

Dự báo khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thanh FRP

Nguyễn Việt Phương¹, Nguyễn Ngọc Phương¹, Đặng Vũ Hiệp¹

¹ Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến Trúc Hà Nội, Km 10, Đường Nguyễn Trãi, Quận Thanh Xuân, TP Hà Nội, Việt Nam

TỪ KHOÁ

Cốt thanh sợi FRP
Dầm bê tông
Khả năng chịu cắt
Cốt đai

TÓM TẮT

Hiện nay cốt thanh FRP (Fiber-reinforced polymer) đã được chấp nhận rộng rãi trong các cấu kiện bê tông như là loại cốt thay thế cho cốt thép thanh truyền thống do khả năng chống ăn mòn tốt, cường độ cao trong khi trọng lượng riêng nhỏ, không bị ảnh hưởng bởi từ tính. Vì vậy, việc dự báo khả năng chịu lực cho loại cấu kiện này, trong đó có khả năng chịu cắt, là một trong những việc quan trọng trong công tác thiết kế. Bài báo giới thiệu phương pháp dự báo và đánh giá khả năng chịu cắt dầm bê tông cốt thanh FRP theo ba tiêu chuẩn ACI 440.1R-06 (Mỹ), CSA S806-02 (Canada) và JSCE-1997 (Nhật Bản). Qua đó đề xuất một công thức đơn giản để dự báo khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thanh FRP. Các kết quả dự báo được so sánh với 73 kết quả thực nghiệm thu thập được từ các nghiên cứu được công bố trước đây cho thấy kết quả dự báo theo các tiêu chuẩn thiết kế nêu trên khá an toàn với hệ số biến động lớn, trong khi công thức đề xuất cho kết quả phù hợp hơn với kết quả thực nghiệm và có hệ số biến động nhỏ hơn.

KEYWORDS

FRP bars
Concrete beam
Shear capacity
Stirrups

ABSTRACT

Currently, Fiber-reinforced polymer (FRP) bars have gained the popular acceptance as an alternative to conventional steel bars for concrete members due to their corrosion resistance, high strength against low weight, magnetic immunity. Therefore, predicting the strength capacity of such members, particularly the shear capacity is one of the most important issues in design. In this paper, the prediction method and assessment of the shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars according to three codes ACI 440.1R-06, CSA S806-02 and JSCE-1997 is presented. The paper then proposes a simple formula to predict the shear strength for FRP bar-reinforced concrete beams. The predicted values are compared with 73 experimental results obtained from previously published researches. The results indicate that the design codes are relatively conservative with large coefficients of variation, while the proposed equation gives results that are in better agreement with the experimental results and a lower coefficient of variation.

1. Đặt vấn đề

Cốt thanh FRP-Fiber Reinforced Polymer được sản xuất có đường kính và chiều dài tương tự như thanh cốt thép truyền thống. Thường có bốn loại sợi hay sử dụng là sợi các bon (C), sợi thủy tinh (G), sợi Aramit (A) và sợi bazan (B). Vật liệu này bắt đầu được sử dụng cho các công trình xây dựng vào những năm 80 của thế kỷ trước ở Thụy Sĩ, Đức, Anh, Hà Lan. Sau đó được nghiên cứu phát triển mở rộng sang các nước như Nhật Bản, Mỹ, Canada.

So với cốt thép thường, cốt thanh FRP có rất nhiều ưu điểm như khả năng chống ăn mòn tốt, không bị ảnh hưởng bởi từ tính, cường độ chịu kéo cao, trọng lượng bản thân nhẹ. Do đó hiện nay trên thế giới ngày càng nhiều công trình xây dựng trong vùng xâm thực sử dụng cốt thanh FRP thay thế hoàn toàn hoặc một phần cốt thép truyền thống. Về quan điểm thiết kế chịu lực, có hai vấn đề cần quan tâm nhất khi sử dụng vật liệu FRP. Thứ nhất, vật liệu FRP không có ứng xử dẻo và cường độ chịu kéo thấp tại vị trí bị uốn cong (hiệu ứng bend effect). Điều này có thể dẫn đến việc phá hoại sớm/dòn khi kết cấu chịu uốn hay chịu cắt. Thứ hai, do không có ứng xử dẻo nên sự phân phối lại ứng suất hay mô men hầu như bị giới hạn và do đó khi thiết kế kết cấu

cốt thanh FRP không thể sử dụng các phương pháp thiết kế kết cấu bê tông cốt thép truyền thống mà không xem xét thận trọng.

Nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về sự làm việc chịu cắt của dầm bê tông cốt thanh FRP được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm. Chẳng hạn như Bentz cùng cộng sự [1] nghiên cứu thực nghiệm trên 11 dầm bê tông cốt GFRP chịu cắt đã rút ra nhận xét rằng trong dầm sử dụng cả cốt dọc và cốt đai thanh FRP thì dầm sử dụng nhiều lớp cốt dọc có thể bù đắp được hiệu ứng bend effect của cốt đai. Hàm lượng cốt dọc cao dẫn đến góc phá hoại nghiêng nhỏ do đó đóng góp của cốt đai vào khả năng chịu cắt sẽ cao. Issa cùng cộng sự [2] đã thí nghiệm 12 dầm bê tông cốt dọc BFRP có cốt đai BFRP hoặc không có cốt đai, tỷ lệ nhịp chịu cắt, a/d chiều cao làm việc của dầm, d thay đổi từ 1,5 đến 7,0. Nhóm nghiên cứu đã rút ra kết luận rằng ngay cả khi tỷ lệ a/d cao thì phá hoại cắt vẫn xảy ra trên nhóm dầm không có cốt đai. Khả năng chịu cắt của cả nhóm dầm sử dụng cốt đai và không có cốt đai đều tăng khi hàm lượng cốt dọc BFRP tăng. Gần đây, Jumaa và Yousif [3] khi nghiên cứu hiệu ứng kích cỡ trên các dầm chịu cắt cốt BFRP (cốt dọc và ngang) đã cho rằng không nên bỏ qua hoàn toàn hiệu ứng kích cỡ khi dự báo khả năng chịu cắt của dầm cốt FRP. Sự xuất hiện của cốt đai làm giảm đáng kể hiệu ứng kích cỡ trong dầm. Ở Việt

Nam, tác giả Huy [4] đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu cắt dầm bê tông cốt thép thanh GFRP và cốt thép thường không có cốt đai đã rút ra kết luận rằng khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép thanh GFRP nhỏ hơn khá nhiều so với dầm bê tông cốt thép thường. Ngoài nghiên cứu thực nghiệm, nghiên cứu xây dựng công thức dự báo khả năng chịu cắt cho dầm bê tông cốt thép FRP cũng được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. Theo đó, hai nhóm phương pháp tiếp cận chính để thiết lập công thức dự báo là phương pháp lý thuyết dẻo biên dưới (mô hình đàn) và phương pháp lý thuyết dẻo biên trên (mô hình đường chảy dẻo nghiêng). Razaqpur và Spadea [5] đã nghiên cứu cơ chế truyền lực cắt trong dầm bê tông cốt thép FRP dựa trên mô hình đàn với góc nghiêng thay đổi. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra hai tham số quan trọng ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của dầm cốt thép FRP là góc nghiêng và cường độ bê tông chịu nén thiết kế của thanh chống. Góc nghiêng thanh chống lấy bằng 45° có thể dự báo quá cao khả năng chịu nén của thanh chống, do đó kiểu phá hoại có thể thay đổi từ phá hoại cốt đai sang phá hoại thanh chống. Kueres và Hegger [6] đã đề nghị một mô hình đàn với góc nghiêng thanh chống thay đổi phụ thuộc vào mô đun đàn hồi, diện tích của cốt đai và biến dạng nén trung bình ở giữa chiều cao dầm. Tương tự như nhận xét của Razaqpur và Spadea [5], các tác giả cũng kết luận góc nghiêng thanh chống đóng vai trò quan trọng trong việc xác định khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép FRP. Hơn nữa, cường độ chịu kéo của cốt đai FRP tại vị trí uốn cong có thể lấy bằng 60 % cường độ chịu kéo trực tiếp của nó. Phương pháp đường chảy dẻo nghiêng kết hợp với tiếp cận cơ học phá hủy được Minh và Rovnak [7] sử dụng để đề xuất một công thức dự báo khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép thanh GFRP. Hoult và cộng sự [8] nghiên cứu dữ liệu thực nghiệm trên 146 mẫu dầm cốt thép FRP bằng cách sử dụng phương pháp lý thuyết miền nén cài tiến đã được sử dụng cho dầm bê tông cốt thép thường để trả lời câu hỏi liệu sử dụng cốt thép FRP trong cấu kiện bê tông chịu cắt có làm thay đổi ứng xử cắt so với cấu kiện bê tông cốt thép thường? Nhóm nghiên cứu đã rút ra kết luận rằng không có sự khác nhau về ứng xử cắt giữa cấu kiện bê tông cốt thép thường và cốt thép FRP không có cốt đai. Do đó hoàn toàn có thể áp dụng được lý thuyết hay công thức đang sử dụng cho cấu kiện bê tông cốt thép vào cấu kiện bê tông cốt thép FRP. Nhận định này sau đó được Bentz và cộng sự [1] xác nhận lại.

