình ngầm thông thường.

4.5. Đánh giá khả năng chịu mài mòn

Để đánh giá khả năng chịu mài mòn của bê tông xi thép tự đầm sử dụng máy mài kiểu BKM - 2, BKM - 3 hoặc Beme. Cân mẫu thử chính xác tới 0,1 g. Trên các mặt mẫu sẽ mài, tiến hành đo các

cặp cạnh song song từng đôi của mẫu lập phương hoặc hai đường kính vuông góc nhau của mẫu trụ rồi tính diện tích mặt mẫu bị mài. Trên vành mài trải đều 20 g cát mài khô rồi đặt mẫu vào khuôn sao cho mẫu có thể chuyển động được tự do theo phương thẳng đứng. Tiếp đó, đè gối tựa của đòn bẩy lên tâm viên mẫu và dùng các quả cân gia tải mẫu cho đủ áp lực 0,6 daN/cm². Sau 30 m đường mài (ứng với 28 vòng quay máy BKM hoặc 22 vòng quay máy Beme) máy tự động dừng lại. Quét bỏ phần cát mài cũ, trải đều trên vành mài 20 g cát mài mới và lại bật máy cho đĩa quay, làm như vậy 5 lần thì đủ một chu kỳ với tổng số 150 m đường mài. Sau một chu kỳ, nhắc mẫu ra, xoay mẫu đi 90° quanh trục thẳng đứng rồi lại mài mẫu với chu kỳ 150 m đường mài mới. Tiến hành như vậy, đủ 4 chu kỳ (600 m đường mài). Cứ sau mỗi chu kỳ xoay mẫu đi 90° cùng chiều với lần trước. Sau đó nhắc mẫu ra, lau sạch rồi đem cân chính xác tới 0,1 g. Hình ảnh mẫu bê tông xi thép sau khi bị mài mòn và quá trình cân lại mẫu bê tông sau khi làm thí nghiệm xác định độ mài mòn được mô tả như trong các Hình 18 và 19. So sánh kết quả thí nghiệm độ mài mòn được mô tả trong Bảng 13.

Kết quả xác định độ mài mòn cho thấy, bê tông xi thép tự đầm có độ chống mài mòn tương đương và cao hơn bê tông thông thường nên có thể sử dụng cho các công trình ngầm thông thường.

Bảng 11. Tổng hợp kết quả cường độ chịu kéo uốn của mẫu dầm bê tông xi thép tự đầm.

Mác bê tông	Tuổi (Ngày)	Mẫu	Kích thước (mm)			Lực nén (kN)	Cường độ (daN/cm ²)	Kết quả (daN/cm ²)
			B	H	L			
M300	28	M1	150	300	600	30,23	40,3	42,37
		M2				34,12	45,5	
		M3				30,98	41,3	
M400	28	M1	150	300	600	34,64	46,2	46,9

Bảng 12. Kết quả cường độ chịu kéo uốn bê tông xi thép thông thường.

Bê tông	Mẫu	Kích thước, mm			Diện tích mài (cm ²)	Khối lượng ban đầu (g)	Khối lượng sau mài (g)	Độ mài mòn bề mặt (g/cm ²)	
		B	H	L					
Bê tông M300	M1	70,6	70,4	70,4	49,70	924	907	0,35	0,34
	M2	70,4	70,3	70,0	49,49	909	889	0,34	
	M3	70,3	70,4	70,2	49,49	928	906	0,33	
Bê tông M400	M1	70,4	70,1	70,5	49,35	924	907	0,29	0,30
	M2	70,5	70,0	70,1	49,35	909	889	0,29	
	M3	70,4	70,0	70,4	49,28	928	906	0,31	



Hình 17. Dầm bê tông xi thép bị gãy.



Hình 18. Ảnh mẫu sau khi mài mòn.



Hình 19. Cân lại mẫu sau khi mài mòn.

Bảng 13. So sánh kết quả độ mài mòn của mẫu bê tông xi thép tự đầm và bê tông đá dăm.

