

## Mô hình dự đoán đường tải trọng-chuyển vị cho dầm ngăn bê tông geopolymer cốt thép

Nguyễn Thiện Thành<sup>1</sup>, Lê Anh Tuấn<sup>2\*</sup>, Trần Cao Thanh Ngọc<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Đại học Bách Khoa – ĐHQG Tp. Hồ Chí Minh

<sup>2</sup> Đại học Bách Khoa – ĐHQG Tp. Hồ Chí Minh

<sup>3</sup> Đại học Quốc tế – ĐHQG Tp. Hồ Chí Minh

### TỪ KHOẢ

Geopolymer  
Dầm ngăn  
Ứng xử cắt  
Giàn áo

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm giới thiệu mô hình nhằm dự đoán đường tải trọng – chuyển vị của dầm ngăn GC cốt thép. Một số nghiên cứu đã được thực hiện đối với xi măng hoạt tính kiềm hoặc bê tông geopolymer (GC) ở cấp độ vật liệu. Tuy nhiên, chưa có nhiều kết quả nghiên cứu về ứng xử của cấu kiện bê tông geopolymer cốt thép. Trong các quy chuẩn thiết kế, sự đóng góp của lực cắt đối với chuyển vị võng bị bỏ qua, điều này đánh giá thấp đáng kể đến chuyển vị tổng. Mặt khác, giá trị mô-đun đàn hồi thấp hơn của bê tông geopolymer ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu cắt của cấu kiện dầm.

### KEYWORDS

Geopolymer  
Deep beam  
Shear strength  
Truss model

### ABSTRACT

This study aims to develop a new tool to predict load-deflection curve for GC deep beams. Several studies have been conducted on alkaline activated cement or geopolymer concrete (GC) at the material level. However, there are few researches on the behavior of reinforced geopolymer concrete structures. In the design codes, the contribution of shear to deflection is neglected, which significantly underestimates the total deflection. On the other hand, a lower modulus of elasticity might affects the shear strength of geopolymer concrete structures.

## 1. Đặt vấn đề

### 1.1. Tình hình nghiên cứu trên thế giới

Bê tông Geopolymer là loại bê tông không sử dụng xi măng Portland thông thường mà là sản phẩm của phản ứng giữa dung dịch kiềm và các loại vật liệu có chứa hàm lượng lớn hợp chất silic và nhôm. Chất kết dính cũng có thể được gọi là một loại chất kết dính kiềm hoạt hóa.

Hầu hết các nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về bê tông geopolymer đều dừng ở tính chất cơ lý của loại vật liệu này. Một số đặc tính về cơ lý của loại vật liệu này so với bê tông Portland truyền thống có thể được kể đến như: cường độ chịu nén đạt được sớm hơn, chịu lửa tốt hơn, chịu tác động hóa học tốt hơn, kết dính với cốt thép tốt và khả năng chịu kéo tốt hơn. Khá ít nghiên cứu sử dụng loại vật liệu này thay thế cho bê tông Portland truyền thống cho các kết cấu khác nhau trong các công trình dân dụng cũng như cầu đường. Một số nghiên cứu đã được thực hiện cho kết cấu dầm bê tông geopolymer có thể được kể ra như sau.

Nhóm của Chang và cộng sự thực hiện thí nghiệm cắt cho dầm bê tông sử dụng tro bay làm chất kết dính geopolymer với tỷ số a/d bằng 2,5; Nhóm của Maranan và cộng sự thực hiện hai thí nghiệm cho dầm bê tông geopolymer cốt GFRP; Nhóm của Cheng và cộng sự thực hiện thí nghiệm cắt cho dầm bê tông geopolymer cốt thép (xi than);

Nhóm của Yacob và cộng sự làm thí nghiệm cắt cho dầm bê tông geopolymer với tỷ số a/d từ 2,0 đến 2,4; Nhóm của Ambily P.S và cộng sự nghiên cứu thực nghiệm cho ứng xử cắt của dầm bê tông geopolymer cốt thép. [1 - 6]

### 1.2. Tình hình nghiên cứu trong nước

Ở Việt Nam, đã có một số nghiên cứu bước đầu về bê tông Geopolymer như: Nghiên cứu chế tạo gạch không nung bằng công nghệ Geopolymer sử dụng tro bay và phế thải bù đắp xây dựng nhà ở cao nguyên Việt Nam của nhóm trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM năm 2010; Vữa và bê tông sử dụng chất kết dính polymer vô cơ của nhóm Đại học Giao thông vận tải Hà Nội 2011; Nghiên cứu ứng xử cơ học cấu kiện dầm bê tông cốt thép geopolymer sử dụng tro bay của nhóm PGS.TS Lê Anh Tuấn, TS. Nguyễn Sỹ Lâm, Th.S Lê Hữu Quốc Phong tại đại học Bách Khoa – ĐHQG Tp.HCM 2015.

