Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, NUCE 2020. 14 (2V): 14–25

NGHIÊN CỨU LÝ THUYẾT VÀ THỰC NGHIỆM VỀ MÔ MEN KHÁNG NỨT CỦA DẦM GEOPOLYMER CỐT THÉP

Phạm Quang Đạo[a,*], Phạm Thanh Tùng[a]

[a]*Khoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng, số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 14/4/2020, Sửa xong 27/4/2020, Chấp nhận đăng 12/05/2020

Tóm tắt

Bê tông geopolymer (GPC) là bê tông sử dụng chất kết dính từ tro bay và xỉ lò cao, được hoạt hóa bằng dung dịch kiềm để thay thế xi măng. Đây là loại vật liệu mới có đặc tính kỹ thuật tốt và thân thiện với môi trường hơn so với bê tông xi măng truyền thống. Hiện nay tại Việt Nam có ít nghiên cứu cơ bản về đặc tính kỹ thuật của bê tông geopolymer cũng như nghiên cứu ứng dụng vật liệu này cho kết cấu xây dựng. Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất hệ số γ có xét đến biến dạng dẻo của bê tông vùng kéo khi tính toán mô men kháng nứt của dầm bê tông geopolymer cốt thép bằng việc sử dụng mô hình ứng suất - biến dạng của bê tông theo TCVN 5574:2018. Kết quả cho thấy hệ số γ được tính từ hệ số đàn hồi của bê tông chịu kéo lấy theo cường độ chịu nén của bê tông geopolymer. Kết quả nghiên cứu lý thuyết được kiểm chứng bởi một chương trình thí nghiệm trên 9 dầm bê tông geopolymer cốt thép do tác giả thực hiện cũng như với kết quả thí nghiệm trên 25 dầm bê tông của các nghiên cứu khác đã được công bố trên thế giới.

Từ khoá: dầm bê tông cốt thép; geopolymer; hệ số đàn hồi của bê tông chịu kéo; mô men kháng nứt.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON CRACKING MOMENT OF REINFORCED GEOPOLYMER CONCRETE BEAM

Abstract

Geopolymer concrete (GPC) uses an alternative binder that bases on a mixture of fly ash and ground blast furnace slag activated by alkaline solution as a placement of cement. This material shows excellent engineering performance and friendly to the environment in comparison to ordinary cement. Currently, in Vietnam, there is a modest number of fundamental researches on the geopolymer mechanical properties and application of this novel material in the building structures as well. The paper presents the study on the coefficient γ, that accounts for the plastic deformation in the tensile zone in the calculation of the cracking moment for reinforced GPC beams based on the stress-strain model of concrete in the current standard TCVN 5574:2018. It is shown that this coefficient depends on the elastic coefficient of the concrete in tension taken by the compressive class of GPC. The theoretical approach is verified by experimental works that consist of testing on the behaviour of 9 reinforced GPC beams by the author and also a series of experimental results of 25 reinforced concrete beams published by other researchers over the world.

Keywords: reinforced concrete beam; geopolymer; elastic coefficient of concrete in tensile; cracking moment.

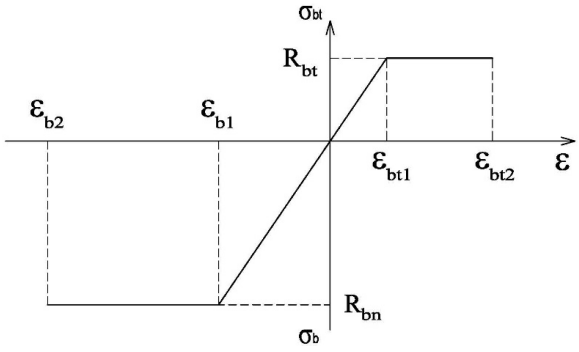
https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(2V)-02 © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Đặt vấn đề

Giá trị mô men kháng nứt M_{crc} theo tiêu chuẩn thiết kế và thực nghiệm thường có sự khác biệt do các yếu tố ảnh hưởng như cấp độ bền nén của bê tông và đặc trưng đàn hồi dẻo của bê tông khi chịu

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* daoccu@gmail.com (Đạo, P. Q.)

kéo. Theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574:2018 [1] và tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012 [2], mô men kháng nứt M_{crc} được xác định dựa trên giả thiết về quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông khi chịu kéo và nén như minh họa trong Hình 1.



Hình 1. Quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông

Mô men kháng nứt được tính theo công thức:

$$M_{crc} = R_{bt.ser} W_{pl} \tag{1}$$

trong đó W_{pl} là mô men kháng đàn hồi dẻo của tiết diện dầm:

$$W_{pl} = \gamma W_{red} \tag{2}$$

với W_{red} là mô men kháng đàn hồi của tiết diện; γ là hệ số xét đến biến dạng dẻo của bê tông vùng kéo phụ thuộc vào đặc trưng biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo của bê tông. Đối với bê tông thường, TCVN 5574:2018 quy định lấy $\gamma = 1{,}3$ đối với dầm có tiết diện chữ nhật và chữ T [1].

Nếu lấy $\gamma = 1{,}0$, bê tông được xem như vật liệu đàn hồi. Như vậy, với việc lựa chọn hệ số $\gamma = 1{,}3$, không phụ thuộc vào cấp cường độ bê tông (đến B100), TCVN 5574:2018 đã giảm mô men kháng nứt 25% so với TCVN 5574:2012, cho thấy cần có những phân tích, đánh giá để đảm bảo độ tin cậy cần thiết và tính kinh tế.