Loại	Mẫu	Kích thước			Diện tích mài (cm ²)	Khối lượng ban đầu (g)	Khối lượng sau mài (g)	Độ mài mòn bề mặt (g/cm ²)
		B (mm)	H (mm)	L (mm)				
Bê tông xi thép	M5-1	70,6	70,5	70,7	49,91	924	907	0,34
	M5-2	70,9	70,6	70,3	49,84	909	889	0,40
	M5-3	70,7	70,7	70,4	49,77	928	906	0,44
Bê tông đá dăm	M7-1	70,4	70,6	70,3	49,49	831	810	0,42
	M7-2	70,4	70,5	70,5	49,63	831	807	0,48
	M7-3	70,5	70,8	70,1	49,42	826	802	0,49

5. Kết luận

Qua các nghiên cứu ở trên có thể thấy rằng, bê tông xi thép tự đầm hoàn toàn có thể đáp ứng cường độ phục vụ cho kết cấu chống giữ công trình ngầm. Với thành phần bê tông xi thép tự đầm có sử dụng cốt liệu xi thép ở Đông Nam Bộ (Việt Nam) thay thế đá 1x2 cm cho kết quả chịu nén, chịu uốn, mô đun đàn hồi, độ mài mòn rất tốt có thể đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật cho các hạng mục công trình ngầm có cấp bê tông yêu cầu M250 trở lên.

Tại Bà Rịa - Vũng Tàu, khi sử dụng xi thép trong bê tông hầm thông thường cần tận dụng được vật liệu phế thải từ các nhà máy sản xuất thép nhằm khắc phục được vấn đề chôn lấp và đổ đồng tại các khu xử lý chất thải tập trung tại Tóc Tiên tỉnh Bà Rịa Vũng Tàu, đáp ứng nhu cầu phát triển mạnh kết cấu hạ tầng kỹ thuật địa phương, sự nghiệp công nghiệp hoá, hiện đại hoá nông nghiệp - nông thôn, gắn kết được hạ tầng địa phương với quốc gia, tạo sự liên hoàn thông suốt và chi phí vận tải hợp lý theo chiến lược phát triển địa phương.

Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, giá thành công trình bê tông xi thép tự đầm có thể được cạnh tranh hơn do khả năng tận dụng được nguồn

nguyên liệu tại địa phương, giá thành rẻ, sự hỗ trợ từ các doanh nghiệp.

Tuy nhiên, nghiên cứu cũng có hạn chế là mới chỉ đánh giá được các tham số độ bền, mô đun đàn hồi, độ mài mòn của bê tông xi thép tự đầm mà còn chưa để cập được đến độ thấm nước và khả năng ăn mòn của bê tông xi thép tự đầm. Đây cũng là hai thông số quan trọng của bê tông vỏ chống công trình ngầm.

Thời gian tới, cần tiến hành các nghiên cứu việc sử dụng bột xi thép thay thế một phần cát trong cốt liệu bê tông tự đầm đá dăm làm các lớp vỏ chống công trình ngầm. Xa hơn cần tiếp tục các nghiên cứu bổ sung cũng như phát triển các nghiên cứu bê tông xi thép tự đầm làm vỏ chống cảm ứng vết nứt, bê tông thông minh trong xây dựng các công trình ngầm.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn phòng thí nghiệm Công ty Cổ phần Viện cơ học ứng dụng, giấy chứng nhận 119/GCN - BXD, LAS - XD 1857.

Đóng góp của các tác giả

Trần Tuấn Điệp - tiến hành đúc mẫu và làm các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm, viết bài;

Trần Tuấn Minh - hiệu chỉnh, biên tập, chỉnh sửa liên hệ gửi bài báo; Nguyễn Duyên Phong - hiệu chỉnh và kiểm tra kết quả thí nghiệm.