Dựa vào những nghiên cứu đó, đã có một số ứng dụng vào thực tiễn ở Việt Nam mà nổi bật nhất là sản phẩm gạch không nung một dạng sản phẩm thương mại có nguồn gốc từ bê tông geopolymer. Tuy nhiên chưa được sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng. Như vậy, qua nghiên cứu một số tài liệu liên quan đến ứng xử cắt của dầm bê tông geopolymer, có thể thấy hầu như chưa có nghiên cứu về mô

\* Liên hệ tác giả: latuan@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 04/11/2022, giải trình ngày 26/11/2022, chấp nhận đăng 13/12/2022

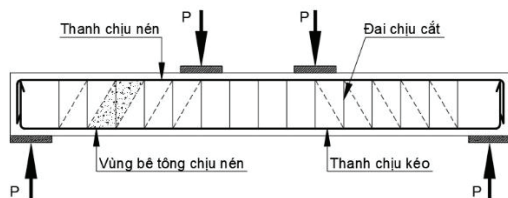
Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2022.415>

hình để tính toán độ võng cho cấu kiện dầm ngăn bê tông geopolymer cốt thép sử dụng tro bay.

**2. Mô hình giàn góc thay đổi cho dầm bê tông chịu cắt (Li và Trần 2018)**

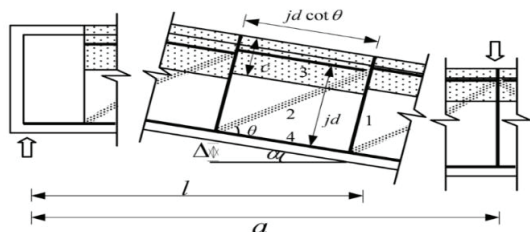
Mô hình giàn đã được sử dụng rộng rãi làm cơ sở của hầu hết các quy trình thiết kế chống cắt cho dầm bê tông cốt thép [7]. Các thanh chịu nén nghiêng của giàn được giả định là các khối bê tông giữa hai vết nứt liền kề ở giai đoạn phá hoại như trong Hình 1. Các thanh chịu nén truyền tải trọng theo phương ngang đến các thanh giằng. Những thanh giằng này cung cấp khả năng chống cắt trong mô hình giàn. Các thanh trên và dưới của giàn lần lượt được giả định là các khối bê tông ứng suất và cốt thép dọc. Các thanh này được giả định là không đóng góp vào khả năng kháng cắt của dầm BTCT.

Nhóm nghiên cứu của Kim và Mander đã đề xuất một mô hình giàn với góc vi phân biến thiên nhằm phát triển một lý thuyết toàn diện để mô hình hóa ứng xử cắt và uốn không đàn hồi [8]. Các mô hình tích hợp phương pháp số đã được đề xuất để tìm độ cứng và sau đó xác định vị trí của các thanh giằng. Phân tích cắt và uốn riêng biệt được thực hiện trên một số mô hình giàn với góc có thể thay đổi để xác định độ võng và độ nghiêng của thanh chống. Kim và Mander đã đề xuất một phương pháp toán học để tính toán mô hình giàn với góc thay đổi của các thanh kéo dọc. Tuy nhiên, các công thức và giải pháp này chỉ áp dụng được cho vùng bị ảnh hưởng của các thanh kéo dọc. Áp dụng ý tưởng và phương pháp của Kim và Mander, nhóm của Li và Trần đề xuất một cách tiếp cận mới để tính toán độ nghiêng của thanh chịu nén trong một mô hình giàn với góc thay đổi cho các dầm bê tông cốt thép tới hạn chịu cắt và uốn [7].



**Hình 0.1.** Mô hình giàn cho dầm nứt chịu tải uốn và cắt.

Cơ chế truyền lực cắt ở vùng điển hình có thể được biểu diễn một cách hợp lý như trong Hình 2.1.



**Hình 0.2.** Đơn vị giàn điển hình phân tích bởi nguyên lý công ảo.

Phương pháp công ngoại được áp dụng để phân tích nội lực và độ cứng cho từng thành phần trong một mỗi vị giàn như Bảng 2.1.

**Bảng 0.1.** Phân tích công ảo cho đơn vị giàn.

	Thành phần	Nội lực $F$	Lực đơn vị $f$	Chiều dài $L$	Độ cứng $EA$
Thanh kéo dọc	1	$V$	1	$jd$	$\cot \theta \rho_s n_s E_c A_v$
Giằng nghiêng	2	$-\frac{V}{\sin \theta}$	$-\frac{1}{\sin \theta}$	$\frac{jd}{\sin \theta}$	$\cos \theta E_c A_v$
Thanh chịu uốn	3	$\left(\frac{l}{jd} - \cot \theta\right) V$	$\frac{l}{jd} - \cot \theta$	$jd \cot \theta$	$(\beta_1 cb) E_c$
Thanh chịu kéo	4	$\frac{l}{jd} V$	$\frac{l}{jd}$	$jd \cot \theta$	$\rho_s n_s E_c (bd)$

Từ bảng trên, chuyển vị võng của đơn vị cấu kiện dầm gây ra bởi lực cắt  $\Delta_s$  có thể xác định theo công thức sau:

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^4 \frac{F f l}{EA} = \frac{1 + \frac{\rho_w n}{\sin^4 \theta}}{\rho_w n \cot \theta E_c A_{sa}} jdV + \left(\frac{l}{jd} - \cot \theta\right)^2 \frac{\cot \theta}{\left(\frac{c}{h} + \rho_s'(n-1) E_c A_g\right)} jdV + \frac{\left(\frac{l}{jd}\right)^2 \cot \theta}{\rho_s n E_c A_g} jdV \quad (1)$$

Trong đó:  $jd$  là chiều cao của đơn vị dầm,  $\theta$  là góc nghiêng của thanh giằng,  $\rho_s$  là tỷ lệ cốt thép chịu cắt;  $n$  là tỷ số mô đun của  $E_s/E_c$ ;  $E_s$  là mô đun đàn hồi của thép;  $E_c$  là mô-đun đàn hồi của bê tông;  $A_{sa}$  là diện tích mặt cắt hiệu dụng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép;  $(EA)_c$  độ cứng của cấu kiện chịu kéo dưới cùng;  $A_s$  là diện tích của phần thép gia cố ở mặt dưới;  $A_g$  là tổng diện tích mặt cắt của dầm bê tông cốt thép.

Với mô hình giàn này, các đơn vị giàn được hình thành dọc theo nhịp chịu cắt của cấu kiện dầm bị nứt. Trong mỗi đơn vị giàn, thanh giằng nghiêng, truyền lực cắt cho thanh kéo dọc. Các thanh trên và dưới đóng vai trò là thành phần chống uốn. Độ cứng của đơn vị giàn là tổng của tất cả các thành phần cấu thành. Sử dụng độ cứng này, công ngoại của mỗi đơn vị giàn có thể được xác định. Công ngoại theo lý thuyết có thể tính được bằng cách áp một đơn vị lực lên một đơn vị giàn bất kỳ.

$$EWD = \Delta_s \times 1 = \frac{1 + \frac{\rho_w n}{\sin^4 \theta}}{\rho_w n \cot \theta E_c A_{sa}} jd + \left(\frac{l}{jd} - \cot \theta\right)^2 \frac{\cot \theta}{\left(\frac{c}{h} + \rho_s'(n-1) E_c A_g\right)} jd + \frac{\left(\frac{l}{jd}\right)^2 \cot \theta}{\rho_s n E_c A_g} jd \quad (2)$$

Độ nén dọc theo đường chéo được giả định sẽ phát triển theo hướng tương ứng với đường công ngoại đạt giá trị cực tiểu. Do đó, giá trị cực tiểu của góc  $\theta$  là độ nghiêng của thanh giằng nghiêng. Như vậy, độ nghiêng của thanh giằng nghiêng  $\theta$  được xác định bằng cách lấy vi phân phương trình (1) như sau:

$$\frac{d(EWD)}{d\theta} = 0 \quad (3)$$

**3. Xác định mô-đun đàn hồi của bê tông geopolymer qua công thức lý thuyết**

Mô-đun đàn hồi của bê tông geopolymer từ tro bay có giá trị khoảng 22,8 – 28 GPa. Để so sánh, mô-đun đàn hồi của bê tông thường là từ 34,16 GPa đến 38,33 GPa. Có thể thấy mô-đun đàn hồi của bê tông geopolymer thấp hơn đáng kể so với bê tông thông thường. Mô-đun đàn hồi của bê tông geopolymer bị ảnh hưởng bởi cấu trúc vi mô dựa trên đặc điểm của các dung dịch hoạt hóa kiềm silicat. Đây là một điểm khác biệt giữa geopolymer và bê tông thường.

Đối với bê tông thông thường, Viện Bê tông Hoa Kỳ, ACI 363 khuyến nghị công thức để xác định giá trị của mô-đun đàn hồi như sau:

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ (MPa)} \quad (4)$$

Theo EN1992-1-1, tính chất biến dạng đàn hồi của bê tông cốt thép phụ thuộc vào thành phần cấu tạo và đặc biệt là vào các cấp phối. Các giá trị gần đúng cho mô-đun đàn hồi  $E_{cm}$  (EN1992-1-1 Bảng 3.1) theo công thức sau:

$$E_{cm} = 22000 \left( \frac{f'_c}{10} \right)^{0.3} \text{ (MPa)} \quad (5)$$

Đồng thời, Hardjito cũng đề xuất công thức để tính mô-đun đàn hồi như sau:

$$E_c = 2707 \sqrt{f'_c} + 5300 \text{ (MPa)} \quad (6)$$

với:  $f'_c, f_{cm}$ : cường độ chịu nén trung bình (MPa)

Công thức (4), (5) được đề xuất để tính mô-đun đàn hồi của bê tông thông thường khi biết trước giá trị của cường độ chịu nén. Trong khi đó, công thức (6) được thiết kế để tính mô-đun đàn hồi chuyên biệt cho bê tông geopolymer. Theo [22], độ chênh lệch của công thức (4), (5) so với giá trị thực nghiệm đo được là 30 – 40 %, trong khi đó độ chênh lệch là khoảng 10 % nếu tính theo công thức (6). Như vậy, mô hình đề xuất của nhóm sẽ sử dụng giá trị mô-đun đàn hồi của bê tông geopolymer (6) để tính toán độ võng cắt cho cấu kiện dầm ngắn geopolymer cốt thép.

