

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CO NGÓT VÀ TỪ BIẾN ĐẾN MẤT MẤT ỨNG SUẤT TRƯỚC TRONG DẦM DỰ ỨNG LỰC SỬ DỤNG BÊ TÔNG GEOPOLYMER

Lê Bá Danh<sup>a</sup>, Nguyễn Bình Hà<sup>a,\*</sup>, Vũ Thành Quang<sup>a</sup>, Nguyễn Quốc Bảo<sup>a</sup>,  
Nguyễn Hùng Sơn<sup>a</sup>, Nguyễn Văn Quang<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

<sup>b</sup>Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 06/5/2024, Sửa xong 03/7/2024, Chấp nhận đăng 04/7/2024

## Tóm tắt

Bài báo trình bày về nghiên cứu ảnh hưởng của co ngót và từ biến đến mất mát ứng suất trước trong dầm dự ứng lực sử dụng bê tông Geopolymer (GPC) thông qua kết quả thực nghiệm đo đặc hệ số từ biến, co ngót; Thiết kế, chế tạo, lắp đặt thiết bị trong dầm GPC dự ứng lực dài 10,4 m để tiến hành đo đặc mất mát ứng suất trước trong thời gian 6 tháng. Kết quả nghiên cứu cho thấy mất mát ứng suất trước tăng nhanh trong thời gian đầu, giảm trong thời gian sau, giá trị thực nghiệm lớn hơn giá trị tính theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017 nằm trong khoảng 8,5% - 11,5%, sự làm việc của dầm GPC tương tự như OPC, có thể sử dụng các công thức xác định mất mát ứng suất trước do co ngót, từ biến của tiêu chuẩn thiết kế cầu để tính toán cho dầm GPC dự ứng lực.

*Từ khoá:* geopolymer; ứng suất trước; mất mát ứng suất trước; co ngót; từ biến; cầu.

STUDYING THE EFFECTS OF CREEP AND SHRINKAGE ON PRESTRESS LOSSES IN PRESTRESS BEAMS USING GEOPOLYMER CONCRETE

## Abstract

This article presents research on the effects of shrinkage and creep on prestress losses in prestressed beams using Geopolymer concrete (GPC) through experimental results measuring creep and shrinkage coefficients; Design, manufacture, and install equipment in a 10,4 m long prestressed GPC beam to measure prestress losses over a period of 6 months. Research results show that prestress losses increase rapidly in the first period, decreases in the later period, the experimental value is greater than the value calculated according to AASHTO LRFD 2017 standards in the range of 8.5% - 11.5%, the performance of GPC beams is similar to OPC, the formulas for determining prestress losses due to shrinkage and creep of bridge design standards can be used to calculate for prestressed GPC beams.

*Keywords:* geopolymer; prestress; prestress loss; shrinkage; creep; bridge.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(4V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(4V)-02) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Năm 2023 sản lượng tiêu thụ xi măng của Việt Nam đạt gần 90 triệu tấn [1], do đó sẽ phát thải khoảng 60 triệu tấn khí CO<sub>2</sub>, hiện nay các nhà máy nhiệt điện chạy than, nhà máy luyện kim thải ra một lượng lớn chất thải là tro bay và xỉ lò cao. Tại Hội nghị thượng đỉnh về biến đổi khí hậu của Liên Hợp Quốc năm 2021 (COP 26), Chính phủ Việt Nam cam kết đạt mức phát thải ròng bằng 0 vào năm

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [ngbinhha@huce.edu.vn](mailto:ngbinhha@huce.edu.vn) (Hà, N. B.)

2050 [2], vì vậy việc giảm lượng tiêu thụ xi măng và sử dụng chất thải tro bay và xỉ lò cao cho các công trình xây dựng là một trong những ưu tiên của Chính phủ.

Theo Joseph Davidovits [3] Bê tông Geopolymer (GPC) là loại bê tông không sử dụng xi măng làm chất kết dính mà sử dụng nguồn vật liệu giàu khoáng  $Al_2O_3$  và  $Si_2O_3$  (alumino-silicat) có trong nguồn phế thải của quá trình sản xuất công nghiệp như tro bay của nhà máy nhiệt điện, xỉ lò cao của nhà máy luyện gang, thép ... và được hoạt hóa trong môi trường kiềm, vì vậy sử dụng GPC sẽ giảm đáng kể phát thải  $CO_2$ , do đó trên thế giới GPC được coi là loại vật liệu thân thiện với môi trường ... và GPC được nghiên cứu, ứng dụng để giảm thiểu việc sử dụng OPC (bê tông Portland thông thường).

Các nghiên cứu về GPC chỉ ra rằng, GPC có khả năng phát triển cường độ nhanh [4], khả năng chịu nhiệt tốt [5], không phát sinh nhiệt trong quá trình đông cứng, làm việc tốt trong môi trường xâm thực [4], cường độ chịu nén có thể đạt tới 80-90 MPa [6], ... Trên thế giới việc áp dụng GPC là khá phổ biến đối với bê tông cốt thép thông thường, một số công trình tiêu biểu như: tường chắn đất sử dụng GPC đúc sẵn có cường độ 40 MPa tại nhà máy ở Toowoomba [5], sân bay Wellcamp xây dựng bằng bê tông EFC [7], Cầu Murrarie Plant [8], Cầu bắc trên đường ô tô tại thành phố Toowoomba sử dụng GPC 40 MPa [8], thử nghiệm sử dụng GPC UST cho tà vẹt tại Ấn Độ [9].

Tại Việt Nam đã có nhiều nhà khoa học tiến hành nghiên cứu về ứng dụng bê tông Geopolymer trong xây dựng công trình nói chung và công trình cầu nói riêng. Trong số những nghiên cứu đáng chú ý như: Trần Việt Hưng [10] đã đề xuất một phương pháp thiết kế thành phần, chế tạo và thí nghiệm bê tông Geopolymer sử dụng tro bay và các nguyên liệu địa phương khác theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm. Kết quả cho thấy bê tông Geopolymer này đạt được cường độ từ 30÷50 MPa và có thể áp dụng cho các công trình cầu; Phạm Quang Đạo [11] đã xây dựng cấp phối bê tông GPC có cường độ chịu nén trung bình lên đến 50 MPa từ sự kết hợp của tro bay và xỉ lò cao, cả hai đều là nguồn vật liệu sẵn có trong nước, thành công này đặc biệt đến từ việc tối ưu hóa tỉ lệ xỉ lò cao thay thế tro bay và sử dụng chất hoạt hóa kiềm dạng bột khô, việc chế tạo GPC được thực hiện trong điều kiện không dưỡng hộ nhiệt; Nguyễn Bình Hà và cs. [12] đã cho thấy việc sử dụng bê tông geopolymer trong công trình cầu có tính khả thi cao, nhất là đối với các công trình phải chịu ăn mòn cao như các công trình ven biển và trên biển.

