

## Ứng xử cắt của dầm bê tông cốt GFRP

Trần Cao Thanh Ngọc<sup>1</sup>, Nguyễn Xuân Huy<sup>2</sup>, Lê Đăng Dũng<sup>2</sup>, Trương Đình Triết<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Bộ Môn Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại Học Quốc Tế, Đại Học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh

<sup>2</sup> Trường Đại Học Giao Thông Vận Tải

<sup>3</sup> Đại Học Nam Florida, Hoa Kỳ

### TỪ KHOÁ

Dầm bê tông cốt GFRP  
Khả năng kháng cắt  
Thanh FRP

### TÓM TẮT

Các nghiên cứu về vấn đề ứng xử cắt cũng như khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt GFRP tại Việt Nam còn khá hạn chế. Ứng xử của thanh FRP rất khác với vật liệu thép truyền thống. Sự khác biệt này tạo ra sự khác biệt trong khả năng kháng cắt của loại cấu kiện này so với cấu kiện bê tông cốt thép truyền thống. Bài báo này được chia thành hai phần. Phần đầu của bài báo trình bày các tiêu chuẩn thiết kế kháng cắt cho cấu kiện bê tông cốt GFRP hiện hành. Phần tiếp theo của bài báo cáo kết quả thí nghiệm của hai mẫu dầm bê tông cốt GFRP có tỉ số nhịp chia cho chiều cao hữu hiệu ( $a/d$ ) là 2,3 và 2,8. Khả năng kháng cắt của 2 mẫu dầm được dùng để so sánh với các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Kết quả thí nghiệm cho thấy tỉ số  $a/d$  ảnh hưởng đến khả năng kháng cắt của dầm như được mô tả trong tiêu chuẩn CSA S806. So với kết quả thí nghiệm, các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành như ACI 440.1R và CSA S806 cho kết quả tương đối chính xác và có thiên hướng an toàn. Tỉ số trung bình khả năng kháng cắt từ tiêu chuẩn chia cho kết quả thí nghiệm của ACI 440.1R và CSA S806 là 0,907 và 0,893.

### KEYWORDS

GFRP reinforced concrete beam  
Shear strength  
FRP bars

### ABSTRACT

There are limited research studies conducted on shear strengths of FRP reinforced concrete beams in Vietnam. The stress-strain behaviors of FRP bars are very much different from the ones of traditional steel bars, which lead to the differences in shear strengths in these concrete structures. This paper consists of two parts. In the first part of the paper, the existing guidelines for shear strengths of FRP reinforced concrete beams are reviewed. The experimental program consisting of two GFRP reinforced concrete beams with an aspect ratio of 2.3 and 2.8 is presented in the second part of the paper. The shear strengths from the tested beams are used to verify the existing guidelines for shear strengths of FRP reinforced concrete beams. The experimental results indicate that the aspect ratio affects the shear strength of FRP reinforced concrete beams. The ACI 440.1R and CSA S806 codes give a fair estimation the shear strengths of tested beams. The ratios of analytical shear strengths over the experimental ones for ACI 440.1R and CSA S806 codes are 0.907 and 0.893, respectively.

### 1. Giới thiệu

Dầm bê tông là một cấu kiện phổ biến trong công trình xây dựng, việc nghiên cứu về dầm bê tông để có được một dầm ngày càng tối ưu như khả năng chống lại môi trường khắc nghiệt như môi trường ven biển... luôn đòi hỏi sự đầu tư, tìm tòi và nghiên cứu không ngừng. Một trong những loại cấu kiện dầm bê tông đang được khá nhiều nhà khoa học quan tâm hiện nay là dầm bê tông cốt FRP, do có tuổi thọ cao trong những môi trường khắc nghiệt.