#### 4. Xác định độ võng uốn của cấu kiện dầm

Tổng chuyển vị của dầm bê tông geopolymer cốt thép bao gồm biến dạng uốn được tính toán dựa trên mômen quán tính hiệu dụng và biến dạng cắt từ phương pháp như đã đề xuất ở phần trên.

Đối với biến dạng uốn, nếu mômen tác dụng ( $M_a$ ) thấp hơn mômen nứt ( $M_{cr}$ ), thì sẽ sử dụng mômen quán tính tổng ( $I_g$ ) để xác định độ võng của dầm. Mômen quán tính hiệu dụng ( $I_e$ ) được áp dụng cho trường hợp mômen tác dụng ( $M_a$ ) cao hơn mômen nứt ( $M_{cr}$ ). Chuyển vị do uốn gây ra  $\Delta_p$  được xác định như sau:

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left( 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right)} \quad (4)$$

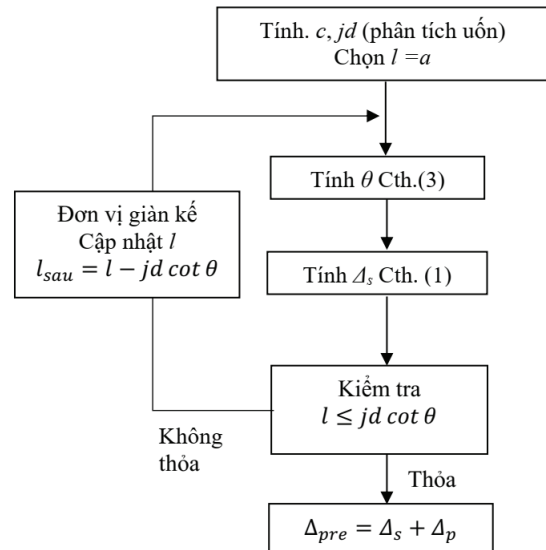
$$\Delta_p = \frac{PL^3 [3(a/L) - 4(a/L)^3]}{48E_c I_e} \quad (5)$$

Trong đó: P là tổng ngoại lực tác dụng lên dầm, L là chiều dài dầm,  $f'_c$  là cường độ chịu nén của bê tông,  $I_g$  là moment quán tính của tiết diện dầm.

$$M_{cr} = \frac{0.62 \lambda \sqrt{f'_c} I_g}{\gamma_t} \quad (6)$$

#### 5. Mô hình đề xuất để tính toán đường tải trọng – chuyển vị

Ở phần trên, chuyển vị gây ra do uốn và chuyển vị gây ra do cắt được giới thiệu và cung cấp công thức tính. Quy trình giải từng bước được tóm tắt trong sơ đồ thể hiện trong Hình 5.1. Phần mềm Matlab được sử dụng để giải vòng lặp cho giá trị góc nghiêng  $\theta$  và chiều dài l.



Hình 5.1. Sơ đồ tính chuyển vị cắt cho dầm bê tông geopolymer cốt thép.

Theo sơ đồ tính dưới đây, tổng chuyển vị của dầm  $\Delta_{pre}$  có thể được tính toán bằng cách lấy tổng chuyển vị uốn theo tiêu chuẩn và chuyển vị cắt theo mô hình đã đề xuất của nhóm. Có thể thấy từ công thức (1), ngoài các thông số hình học, chuyển vị cắt của cấu kiện dầm ngắn chỉ phụ thuộc vào góc nghiêng  $\theta$ , chiều dài l, và mô-đun đàn hồi của bê tông  $E_c$ . Độ tin cậy của mô hình đề xuất trong việc phân tích ứng xử cắt của cấu kiện dầm bê tông cốt thép được chứng minh là đạt yêu cầu [7].

#### 6. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

##### 6.1. Số liệu thực nghiệm thu thập

Dầm ngắn bê tông geopolymer cốt thép được thí nghiệm trong điều kiện uốn 4 điểm bởi các nhóm Jacob, Ambily, và Chang được sử dụng để kiểm tra độ tin cậy cho mô hình đề xuất của nhóm. Các dầm được chọn để phân tích đều có tỷ số nhíp cắt (a/d) nhỏ hơn 2,5.

Các thông số liên quan đến mẫu thí nghiệm được trình bày ngắn gọn trong Bảng 6.1.