Theo tiêu chuẩn EC2 [3], mô men kháng nứt được tính toán với cường độ chịu kéo dọc trục trung bình. Tại tiết diện trước khi nứt, ứng suất kéo trong bê tông bằng cường độ chịu kéo của bê tông, tương ứng với khả năng kháng nứt của tiết diện [4], mô men kháng nứt của tiết diện được xác định như sau:

$$M_{crc} = f_{ctm} \frac{I_{red}}{y_t} \tag{3a}$$

trong đó cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông $f_{ctm} = 0{,}3 f_{ck}^{2/3}$ với bê tông < C50/60 (f_{ck} cường độ đặc trưng về nén của bê tông); I_{red} là mô men quán tính quy đổi của tiết diện; y_t là khoảng cách từ mép chịu kéo ngoài cùng đến vị trí trục trung hòa của tiết diện quy đổi.

Theo tiêu chuẩn ACI 318 [4], biến dạng dẻo của bê tông vùng kéo được xét tới thông qua cường độ chịu kéo uốn của bê tông f_r thay vì sử dụng trực tiếp cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông. Khi tiết diện chưa xuất hiện khe nứt, sử dụng mômen quán tính của tiết diện nguyên I_g bỏ qua ảnh hưởng của diện tích tiết diện cốt thép. Khi đó, mômen kháng nứt M_{cr} được tính theo công thức:

$$M_{cr} = \frac{I_g f_r}{y_t} \tag{3b}$$

trong đó y_t là khoảng cách từ mép chịu kéo ngoài cùng đến đến trục trung hòa của tiết diện quy đổi; f_r là cường độ chịu kéo uốn của bê tông, $f_r = 0{,}62\sqrt{f_c'}$ MPa.

Bê tông geopolymer (GPC) là bê tông sử dụng chất kết dính từ tro bay, xỉ lò cao được hoạt hóa dung dịch kiềm để thay thế xi măng [5]. Hardjito và Rangan [6] nghiên cứu chế tạo bê tông GPC từ tro bay (có hàm lượng can xi thấp) được hoạt hóa trong môi trường kiềm, đã chỉ ra rằng bê tông GPC có cường độ chịu kéo tốt hơn so với của bê tông xi măng thường. Bảng 1 cho thấy giá trị cường độ kéo thực nghiệm của bê tông GPC so với giá trị được tính toán theo tiêu chuẩn EC2 và ACI 318 áp dụng cho bê tông thường.

Bảng 1. Cường độ kéo ép chẻ bê tông GPC [5]

Tên mẫu	Cường độ nén trung bình (MPa)	Cường độ chịu kéo ép chẻ trung bình (MPa)	Cường độ chịu kéo ép chẻ trung bình theo [3] (MPa)	Cường độ chịu kéo uốn trung bình theo [4] (MPa)
23	89	7,43	5,62	5,90
24	68	5,52	4,60	5,15
25	55	5,45	3,91	4,64
26	44	4,43	3,27	4,15

Ngoài ra, khả năng chống nứt của dầm GPC cốt thép cũng được nghiên cứu thực nghiệm trên thế giới. Sumajouw và Rangan [7] thí nghiệm 12 nhóm dầm GPC cốt thép (mỗi nhóm gồm 3 dầm, chất kết dính của bê tông là tro bay hoạt hóa bởi dung dịch kiềm); dầm có tiết diện 200 × 300 mm, chiều dài 3300 mm cho 3 cấp cường độ bê tông 40, 50, 75 MPa với 4 hàm lượng cốt thép khác nhau, lần lượt là 0,64%; 1,18%; 1,84%; 2,69%. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô men kháng nứt thực nghiệm lớn hơn giá trị tính toán theo ACI [4], mô men kháng nứt tăng khi cường độ chịu nén tăng (do cường độ chịu kéo tăng) và ảnh hưởng của cốt thép dọc làm tăng khả năng chống nứt là rất ít. Điều này là tương tự như đối với bê tông thường. Giá trị mô men kháng nứt của các dầm được nêu trong Bảng 2.

Bảng 2. Mô men kháng nứt của dầm GPC cốt thép [6]

Tên dầm	Cường độ chịu nén bê tông (MPa)	Cường độ kéo uốn trung bình theo [4] (MPa)	Hàm lượng cốt dọc (%)	Mô men nứt thực nghiệm $M_{crc,exp}$ (kNm)	Mô men nứt tính toán $M_{crc,cal}$ (kNm)
GBI-1	37	3,65	0,64	13,40	10,39
GBI-2	42	3,89	1,18	13,55	10,86
GBI-3	42	3,89	1,84	13,50	10,61
GBI-4	37	3,65	2,69	14,30	9,66
GBII-1	46	4,07	0,64	15,00	11,65
GBII-2	53	4,37	1,18	16,20	12,27
GBII-3	53	4,37	1,84	16,65	12,02
GBII-4	46	4,07	2,69	16,05	10,91
GBIII-1	76	5,23	0,64	19,00	15,13
GBIII-2	72	5,09	1,18	20,00	14,43
GBIII-3	72	5,09	1,84	21,00	14,18
GBIII-4	76	5,23	2,69	19,90	14,39

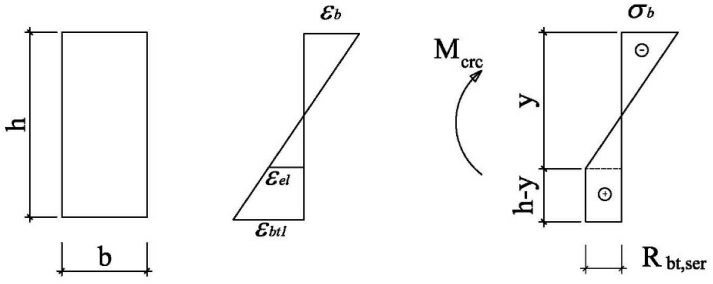
Hiện nay, các nghiên cứu về ứng xử của dầm GPC cốt thép chủ yếu nhận định rằng vật liệu và kết cấu bê tông GPC có đặc tính tương tự bê tông thường. Trong khi đó, các nghiên cứu trong nước mới

chủ yếu ở giai đoạn bắt đầu chế tạo thử nghiệm vật liệu và chưa có các nghiên cứu về kết cấu chịu lực bằng bê tông GPC. Bài báo này sẽ trình bày nghiên cứu đề xuất tính toán mô men kháng nứt theo tiêu chuẩn hiện hành của Việt nam TCVN 5574:2018 để áp dụng cho dầm bê tông GPC thông qua việc xác định hệ số γ xét đến biến dạng dẻo của bê tông vùng kéo theo đặc trưng cơ học của bê tông GPC từ thực nghiệm. Đồng thời, đề xuất này cũng được kiểm chứng bằng kết quả nghiên cứu thực nghiệm của 9 dầm được chế tạo từ chính vật liệu bê tông GPC này.

