

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG CHẤT KẾT DÍNH GEOPOLIME

TS. NGUYỄN HỒNG HẢI, TS. NGUYỄN NAM THẮNG

Viện KHCN Xây dựng

Tóm tắt: Nghiên cứu ứng dụng tro bay, bùn đỏ để chế tạo chất kết dính Geopolime ứng dụng trong xây dựng thay thế xi măng giúp giải quyết lượng phế thải lớn, giảm thiểu ô nhiễm môi trường là một trong những nhiệm vụ trọng tâm của ngành xây dựng hiện nay. Tuy vậy, để sử dụng rộng rãi vật liệu này trong kết cấu bê tông cốt thép cần có nghiên cứu đầy đủ cả lý thuyết và thực nghiệm về tính chất cơ lý của bê tông sử dụng chất kết dính Geopolime. Với lý do trên, bài báo trình bày kết quả thí nghiệm kiểm tra khả năng làm việc của dầm bê tông cốt thép sử dụng chất kết dính Geopolime nhằm từng bước ứng dụng lý thuyết tính toán theo TCVN 5574: 2012.

Từ khóa: Geopolime, GPC, OPC

Abstract: Research on the application of fly ash and red mud to produce Geopolymer applied in the construction area substituting traditional cement to help solve large amounts of waste, reduce environmental pollution is one of the key tasks of construction industry today. However, in order to widely use this material in reinforced concrete structures, need to research on physical and mechanical properties of Geopolymer concrete. For the above reason, the paper presents the results of testing the reinforced concrete beams using Geopolime to gradually apply the theory of calculation based on TCVN 5574: 2012.

Key words: Geopolymer, GPC, OPC.

1. Đặt vấn đề

Tro xỉ và bùn đỏ là hai chất phế thải công nghiệp gây nguy hại đến môi trường nếu không có sự quản lý cũng như sử dụng hợp lý. Riêng với tro xỉ, hàng năm các nhà máy nhiệt điện thải ra khoảng 12,2 triệu tấn, dự kiến đến năm 2020, lượng tro, xỉ thải ra từ các nhà máy nhiệt điện than đạt khoảng 30 triệu tấn (Nguồn Bộ Công thương). Cũng như tro xỉ, bùn đỏ là chất phế thải từ các dây chuyền khai tuyển nhôm từ quặng bauxite tại Tây Nguyên cũng gặp phải các vấn đề liên quan đến ô nhiễm môi trường từ bãi chứa, hàm lượng kim loại nặng,...

Khối lượng thải ra từ quá trình sản xuất nhôm là rất lớn 0,4 đến 2 tấn bùn đỏ cho mỗi tấn nhôm thành phẩm. Hiện nay bùn đỏ tại Công ty Alumilium Lâm Đồng có lượng kiềm trong chất khô lên đến 2 % là nguồn cung cấp kiềm và alumina cho chất kết dính Geopolime rất tốt. Trong khi đó, tro bay Vĩnh Tân với hàm lượng MKN là 12 % có thể cho phép chế tạo chất kết dính (CKD) Geopolime để từ đó chế tạo gạch không nung và cấu kiện bê tông đúc sẵn. Có thể thấy việc chế tạo chất kết dính Geopolime có cường độ tương tự xi măng pooc lăng thường (OPC), là hết sức cần thiết và có ý nghĩa kinh tế rất lớn, không chỉ tận dụng được khối lượng lớn chất thải rắn mà về lâu dài còn làm giảm lượng khí thải do quá trình sản xuất xi măng tạo ra. Từ chất kết dính Geopolime có thể chế tạo ra nhiều sản phẩm khác nhau, trong khuôn khổ của nghiên cứu này đề cập đến sản phẩm cấu kiện bê tông cốt thép đúc sẵn có cường độ nén của bê tông 30-40 Mpa, đồng thời nghiên cứu đánh giá sự làm việc của dầm bê tông cốt thép (BTCT) này với dầm BTCT thông thường nhằm từng bước sử dụng chất kết dính Geopolime thay thế xi măng pooc lăng thường.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1 Phương pháp nghiên cứu

Đề tài đã sử dụng phương pháp phân tích tổng hợp và thực nghiệm dựa trên cơ sở phân tích hoá lý, cơ lý theo phương pháp tiêu chuẩn hiện hành (TCVN, TCN, ASTM,...) và các phương pháp phi tiêu chuẩn để đánh giá, lựa chọn nguyên vật liệu và nghiên cứu tính chất của hỗn hợp chất kết dính. Ngoài ra sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để tìm và giảm tối đa số lượng nghiên cứu thực nghiệm để tìm ra cấp phối tối ưu cho bê tông Geopolime.