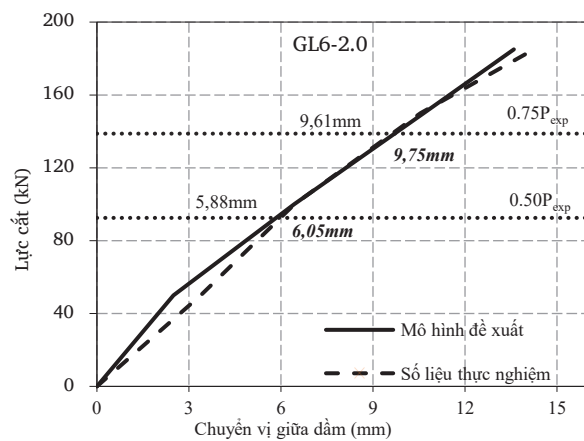
##### 6.2. So sánh giữa kết quả từ mô hình đề xuất $\Delta_{pre}$ với giá trị thực nghiệm thu thập

Để đánh giá độ chính xác của mô hình được đề xuất, chuyển vị ở 50 % và 75 % tải trọng phá hủy được so sánh giữa dự đoán từ mô hình của nhóm  $\Delta_{pre}$  và giá trị thực nghiệm thu thập được  $\Delta_{exp}$ .

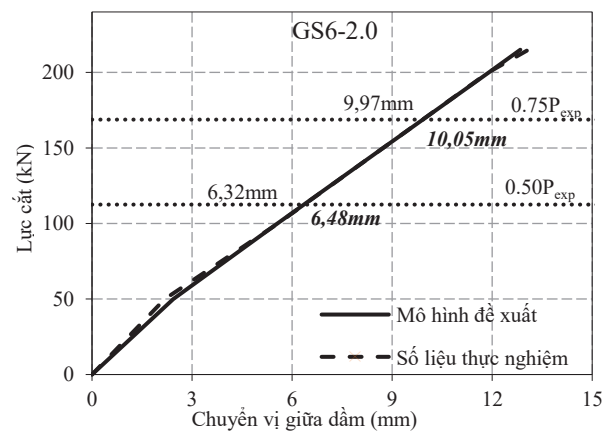
Nhóm nghiên cứu thiết lập đường tải trọng – chuyển vị cho 9 mẫu dầm tương ứng với 9 mẫu thực nghiệm do 3 nhóm tác giả đã thực hiện. Các mẫu dầm này đều là các mẫu dầm ngắn sử dụng vật liệu bê tông geopolymer chịu tải 4 điểm. Kết quả dự đoán từ mô hình đề xuất của nhóm sẽ được so sánh với giá trị thực nghiệm từ các nhóm nghiên cứu qua các đồ thị dưới đây.

**Bảng 0.1.** Số liệu thực nghiệm thu thập.

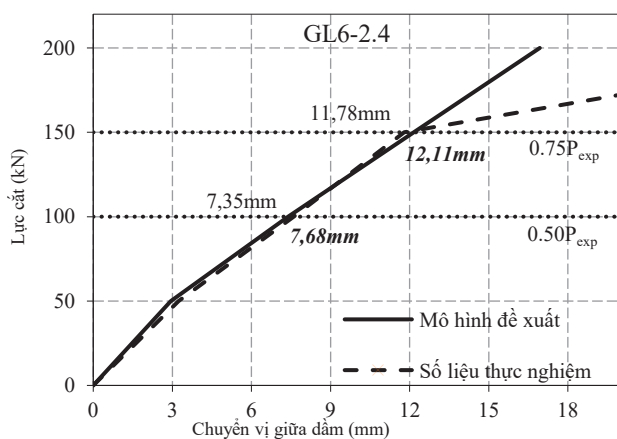
Mã dầm	Thông số hình học					Thông số thép dọc			Thông số thép đai		
	$f_{cu}$ MPa	b mm	d mm	a mm	a/d	$A_f$ mm <sup>2</sup>	$E_f$ GPa	$f_{Fu}$ MPa	$A_{fv}$ mm <sup>2</sup>	s mm	$f_{Fvu}$ MPa
Yacob và cộng sự (2019)											
GL6-2.0	24,5	200	259	1680	2,5	100,5	30	640	100	150	640
GL6-2.4	24,5	120	268	1100	2,0	163,4	30	640	100	150	640
GS6-2.0	24,5	120	268	1100	2,0	276,5	30	640	100	150	640
CL6-2.0	48,0	120	268	1100	2,0	163,4	30	640	100	150	640
Cheng và cộng sự (2020)											
G1-N1.8-D	30	200	350	525	1,5	1272	210	563	100	175	525
G2-N1.8-D	63,1	200	350	525	1,5	1272	210	563	100	175	525
G3-N1.8-D	71,6	200	350	525	1,5	1272	210	563	100	175	525
Ambily.P.S và cộng sự (2011)											
GBFC0015-2	88	100	125	187,5	2,0	339,3	210	640	56.5	100	640
GBFC0020-2	88	100	125	250	2,0	339,3	210	640	56.5	100	640



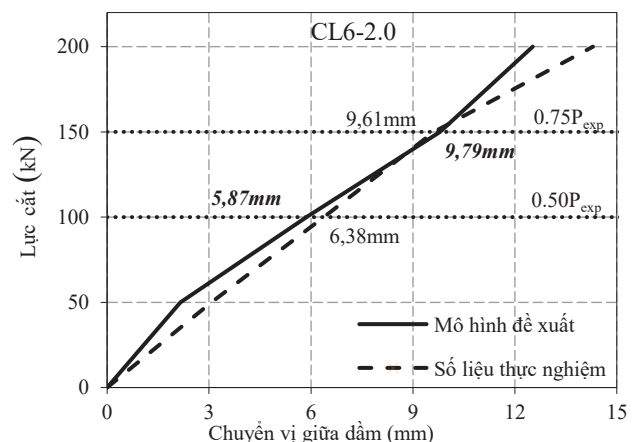
(a)