Vai trò của thanh FRP đã được cộng đồng nghiên cứu công nhận như là một trong những vật liệu thay thế cho thép trong kết cấu bê tông, đặc biệt là kết cấu dầm bê tông. Tuổi thọ cao của vật liệu FRP là một trong những

tính chất quan trọng của loại vật liệu này cho công trình kết cấu bê tông trong những môi trường khắc nghiệt như môi trường ven biển. Ngoài ra, loại vật liệu này còn có cường độ, tỉ số cường độ trên khối lượng, khả năng chống ăn mòn cao hơn thép truyền thống. Tuy nhiên, biểu đồ ứng suất biến dạng của thanh FRP rất khác với vật liệu thép truyền thống, đặc biệt là môđun đàn hồi. Những khác biệt này sẽ dẫn đến sự khác biệt về khả năng kháng cắt của dầm bê tông. Như đã biết phá hủy kháng cắt trong dầm bê tông đem đến những hậu quả vô cùng nghiêm trọng.

Một số phương pháp đã được đề xuất bởi các nhà khoa học để dự đoán khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt FRP trong vài thập kỷ vừa qua. Kết quả của những nghiên cứu này là tiền đề để hình thành

Tác giả liên hệ: triet@usf.edu

Nhận ngày 12/04/2021, giải trình ngày 02/06/2021, chấp nhận đăng 25/07/2021

một số tiêu chuẩn thiết kế về loại cấu kiện này như bộ tiêu chuẩn ACI 440.1R [1], CSA S806 [2], ISIS [3] và JSCE [4]. Khả năng kháng cắt của dầm trong những tiêu chuẩn này được phát triển dựa trên công thức truyền thống ( $V_s + V_c$ ) thường được sử dụng cho kết cấu bê tông cốt thép. Một số hệ số điều chỉnh sự khác biệt của môđun đàn hồi giữa thanh FRP và thanh thép truyền thống đã được đề xuất trong những tiêu chuẩn thiết kế này. Gần đây El-Sayed *et al.* [5] đã chỉ ra rằng tiêu chuẩn ACI 440.1R [1] quá thiên về an toàn trong việc dự đoán khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt FRP. El-Sayed *et al.* [5] đã đề xuất một số điều chỉnh đối với công thức của tiêu chuẩn ACI 440.1R [1]. Hoult *et al.* [6] cũng đã đưa ra đề xuất để dự đoán khả năng kháng cắt của loại dầm này dựa trên lý thuyết MCFT.

Vấn đề tính toán và mô phỏng khả năng kháng cắt cũng như chuyển vị cắt của dầm bê tông là một trong những vấn đề liên quan đến kết cấu bê tông còn khá nhiều tranh cãi. Ngoài ra, biểu đồ ứng suất biến dạng của thanh FRP rất khác với vật liệu thép truyền thống, đặc biệt là môđun đàn hồi. Những khác biệt này sẽ dẫn đến sự khác biệt về khả năng kháng cắt của cấu kiện bê tông cốt FRP so với bê tông cốt thép. Do đó cần nhiều hơn những nghiên cứu tập trung vào vấn đề này để đưa ra những đề xuất, phương pháp tính toán có độ tin cậy cao.

Bài báo được chia làm hai phần. Trong phần đầu của bài báo, phương pháp tính toán khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt FRP được đề cập trong một số tiêu chuẩn thiết kế phổ biến như ACI 440.1R[1] và CSA S806[2] sẽ được trình bày. Kết quả thí nghiệm của 2 mẫu dầm bê tông cốt GFRP sẽ được trình bày ở phần kế tiếp của bài báo, kết quả kháng cắt của 2 mẫu dầm sẽ được so sánh với các tiêu chuẩn thiết kế được trình bày ở phần đầu của bài báo.

## 2. Các phương pháp tính toán khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt FRP

### 2.1. ACI 440.1R [1]

Tiêu chuẩn ACI 440.1R [1] đề xuất phương trình tính khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt FRP như sau:

$$V_n = V_c + V_f \tag{1}$$

Khả năng kháng cắt của bê tông của dầm bê tông sử dụng thanh FRP cho cốt dọc:

$$V_c = \frac{2}{5}k\sqrt{f'_c}b_wd \tag{2}$$

Trong đó  $f'_c$ ,  $b_w$ ,  $d$  là cường độ bê tông, chiều rộng và chiều cao hữu hiệu của dầm.