Trong nghiên cứu này, nhóm đề tài đã sử dụng các phương pháp tiêu chuẩn dùng để xác định các tính chất kỹ thuật của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu cũng như các tính chất của hỗn hợp chất kết dính và phương pháp phi tiêu chuẩn để nghiên cứu chế tạo hỗn hợp chất kết dính Geopolime.

2.2 Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

2.2.1 Tro bay Công ty nhiệt điện Vĩnh Tân 2

Lượng sót trên sàng 0,045mm: 24%.

Thành phần hóa: SiO₂: 54,98%; Fe₂O₃: 5,03%; Al₂O₃: 23,10%; Chỉ số kiềm M_k = 0,042; thuộc loại siêu axit. Lượng MKN của tro bay đều trong mức qui định cho phép.

Theo tiêu chuẩn TCVN 6882:2001, tro bay Vĩnh Tân 2 thuộc loại phụ gia hoạt tính.

2.2.2 Bùn đỏ Công ty TNHH MTV nhôm Lâm Đồng

Thành phần hạt: từ 0,375µm đến 100µm.

Thành phần hóa: SiO₂: 6,74%; Fe₂O₃: 59,48%; Al₂O₃: 12,42%; pH: 12,04.

Độ ẩm: 39,61 %.

2.2.3 Xi lò cao Nhà máy thép Hòa Phát

Thành phần hạt: Xi lò cao có cỡ hạt lớn, vì vậy để tham gia phản ứng Geopolyme hóa cần nghiền mịn đến cỡ hạt sót sàng nhỏ hơn 10% trên sàng 0,08mm.

Thành phần hóa: SiO₂: 32,93%; Fe₂O₃: 0,96%; Al₂O₃: 14,49%; CaO: 37,95%.

2.2.4 Chất hoạt hóa

Trong nghiên cứu này, đề tài sử dụng chất hoạt hóa dạng tinh thể rắn^[2] được cung cấp bởi Trường Đại học Melbourne - Australia. Bản chất gồm có: thủy tinh lỏng Natri và kiềm vảy công nghiệp NaOH. Thủy tinh lỏng Na₂SiO₃ đóng vai trò cung cấp môi trường kiềm cho phản ứng geopolime hóa, ngoài ra nó còn cung cấp thành phần Si(OH)₄ khi thủy phân có tác dụng làm tăng tốc quá trình geopolime hóa.

Kiểm NaOH làm tăng nồng độ của môi trường kiềm, làm cho quá trình geopolime hóa diễn ra nhanh và triệt để.

2.2.5 Nước

Nhìn chung, có thể sử dụng nước sinh hoạt để chế tạo chất kết dính Geopolime. Tỷ lệ nước/chất kết dính ảnh hưởng lớn đến tính công tác và cường độ của chất kết dính Geopolime. Trong nghiên cứu này, lựa chọn tìm ra tỉ lệ N/CKD tối ưu để đảm bảo tính công tác và cường độ bê tông.

2.2.6 Cát liệu

Cát liệu mịn sử dụng là cát vàng Sông Lô. Cát Sông Lô có thể sử dụng để chế tạo vữa và bê tông theo yêu cầu kỹ thuật TCVN 7570: 2006.

Cát liệu thô sử dụng là đá dăm Hòa Bình kích thước cỡ hạt được tuyển chọn là 5mm - 10mm. Đáp ứng yêu cầu kỹ thuật TCVN 7570: 2006.

3. Chế tạo chất kết dính Geopolime và bê tông GPC

3.1 Nghiên cứu chế tạo chất kết dính Geopolime

Mục tiêu của nghiên cứu là tìm ra cấp phối chế tạo chất kết dính Geopolime có cường độ chịu nén 28 ngày tuổi ≥ 50MPa từ nguồn vật liệu tro bay, bùn đỏ, xi lò cao, chất hoạt hóa môi trường kiềm (dạng bột).