(c)

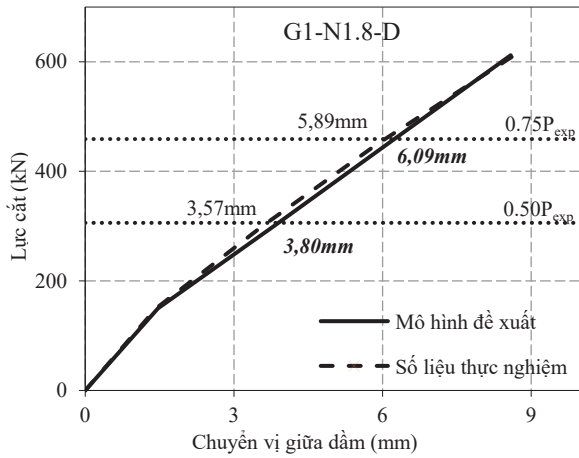


(b)

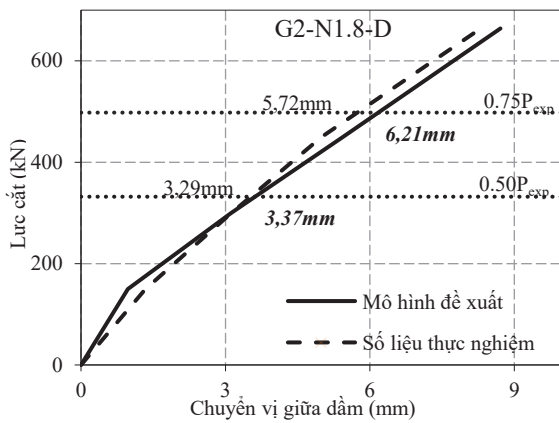


(d)

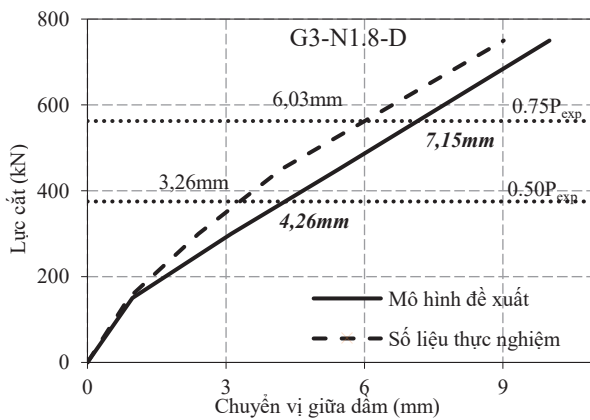
**Hình 0.1.** So sánh giữa kết quả thực nghiệm của nhóm Yacob với kết quả từ phương pháp đề xuất (a-d).



(e)

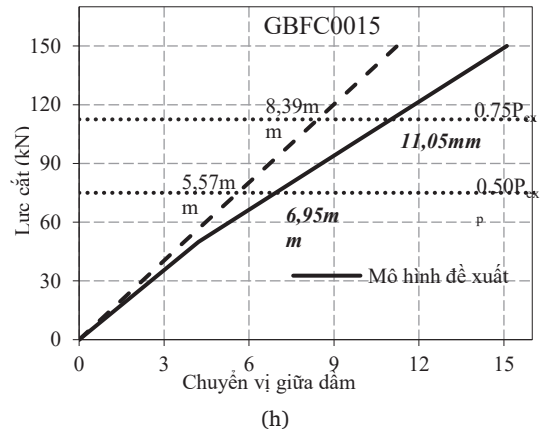


(f)

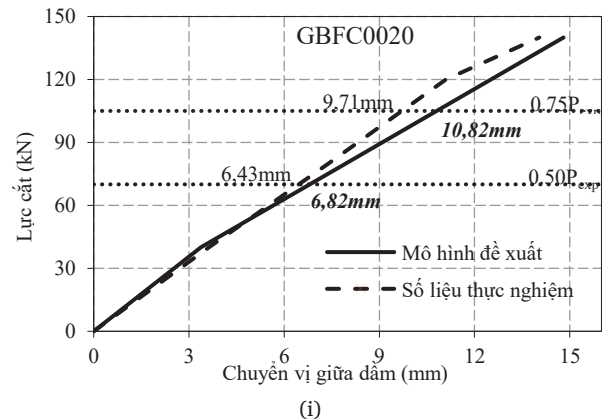


(g)

**Hình 0.2.** So sánh giữa kết quả thực nghiệm của nhóm Cheng với kết quả từ phương pháp đề xuất (e-g).



(h)



(i)

**Hình 0-3.** So sánh giữa kết quả thực nghiệm của nhóm Ambily với kết quả từ phương pháp đề xuất (h-i).

Theo Bảng 3, ở 75 % tải trọng phá hủy, tỷ lệ trung bình và độ lệch chuẩn của kết quả dự đoán từ mô hình của nhóm và kết quả thực nghiệm thu thập lần lượt là 1,10 và 0,11. Điều này cho thấy rằng mô hình đề xuất của nhóm đã dự đoán khá chính xác chuyển vị của dầm ngăn bê tông geopolymer cốt thép ở 75 % tải trọng phá hủy.