Sự khác biệt trong việc sử dụng thép truyền thống và thanh FRP như cốt dọc trong khả năng kháng cắt của bê tông được thể hiện qua hệ số  $k$ . Do môđun đàn hồi nhỏ hơn của thanh FRP so với thép truyền thống, dầm bê tông sử dụng thanh FRP như cốt dọc sẽ có bề rộng vết nứt lớn hơn, điều này dẫn đến vùng chịu nén sẽ nhỏ hơn so với kết cấu

bê tông cốt thép truyền thống. Hệ quả là khả năng kháng cắt của loại dầm này sẽ nhỏ hơn dầm bê tông cốt thép truyền thống. Hệ số  $k$  được tính như sau:

$$k = \sqrt{2\rho_F n_f + (\rho_F n_f)^2} - \rho_F n_f \tag{3}$$

Trong đó  $\rho_F n_f$  lần lượt là tỉ lệ phần trăm của thanh FRP và tỉ số môđun đàn hồi của thanh FRP trên môđun đàn hồi của bê tông.

Đóng góp kháng cắt của thanh FRP khi sử dụng là cốt ngang của dầm được tính như sau:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \tag{4}$$

Trong đó  $A_{fv}$  là diện tích thanh FRP cốt ngang trong khoảng cách  $s$ .

Để khống chế bề rộng của vết nứt do lực cắt và tránh việc phá hủy do phần uốn cong của thanh cốt ngang, ứng suất trong thanh FRP cốt ngang sẽ bị khống chế như sau:

$$f_{fv} = 0.004E_f \leq f_{fb} \tag{5}$$

Trong đó  $E_f$ ,  $f_{fb}$  lần lượt là môđun đàn hồi của thanh FRP và cường độ của phần uốn cong của thanh FRP.

### 2.2. CSA S806 [2]

Tương tự như tiêu chuẩn ACI 440.1R [1], khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt FRP theo tiêu chuẩn CSA S806 [2] cũng dựa trên công thức tổng khả năng kháng cắt của bê tông và khả năng kháng cắt của thanh FRP cốt ngang. Tuy nhiên một giá trị cận trên  $0.22f'_c b_w d_v$  được áp dụng để khống chế khả năng kháng cắt của loại dầm này trong tiêu chuẩn CSA S806 [2].

Theo tiêu chuẩn CSA S806 [2], khả năng kháng cắt của bê tông không chỉ phụ thuộc vào độ cứng của cốt dọc như tiêu chuẩn ACI 440.1R [1] mà còn phụ thuộc vào tỉ số của mômen trên lực cắt, cơ cấu thanh chống và ảnh hưởng kích thước. Đây chính là điểm mới nổi trội của tiêu chuẩn CSA S806 [2] so với tiêu chuẩn ACI 440.1R [1]. Theo tiêu chuẩn CSA S806 [2], khả năng kháng cắt của bê tông trong loại dầm này được tính như sau:

$$V_c = 0.05\lambda\phi_c k_m k_r k_a k_s (f'_c)^{1/3} b_w d_v \tag{6}$$

Trong đó  $\lambda$  là hệ số tỷ trọng của bê tông,  $\phi_c$  là hệ số vật liệu và  $d_v$  là chiều cao hữu hiệu của dầm.

Tỉ số của mômen trên lực cắt, độ cứng của cốt dọc, cơ cấu thanh chống và ảnh hưởng kích thước được kể đến thông qua hệ số lần lượt là  $k_m$ ,  $k_r$ ,  $k_a$ ,  $k_s$ . Những hệ số này được tính như sau:

$$k_m = (V_f d / M_f)^{1/2} \tag{7}$$

$$k_r = 1 + (E_f \rho_f)^{1/3} \tag{8}$$

$$k_a = (2.5V_f d) / M_f \text{ for } a/d < 2.5 \tag{9}$$

$$k_s = \left( \frac{750}{450+d} \right) \tag{10}$$

Đối với cấu kiện có cốt ngang nhỏ hơn giá trị yêu cầu và có chiều cao hữu hiệu lớn hơn 300 mm, hệ số ảnh hưởng kích thước,  $k_s$  sẽ được áp dụng như đề xuất như trên.