Nhiều tiêu chuẩn tiên tiến trên thế giới như Mỹ [9], Canada [10] và Nhật Bản [11] đã đề cập đến việc thiết kế cho kết cấu bê tông cốt thép FRP. Điểm giống nhau của các tiêu chuẩn này là sử dụng mô hình đàn kết hợp với hệ số thực nghiệm để dự báo khả năng chịu cắt của dầm cốt thép FRP. Sức kháng cắt của dầm cốt thép FRP bằng tổng sức kháng cắt của bê tông chưa nứt cộng với sức kháng cắt của cốt đai nằm trong vết nứt nghiêng (giả thiết vết nứt nghiêng 45°). Hiện nay Việt Nam chưa có tiêu chuẩn thiết kế riêng cho loại kết cấu này. Do đó mục đích của bài báo này là trước tiên đánh giá mức độ phù hợp các công thức dự báo khả năng chịu cắt của dầm bê tông tiết diện chữ nhật cốt thép FRP theo ba tiêu chuẩn Mỹ, Canada và Nhật Bản, sau đó đề xuất một công thức đơn giản dự báo khả năng chịu cắt dựa theo TCVN 5574-2018 [12] cho dầm bê tông cốt thép FRP và kiểm chứng trên một bộ dữ liệu thực nghiệm được thu thập từ nhiều nghiên cứu độc

lập. Công thức đề xuất có hình thức gần với TCVN, thuận tiện cho các nhà thiết kế và xét đến một số đặc tính cơ học của thanh FRP.

2. Công thức thiết kế trong một số tiêu chuẩn

2.1 Tiêu chuẩn Mỹ ACI 440.1R-06 [9]

Điều kiện để cấu kiện cốt FRP đảm bảo khả năng chịu cắt dưới tác dụng của tải trọng:

$$\phi V_n > V_u \quad (1)$$

trong đó: ϕ là hệ số giảm độ bền (cấu kiện chịu cắt lấy bằng 0.75); V_u là lực cắt do tải trọng gây ra; V_n là khả năng chịu cắt danh định lấy bằng tổng khả năng chịu cắt của cấu kiện bê tông cốt thép FRP (V_c) và khả năng chịu cắt của cốt đai thanh FRP (V_f).

$$\text{Khả năng chịu cắt của bê tông cốt thép FRP: } V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (2)$$

trong đó: f'_c là cường độ nén của mẫu trụ bê tông; b_w là bề rộng của bụng cấu kiện; c là chiều cao vùng nén bê tông được lấy bằng kd với k là hệ số chiều cao vùng nén và d là chiều cao làm việc của cấu kiện.

Do cốt FRP không có giới hạn chảy nên để đảm bảo bê tông cốt FRP không bị phá hoại dòn thì cần bố trí lượng đai tối thiểu $A_{fv,min}$ khi $V_u > \phi V_c / 2$.

$$\text{Khả năng chịu cắt của cốt đai thanh FRP: } V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (3)$$

trong đó: A_{fv} là tổng diện tích của cốt đai cắt qua vết nứt; f_{fv} là ứng suất trong cốt đai thanh FRP; s là bước đai.