Tương tự, ở 50 % tải trọng phá hủy, mô hình đề xuất của nhóm dự đoán chuyển vị võng giữa nhịp cao hơn so với kết quả thực nghiệm. Theo Bảng 3, tỷ lệ trung bình và độ lệch chuẩn giữa kết quả của nhóm và thực nghiệm lần lượt là 1,10 và 0,11. Như vậy, phương pháp đề xuất đạt được sự ổn định tương đối trong việc thiết lập đường tải trọng - chuyển vị của dầm ngăn bê tông geopolymer tại 50 % tải trọng phá hủy.

Đối với bốn mẫu dầm bê tông geopolymer cốt thép với nhịp cắt a/d từ 2,0 đến 2,4, đường cong tải trọng - chuyển vị đạt được sự tương đồng khá cao giữa kết quả thực nghiệm và dự đoán từ mô hình đề xuất. Tại 50 % tải trọng phá hủy, tỷ lệ trung bình và độ lệch chuẩn giữa chuyển vị dự đoán của nhóm và thực nghiệm lần lượt là 0,957 và 0,024. Trong khi đó, tại 75 % tải trọng phá hủy, tỷ lệ trung bình và độ lệch chuẩn giữa chuyển vị dự đoán của nhóm và thực nghiệm lần lượt là 0,983 và 0,008. Điều này cho thấy rằng phương pháp đề xuất đã dự đoán chính xác chuyển vị của dầm ngăn bê tông geopolymer cốt thép với nhịp cắt từ 2,0 đến 2,5 (dầm ngắn).

Đối với ba mẫu đầm thí nghiệm với nhịp cắt a/d bằng 1,80; đường cong tải trọng – chuyển vị dự đoán gần như tương đồng với đường thực nghiệm được cung cấp từ nhóm tác giả. Tại 50 % tải trọng phá hủy, tỷ lệ trung bình và độ lệch chuẩn giữa chuyển vị dự đoán bằng mô hình đề xuất của nhóm so với thực nghiệm lần lượt là 0,894 và 0,113. Ở mức 75 % tải trọng phá hủy, hai chỉ số trên lần lượt đạt 0,911 và 0,063. So sánh với phương pháp truyền thống, mô hình được

đề xuất của nhóm khớp gần như cùng một hành vi với kết quả thực nghiệm cho cả ba mẫu với sai số dưới 5 %.

Đồng thời, với hai nhóm mẫu thí nghiệm của nhóm tác giả Ambily.P.S với nhịp cắt a/d lần lượt là 1,5 và 2,0 [4]; đường tải trọng – chuyển vị dự đoán cho hai nhóm mẫu có hình dạng tương đương, tuy nhiên không đạt được độ chính xác như các mẫu của các nhóm tác giả kể trên.

**Bảng 0.2.** Bảng so sánh giữa kết quả dự đoán từ mô hình của nhóm và giá trị thực nghiệm thu thập.

Mã đầm	Tỷ lệ mô hình đề xuất/ thực nghiệm tại 75 % tải trọng phá hủy				Tỷ lệ mô hình đề xuất/ thực nghiệm tại 50 % tải trọng phá hủy			
	Mô hình đề xuất $\Delta_{pre}$	$\frac{\Delta_{pre}}{\Delta_{exp}}$	$\frac{\Delta_{CSA}}{\Delta_{exp}}$	$\frac{\Delta_{ACI}}{\Delta_{exp}}$	Mô hình đề xuất $\Delta_{pre}$	$\frac{\Delta_{pre}}{\Delta_{exp}}$	$\frac{\Delta_{CSA}}{\Delta_{exp}}$	$\frac{\Delta_{ACI}}{\Delta_{exp}}$
<b>Yacob và cộng sự (2009)</b>								
GL6-2.0	9,75	1,01	0,62	0,72	6,05	1,03	0,78	0,84
GL6-2.4	12,11	1,03	0,65	0,76	7,68	1,04	0,68	0,80
GS6-2.0	10,05	1,01	0,76	0,89	6,48	1,03	0,74	0,87
CL6-2.0	9,79	1,02	0,65	0,76	6,38	1,08	0,72	0,85
<b>Cheng và cộng sự (2020)</b>								
G1-N1.8-D	6,09	1,03	0,48	0,56	3,80	1,06	0,51	0,60
G2-N1.8-D	6,21	1,09	0,48	0,56	3,37	1,03	0,57	0,67
G3-N1.8-D	7,15	1,19	0,47	0,54	4,26	1,31	0,52	0,60
<b>Ambily.P.S và cộng sự (2011)</b>								
GBFC0015	11,05	1,13	0,35	0,40	6,95	1,07	0,39	0,43
GBFC0020	10,82	1,34	0,46	0,52	6,82	1,29	0,48	0,54
Trung bình		1,10	0,55	0,63		1,10	0,60	0,69
Độ lệch chuẩn		0,11	0,12	0,14		0,11	0,13	0,15