Một điểm mới của tiêu chuẩn CSA S806 [2] so với tiêu chuẩn ACI 440.1R [1] là việc tính khả năng kháng cắt của thanh FRP sử dụng là cốt ngang. Mô hình giàn ảo với góc nghiêng thay đổi được sử dụng trong tiêu chuẩn CSA S806 [2], trong khi đó tiêu chuẩn ACI 440.1R [1] áp dụng góc nghiêng 45° không đổi. Như đã biết, góc nghiêng vết nứt trong dầm bê tông sẽ thay đổi tùy thuộc vào lực tác dụng, đặc tính của bê tông và cốt thép hay cốt FRP.

Khả năng kháng cắt của thanh FRP sử dụng như cốt ngang trong loại dầm này theo tiêu chuẩn CSA S806 [2] được tính như sau:

$$V_f = \frac{A_{fv}f_{fv}d_v}{s} \cot \theta \quad (11)$$

Trong đó góc nghiêng  $\theta$  được tính theo công thức  $\theta = 30 + 7000\varepsilon_1$ . Biến dạng trung bình theo chiều dọc tại điểm giữa của thiết diện tính toán là:

$$\varepsilon_1 = \frac{M_f + V_f + 0.5N_f}{2E_f A_f} \quad (12)$$

Trong đó  $M_f$ ,  $V_f$ ,  $N_f$  lần lượt là mômen, lực cắt và lực dọc tại thiết diện tính toán.

Ứng suất trong thanh FRP cốt ngang theo tiêu chuẩn CSA S806 [2] được giới hạn như sau:

$$f_{fv} = \min\{0.005E_f, 0.4f_{Fu}, 1200\text{MPa}\} \quad (13)$$

Trong đó  $f_{Fu}$  là khả năng chịu kéo thiết kế của thanh FRP cốt ngang

### 3. Thí nghiệm khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt FRP

Để kiểm chứng độ tin cậy của các công thức trong các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành như đề cập phần trên, ở phần này 3 mẫu dầm bê tông cốt GFRP với chiều dài nhịp chịu cắt thay đổi sẽ được thí nghiệm để xác định khả năng kháng cắt. Khả năng kháng cắt thu được sẽ được so sánh với công thức trong các tiêu chuẩn thiết kế cấu kiện bê tông cốt FRP hiện hành.

#### 3.1 Mẫu thí nghiệm

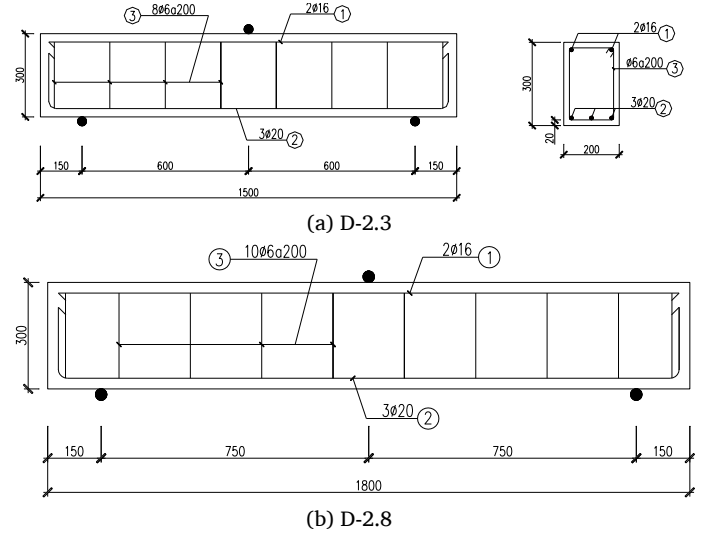
**Bảng 1.**

Tóm tắt kích thước các mẫu thí nghiệm.