2.2 Tiêu chuẩn Canada CSA S806-02 [10]

Tiêu chuẩn chia ra 2 trường hợp dầm: (a) Dầm có đai thanh FRP – xác định theo công thức (4); (b) Dầm có đai thép – xác định theo công thức (5).

$$V_r = V_c + V_{sf} \leq V_c + 0,6 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4)$$

$$V_r = V_c + V_{ss} \leq V_c + 0,8 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (5)$$

Khả năng chịu cắt của cốt đai thanh FRP được xác định như sau:

$$V_{sf} = \frac{0,4 \phi_f A_{fv} f_{fv} d}{s} < 0,6 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (6)$$

Khả năng chịu cắt của bê tông được xác định như sau:

$$\text{- Khi chiều cao } h \leq 300 \text{ mm hoặc } A_{fv} \geq A_{v,min} = \frac{0,3 \sqrt{f'_c} b_w s}{f_{fv}} :$$

$$0,1 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \leq V_c = 0,035 \lambda \phi_c (f'_c \rho_f E_f \frac{V_f d}{M_f})^{\frac{1}{3}} b_w d \leq 0,2 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (7)$$

$$\text{- Khi chiều cao } h > 300 \text{ mm và } A_{fv} < A_{v,min} = \frac{0,3 \sqrt{f'_c} b_w s}{f_{fv}} :$$

$$V_c = (\frac{130}{1000 + d}) \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \geq 0,08 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (8)$$

trong đó: ϕ_c là hệ số kháng cắt của bê tông; λ là hệ số phụ thuộc vào trọng lượng riêng của bê tông; ϕ_f là hệ số kháng cắt cốt đai thanh FRP; V_{sf} là khả năng chịu cắt của cốt đai thanh FRP; V_{ss} là khả năng chịu cắt của cốt đai thép.

Bảng 1.

Kết quả tính toán theo ACI440.1R-06.

Tác giả	Tên mẫu	f_c (MPa)	b_w (mm)	ρ_f	E_b (MPa)	c (mm)	V_c (kN)	f_{fv}	s (mm)	V_{fv} (kN)	$V_{pre.}$ (KN)	V_{exp} (KN)	$V_{exp}/V_{pred.}$
Long Nguyen Minh [7]	GB1-A	43,68	150	0,01	31063	38,65	15,33	-	200	31,31	46,64	77,20	1,66
	GB2-A	43,68	150	0,02	31063	46,58	18,47	-	200	31,31	49,78	84,30	1,69
	GB3-A	43,68	150	0,02	31063	52,91	20,98	-	200	31,31	52,29	98,50	1,88
	GB1-B	55,56	150	0,01	35033	36,56	16,35	-	200	31,31	47,66	84,50	1,77
	GB2-B	55,56	150	0,02	35033	44,11	19,73	-	200	31,31	51,04	95,40	1,87
	GB3-B	55,56	150	0,02	35033	50,15	22,43	-	200	31,31	53,74	108,10	2,01
Noor Azlina A.Hamid [13]	G1B1- 1.5-0.6R- S1	30,00	200	0,01	25743	54,18	23,74	-	50	330,27	354,02	233,20	0,66
	G1B2- 1.5-0.8R- S1	30,00	200	0,01	25743	61,79	27,07	-	50	330,27	357,35	281,60	0,79
	G1B3- 1.5-0.6R- S2	30,00	200	0,01	25743	54,18	23,74	-	150	110,09	133,83	139,00	1,04
	G1B4- 1.5-0.8R- S2	30,00	200	0,01	25743	61,79	27,07	-	150	110,09	137,17	181,30	1,32
	G1B7- 3.0-0.6R- S2	30,00	200	0,01	25743	54,18	23,74	-	150	110,09	133,83	92,80	0,69
	G1B8- 3.0-0.8R- S2	30,00	200	0,01	25743	61,79	27,07	-	150	110,09	137,17	125,60	0,92
	G2B1- 1.6-1.2R- S1	45,00	200	0,01	31529	64,15	34,43	-	50	312,94	347,37	255,00	0,73
	G2B2- 1.6-1.5R- S1	45,00	200	0,02	31529	70,85	38,02	-	50	312,94	350,96	280,20	0,80
	G2B3- 1.6-1.2R- S2	45,00	200	0,01	31529	64,15	34,43	-	150	104,31	138,74	179,30	1,29
	G2B4- 1.6-1.5R- S2	45,00	200	0,02	31529	70,85	38,02	-	150	104,31	142,34	219,30	1,54
	G2B7- 3.2-1.2R- S2	45,00	200	0,01	31529	64,15	34,43	-	150	104,31	138,74	138,50	1,00
	G2B8- 3.2-1.5R- S2	45,00	200	0,02	31529	70,85	38,02	-	150	104,31	142,34	140,10	0,98

Bảng 1 (tiếp).