Trong lựa chọn cấp phối đề tài sử dụng tro bay với hàm lượng từ 42% đến 90%, xi lò cao hàm lượng từ 20% đến 40%, bùn đỏ từ 10% đến 50%, chất hoạt hóa đưa vào với hàm lượng cố định theo khuyến cáo của nhà sản xuất 6%-8%CKD. Cấp phối số 01 có dùng thêm 16% silicafume. Các cấp phối nghiên cứu được trình bày trong bảng sau:

Bảng 1. Cấp phối chất kết dính Geopolime

STT	Kí hiệu	Chất kết dính				N/CKD
		Tro bay	Xi lò cao	Silicafume	Bùn đỏ	
		%	%	%	%	
1	F1	42	0	16	42	0.43
2	F2	90	0	0	10	0.43
3	F3	50	0	0	50	0.43
4	S1	40	40	0	20	0.38
5	S2	60	20	0	20	0.38
6	S3	60	20	0	20	0.35
7	S4	60	20	0	20	0.33
8	S5	50	30	0	20	0.3

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Kết quả kiểm tra cường độ nén R_n 28 ngày của các mẫu cho thấy:

Lượng nước tham gia trong quá trình phản ứng ảnh hưởng đến độ pH của hỗn hợp chất kết dính. Các cấp phối F1, F2 và F3 có tính kiềm thấp (pH thấp) không đủ điều kiện môi trường kiềm để đóng rắn. Cấp phối F2 và F3 chỉ sử dụng tro bay và bùn đỏ, tro bay có vai trò tăng tuổi muộn nhưng không phát huy được ở tuổi sớm. Do đó các mẫu S1, S2, S3, S4, S5 được sử dụng thêm xỉ lò cao để tăng cường độ sớm. Từ kết quả kiểm tra cường độ chịu nén cho thấy cấp phối S4 và S5 sẽ thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu cường độ cao (60 MPa - 70 MPa).

Lượng bùn đỏ sử dụng không được nhiều quá vì hàm lượng Fe_2O_3 trong bùn đỏ khá cao (>50%). Lượng Fe_2O_3 này trong môi trường kiềm cũng tham gia phản ứng chiếm chỗ Al_2O_3 gây giảm cường độ khá nhiều. Trên cơ sở kết quả kiểm tra, chọn cấp phối S4 có cường độ chịu nén ≥ 60 MPa để chế tạo bê tông geopolime.

3.2 Nghiên cứu chế tạo bê tông Geopolime

Từ phương pháp chế tạo chất kết dính và lựa chọn thành phần cốt liệu tiến hành chế tạo bê tông geopolime. Trong nghiên cứu đã áp dụng phương pháp đồ thị thiết kế thành phần hạt và dùng phương pháp số học kiểm tra kết quả thiết kế.

Bảng 2. Thành phần vật liệu cho $1m^3$ bê tông geopolime làm cấu kiện BTCT

Ký hiệu mẫu	Tro bay (kg)	Xỉ lò cao (kg)	Bùn đỏ (kg)	Chất hoạt hóa (kg)	Cát vàng (kg)	Đá dăm (kg)	Nước (lít)
CPB1	298	149	110	48	760	1050	189



Hình 1. Chế tạo và nén kiểm tra cường độ mẫu bê tông

Bảng 3. Kết quả cường độ kéo khi uốn, nén của bê tông 28 ngày tuổi

Ký hiệu tổ mẫu	Cường độ kéo khi uốn 28 ngày, MPa	Cường độ nén 28 ngày, MPa
B1	4,1	35,2
B1	5,8	41,1
B3	4,4	39,5

Trên cơ sở chất kết dính Geopolime được chế tạo ở trên và cấp phối bê tông được nghiên cứu, nhóm tác giả đã chế tạo 03 dầm bê tông cốt thép sử dụng chất kết dính Geopolime (GPC), nhằm nghiên cứu sự làm việc của dầm này, đồng thời so sánh với dầm bê tông cốt thép thông thường (OPC), đánh giá khả năng chịu lực của bê tông Geopolime.