Hiện nay, ở nước ta khối lượng bê tông xi măng (BTXM) sử dụng trong các công trình cầu hiện nay là rất lớn, kết cấu dầm chủ yếu là BTXM, kết cấu trụ thì gần như hoàn toàn là BTXM. Các kết cấu nhịp cầu đa số là dầm bê tông xi măng ứng suất trước (BTXM UST), do đó cần nghiên cứu áp dụng dầm GPC UST vào trong công trình cầu sẽ góp phần giảm phát thải  $CO_2$ , và áp dụng tại những vùng chịu sự tác động của môi trường biển.

Khi thiết kế kết cấu BT UST thì việc xác định được MMUST do: ma sát, co ngót dầm hồi, tụt neo, chùng dầm, co ngót và từ biến là bắt buộc phải thực hiện, trong đó xác định được mất mát theo thời gian của co ngót và từ biến là rất khó khăn và quan trọng. Trong khi đó các nghiên cứu về kết cấu GPC UST còn hạn chế.

Nghiên cứu này sẽ sử dụng các kết quả đã có của thí nghiệm biến dạng do co ngót, từ biến của GPC để tiếp tục xây dựng mô hình dầm GPC UST thí nghiệm dài 10,4 m nhằm đo đạc MMUST trong cấp dự ứng lực trong thời gian 6 tháng, so sánh với mô hình tính toán MMUST theo AASHTO LRFD 2017 và ứng dụng những đề xuất vào thiết kế cho công trình thực tế.

## **2. Kết quả đo đạc biến dạng từ biến, co ngót của GPC**

### **2.1. Thành phần cấp phối chế tạo mẫu đo**

Với mục đích chế tạo ra loại GPC sử dụng tro bay và xỉ lò cao và không phải bảo dưỡng nhiệt, nhóm nghiên cứu đã chế tạo GPC đạt được cường độ 45 MPa đến 55 MPa với thành phần cốt liệu như trong Bảng 1.

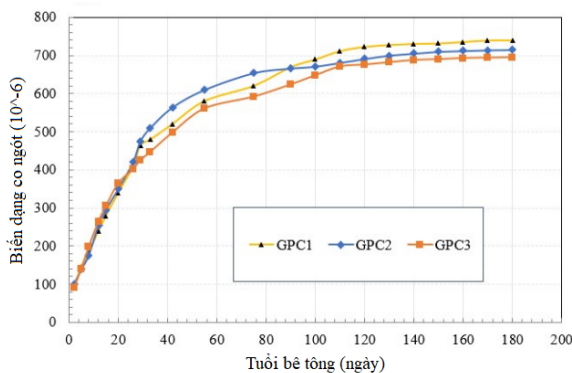
Bảng 1. Thành phần cốt liệu bê tông Geopolymer

Cát (kg)	Đá (kg)	Xi lò cao (kg)	Tro bay (kg)	Chất hoạt hóa (kg)	Nước (kg)	Phụ gia siêu dẻo (kg)
700	1120	330	110	43,75	175	5,5

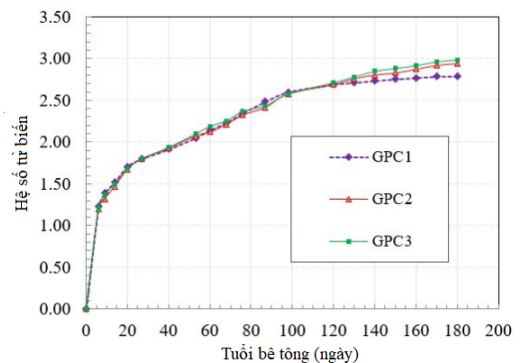
Tỷ lệ Tro bay (Fly Ash - FA) trên Xi lò cao nghiền mịn (Granulated blast-furnace slag-GBFS): 1/3; Activator dạng khô với tỷ lệ cố định  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ : 2,1 nghiền cứu sử dụng (chất hoạt hóa)/ (FA+GBFS): 10%; Nước/chất kết dính: 0,39; hàm lượng phụ gia siêu dẻo gốc Polyethylene Glycol Methacrylate theo khối lượng: 1,5%.

## 2.2. Kết quả đo đặc biến dạng do co ngót và từ biến của GPC

Thí nghiệm xác định biến dạng co ngót được tham khảo theo TCVN 3117-2022 [13] và ASTM C157/C157M-17 [14]. Mẫu thí nghiệm co ngót là hình lăng trụ có kích thước  $100 \times 100 \times 400$  (mm). Giá trị của biến dạng co ngót trung bình của 3 mẫu GPC tại thời điểm 180 ngày bằng  $\varepsilon = 717 \cdot 10^{-6}$ . Biểu đồ biến dạng co ngót theo thời gian của 3 mẫu được thể hiện trên Hình 1. Thí nghiệm từ biến được tham khảo Tiêu chuẩn ASTM C512 [15], bằng việc đúc 4 mẫu hình lăng trụ tròn kích thước  $150 \times 300$  (mm), trong đó 3 mẫu được gia tải để đo biến dạng từ biến, 1 mẫu đặt bên cạnh thí nghiệm từ biến để đo biến dạng co ngót tự do. Hệ số từ biến trung bình của 3 mẫu GPC ở thời điểm 180 ngày là 2,9. Biểu đồ hệ số từ biến của ba mẫu GPC theo thời gian được thể hiện trên Hình 2.