Kết quả tính toán theo ACI440.1R-06.

Tác giả	Tên mẫu	f_c (MPa)	b_w (mm)	ρ_f	E_b (MPa)	c (mm)	V_c (kN)	f_{iv}	s (mm)	V_{fv} (kN)	$V_{pre.}$ (KN)	V_{exp} (KN)	$V_{exp}/V_{pred.}$
Evan C.Bentz [1]	L05-0	46,00	450	0,01	31877	95,66	116,78	-	-	-	116,78	135,00	1,16
	M05-0	35,00	450	0,01	27806	47,70	50,79	-	-	-	50,79	86,00	1,69
	S05-0	35,00	450	0,01	27806	21,13	22,50	-	-	-	22,50	54,50	2,42
	L05-1	46,00	450	0,01	31877	95,66	116,78	163	400	5.40	122,18	237,00	1,94
	L05-2	49,00	450	0,01	32900	94,24	118,74	163	200	10.80	129,54	246,00	1,90
	L20-0	36,00	450	0,02	28200	175,13	189,14	-	-	-	189,14	232,00	1,23
	M20-0	35,00	450	0,02	27806	83,28	88,68	-	-	-	88,68	138,00	1,56
	S20-0	35,00	450	0,02	27806	38,66	41,17	-	-	-	41,17	74,00	1,80
	L20-1	36,00	450	0,02	28200	175,13	189,14	163	400	4.94	194,08	500,00	2,58
	M20-1	35,00	450	0,02	27806	83,28	88,68	163	400	2.33	91,02	154,00	1,69
L20-2	42,00	450	0,02	30459	169,23	197,41	163	200	9.88	207,30	690,00	3,33	
Mohsen A.Issa [2]	5-10N5	35,90	300	0,01	28161	27,11	19,49	-	-	-	19,49	29,30	1,50
	5-13N5	35,90	300	0,01	28161	33,48	24,07	-	-	-	24,07	38,70	1,61
	5-16N5	35,90	300	0,02	28161	40,52	29,13	-	-	-	29,13	45,20	1,55
	6-16N7	35,90	300	0,02	28161	43,96	31,61	-	-	-	31,61	40,20	1,27
	3-25N7	35,90	300	0,03	28161	45,57	32,76	-	-	-	32,76	48,40	1,48
	4-25N7	35,90	300	0,04	28161	51,33	36,91	-	-	-	36,91	51,50	1,40
	2-13SB1	35,90	200	0,01	28161	34,60	16,59	212	127	72.07	88,66	147,50	1,66
	3-13SB1	35,90	200	0,01	28161	41,63	19,95	212	127	72,07	92,03	195,80	2,13
	3-16SB1	35,90	200	0,01	28161	50,09	24,01	212	127	70,76	94,77	214,00	2,26
	2-25B1	35,90	200	0,02	28161	59,74	28,63	212	127	69,45	98,09	192,10	1,96
3-16B2	35,90	200	0,01	28161	50,09	24,01	212	127	70,76	94,77	134,70	1,42	
3-16B3	35,90	200	0,01	28161	50,09	24,01	212	127	70,76	94,77	91,50	0,97	
Đình Trọng Huy [4]	D2A-FRP 12	43,16	150	0,01	30877	31,54	12,43	-	-	-	12,43	27,85	2,24
	D2B-FRP 12	43,16	150	0,01	30877	31,54	12,43	-	-	-	12,43	25,71	2,07
	D3A-FRP 14	43,16	150	0,01	30877	35,91	14,16	-	-	-	14,16	32,14	2,27
	D3B-FRP 14	43,16	150	0,01	30877	35,91	14,16	-	-	-	14,16	30,00	2,12
	D4A-FRP 16	43,16	150	0,01	30877	40,94	16,14	-	-	-	16,14	34,28	2,12
	D4B-FRP 16	43,16	150	0,01	30877	40,94	16,14	-	-	-	16,14	32,14	1,99
Ghazi Bahroz Jumaa [3]	SHR3	75,93	200	0,03	40955	58,67	40,90	-	-	-	40,90	107,30	2,62
	MHR3	75,93	200	0,03	40955	101,92	71,05	-	-	-	71,05	140,60	1,98
	LHR3	75,93	200	0,03	40955	144,93	101,03	-	-	-	101,03	169,50	1,68
	SHR3S1	75,93	200	0,03	40955	58,67	40,90	224	120	43,84	84,73	168,00	1,98
	MHR3S1	75,93	200	0,03	40955	101,92	71,05	224	200	45,96	117,01	279,40	2,39
	LHR3S1	75,93	200	0,03	40955	144,93	101,03	224	300	45,13	146,16	391,70	2,68
	SHR3S2	75,93	200	0,03	40955	58,67	40,90	224	80	65,75	106,65	190,10	1,78
	MHR3S2	75,93	200	0,03	40955	101,92	71,05	224	135	68,09	139,14	292,60	2,10
LHR3S2	75,93	200	0,03	40955	144,93	101,03	224	200	67,70	168,73	402,20	2,38	
Ayman Abu-	C20-R1- G3.5	24,00	150	0,008	23025	45,07	13,25	-	-	-	13,25	85,00	6,42