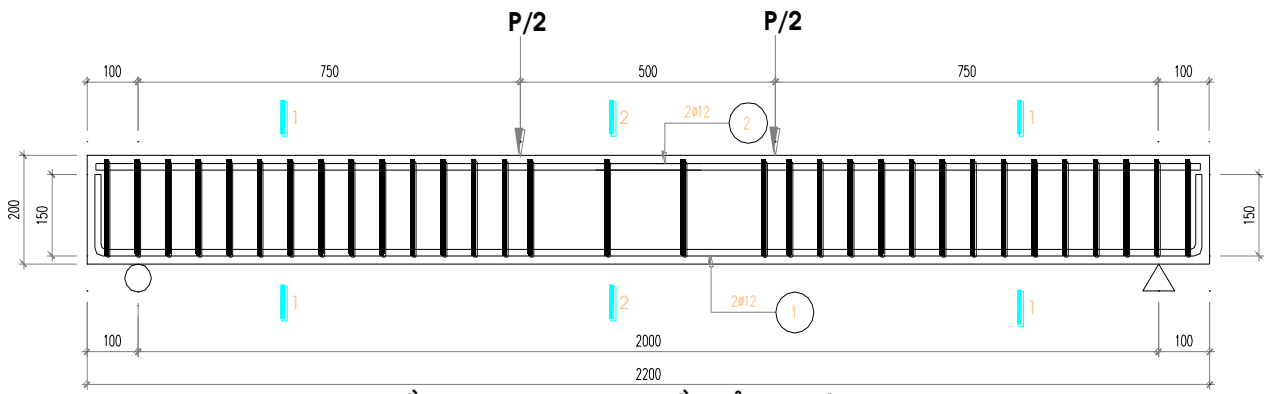
4. Thí nghiệm nghiên cứu sự làm việc của dầm GPC

Mô tả mẫu dầm thí nghiệm:

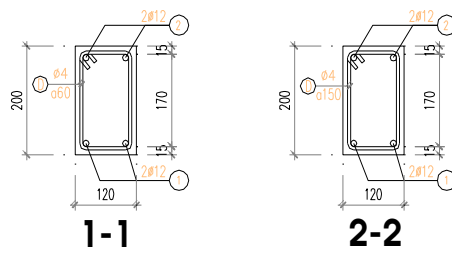
Dầm thí nghiệm là dầm đơn giản có chiều dài

2,2m, tiết diện mặt cắt ngang của dầm là 120x200mm. Cốt thép dọc là 4 thanh D12, CB300V, $R_s = 260$ MPa, $E_s = 21 \times 10^4$ MPa, thép đai là D4. Dầm được gối lên 2 gối tựa, khoảng cách gối tựa là 2m. Hai tải tập trung được đặt vào dầm với khoảng cách như hình 1. Các tải tập trung được gia tải bằng hệ thống kích thủy lực theo từng cấp tải.

Dầm chịu lực P như hình vẽ, tải trọng thí nghiệm được đặt vào khoảng giữa dầm với 2 tải tập trung (hình 2).



DẦM D1-12X20 (SƠ ĐỒ THỬ NGHIỆM)



Hình 2. Sơ đồ chịu tải của dầm

Lắp đặt mẫu thí nghiệm:

Gia tải dầm được thực hiện thông qua hệ khung gia tải thủy lực với kích thủy lực 30T Enerpac – Mỹ và hệ thống thiết bị đo bao gồm:

- Hệ khung gia tải thủy lực;
- Kích thủy lực 30T Enerpac - Mỹ;
- Load cell đo lực KCE 500KNA và máy nhận dữ liệu SDA-810A- Nhật Bản.

Sơ đồ lắp đặt dầm thí nghiệm được thể hiện trên hình 2, dầm thí nghiệm được thí nghiệm dưới dạng dầm chịu uốn. Hai đầu dầm được giữ bởi 2

gối tựa, một đầu cố định, một đầu khớp. Hai lực tác dụng lên dầm được đặt ở khoảng giữa dầm thông qua kích thủy lực.

Thiết bị đo đạc:

Thiết bị đo đạc bao gồm:

- Đầu đo chuyển vị CDP 25 kết nối máy nhận dữ liệu SDA-810A - Nhật Bản;
- Kính đo vết nứt chuyên dụng có giá trị vạch chia bằng 0,05 mm;
- Thước lá kim loại;
- Máy ảnh và các dụng cụ, thiết bị phụ trợ khác.



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm dầm

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Kết quả thí nghiệm:

Mẫu thí nghiệm được thực hiện với 03 dầm, cường độ nén mẫu sau 28 ngày trung bình đạt 38,6 Mpa. Kết quả thí nghiệm cho thấy với các dầm xuất hiện vết nứt khi tải tác dụng lên dầm từ 12 kN với chuyển vị đáy dầm từ 1,67mm, chiều rộng vết nứt 0,04mm, có vài vết nứt xuất hiện trong khoảng giữa dầm (hình 3).