Hình 1. Biến dạng tỷ đối do co ngót của 3 mẫu GPC



Hình 2. Hệ số từ biến của 3 mẫu GPC

## 3. Thiết kế, chế tạo đầm thí nghiệm đo đặc MMUST

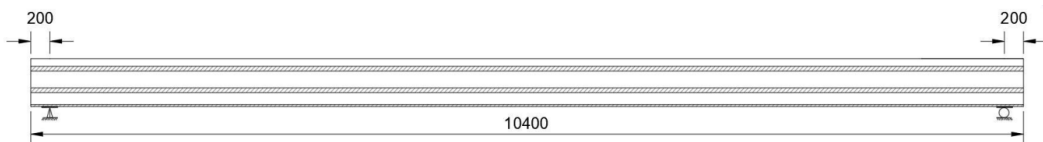
### 3.1. Thiết kế đầm thí nghiệm

Mục tiêu của thí nghiệm là đo đặc được mát mát ứng suất trước do co ngót và từ biến trong cấp dự ứng lực của đầm cầu GPC ứng suất trước, do không thể có điều kiện đo đặc được trong các kết cấu đầm thực, nên cần thiết kế mô hình thí nghiệm để từ đó có thể suy ra kết quả của kết cấu đầm dự ứng lực trong thực tiễn. Việc thiết kế mô hình thí nghiệm phải đáp ứng các yêu cầu của phương pháp suy luận tương tự (analogue), suy luận tương tự là phương pháp suy luận căn cứ vào một số thuộc tính giống nhau của hai đối tượng để rút ra kết luận về thuộc tính giống nhau khác của chúng. Để đảm bảo độ tin cậy của phép suy luận thì cần những điều kiện sau: Số dữ kiện tương tự giữa hai đối tượng càng nhiều thì xác suất đúng của kết luận càng chính xác; Số dữ kiện là thuộc tính bản chất chung giữa hai đối tượng càng nhiều thì xác suất của kết luận càng chính xác; Những dữ kiện tương tự giữa hai đối tượng phải liên quan trực tiếp đến kết luận.

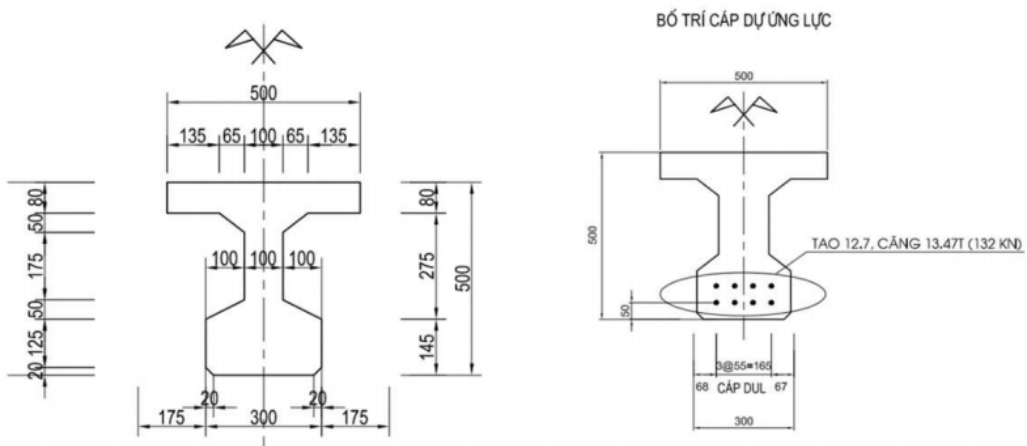
Căn cứ vào yêu cầu trên, mô hình thí nghiệm được thiết kế sao cho số lượng dữ kiện tương tự và số lượng thuộc tính bản chất chung của mẫu và dầm GPC dự ứng lực phải có nhiều cái chung để đảm bảo xác suất kết luận chính xác, vì vậy mẫu thí nghiệm phải thỏa mãn các điều kiện chính sau: Tổng thể dầm sẽ được thiết kế theo tiêu chuẩn thiết kế cầu AASHTO LRFD 2017 [16]; Chiều cao dầm  $h$  thỏa mãn điều kiện  $\frac{h}{l} = \left( \frac{1}{15} \div \frac{1}{25} \right)$  thông thường có thể chọn  $\frac{h}{l} = \frac{1}{20}$  và chọn chiều cao này cần chú ý đến khả năng của việc chế tạo, hệ thống thí nghiệm ... ví dụ chiều cao nhỏ thì có đảm bảo bố trí được các cốt thép trong tiết diện đúng như yêu cầu không? ... Số lượng cốt thép ứng suất trước được chọn sao cho đáp ứng yêu cầu là trục trung hòa của dầm T đi qua sườn.

Với các yêu cầu thiết kế dầm tuân theo các yêu cầu trên thì quan sát phản ứng (sự làm việc) của dầm thí nghiệm cũng có thể suy ra sự làm việc của dầm GPC ứng suất trước trong thực tế, tức là đối với tải trọng tác dụng thì độ võng, phát triển vùng nứt, chiều cao vùng nén, sự làm việc chịu uốn, chịu cắt ... và ảnh hưởng của co ngót từ biến đến mất mát ứng suất trong cáp ứng suất trước của dầm thí nghiệm sẽ có thể dựa vào đó để kết luận của về phản ứng của dầm trong thực tiễn theo phương pháp suy luận tương tự.

Căn cứ vào yêu cầu thí nghiệm, dầm được thiết kế với chiều dài 10,4 m, chiều dài nhịp tính toán 10 m, tiết diện chữ T và với các kích thước, bố trí cốt thép UST và cốt thép thường thể hiện trên các Hình 3, Hình 4, Hình 5.



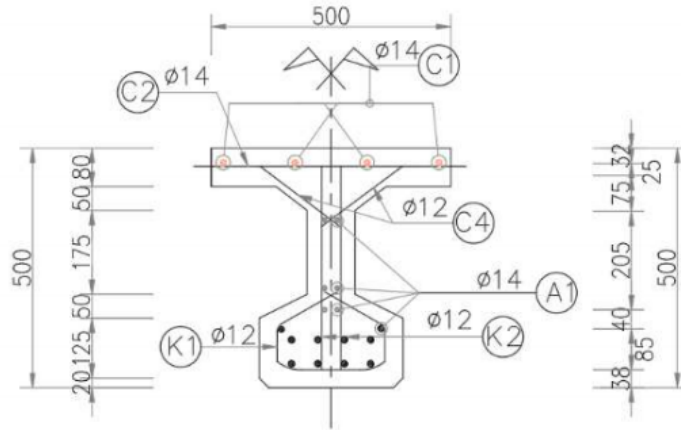
Hình 3. Mặt cắt dọc dầm thí nghiệm



Hình 4. Mặt cắt ngang dầm thí nghiệm

Cáp UST là loại có độ chùng thấp được thí nghiệm theo Tiêu chuẩn ASTM A416/416M-2012 [17], kết quả thí nghiệm tại Nhà máy Bê tông Xuân Mai [18] với các thông số cơ bản được ghi trong Bảng 2.