Mẫu	$f_c$ (MPa)	a (mm)	b (mm)	a/d (mm)	Thép dọc	Thép đai	$V_u$ (kN)	$V_n$ (kN)
D-2.3	35,5	600	300	2,27	3φ20	φ6- 200	C- 2,3	35,5
D-2.8	33,2	750	300	2,84	3φ20	φ6- 200	C- 2,8	33,2

Thực nghiệm theo kiểu uốn 3 điểm được thực hiện trên 2 mẫu dầm. Tiết diện của 2 mẫu dầm là 200 mm × 300 mm, 3 thanh FRP đường kính 20 mm được sử dụng cho thanh dọc lớp dưới chịu uốn, cốt đai đường kính 6 mm tại khoảng cách 100 mm. Nhịp chịu cắt của 3 mẫu thí nghiệm lần lượt là 600 mm và 750 mm, tỉ số a/d của mẫu thí

th nghiệm là 2,3 và 2,8. Hình 1 và Bảng 1 tóm tắt kích thước của các mẫu thí nghiệm.



**Hình 1.** Mẫu thí nghiệm

#### 3.2. Vật liệu

Cường độ vật liệu bê tông của các mẫu tại ngày thí nghiệm được báo cáo trong Bảng 1. Bảng 2 trình bày các đặc trưng vật liệu của thanh GFRP dùng trong mẫu thí nghiệm.

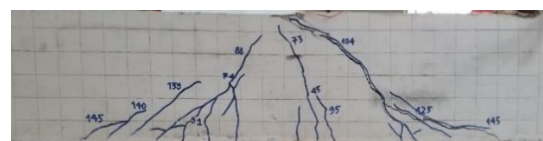
**Bảng 2.**

Đặc trưng vật liệu của thanh GFRP.

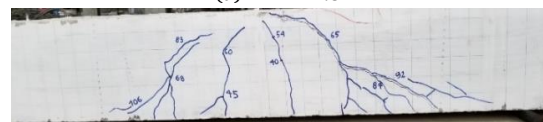
Loại	$E_f$ (GPa)	$f_{fu}$ (MPa)	$A_{f,bar}$ (mm <sup>2</sup> )	$t_f$ (mm)
GFRP	42,5	φ6	810,0	19,6
		φ16	800,2	165,0
		φ20	801,3	240,4

### 4. So sánh với kết quả thí nghiệm

#### 4.1 Hình thái phá hoại



(a) D-2.3



(b) D-2.8

**Hình 2.** Hình ảnh phá hoại mẫu dầm thí nghiệm.

**Bảng 3.**

Khả năng kháng cắt.

Mẫu	a/d (mm)	P <sub>Exp</sub> (kN)	V <sub>Exp</sub> (kN)	ACI [1]			CSA [2]			V <sub>ACI</sub> /V <sub>Exp</sub>	V <sub>CSA</sub> /V <sub>Exp</sub>
				V <sub>C</sub> (kN)	V <sub>f</sub> (kN)	V <sub>ACI</sub> (kN)	V <sub>C</sub> (kN)	V <sub>f</sub> (kN)	V <sub>CSA</sub> (kN)		
D-2.3	2,27	145,3	72,7	23,2	8,8	32,0	53,8	10,0	63,8	0,44	0,88
D-2.8	2,84	120,1	60,1	22,7	8,8	31,5	47,0	10,0	55,7	0,52	0,95
Trung bình										0,48	0,92

Hình 2)a) và 2(b) thể hiện hình ảnh phá hoại của mẫu dầm D-2.3 và D-2.8. Cả hai mẫu dầm đều bị phá hoại cắt đặc trưng. Vết nứt xiên xuất hiện trong cả 2 dầm, tại phá hoại vết nứt này được mở rộng. Sự mở rộng này làm cho dầm mất khả năng chịu cắt và bị phá hoại.

Vết nứt do mô men xuất hiện trong cả 2 mẫu dầm tại vị trí giữa dầm khi tải trọng đạt 45 kN cho mẫu D-2.3 và 40 kN cho mẫu D-2.8. Vết nứt xiên xuất hiện trong mẫu dầm D-2.3 khi tải trọng đạt 74 kN. Vết nứt tương tự xuất hiện ở mẫu D-2.8 khi tải trọng đạt 65 kN.