2. Xác định hệ số xét đến biến dạng dẻo của bê tông vùng kéo

2.1. Xét cấu kiện bê tông (không cốt thép) với tiết diện chữ nhật

Sơ đồ ứng suất biến dạng của tiết diện trước khi nứt để xác định M_{crc} lấy theo TCVN 5574:2018 [1] được biểu diễn trong Hình 2.



(a) Tiết diện (b) Biến dạng (c) Ứng suất

Hình 2. Mô hình ứng suất - biến dạng của tiết diện bê tông trước khi nứt

Từ Hình 2, ta có phương trình cân bằng tổng các lực dọc trục của cấu kiện như sau:

$$0{,}5\sigma_b by - 0{,}5R_{bt,ser}by - R_{bt,ser}b(h-y) = 0 \tag{4a}$$

hoặc

$$(1-\nu_{bt})\eta^2 + 2\nu_{bt}\eta - 2\nu_{bt} = 0 \tag{4b}$$

trong đó $\eta = \dfrac{y}{h}$; $\nu_{bt} = \dfrac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{bt2}}$; ν_{bt} là hệ số đàn hồi của bê tông chịu kéo; $\nu_{bt} = \dfrac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{bt2}} = \dfrac{\varepsilon_{el}}{0{,}00015}$; Giá trị ν_{bt} được tính với $\varepsilon_{el} = \dfrac{R_{bt,m}}{E_b}$; $R_{bt,m}$ là cường độ chịu kéo trung bình của bê tông.

Nghiệm của phương trình bậc hai (4b) là:

$$\eta = \frac{-\nu_{bt} + \sqrt{-\nu_{bt}^2 + 2\nu_{bt}}}{1-\nu_{bt}} \tag{5}$$

Phương trình cân bằng theo mô men cho tiết diện theo trạng thái ứng suất trên Hình 2(c), ta có:

$$M_{crc} = R_{bt,ser}\frac{bh^2}{6}(0{,}5k\eta(\eta+3) - 0{,}5\eta(3-\eta)) = \gamma R_{bt,ser}W_0 \tag{6}$$

trong đó $W_0 = \dfrac{bh^2}{6}$; $k = \dfrac{\sigma_b}{R_{bt,ser}} = \dfrac{\eta - \nu_{bt}}{\nu_{bt} - \nu_{bt}\eta}$; $R_{bt,ser}$ là cường độ chịu kéo của bê tông ở trạng thái giới hạn thứ II và

$$\gamma = 0{,}5k\eta(\eta+3) - 0{,}5\eta(3-\eta) \tag{7}$$

Từ (7) có thể thấy giá trị γ phụ thuộc vào hệ số đàn hồi của bê tông vùng kéo. Bảng 3 trình bày kết quả tính toán của hệ số γ cho các cấp độ nén B của bê tông.

Từ Bảng 3 nhận thấy việc chọn hệ số $\gamma = 1{,}3$ trong công thức (2) của TCVN 5574:2018 để tính Wpl có thể dẫn đến sai số đáng kể khi sử dụng các loại bê tông khác nhau. Do đó, nhóm tác giả đề xuất lấy hệ số γ như sau:

$\gamma = 1{,}55$ với bê tông có cấp độ bền nén đến B35;

$\gamma = 1{,}45$ với bê tông có cấp độ bền nén từ B40 đến B55;

$\gamma = 1{,}30$ với bê tông cường độ cao đến B100. (8)

Trong thực tế, các cấu kiện chịu uốn thường sử dụng bê tông có cấp độ bền không quá lớn nên việc đề xuất xác định hệ số γ theo cấp độ bền nén B có ý nghĩa kinh tế.

Bảng 3. Giá trị γ theo cấp độ bền nén B của bê tông

B	ν_{bt}	η	γ
B15	0,39	0,661	1,68
B20	0,42	0,680	1,64
B25	0,44	0,695	1,61
B30	0,46	0,707	1,59
B35	0,48	0,721	1,56
B40	0,50	0,731	1,54
B45	0,52	0,744	1,51
B50	0,55	0,763	1,47
B55	0,57	0,774	1,45
B60	0,60	0,788	1,42
B70	0,61	0,797	1,41
B80	0,65	0,817	1,37
B90	0,68	0,836	1,33
B100	0,70	0,843	1,30