Dầm thí nghiệm đã được kiểm toán thỏa mãn các trạng thái giới hạn theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017.



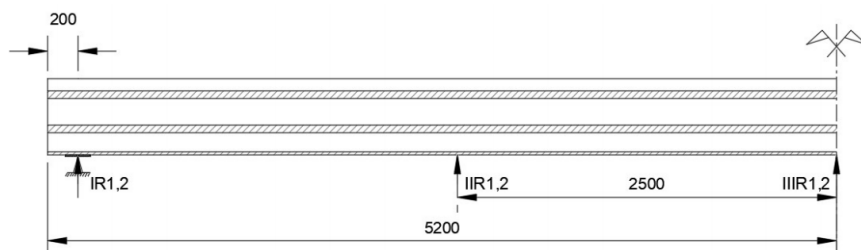
Hình 5. Bố trí cốt thép thường đầm thí nghiệm

Bảng 2. Thông số vật liệu cấp UST

Chỉ tiêu thí nghiệm	Ký hiệu	Kết quả	Đơn vị
Mô đun đàn hồi	$E_p$	197.000	MPa
Cường độ chịu kéo	$f_{pu}$	1.978,667	MPa
Giới hạn chảy	$f_{py}$	1.834	MPa
Giới hạn ứng suất:			
- Ngay trước khi truyền lực	$0,75f_{pu}$	1.484	MPa
- Giai đoạn khai thác sau khi tính toán bộ mất mát	$0,80f_{py}$	1.467	MPa
Tham số cấp UST:			
- Đường kính danh định	$D_p$	12,7	mm
- Diện tích	$A_p$	99,23	mm <sup>2</sup>
- Ứng suất trong cáp UST tại thời điểm căng kéo	$f_{pj}$	1.484	MPa
- Lực kích	$P_j$	138	KN

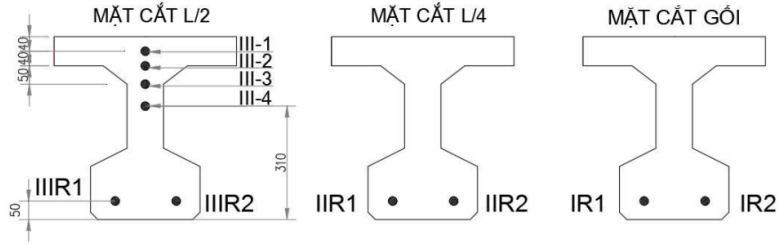
### 3.2. Bố trí thiết bị đo đặc MMUST do co ngót và từ biến

Với mục đích xác định mất mát ứng suất trong cáp UST theo thời gian, tiến hành lắp đặt 06 thiết bị đo biến dạng (dây rung) vào 2 tao cáp UST phía ngoài ở đáy đầm, mỗi tao có 3 thiết bị được bố trí dọc theo chiều dài đầm bố trí tại 3 vị trí: gối cầu,  $L/4$  và  $L/2$  vị trí và ký hiệu thiết bị đo biến dạng được thể hiện trên Hình 6 và Hình 7.



Hình 6. Bố trí thiết bị đo theo phương dọc đầm





Hình 7. Bố trí thiết bị đo theo mặt cắt ngang dầm

### 3.3. Chế tạo dầm thí nghiệm

Tính toán thành phần và khối lượng vật liệu chế tạo dầm GPC được dựa trên cơ sở thành phần cấp phối được ghi trong Bảng 1. Việc chế tạo cốt thép, căng kéo cáp dự ứng lực, đổ bê tông dầm được thực hiện tại nhà máy Bê tông Xuân Mai. Công tác chuẩn bị vật liệu để trộn GPC được thể hiện trên Hình 8.



Hình 8. Công tác chuẩn bị vật liệu

Công tác chế tạo, lắp đặt cốt thép thường, cáp ứng suất trước được thể hiện trên Hình 9.



Hình 9. Công tác lắp đặt cốt thép thường và thép UST



Hình 10. Căng cáp UST

Cáp UST sử dụng là tao 12,7 mm. Lực căng bằng 138 KN, cáp được căng theo từng tao, quá trình căng cáp dự ứng lực được thực hiện theo từng cấp lực của tiêu chuẩn thi công, như được minh họa trên Hình 10.

Sau khi kết thúc quá trình căng cáp, tiến hành lắp đặt thiết bị đo biến dạng (thiết bị dây rung) để đo sự thay đổi biến dạng trong cáp dự ứng lực, các thiết bị này được lắp đặt trước khi đổ bê tông 01 ngày. Vị trí lắp đặt thiết bị dây rung tại giữa nhịp được thể hiện trên Hình 11.



Hình 11. Vị trí lắp đặt dây rung tại giữa nhịp

Bê tông Geopolymer được trộn tại trạm trộn của nhà máy, được vận chuyển vào vị trí đúc đầm, sau khi bê tông đạt 6 ngày tuổi tiến hành dỡ ván khuôn và cắt cáp khi bê tông đạt 9 ngày tuổi. Dầm thí nghiệm sau khi đổ bê tông và tháo ván khuôn được thể hiện trên Hình 12.