**4.2. So sánh với các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành**

Khả năng kháng cắt của 2 mẫu dầm được thể hiện trong Bảng 3. Khả năng kháng cắt cao hơn đối dầm có tỉ số a/d nhỏ hơn. Mẫu dầm D-2.3 đạt được khả năng kháng cắt cực đại là 72,7 kN, trong khi mẫu dầm D-2.8 là 60,1 kN. Ảnh hưởng của tỉ số a/d đã được đề cập trong tiêu chuẩn CSA S806 [2] thông qua hệ số k<sub>v</sub>. Thực nghiệm cho thấy tỉ số a/d ảnh hưởng đến khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt FRP.

So với kết quả thí nghiệm, các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành như ACI 440.1R[1] và CSA S806[2] cho kết quả tương đối chính xác và có thiên hướng an toàn. Tỉ số trung bình khả năng kháng cắt từ tiêu chuẩn chia cho kết quả thí nghiệm của ACI 440.1R[1] và CSA S806[2] là 0,48 và 0,92. Kết quả cho thấy tiêu chuẩn CSA S806[2] cho kết quả tốt hơn, trong khi tiêu chuẩn ACI 440.1R[1] quá an toàn cho dầm bê tông cốt FRP.

So sánh giữa 2 tiêu chuẩn ACI 440.1R[1] và CSA S806[2], V<sub>f</sub> của 2 tiêu chuẩn khá tương đồng trong khi đó V<sub>c</sub> của tiêu chuẩn CSA S806[2] gần như gấp đôi của tiêu chuẩn ACI 440.1R[1]. Việc quá thiên về an toàn trong tính toán V<sub>c</sub> của tiêu chuẩn ACI 440.1R[1] dẫn đến tỉ số trung bình khả năng kháng cắt từ tiêu chuẩn chia cho kết quả thí nghiệm của ACI 440.1R[1] là khá nhỏ như trong Bảng 3.

**5. Kết luận**

Bài báo tập trung nghiên cứu khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt GFRP. Công thức từ các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành như ACI 440.1R[1] và CSA S806[2] cho khả năng kháng cắt của cấu kiện

bê tông cốt FRP được trình bày ở phần đầu của bài báo. Kết quả thí nghiệm của 2 mẫu dầm bê tông cốt GFRP có tỉ số a/d khác nhau được báo cáo ở phần tiếp theo của bài báo. Kết quả thí nghiệm cho thấy tỉ số a/d ảnh hưởng đến khả năng kháng cắt của dầm như được mô tả trong tiêu chuẩn CSA S806[2]. So với kết quả thí nghiệm, các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành CSA S806[2] cho kết quả tương đối chính xác và có thiên hướng an toàn. Tỉ số trung bình khả năng kháng cắt từ tiêu chuẩn chia cho kết quả thí nghiệm của ACI 440.1R[1] và CSA S806[2] là 0,48 và 0,92.

**Lời cảm ơn :**

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2019.304.

**Tài liệu tham khảo**

- [1]. A. El-Sayed, E. El-Salakawy, and B. Benmokrane, "Shear Strength of One-Way Concrete Slabs Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Composite Bars," *J. Compos. Constr.*, vol. 9, no. 2, pp. 147–157, Apr. 2005, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:2(147).
- [2]. N. A. Hoult, E. G. Sherwood, E. C. Bentz, and M. P. Collins, "Does the Use of FRP Reinforcement Change the One-Way Shear Behavior of Reinforced Concrete Slabs?," *J. Compos. Constr.*, vol. 12, no. 2, pp. 125–133, Apr. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(125).
- [3]. *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*, ISIS Design Manual No. 3, Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg, MB, Canada, 2001.
- [4]. *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*, Japan Society of Civil Engineering (JSCE), Tokyo, 1997.
- [5]. A. El-Sayed, E. El-Salakawy and B. Benmokrane, "Shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars: design method," *ACI Structural Journal*, SP230-54, 955-973, 2005.
- [6]. N. A. Hoult, E. G. Sherwood, E. C. Bentz, and M. P. Collins, "Does the Use of FRP Reinforcement Change the One-Way Shear Behavior of Reinforced Concrete Slabs?," *J. Compos. Constr.*, vol. 12, no. 2, pp. 125–133, Apr. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(125)