2.2. *So sánh với kết quả thực nghiệm của các nghiên cứu trước đây*

Bảng 4. So sánh mô men kháng nứt M_{crc}

Nguồn trích dẫn	Tiết diện dầm (mm)	Bê tông	Cốt thép	Bố trí thép	M_{crc} thí nghiệm (kNm)	M_{crc} [1] (kNm)	M_{crc} đề xuất (kNm)
[8]	120×204 118×202 120×202	B22,5 $R_{bt,ser}$ = 1,5 MPa E_b= 28500 MPa	A-III E_s = 205000 MPa	2ϕ8, a = 25 mm 2ϕ8 + 2ϕ8 $a = a'$ = 25 mm 2ϕ12 + 2ϕ8, $a = a'$ = 25 mm	2,735 2,169 2,574	1,74 1,73 1,90	2,06 2,05 2,25
[9]	151×273	B32,5 $R_{bt,ser}$ = 1,81 MPa E_b = 24700 MPa	A-IV E_s = 212000 MPa	2ϕ12 + 2ϕ6 $a = a'$ = 30 mm	7,72	5,0	5,92
	148×275	B32,5 $R_{bt,ser}$ = 1,81 MPa E_b = 24700 MPa	A-IV E_s = 195000 MPa	2ϕ12 + 2ϕ6 $a = a'$ = 30 mm	7,64	4,94	5,85
	150×275	B32,5 $R_{bt,ser}$ = 1,94 MPa E_b = 24200 MPa	A-IV E_s = 194000 MPa	2ϕ12 + 2ϕ6 $a = a'$ = 20 mm	7,8	5,39	6,39
	148×281	B32,5 $R_{bt,ser}$ = 1,94 MPa E_b = 24200 MPa	A-IV E_s = 208000 MPa	2ϕ12 + 2ϕ6 $a = a'$ = 30 mm	7,63	5,57	6,60
	150×281	B32,5 $R_{bt,ser}$ = 1,94 MPa E_b = 24200 MPa	A-IV E_s = 191000 MPa	2ϕ12 + 2ϕ6 $a = a'$ = 30 mm	7,6	5,80	6,87
	150×273	B35 $R_{bt,ser}$ = 2,12 MPa E_b = 30800 MPa	A-IV E_s = 205000 MPa	2ϕ18 + 2ϕ6 $a = a'$ = 20 mm	7,85	6,47	7,66
	149×275	B35 $R_{bt,ser}$ = 2,12 MPa E_b = 30800 MPa	A-IV E_s = 198000 MPa	2ϕ18 + 2ϕ6 $a = a'$ = 30 mm	7,8	6,28	7,44
[10]	100×100	B40 $R_{bt,ser}$ = 2,36 MPa E_b = 33152 MPa	A-III E_s = 213000 MPa	2ϕ8 a = 20 mm	0,66	0,57	0,64
[11]	120×220	B25 $R_{bt,ser}$ = 2,01 MPa E_b = 30000 MPa	A-III E_s = 200000 MPa	2ϕ10 a = 30 mm	3,38	2,85	3,38
[12]	150×150	B25 $R_{bt,ser}$ = 2,19 MPa E_b = 30000 MPa	A-III E_s = 200000 MPa	2ϕ12 a = 16 mm	2,50	1,85	2,19

Bảng 4 so sánh mô men kháng nứt M_{crc} theo các thí nghiệm dầm bê tông cốt thép và kết quả tính theo TCVN 5574:2018 với $\gamma = 1{,}3$ và với hệ số đề xuất γ theo (8).

Từ Bảng 4 có thể thấy mô men kháng nứt M_{crc} tính với hệ số γ được đề xuất theo (8) có kết quả gần với kết quả thực nghiệm hơn và vẫn thiên về an toàn. Cụ thể, giá trị trung bình và độ biến động của tỷ số mô men kháng nứt thực nghiệm so với giá trị theo [1] hoặc đề xuất theo (8) trong Bảng 5.

Bảng 5. Đánh giá tỷ số các giá trị mô men kháng nứt M_{crc}

Nguồn trích dẫn (cấp độ bền)	So với giá trị theo [1]		So với đề xuất theo (8)		Ghi chú
	Trung bình	Hệ số biến động	Trung bình	Hệ số biến động	
[8] (B22,5)	1,39	0,120	1,18	0,120	3 dầm
[9] (B32,5)	1,38	0,098	1,17	0,098	6 dầm
[10] (B40)	1,16		1,03		Số liệu đã tính trung bình
[11] (B25)	1,19		1,00		
[12] (B25)	1,35		1,14		

2.3. So sánh với kết quả tính toán theo mô hình phi tuyến

Trong [13] sử dụng mô hình phi tuyến trong với mô hình ứng suất biến dạng 2 và 3 đoạn thẳng [1] để tính toán mô men kháng nứt của tiết diện dầm theo quy trình tính lặp mà không sử dụng công thức gần đúng (2).

Các thông số của tiết diện dầm: b = 12 cm, h = 18 cm, $R_{bt,ser}$ = 2,2 MPa , E_b = 30700 MPa, diện tích cốt dọc chịu kéo và chịu nén là 1,57 cm^2 (A-IV, E_s = 212000 MPa). Kết quả tính toán được trình bày trong Bảng 6.

Bảng 6. So sánh mô men kháng nứt M_{crc} theo lý thuyết

Mô men kháng nứt	Mô hình 2 đoạn thẳng	Mô hình 3 đoạn thẳng	Mô hình đề xuất
M_{crc} (KNm)	2,68	2,58	2,22

Từ Bảng 6 cho thấy mô men kháng nứt tính với hệ số γ đề xuất có gần kết quả theo mô hình ứng suất biến dạng sử dụng 3 đoạn thẳng. Bên cạnh đó, việc không phải sử dụng quy trình tính lặp cho phép người sử dụng dễ dàng tính toán một cách nhanh chóng, thuận tiện.

3. Nghiên cứu thực nghiệm khả năng kháng nứt của dầm bê tông GPC cốt thép

Để kiểm chứng đề xuất về hệ số γ đề xuất trong biểu thức (8), nhóm tác giả đã thực hiện một chương trình thực nghiệm trên 9 dầm bê tông GPC cốt thép tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định Công trình - Trường Đại học Xây dựng vào tháng 5-6/2019. Với mục đích là đánh giá ứng xử của dầm bê tông GPC cốt thép trong đó có việc kiểm chứng khả năng kháng nứt của dầm, nội dung chính của chương trình thực nghiệm được trình bày trong các mục sau.

3.1. Vật liệu thí nghiệm

Bê tông GPC được chế tạo từ chất kết dính là tro bay (FA), xỉ lò cao (FS) trong nước được hoạt hóa trong môi trường kiềm thay thế xi măng [14]. Cấp phối vật liệu và kết quả thí nghiệm các đặc trưng cơ lý của mẫu bê tông GPC được trình bày trong Bảng 7 và Bảng 8.