Các vết nứt xuất hiện khi tải tác dụng lên dầm 12kN



Vết nứt rộng 0,35mm, tương ứng với cấp tải 20 kN

Hình 4. Sự xuất hiện vết nứt của dầm GPC

Khi tăng lực tác dụng, các vết nứt của cả ba dầm có chiều rộng lần lượt 0,35mm (dầm 1), 0,35mm (dầm 2) và 0,3mm (dầm 3) tương ứng với lực tác dụng lên dầm là 20kN, 24kN và 20kN. Chiều rộng vết nứt của các dầm tương ứng với lực tác dụng lên dầm khá tương đồng

với việc tính toán dầm bê tông cốt thép thông thường có cùng đặc trưng vật liệu với lực tính toán lớn nhất theo khả năng chịu lực của dầm là 18kN. Các dầm bị phá hoại khi lực tác dụng lên dầm lần lượt là 40kN, 37kN và 36kN (hình 4).



Vết nứt rộng 1mm tương ứng với lực P=40kN



Vết nứt rộng 1,1mm, tương ứng với cấp tải 37kN

Hình 5. Dầm bị phá hủy khi chiều rộng vết nứt là 1,1mm

Kết quả chi tiết số liệu thí nghiệm các dầm được thể hiện trong các bảng từ bảng 4 đến bảng 6. Các mẫu dầm được thử nghiệm khi đã đủ 28 ngày tuổi.

Bảng 4. Kết quả đo chuyển vị trong thử nghiệm dầm số 1

STT	Tải trọng (daN)	Chuyển vị tại vị trí đo	
		(mm) Dấu "-" biểu thị sự võng xuống	
		V1	Ghi chú
1	0	0.00	
2	2	-0.30	
3	4	-0.37	
4	6	-0.49	
5	8	-0.71	
6	10	-1.11	
7	12	-1.67	Nứt với a=0.04mm
8	14	-2.31	Nứt với a=0.08mm
9	16	-2.82	Nứt với a=0.12mm
10	18	-3.33	Nứt với a=0.20mm
11	20	-3.91	Nứt với a=0.35mm
12	22		
13	24		
14	26		
15	28		
16	30		
17	32		
18	36		
19	38		
20	40		Phá hoại, nứt 1mm

Bảng 5. Kết quả đo chuyển vị trong thử dầm số 2

STT	Tải trọng (daN)	Chuyển vị tại vị trí đo	
		(mm) Dấu "-" biểu thị sự võng xuống	
		V1	Ghi chú
1	0	0.00	
2	2	-0.13	
3	4	-0.40	
4	6	-0.73	
5	8	-1.19	Nứt với a=0.03mm
6	10	-1.62	
7	12	-2.10	Nứt với a=0.15mm
8	14	-2.60	