Tài liệu tham khảo

- Cao C. (2012). Biến xỉ thép thành vật liệu có ích, *Báo Xây dựng*, 6.
- Khater, G. A. (2002). The use of Saudi slag for the production of glass - ceramic materials. *Ceramics International*, 28(1). 59 - 67.
- Hoàng, P. U. (2008). *Hoàn thiện công nghệ chế tạo và thi công bê tông tự lèn trong xây dựng công trình thủy lợi*. Đề tài Nghiên cứu Khoa học.
- Hoàng, P. H., & Nguyễn, T. L. (2011). *Nghiên cứu bê tông tự đầm sử dụng vật liệu địa phương*. Đề tài Nghiên cứu Khoa học cấp cơ sở. Mã số: T2011-02-27, Đại học Đà Nẵng.
- Lương, T. C. (2012). *Xỉ thép có thể tận dụng để thay thế vật liệu tự nhiên*. Công ty Trách nhiệm hữu hạn Vật liệu xanh.
- Mien, T. V., Chanh, V. N., Toyoharu, N., & Boonchai, S. (2014). Properties of high strength concrete using steel slag coarse aggregate. *Proceedings of the 6th ACEC and the 6th AEEC*, 21 - 22. November 2013, Bangkok, Thailand.
- Motz, H., & Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources, *Waste Management*, 21(3), 285-293.
- Nguyễn, T. P., & Nguyễn, N. T. (1997). *Thi công hầm*. Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật.
- Nguyễn, T. P., & Nguyễn, Q. H. (1998). *Thiết kế công trình hầm giao thông*. Nhà xuất bản Giao thông Vận tải.
- Nguyễn, V. C. (2009). Bê tông tự lèn - Sản xuất kiểm nghiệm và thi công. *Tạp chí Phát triển khoa học và Công nghệ*, 12, 18.
- Nguyễn, X. T. (2012). *Thi Công hầm và công trình ngầm*. (Tái bản). Nhà xuất bản Xây dựng.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self - compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15.
- Ozeki, S. (1997). Properties and usage of steel plant slag, *Encosteel: Steel for Sustainable Development*, 135-139.
- Patel, J. P. (2008). *Broader use of steel slag aggregates in concrete*, Master Thesis, Cleveland State University.
- Qasrawi, H. (2014). The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment. *Construction and Building Materials*, 54, 298-304.
- Sugamata, T., Edamatsu, Y., & Ouchi, M. (2003). A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers. In *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the Third International RILEM Symposium*, 420-431.
- TCVN 7572 - 4:2006. (2006). *Cốt liệu cho bê tông vữa - Phương pháp thử*. Tiêu chuẩn Xây dựng.
- Tô, N. P. N. (2012). *Nghiên cứu ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu trong chế tạo bê tông xi măng ở Việt Nam*. Luận văn Thạc sĩ. Trường Đại học Bách Khoa, Đại học quốc gia Hồ Chí Minh, 103 trang.
- Trần, H. B. (2011). *Nghiên cứu sử dụng xỉ thép làm phụ gia khoáng thay thế hàm lượng xi măng trong thành phần BTXM*. Luận văn Thạc sĩ khoa học kỹ thuật. Đại học Giao thông Vận tải, 105 trang.
- Trương, Đ. Q. (2012). *Nghiên cứu công nghệ thi công bê tông cường độ cao theo phương pháp tự chèn cho các công trình thủy lợi - thủy điện*. Luận văn thạc sĩ kỹ thuật. Trường Đại học Đà Nẵng, 100 trang.
- Vũ, Q. V. (2008). *Nghiên cứu tính chất của bê tông tự lèn cát nghiền & đặc tính cơ lý của ván khuôn*. Hội đập lớn và phát triển nguồn nước Việt Nam, 16 trang.
- Vũ, Q. V. (2011). *Nghiên cứu tính chất của Bê tông tự lèn cát nghiền và đặc tính cơ lý của ván khuôn*. Hội đập lớn và phát triển nguồn nước Việt Nam, 14 trang.