Bảng 7. Thành phần cấp phối của bê tông GPC (1 m^3)

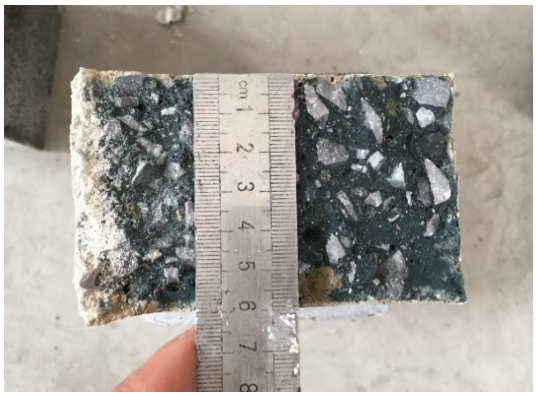
Cấp phối	Tro bay (kg)	Xỉ lò cao (kg)	Đá 0,5×1 (kg)	Cát (kg)	Nước (lít)	Chất hoạt hóa - AA (kg)	AA/(FA+FS) (%)
M	210	210	1213	626	189	33,6	8

Bảng 8. Tổng hợp số liệu thí nghiệm mẫu vật liệu bê tông GPC

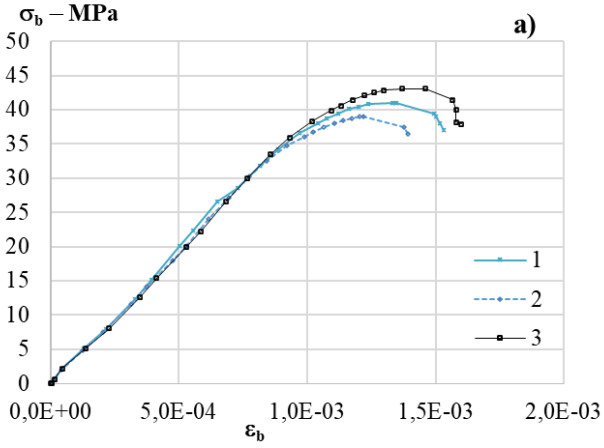
TT	Loại thí nghiệm	Kích thước mẫu (mm)	Số mẫu	Giá trị trung bình (MPa)	Hệ số biến động
1	Cường độ chịu nén mẫu trụ TCVN 3118:1993 [15]	Mẫu trụ D×H = 150×300	6	38,25	0,025
2	Mô đun đàn hồi bê tông ASTM C469 [16]	Mẫu trụ D×H = 150×300	3	32022	0,031
3	Cường độ chịu kéo uốn TCVN 3119:1993 [17]	Mẫu lăng trụ 100×100×400	12	5,03	0,071
4	Cường độ chịu kéo dọc trục [18]	Mẫu lăng trụ 100×100×400 (tiết diện khảo sát 60×100)	6	2,92	0,060



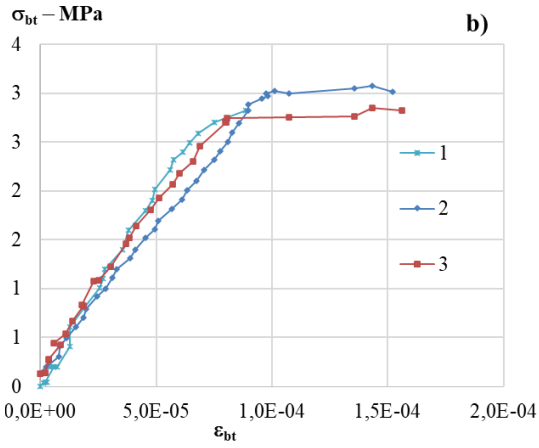
Hình 3. Mẫu kéo dọc trục



Hình 4. Mặt cắt ngang mẫu kéo dọc trục



(a) Khi chịu nén



(b) Khi chịu kéo

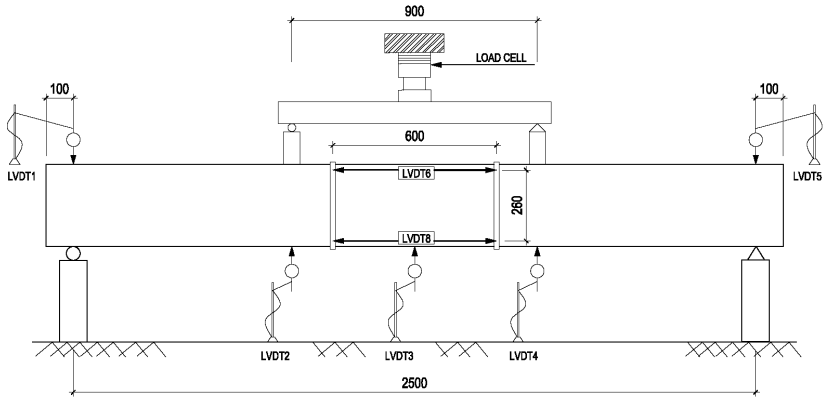
Hình 5. Biểu đồ ứng suất – biến dạng của bê tông

Quá trình thí nghiệm các mẫu cơ bản vật liệu bê tông chịu kéo dọc trục được mô tả trong Hình 3 và 4. Biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng khi nén và kéo mẫu bê tông như Hình 5.