Hình 12. Dầm bê tông đầm, sau 6 ngày tiến hành tháo ván khuôn

## 4. Kết quả đo đạc

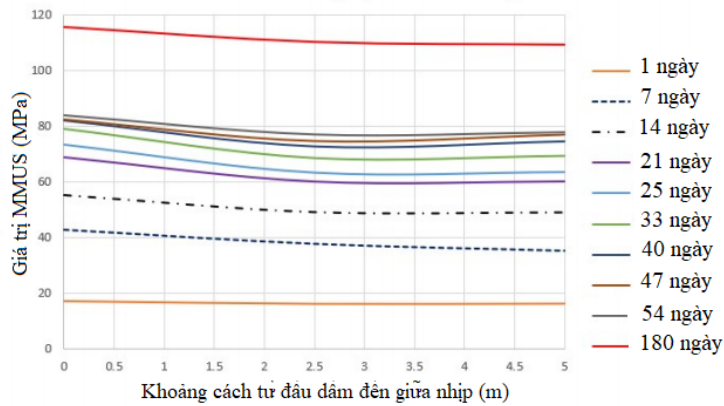
### 4.1. Kết quả đo đạc mất mát ứng suất trước

Giá trị đo đạc của thí nghiệm là biến dạng tại các thời điểm, giá trị ứng suất mất mát ghi trong Bảng 3 được xác định bằng hiệu giá trị đo được của hai thời điểm – đó chính là biến dạng trong khoảng thời gian đó nhân với mô đun đàn hồi của thép (theo thí nghiệm về thép). Thời điểm bắt đầu đo đạc mất mát ứng suất do từ biến và co ngót là 10 ngày sau khi căng cáp, 9 ngày sau khi đổ bê tông, số liệu đầu tiên trong phần tính toán là sau khi cắt xong toàn bộ cáp, do đó sẽ không có mất mát do ma sát, tụt neo và co ngót đàn hồi, chỉ còn mất mát ứng suất theo thời gian là co ngót, từ biến và chùng dãn, tuy nhiên giá trị của mất mát do chùng dãn còn lại khá nhỏ do đã căng trước 10 ngày nên nghiên cứu này đã bỏ qua mất mát ứng suất do chùng dãn. Quá trình biến dạng do từ biến, co ngót gây ra mất mát ứng suất trước trong cáp dự ứng lực được đo đạc trong thời gian 6 tháng kể từ khi cắt cáp, kết quả MMUS trong cáp dự ứng lực được trình bày trong Bảng 3 và Bảng 4.

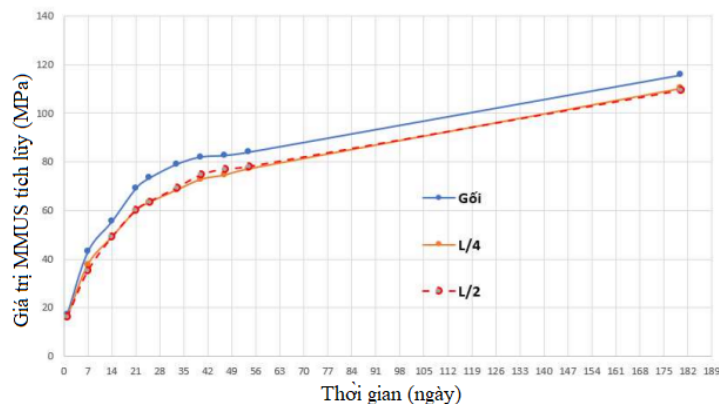
Bảng 3. Mất mát ứng suất theo thời gian của cáp UST số 1 (MPa)

Số ngày	Gối (IR1)	$L/4$ (IIR1)	$L/2$ (IIR1)
1 ngày	17,3754	16,2131	16,0949
7 ngày	43,0445	37,824	34,869
14 ngày	55,4555	49,1515	48,659
21 ngày	69,0485	60,085	59,7501
25 ngày	73,3825	63,434	63,237
33 ngày	79,0955	68,556	68,95
40 ngày	82,0505	72,89	74,269
47 ngày	82,6415	74,663	76,633
54 ngày	84,0205	77,224	77,618
180 ngày	115,7375	110,32	108,941

Dựa vào Bảng 3 ta có biểu đồ MMUST tích lũy theo thời gian của tao cáp số 1 như trên Hình 13 và Hình 14.



Hình 13. Biểu đồ MMUST tích lũy theo thời gian của tao cáp số 1



Hình 14. Biểu đồ MMUST theo thời gian tại gối,  $L/4$  và  $L/2$  của cáp số 1

Biểu đồ Hình 13 và Hình 14 cho thấy, giá trị MMUST trong cáp DUL tăng dần theo thời gian, ở đầu dầm giá trị mất mát nhiều nhất và giảm dần về giữa nhịp. Các đường thể hiện MMUST có dạng song song, như vậy giá trị MMUST từ gối về giữa nhịp có xu thế giảm đều theo thời gian, MMUST

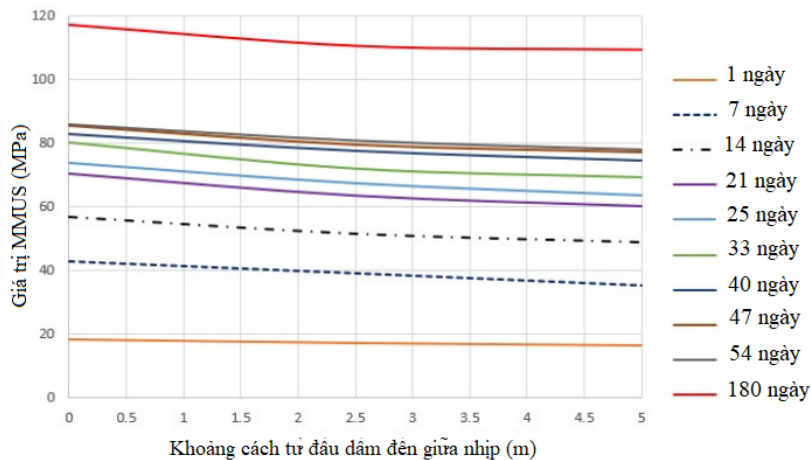


giảm từ gối đến  $L/2$  là 9,5%. Tốc độ MMUST có sự chênh lệch khá rõ rệt, trong khoảng thời gian 21 ngày MMUST tăng nhanh lên đến 270% ở  $L/4$ ,  $L/2$  và 297% ở gối. Từ ngày thứ 21 đến ngày thứ 54 giá trị MMUST vẫn tăng những với tốc độ nhỏ hơn bằng 21% đến 29%. Từ ngày 54 đến ngày 180 tăng thêm 37% đến 40%.