Tại mức 50 % tải trọng phá hủy, tỷ lệ trung bình của chuyển vị dự đoán bằng mô hình đề xuất và độ lệch chuẩn so với thực nghiệm lần lượt là 0,854 và 0,110. Ở mức 75 % tải trọng phá hủy, hai chỉ số trên lần lượt đạt 0,815 và 0,101. Mô hình dự đoán tương đối hình dạng ứng xử của đồ thị tải trọng – chuyển vị cho hai nhóm đầm của tác giả. Tuy nhiên, độ chính xác không cao được như hai nhóm mẫu trên. Lý do có thể do mô-đun đàn hồi của các mẫu cấp phối nhóm tác giả sử dụng có giá trị chênh lệch khá lớn so với bê tông thông thường trong khi mô hình đề xuất sử dụng công thức của tác giả Hardjito để tính mô-đun đàn hồi cho tất cả trường hợp và cấp phối khác nhau của bê tông geopolimer. Do đó, độ chênh lệch này là có thể phần nào lý giải được.

**6. Kết luận**

Trong nghiên cứu này, nhóm chúng tôi giới thiệu mô hình lý thuyết để dự đoán đường tải trọng – chuyển vị cho đầm bê tông ngăn geopolimer cốt thép. Tổng chuyển vị vông giữa nhịp của đầm luôn lớn hơn hoặc bằng tổng chuyển vị vông do uốn và cắt.

Độ tin cậy của mô hình đề xuất được xác định bằng cách so sánh kết quả từ mô hình đề xuất với số liệu thực nghiệm thu thập từ các nhóm nghiên cứu. So sánh chỉ ra rằng mô hình đề xuất của nhóm đưa ra tỷ lệ trung bình tốt hơn đáng kể tại 50 % và 75 % tải phá hủy so với

tiêu chuẩn thiết kế ACI 440.1R-15 (2015) và CSA S806 (2012). Mô hình được đề xuất có thể là một công cụ phù hợp để mô hình hóa đường cong tải trọng - chuyển vị cho đầm ngăn bê tông geopolimer cốt thép.

Tuy nhiên, số lượng mẫu thí nghiệm được lấy để khảo sát còn khá khiêm tốn. Vì vậy, chưa thể một đánh giá khách quan tác động của các yếu tố gây nhiễu lên đường tải trọng – chuyển vị. Do đó, cần nhiều hơn các mẫu thí nghiệm chuyên biệt cho loại đầm ngăn bê tông geopolimer cốt thép để có thể đánh giá sâu hơn về các yếu tố gây ảnh hưởng đến ứng xử kháng cắt của loại đầm này. Các hướng nghiên cứu khả thi như khảo sát ứng xử cắt của cấu kiện đầm bê tông geopolimer chịu cháy, đầm chuyển bê tông geopolimer cốt thép,... có thể được phát triển thêm trong tương lai.

**Tài liệu tham khảo**

[1]. E. H. Chang, “Shear and Bond Behaviour of Reinforced Fly Ash-based Geopolymer Concrete Beams”, PhD Thesis, Curtin University of Technology, Perth, Australia, January, 2009.  
 [2]. N. S. Yacob, M. A. ElGawady, L. H. Sneed, and A. Said, “Shear strength of fly ash-based geopolimer reinforced concrete beams,” *Eng. Struct.*, vol. 196, no. June, p. 109298, 2019.

- [3]. C. Wu, H. J. Hwang, C. Shi, N. Li, and Y. Du, "Shear tests on reinforced slag-based geopolymer concrete beams with transverse reinforcement," *Eng. Struct.*, vol. 219, no. October 2019, p. 110966, 2020.
- [4]. C. K. Madheswaran and P. merlin Philip, "Experimental and Analytical Investigations on Flexural Behaviour of Retrofitted Reinforced Concrete Beams with Geopolymer Concrete Composites," *Int. J. Mater. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 3, p. 62, 2014.
- [5]. G. B. Maranan, A. C. Manalo, B. Benmokrane, W. Karunasena, P. Mendis, and T. Q. Nguyen, "Shear behaviour of geopolymer-concrete beams transversely reinforced with continuous rectangular GFRP composite spirals," *Compos. Struct.*, vol. 187, pp. 454–465, Mar. 2018.
- [6]. G. B. Maranan, A. C. Manalo, B. Benmokrane, W. Karunasena, and P. Mendis, "Shear Behavior of Geopolymer Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars," *ACI Struct. J.*, vol. 114, no. 2, Mar. 2017.
- [7]. B. Li and C. T. N. Tran, "Determination of inclination of strut and shear strength using variable angle truss model for shear-critical RC beams," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 41, no. 4, pp. 459–477, 2012.
- [8]. J. Kim and J. Mander, "Truss modeling of reinforced concrete shear-flexure behavior," *Technical Report MCEER-99-0005*. 1999.