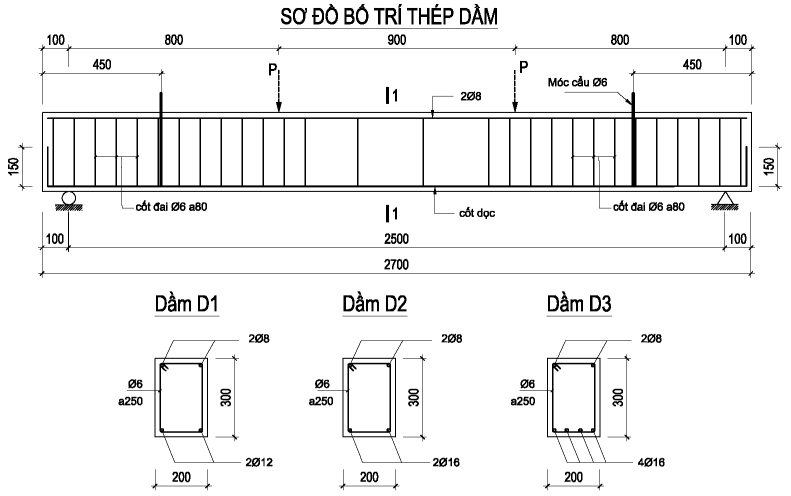
Tính toán hệ số đàn hồi của bê tông geopolymer từ kết quả thực nghiệm: Với kết quả cường độ nén trung bình mẫu trụ là 38,25 MPa, quy đổi sang mẫu vuông (nhân với 1,2 theo TCVN3118:1993) là 45,9 MPa, tương đương cấp độ bền B35 (cường độ đặc trưng của bê tông GPC, $R_{b,ch}$ = 35,7 MPa). Từ Bảng 7, với $\varepsilon_{el} = \dfrac{R_{bt,m}}{E_b}$ = 0,00009; ta có: $\nu_{bt} = \dfrac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{bt2}}$ = 0,6. Thay vào công thức (5) và (7) ta có γ = 1,42 (8), Giá trị này có thể chọn theo γ = 1,45 với (8a) với sai số không đáng kể.

3.2. Bố trí thí nghiệm dầm

Dầm thí nghiệm có chiều dài hình học 2700 mm (nhịp chịu tải 2500 mm), tiết diện dầm $b \times h$ = 200 × 300 mm. Dầm được gia tải bằng 2 lực tập trung P cách nhau 900 mm như Hình 6. Các dầm thí nghiệm gồm 3 nhóm có hàm lượng thép dọc chịu kéo khác nhau (nhóm dầm D1: ít cốt thép, nhóm dầm D2: lượng cốt thép trung bình, nhóm dầm D3: nhiều cốt thép). Kích thước và bố trí cốt thép dọc, thép đai như trên Hình 7. Thông số về lượng thép và đặc trưng cơ học của mỗi nhóm dầm nêu trong Bảng 9.



Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm



Hình 7. Cốt thép dầm

Bảng 9. Thông số cốt thép các dầm thí nghiệm

Nhóm	Ký hiệu mẫu dầm	Cốt thép dọc chịu kéo	Hàm lượng cốt thép	Giới hạn chảy cốt thép (MPa)	Mô đun đàn hồi cốt thép (MPa)
1	D1-1, D1-2, D1-3	2ϕ12	0,41%	356,45	205500
2	D2-1, D2-2, D2-3	2ϕ16	0,74%	415,66	202500
3	D3-1, D3-2, D3-3	2ϕ16	1,48%	415,66	202500

3.3. Quá trình thực nghiệm và xác định mô men kháng nứt

a. Nội dung đo đạc và quan sát thí nghiệm

Mục tiêu đánh giá ứng xử của dầm khi chịu uốn, các đại lượng được đo đạc, quan sát bởi các thiết bị, dụng cụ bao gồm:

(i) Lực gia tải: bằng kích thủy lực gắn với hệ khung và lực kích được đo bằng đầu đo Load cell.

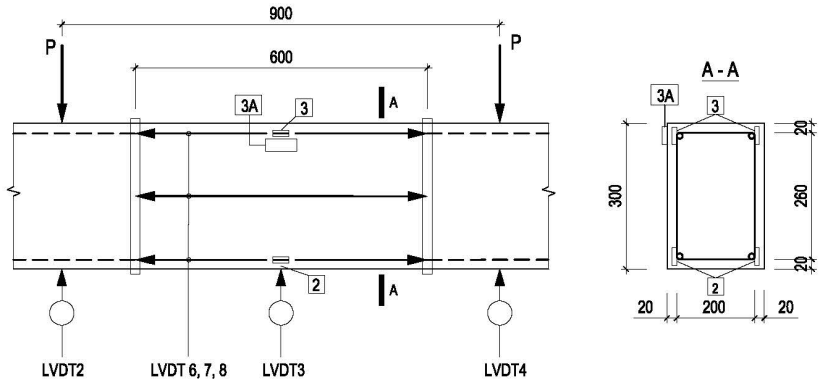
(ii) Chuyển vị đứng của dầm tại các điểm: 5 thiết bị đo chuyển vị (LVDT), được đặt thẳng đứng để đo chuyển vị tại các tiết diện chính giữa dầm, vị trí đáy dầm phía dưới 2 lực tập trung và mặt trên của dầm tại 2 gối tựa.

(iii) Đo độ cong trung bình trên đoạn uốn thuần túy (khoảng đo 600 mm, tại chính giữa nhịp): 3 LVDT, được đặt nằm ngang mặt bên dầm để đo độ co ngắn và giãn dài các thớ trên tiết diện của dầm tại 3 cao độ: cốt thép chịu kéo, trục trung hòa tiết diện ban đầu, cốt thép chịu nén.

(iv) Đo biến dạng cốt thép dọc chịu kéo, cốt dọc chịu nén và bê tông vùng nén: bằng phiến điện trở Strain gauges, sơ đồ lắp đặt tem đo biến dạng dầm, được dán vào cốt thép chịu kéo và cốt thép chịu nén, bề mặt bê tông dầm (mặt bên).

Vị trí dán Strain gauges với cốt thép chịu kéo và cốt thép chịu nén: Tem biến dạng được lắp đặt trên 4 thanh cốt thép nằm ở góc cốt đai tại mặt cắt chính giữa dầm. Biến dạng đo được cho phép tính toán ứng suất trong cốt thép theo các cấp tải trọng. Kết quả đo liên tục về biến dạng của cốt thép cho biết các giá trị đặc trưng về biến dạng của cốt thép và bê tông trên cùng một tiết diện ở các trạng thái dầm bắt đầu nứt, cốt thép bắt đầu chảy dẻo và khi dầm bị phá hoại.