Bảng 4. Mất mát ứng suất trước theo thời gian của cáp DUL số 2 (MPa)

TT	Gối (IR2)	$L/4$ (IIR2)	$L/2$ (IIIR2)
1 ngày	18,2422	17,0799	16,2919
7 ngày	43,0445	39,203	35,263
14 ngày	56,736	51,614	49,053
21 ngày	70,329	63,434	60,1441
25 ngày	73,678	67,374	63,631
33 ngày	80,376	72,102	69,344
40 ngày	82,74	77,618	74,663
47 ngày	85,498	79,391	77,027
54 ngày	85,695	80,77	78,012
180 ngày	117,018	110,517	109,335

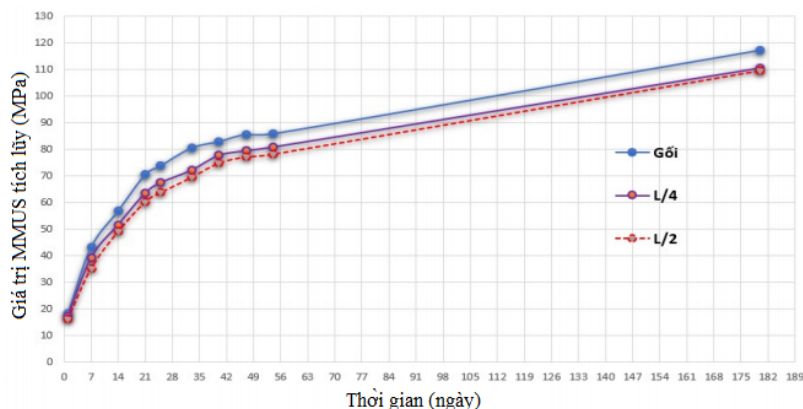
Dựa vào Bảng 4 ta có biểu đồ MMUS tích lũy theo thời gian của tao cáp số 2 như Hình 15 và Hình 16.



Hình 15. Biểu đồ MMUS tích lũy theo thời gian của tao cáp số 2

Biểu đồ Hình 15 và Hình 16 cho thấy, giá trị MMUST trong cáp DUL cũng tăng dần theo thời gian, ở đầu dầm giá trị mất mát nhiều hơn và giảm dần về giữa nhịp. Các đường thể hiện MMUST có dạng song song, thể hiện giá trị MMUS từ gối về giữa nhịp có xu thế giảm đều theo thời gian, MMUST giảm từ gối về  $L/4$  là 5%, giữa nhịp là 6%. Trong thời gian từ ngày đầu đến ngày thứ 21 sau khi cắt cáp, giá trị MMUS trong cáp tăng nhanh và có tốc độ lớn, giá trị tăng khoảng 270% đến 285%. Từ ngày thứ 21 đến ngày thứ 54 giá trị MMUST vẫn tăng những với tốc độ nhỏ hơn bằng 21% đến 29%. Từ ngày 54 đến ngày 180 tăng thêm 36% đến 40%.

Căn cứ kết quả đo đạc cho thấy biểu đồ MMUST do co ngót và từ biến trong dầm thí nghiệm (Hình 14, Hình 16) tương đồng với biểu đồ biến dạng của mẫu co ngót và từ biến (Hình 1, Hình 2). Giá trị MMUST do co ngót và từ biến tăng nhanh trong thời gian đầu và tốc độ giảm dần trong thời gian sau.



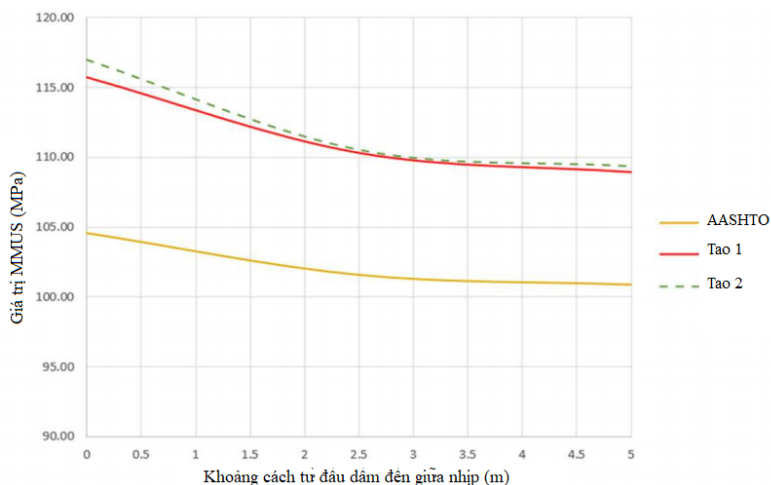
Hình 16. Biểu đồ MMUST theo thời gian tại gối,  $L/4$  và  $L/2$  của cấp số 2

#### 4.2. So sánh MMUST của dầm GPC thực nghiệm và tính toán theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017

Nghiên cứu đã tính toán MMUST của dầm thí nghiệm theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017 tại các điểm đầu dầm,  $1/4$  nhịp, và giữa nhịp để so sánh với kết quả đo đạc được thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả MMUST từ thực nghiệm và tính theo tiêu chuẩn (MPa)

	IIIR1	IIR1	IR1	IIIR2	IIR2	IR2
Giá trị đo thực nghiệm (MPa)	108,94	110,32	115,73	109,33	110,50	117,01
Giá trị tính toán theo AASHTO LRFD 2017 (MPa)	100,90	101,96	104,60	100,90	101,96	104,60



Hình 17. Biểu đồ so sánh MMUST theo chiều dài dầm giữa GPC thực nghiệm và tính toán theo tiêu chuẩn

Dựa vào Bảng 5 và Hình 17 chúng ta nhận thấy, MMUST trong cấp của thực nghiệm và tính toán theo tiêu chuẩn giống nhau đều giảm dần từ gối về vị trí giữa nhịp. So sánh giữa kết quả đo thực nghiệm với kết quả tính toán MMUST theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017, giá trị MMUST trong các tao cấp thực nghiệm lớn hơn 8,5% đến 11,5% so với tính toán.

Căn cứ vào kết quả trong Bảng 5 và Hình 17 cho thấy quá trình MMUST trong dầm GPC tương tự như trong dầm OPC và có thể sử dụng các công thức của AASHTO LRFD 2017 để tính toán MMUST do co ngót và từ biến cho dầm GPC dự ứng lực.