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

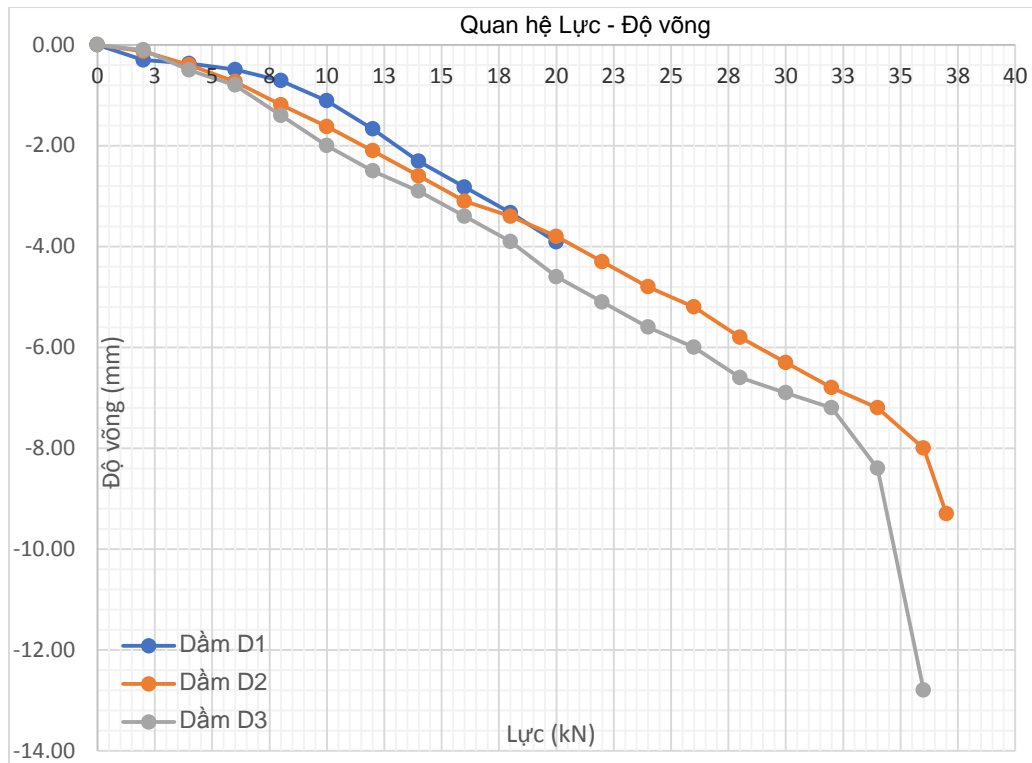
STT	Tải trọng (daN)	Chuyển vị tại vị trí đo	
		(mm) Dấu "-" biểu thị sự võng xuống	
		V1	Ghi chú
9	16	-3.10	Nứt với a=0.16mm
10	18	-3.40	
11	20	-3.80	Nứt với a=0.2mm
12	22	-4.30	
13	24	-4.80	Nứt với a=0.35mm
14	26	-5.20	
15	28	-5.80	Nứt với a=0.5mm
16	30	-6.30	
17	32	-6.80	
18	34	-7.20	Nứt với a=0.55mm
19	36	-8.00	
20	37	-9.30	Phá hoại, nứt 1mm

Bảng 6. Kết quả đo chuyển vị trong thử dầm số 3

STT	Tải trọng (kN)	Chuyển vị tại vị trí đo	
		(mm) Dấu "-" biểu thị sự võng xuống	
		V1	Ghi chú
1	0	0.00	
2	2	-0.10	
3	4	-0.50	
4	6	-0.80	
5	8	-1.40	Nứt với a=0.1mm
6	10	-2.00	
7	12	-2.50	Nứt với a=0.20mm
8	14	-2.90	
9	16	-3.40	
10	18	-3.90	
11	20	-4.60	Nứt với a=0.3mm
12	22	-5.10	
13	24	-5.60	
14	26	-6.00	
15	28	-6.60	
16	30	-6.90	Nứt với a=0.5mm
17	32	-7.20	
18	34	-8.40	
19	36	-12.80	Phá hoại, với 1.1mm

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Trên hình 6 thể hiện quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị của các dầm D1, D2, và D3. Theo đó, đường cong quan hệ lực và chuyển vị chia làm 3 đoạn trước khi nứt, sau khi nứt và trước khi phá hoại.



Hình 6. Quan hệ độ võng và lực của các dầm D1, D2 và D3

Theo kết quả thí nghiệm, các vết nứt xuất hiện trong giai đoạn lực $P = 8 \div 12$ kN.

So sánh với kết quả tính toán bề rộng vết nứt đối với dầm OPC (dầm được đúc có kích thước, hàm lượng thép và cường độ bê tông như dầm GPC đề cập ở trên, tuy nhiên dùng xi măng pooc lăng thông thường để chế tạo bê tông. Dầm này được thí nghiệm để so sánh đối chứng), với tải thí nghiệm $P = 19,22$ kN, bề rộng vết nứt là 0,15, đối chiếu với kết quả thí nghiệm khi bề rộng vết nứt là 0,15mm, giá trị tải trọng thí nghiệm tương ứng dao động từ 12kN đến 17kN. Đồng thời so sánh với kết quả thí nghiệm dầm OPC có thể nhận xét khả năng xuất hiện vết nứt của dầm GPC nhanh hơn. Khi bề rộng vết nứt rộng 0,35mm thì lực P dao động từ 20 kN đến 24 kN, như vậy khá phù hợp với khả năng chịu lực của dầm theo tính toán với dầm bê tông cốt thép thông thường. Theo kết quả quan hệ lực - chuyển vị của dầm, dầm bị phá hoại ở lực $P = 34$ kN, độ võng của dầm ≈ 7 mm (đây là giai đoạn thép bị chảy dẻo trước khi phá hoại).