Vị trí dán cảm biến trên bề mặt bê tông: Cảm biến đo biến dạng của bê tông được gắn trên bề mặt bê tông ở mặt bên dầm tại cao trình của cốt thép chịu nén. Giá trị biến dạng đo được dùng để đối



Hình 8. Sơ đồ lắp đặt cảm biến đo biến dạng của cốt thép chịu kéo, nén

chiếu và tính toán ứng suất nén trong bê tông và đánh giá biến dạng của bê tông khi bê tông bị nén vỡ do ứng suất nén.

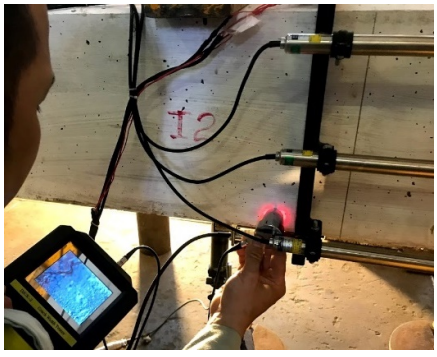
Chủng loại tem biến dạng: Strain gauges đo biến dạng cốt thép KFGS-5-120-C1 đo biến dạng cốt thép, chiều dài 5 mm, Strain gauges đo biến dạng bê tông PL-60-11 dạng lá, đo biến dạng một phương, chiều dài 60 mm, điện trở 120 Ω.

b. Quá trình gia tải và đo đạc

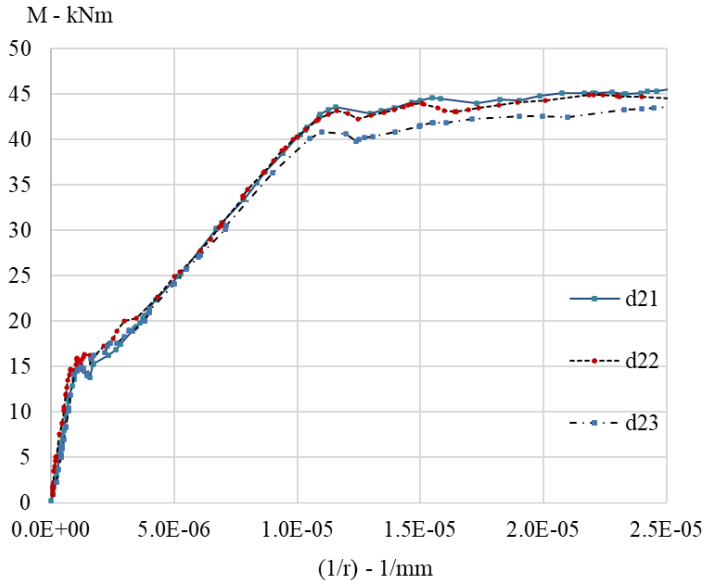
Sau khi gia tải thử để kiểm tra sự làm việc của hệ giá thí nghiệm và các thiết bị đo như Hình 9, quá trình gia tải cho mỗi dầm thí nghiệm được thực hiện thành 3 giai đoạn chính [19]: (i) từ khi bắt đầu đến cấp tải trọng dự kiến gây nứt; (ii) giai đoạn mở rộng vết nứt cho đến khi cốt thép bắt đầu chảy dẻo; (iii) giai đoạn còn lại đến khi dầm bị phá hoại. Ở cấp tải trọng dự kiến gây nứt, tốc độ tăng tải duy trì rất chậm và kết hợp quan sát hình thành khe nứt đầu tiên (Hình 10). Tải trọng tại thời điểm xuất hiện khe nứt đầu tiên sẽ ứng với mô men kháng nứt của dầm. Biểu đồ mô men theo độ cong của dầm tại tiết diện chính giữa dầm vẽ trên Hình 11 (nhóm dầm D2).



Hình 9. Hình ảnh thí nghiệm dầm



Hình 10. Thiết bị soi và đo bề rộng khe nứt



Hình 11. Biểu đồ Tải trọng (mô men) – Độ cong $(1/r)$ thực nghiệm

c. Phương pháp xác định mô men kháng nứt thực nghiệm

Khi tải trọng thí nghiệm tăng dần, biến dạng và ứng suất kéo trong bê tông ở thớ ngoài cùng tăng lên, khi biến dạng bê tông vượt qua biến dạng giới hạn ε_{bt1} thì ứng suất kéo trong bê tông đạt đến $R_{bt,ser}$ và biến dạng trong bê tông tiếp tục tăng cho tới khi đạt biến dạng giới hạn ε_{bt2}, sau đó dầm sẽ bắt đầu nứt. Trạng thái xảy ra nứt là thời điểm xuất hiện của khe nứt đầu tiên, thông thường phát hiện được bằng mắt thường và đo đạc bằng thiết bị đo bề rộng khe nứt nhỏ nhất cỡ 0,01 mm. Ngoài ra, với các số liệu đo đạc được, có thể kiểm chứng sự hình thành khe nứt đầu tiên khi ứng suất trong cốt thép dọc chịu kéo có sự biến đổi tăng đột ngột hoặc biểu đồ tải trọng - độ cong bắt đầu có sự thay đổi độ dốc. Sau khi phân tích và tổng hợp số liệu, kết quả mô men kháng nứt thực nghiệm được xác định và so sánh giá trị tính theo TCVN 5574:2018 với γ = 1,42 được trình bày trong Bảng 10.