## 5. Áp dụng GPC cho công trình cầu

### 5.1. Số liệu mô hình cầu

Áp dụng các kết quả đề xuất vào thực tiễn cho công trình cầu bán lắp ghép, nhịp giản đơn dài 33 m, trong đó kết cấu lắp ghép tiết diện I dự ứng lực căng sau sử dụng GPC và bản mặt cầu sử dụng OPC đổ tại chỗ (Bảng 7). Cáp UST sử dụng loại có độ chùng thấp tảo 12,7 mm, theo tiêu chuẩn ASTM A416-96a cấp 270. Các thông số đầu vào của vật liệu thiết kế gồm: GPC, BTCT thường, cáp UST được thể hiện ở Bảng 6. Tiêu chuẩn thiết kế TCVN 11823-2017 với hoạt tải thiết kế là HL-93.

Kết quả tính toán sẽ được so sánh với kết cấu cầu tương tự nhưng thay GPC bằng OPC. Chỉ khác về mô đun đàn hồi, hệ số co ngót, từ biến của 2 loại vật liệu. So sánh kết quả thí nghiệm hệ số từ biến và co ngót của GPC với OPC tại thời điểm lớn hơn 150 ngày cho thấy giá trị từ biến và co ngót của GPC tương ứng lớn gấp 1,2 và 2 lần của OPC.

Bảng 6. Thông số vật liệu thiết kế

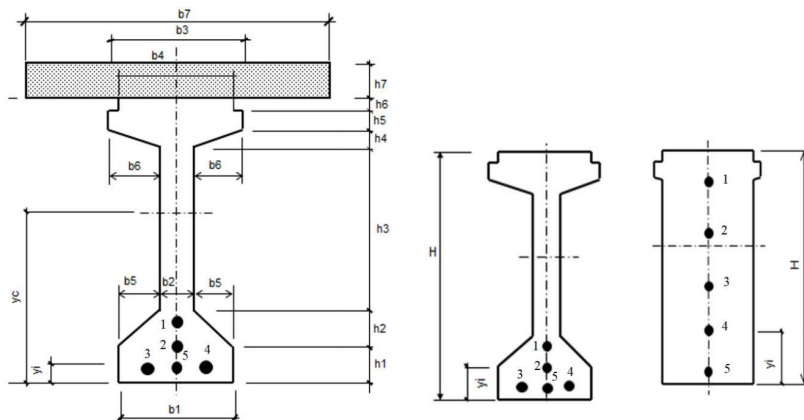
Vật liệu	Thông số tính toán	Đơn vị	Giá trị
Bê tông GPC cho dầm	Cường độ nén quy định của bê tông (28 ngày), $f'_c$	MPa	55
	Cường độ nén của bê tông lúc căng cáp, $f'_{ci}$	MPa	49,5
	Cường độ chịu kéo khi uốn, $f_r$	MPa	4,26
	Khối lượng riêng, $\gamma_c$	kN/m <sup>3</sup>	24,5
	Mô đun đàn hồi, $E_c$	GPa	35,7
Bê tông bản mặt cầu	Cường độ nén quy định của bê tông (28 ngày), $f'_{cb}$	MPa	30
	Cường độ chịu kéo khi uốn, $f_{rb}$	MPa	3,45
	Mô đun đàn hồi, $E_{cb}$	GPa	28,11
Cáp UST	Đường kính danh định 1 tảo, $D_p$	mm	12,7
	Diện tích danh định 1 tảo, $A_p$	mm <sup>2</sup>	98,7
	Cường độ chịu kéo, $f_u$	MPa	1860
	Giới hạn chảy, $f_{py}$	MPa	1674
	Mô đun đàn hồi, $E_p$	GPa	197

Các thông số cơ bản của cầu nhịp giản đơn bán lắp ghép dài 33 m được thể hiện trong Bảng 7.

Bảng 7. Các thông số cơ bản của cầu

STT	Thông số tính toán	Đơn vị	Giá trị
1	Chiều dài dầm	m	33
2	Chiều dài nhịp tính toán	m	32,2
3	Bề rộng cầu	m	17,5
4	Bề rộng lan can	m	0,5
5	Chiều rộng phần xe chạy	m	16,5
6	Số dầm chủ	dầm	7
7	Khoảng cách giữa các dầm	m	2,45
8	Số làn xe	làn	4

Mặt cắt ngang dầm I được thể hiện trong Hình 18. Các kích thước cơ bản của dầm tại mặt cắt đầu dầm và giữa nhịp được thể hiện trong Bảng 8.



Hình 18. Cấu tạo mặt cắt ngang dầm (trái) và bố trí cáp UST (phải)

Bảng 8. Kích thước cơ bản dầm tại tiết diện đầu dầm và giữa nhịp

Ký hiệu	Tên kích thước	Đầu dầm (m)	Giữa nhịp (m)
<b>Chiều rộng</b>			
b1	Chiều rộng đáy dầm	0,650	0,650
b2	Chiều dày sườn dầm	0,650	0,200
b3	Chiều rộng cánh trên	0,850	0,850
b4	Chiều rộng phần trên của cánh	0,650	0,650
b5	Chiều rộng phần dốc của đáy dầm	0,000	0,225
b6	Chiều rộng phần dốc của cánh trên	0,100	0,325
b7	Chiều rộng bản cánh hữu hiệu	2,450	2,450
<b>Chiều cao</b>			
h1	Chiều cao cánh dưới	0,250	0,250
h2	Chiều cao nách dưới	0,000	0,200
h3	Chiều cao sườn dầm	1,166	0,890
h4	Chiều cao nách trên	0,034	0,110
h5	Chiều cao cánh trên	0,120	0,120
h6	Chiều cao phần trên cánh	0,080	0,080
h7	Chiều cao bản mặt cầu	0,200	0,200
H	Chiều cao dầm	1,650	1,650
<b>Cao độ cáp dự ứng lực</b>			
y1	số 1	1,340	0,450
y2	số 2	1,065	0,260
y3	số 3	0,790	0,110
y4	số 4	0,515	0,110
y5	số 5	0,240	0,110

## 5.2. Kết quả tính toán

Dầm I thiết kế được chia thành 3 giai đoạn làm việc. Giai đoạn 1: chế tạo dầm, giai đoạn này chỉ có tải trọng là trọng lượng bản thân dầm chủ và 1 phần dầm ngang. Giai đoạn 2: lắp ghép dầm, tải

trọng gồm trọng lượng bê tông ướt bản mặt cầu, trọng lượng đầm ngang, trọng lượng của tấm đan. Giai đoạn 3: giai đoạn khai thác, tải trọng gồm trọng lượng lan can, lớp phủ và hoạt tải xe HL-93. Kết quả kiểm toán cho thấy cầu đầm liên hợp bán lắp ghép nhịp giản đơn dài 33 m, trong đó đầm lắp ghép tiết diện I dự ứng lực sử dụng GPC hoàn toàn đạt các yêu cầu của các trạng thái giới hạn.