5. Kết luận

Kết luận:

- Từ nguồn nguyên liệu phế thải công nghiệp trong nước kết hợp với chất hoạt hóa kiềm

dạng khô đề tài đã nghiên cứu chế tạo được bê tông Geopolime có cường độ nén 28 ngày $R_{n28} \geq 30$ MPa;

- Đường cong tải trọng - độ võng nhận được từ các thí nghiệm có một dạng tương tự, chia làm ba giai đoạn: (i) trước khi nứt, (ii) sau khi nứt – trước khi cốt thép chảy dẻo, (iii) và sau khi cốt thép chảy dẻo;
- Tải trọng gây nứt và tải trọng phá hoại của dầm GPC và dầm OPC với cường độ chịu nén tương tự là không khác biệt nhiều. Các giá trị thực nghiệm tương ứng khá gần với các giá trị tính toán theo tiêu chuẩn TCVN 5574-2012^[1];
- Ở giai đoạn làm việc đàn hồi, khả năng làm việc của dầm GPC cho kết quả tương đối tốt, so sánh với dầm OPC có cùng tính chất thì dầm GPC có khả năng làm việc trong giai đoạn đàn hồi kém hơn so với dầm OPC. Tuy nhiên, sự khác nhau này là không nhiều;
- Tại thời điểm xuất hiện khe nứt đầu tiên và khi cốt thép bắt đầu chảy dẻo, giá trị độ võng thực nghiệm của dầm GPC là khá khác biệt, lớn hơn khoảng 40% so với kết quả tính toán dầm OPC theo tiêu chuẩn TCVN 5574-2012. Do đó, cần

nghiên cứu thêm để có một số điều chỉnh cho công thức tính toán độ võng theo tiêu chuẩn TCVN 5574-2012 cho dầm bê tông GPC.

Kiến nghị:

Để có thể ứng dụng bê tông GPC đối với các kết cấu công trình, cần có những nghiên cứu chuyên sâu nhằm áp dụng lý thuyết tính toán đối với bê tông sử dụng chất kết dính Geopolyme.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 5574-2012, Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - tiêu chuẩn thiết kế.
- [2] Báo cáo tổng kết đề tài B2016-XDA-04 Nghiên cứu đặc trưng cơ học và khả năng áp dụng tiêu chuẩn TCVN 5574:2012 cho dầm bê tông cốt thép dùng bê tông FA và BFS trong điều kiện Việt Nam.
- [3] Davidovits J (2012), "Geopolime chemistry and sustainable development".
- [4] Palomo A Fernandez Jimenez A (2003), "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements".
- [5] J. L. Provis và các cộng sự (2005), "The Role of Mathematical Modelling and Gel Chemistry in Advancing Geopolime Technology", *Chemical Engineering Research and Design*. 83(7), pp. 853-860.
- [6] Christopher R. Shearer và các cộng sự (2016), "Alkali-activation potential of biomass-coal co-fired fly ash", *Cement and Concrete Composites*. 73(Supplement C), pp. 62-74.
- [7] Caijun Shi và Robert L. Day (1995), "A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements", *Cement and Concrete Research*. 25(6), pp. 1333-1346.
- [8] Zhaohui Xie và Yunping Xi (2001), "Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash", *Cement and Concrete Research*. 31(9), pp. 1245-1249.
- [9] Nguyen, V.C., Shigeishi, M., Tran, Q.T, (2012) Inorganic Composite Material based on Fly Ash, Red Residue From Bauxite Ore for Road building Projects in Viet Nam. *Advanced Materials Research Vols. 383-393, 2774-2781*.
- [10] Đào Văn Đông (2009). Vữa và bê tông "xanh" sử dụng chất kết dính polime vô cơ. *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải*.
- [11] Báo cáo tổng kết đề tài RD 25-11 Nghiên cứu sản xuất gạch không nung từ phế thải tro bay và xỉ lò cao trên cơ sở chất kết dính Geopolime.
- [12] Đỗ Quang Minh (2006). Chất kết dính từ bùn đỏ, *Tạp chí khoa học và công nghệ các Trường đại học kỹ thuật*.
- [13] Đỗ Quang Minh, Kiều Đỗ Trung Kiên, Đỗ Thị Hằng, Nguyễn Đình Chinh (2010), Khả năng sử dụng bùn đỏ làm vật liệu xây dựng không nung. *Tạp chí Vật liệu Xây dựng Việt Nam, Vol 4, tr 44-48*.

Ngày nhận bài: 16/4/2019.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 06/5/2019.