Bảng 10. So sánh mô men kháng nứt M_{crc} bê tông GPC

Dầm	Cường độ bê tông (MPa)	Hàm lượng thép dọc	M_{crc} thí nghiệm (kNm)	M_{crc} [1] (kNm)	M_{crc} đề xuất theo (8) (kNm)
D1-1 D1-2 D1-3	$R_{bt,ser}$ = 2,92 $R_{b,ch}$ = 35,7	0,41%	13,73 13,42 14,02	12,18	13,30
D2-1 D2-2 D2-3	$R_{bt,ser}$ = 2,92 $R_{b,ch}$ = 35,7	0,74%	14,81 16,33 14,88	12,79	13,97
D3-1 D3-2 D3-3	$R_{bt,ser}$ = 2,92 $R_{b,ch}$ = 35,7	1,48%	16,32 16,52 16,04	14,16	15,47

Bảng 11. Đánh giá tỷ số các giá trị mô men kháng nứt M_{crc} dầm GPC

Nhóm dầm	Mô men nứt thực nghiệm trung bình (kNm)	So với giá trị theo [1]		So với đề xuất theo (8)	
		Trung bình	Hệ số biến động	Trung bình	Hệ số biến động
D1	13,72	1,13	0,025	1,03	0,023
D2	15,34	1,20	0,067	1,10	0,061
D3	16,29	1,15	0,017	1,05	0,016

Từ kết quả thực nghiệm cho thấy: các đặc trưng cơ học xác định bằng thực nghiệm của vật liệu bê tông GPC và giá trị mô men nứt của 9 mẫu dầm rất ổn định. Tỷ số giữa mô men kháng nứt thực nghiệm và giá trị đề xuất của các nhóm dầm D1, D2, D3 được xác định lần lượt là 1,03; 1,10; 1,05 (Bảng 11). Hệ số biến động của tỷ số này tính chung cho cả 9 dầm là 0,042. Như vậy, giá trị thực nghiệm mô men kháng nứt phù hợp với giá trị tính toán theo công thức đề xuất với hệ số γ = 1,42. Kết quả này cho thấy việc đề xuất tính hệ số γ theo (8) hoặc chọn theo (8a) cho dầm bê tông GPC là phù hợp hơn so với giá trị γ = 1,3 như trong TCVN 5574:2018 cho bê tông thường.

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất việc xác định hệ số γ có xét tới biến dạng dẻo của bê tông vùng kéo khi tính toán mô men kháng nứt của dầm bê tông geopolymer cốt thép dựa trên lý

thuyết về mô men kháng nứt của dầm bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn hiện hành của Việt Nam TCVN 5574:2018. Nghiên cứu về lý thuyết cho thấy giá trị của hệ số γ cần được điều chỉnh theo đặc trưng biến dạng của vật liệu phụ thuộc vào cấp độ bền nén của bê tông. Đề xuất về sự điều chỉnh của hệ số γ được kiểm chứng bởi một chương trình thực nghiệm trên 9 dầm bê tông geopolymer cốt thép do nhóm tác giả thực hiện và một số kết quả thí nghiệm của các tác giả khác đã công bố trên thế giới. Kết quả kiểm chứng phù hợp giữa lý thuyết và thực nghiệm thu được cho thấy sự điều chỉnh hệ số γ là cần thiết, phản ánh được đặc trưng cơ học của GPC, làm tăng độ tin cậy và tính kinh tế trong việc tính toán mô men kháng nứt của dầm bê tông geopolymer cốt thép. Đây là một trong những tiền đề cho các bước nghiên cứu tiếp theo về ứng dụng vật liệu mới thân thiện môi trường cho kết cấu công trình ở Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

[1] TCVN 5574:2018. *Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*. Bộ Khoa học – Công nghệ, Việt Nam.

[2] SP 63.13330.2012. *Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*. Liên bang Nga.

[3] EC2. *Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*. Liên minh Châu Âu.

[4] ACI 318-19. *Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*. Hoa Kỳ.

[5] Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *In: First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine. SRIBM*, Kiev State Technical University, 131–149.

[6] Hardjito, D., Rangan, B. V. (2005). *Research report GC1 on Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. Curtin University of Technology, Perth, Australia.

[7] Sumajouw, M. D. J., Rangan, B. V. (2006). *Research report GC3 on Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: reinforced beams and columns*. Curtin University of Technology, Perth, Australia.

[8] Toshin, D. S. (2009). *Nonlinear analysis of reinforced concrete flexural elements during unloading using deformation model*. Diss. PhD of tech. sciences, Togliatti, p. 132. (in Russian).

[9] Nuguzhinov, J. S. (1986). *Deformation and crack opening of reinforced concrete flexural elements under repeated loading*. Diss. PhD of tech. sciences, M.: NiiZhB, p. 197. (in Russian).

[10] Umansky, A. M. (2017). *Improving the methods of structural analysis of marine hydraulic structures from composite concrete using basalt-plastic reinforcement*. Diss. PhD of tech. sciences, Vladivostok: Eastern Federal University (FEFU), p. 173. (in Russian).

[11] Sharafutdinov, L. A. (2017). *Improving the methods for calculating the reinforcement of reinforced concrete flexural elements with steel fiber concrete using a nonlinear deformation model: Diss. agist, technician, and technologist*. Kazan: Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, p. 156. (in Russian).

[12] Arivalagan, S. (2012). Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beam Containing Steel Slag as Coarse Aggregate. *International Journal of Structural and Civil Engineering*, 1(1):1–10.

[13] Yeryshev, V. A. (2019). *Diagram method for calculating reinforced concrete elements*. Togliatti, from TSU. (in Russian).

[14] Đạo, P. Q. (2016). Nghiên cứu thực nghiệm đặc trưng cơ học của bê tông Geopolymer. *Hội nghị Khoa học công nghệ lần thứ 16*, Trường Đại học Xây dựng.

[15] TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén*. Bộ Xây dựng, Việt Nam.

[16] ASTM C469. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Hoa Kỳ.

[17] TCVN 3119: 1993. *Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ kéo uốn*. Bộ Xây dựng, Việt Nam.

[18] Nianxiang, X., Wenyan, L. (1989). Determining tensile properties of mass concrete by direct tensile test. *Materials Journal*, 86(3):214–219.

[19] Tùng, P. T., Đạo, P. Q., Tùng, Đ. V., Quang, N. V. (2018). Nghiên cứu sự hình thành và mở rộng khe nứt thẳng góc trong dầm bê tông cốt thép khi chịu tác dụng của tải trọng ngắn hạn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXD*, 12(2):3–10.