### 5.3. Kết quả tính toán giá trị ứng suất còn lại trong cáp sau khi trừ đi các MMUS

Kết quả trong Bảng 9 cho thấy giá trị MMUST của GPC cao hơn của OPC và biểu đồ MMUST của cả hai loại vật liệu đều có dạng tương đồng nhau. Giá trị ứng suất còn lại của GPC nhỏ hơn và chênh so với OPC khoảng 2,7% ở đầu đầm và 1% ở giữa nhịp.

Bảng 9. Giá trị ứng suất còn lại trong cáp sau khi trừ các MMUS (MPa)

	Đầu đầm	Ls/8	Ls/4	3*Ls/8	Ls/2
GPC Cấp 1	1.120,828	1.115,417	1.127,39	1.148,006	1.149,97
GPC Cấp 2	1.121,13	1.116,50	1.129,24	1.150,62	1.153,39
GPC Cấp 3	1.121,76	1.118,28	1.132,16	1.154,66	1.158,61
GPC Cấp 4	1.127,25	1.119,43	1.132,78	1.154,34	1.159,49
GPC Cấp 5	1.129,44	1.125,92	1.141,20	1.165,15	1.173,79
OPC Cấp 1	1.151,20	1.142,86	1.146,59	1.156,10	1.152,29
OPC Cấp 2	1.151,51	1.143,95	1.148,45	1.158,71	1.155,70
OPC Cấp 3	1.152,13	1.145,73	1.151,37	1.162,76	1.160,92
OPC Cấp 4	1.157,63	1.146,88	1.151,99	1.162,44	1.161,81
OPC Cấp 5	1.159,82	1.153,37	1.160,40	1.173,25	1.176,11

## 6. Kết luận

Bài báo trình bày nguyên tắc thiết kế, chế tạo, bố trí thiết bị đo và kết quả thực nghiệm đo đặc mất mát ứng suất trước theo thời gian do co ngót và từ biến (bỏ qua ảnh hưởng một phần của chùng dãn) trong thời gian 6 tháng của cáp dự ứng lực trong đầm thí nghiệm dài 10,4 m, tại đầu đầm mất mát nhiều hơn ở giữa nhịp.

Giá trị mất mát ứng suất thực nghiệm lớn hơn giá trị tính theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017 nằm trong khoảng 8,5%-11,5% và đều tăng nhanh trong thời gian đầu, giảm trong thời gian sau.

Mất mát ứng suất do từ biến và co ngót khi sử dụng GPC có giá trị lớn hơn khi sử dụng OPC có cùng cường độ. Kết quả so sánh với kết cấu nhịp cầu dài 33 m cho thấy ứng suất còn lại chênh lệch nhỏ từ 1% đến 2,7%. Có thể sử dụng hệ số co ngót, từ biến của GPC áp dụng vào các công thức trong tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017 để tính mất mát ứng suất trước do co ngót trong đầm GPC dự ứng lực.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Xi măng Việt Nam (2024). *Sản lượng tiêu thụ xi măng kỳ vọng được phục hồi trong năm 2024*. Truy cập ngày 15 tháng 2 năm 2024.
- [2] DCC - Cục biến đổi khí hậu - Bộ Tài nguyên và Môi trường (2023). *COP28: Hội nghị toàn diện đầu tiên về tiến trình thực hiện Thỏa thuận Paris*. Truy cập ngày 15 tháng 12 năm 2023.
- [3] Davidovits, J. (1991). *Geopolymers: Inorganic polymeric new materials*. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8):1633–1656.
- [4] Tùng, P. T., Đạo, P. Q., Thuận, P. D., Thuận, N. V. (2018). Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của hàm lượng muối sulphate đến cường độ chịu nén của bê tông thường và bê tông Geopolymer. *Tạp chí Xây dựng*, 608:73–77.
- [5] Gourley, J. T. (2014). Geopolymers in Australia. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 50:102–110.



- [6] Hardjito, D., Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia.
- [7] Geopolymer Institute. *Visit to geopolymer concrete airport and eco-building*.
- [8] Wagners Concrete PTY LTD. *Global Change Institute (GCI) Building*.
- [9] Khan, D. S. I. (2021). *Mechanical performance of geopolymer pre-stressed railway sleepers*. *Materials Today: Proceedings*, 47:414–423.
- [10] Hung, T. V. (2017). *Nghiên cứu thành phần, đặc tính cơ lý của bê tông Geopolymer tro bay và các ứng dụng cho kết cấu Cầu hầm*. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Giao thông Vận tải.
- [11] Đạo, P. Q. (2021). *Nghiên cứu sự làm việc của dầm bê tông cốt thép sử dụng tro bay và xỉ lò cao làm chất kết dính geopolymer*. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [12] Hà, N. B., Bảo, N. Q., Quang, V. T. (2023). *Nghiên cứu ứng dụng bê tông geopolymer cho cầu dầm liên tục bê tông cốt thép dự ứng lực*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 17(2V): 32–41.
- [13] TCVN 3117: 2022. *Bê tông - Phương pháp xác định độ co*. Tiêu chuẩn Quốc gia, Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [14] ASTM C157/C157M-17. *Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete*.
- [15] ASTM C512-02. *Standard test method for creep of concrete in compression*.
- [16] AASHTO (2017). *AASHTO LRFD Bridge design specifications. Section 5: Concrete structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- [17] ASTM A416/416M-2012. *Standard specification for steel strand, uncoated seven-wire for prestressed concrete*.
- [18] Bê tông Xuân Mai (2023). *Kết quả thí nghiệm cường độ cấp 12,7*. Ngày 16 tháng 4 năm 2023.