Tác giả	Tên mẫu	f_c (MPa)	b_w (mm)	ρ_f	E_b (MPa)	c (mm)	V_c (kN)	f_{fv}	s (mm)	V_{fv} (kN)	$V_{pre.}$ (KN)	V_{exp} (KN)	$V_{exp}/V_{pred.}$
Obaida [14]	C20-R1-G5	24,00	150	0,012	23025	50,01	14,70	-	-	-	14,70	92,00	6,26
	C20-R1-G7.5	24,00	150	0,018	23025	59,75	17,56	-	-	-	17,56	165,00	9,40
	C20-R1.5-G3.5	24,00	150	0,008	23025	45,07	13,25	-	-	-	13,25	88,00	6,64
	C20-R1.5-G5	24,00	150	0,012	23025	50,01	14,70	-	-	-	14,70	115,00	7,82
	C20-R1.5-G7.5	24,00	150	0,018	23025	59,75	17,56	-	-	-	17,56	126,00	7,17
Giá trị trung bình												2,25	

Bảng 2.

Kết quả tính toán theo CSA S806-02.

Tác giả	Tên mẫu	f'_c (Mpa)	ρ_n	b (mm)	V_c (kN)	A_v (mm ²)	f_{fv} (Mpa)	s (mm)	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (kN)	V_{exp} (kN)	$V_{exp}/V_{pred.}$
Long Nguyen Minh [7]	GB1-A	43,68	0,01	150	27,19	56,52	-	200	31,31	58,50	77,20	1,32
	GB2-A	43,68	0,02	150	31,16	56,52	-	200	31,31	62,47	84,30	1,35
	GB3-A	43,68	0,02	150	34,25	56,52	-	200	31,31	65,57	98,50	1,50
	GB1-B	55,56	0,01	150	29,46	56,52	-	200	31,31	60,77	84,50	1,39
	GB2-B	55,56	0,02	150	33,76	56,52	-	200	31,31	65,07	95,40	1,47
	GB3-B	55,56	0,02	150	37,11	56,52	-	200	31,31	68,43	108,10	1,58
Noor Azlina A.Hamid [13]	G1B1-1.5-0.6R-S1	30	0,01	200	37,85	100,48	-	50	330,27	368,12	233,20	0,63
	G1B2-1.5-0.8R-S1	30	0,01	200	37,85	100,48	-	50	330,27	368,12	281,60	0,76
	G1B3-1.5-0.6R-S2	30	0,01	200	37,85	100,48	-	150	110,09	147,94	139,00	0,94
	G1B4-1.5-0.8R-S2	30	0,01	200	37,85	100,48	-	150	110,09	147,94	181,30	1,23
	G1B7-3.0-0.6R-S2	30	0,01	200	37,85	100,48	-	150	110,09	147,94	92,80	0,63
	G1B8-3.0-0.8R-S2	30	0,01	200	37,85	100,48	-	150	110,09	147,94	125,60	0,85
	G2B1-1.6-1.2R-S1	45	0,01	200	44,54	100,48	-	50	312,94	357,48	255,00	0,71
	G2B2-1.6-1.5R-S1	45	0,02	200	44,54	100,48	-	50	312,94	357,48	280,20	0,78
	G2B3-1.6-1.2R-S2	45	0,01	200	44,54	100,48	-	150	104,31	148,86	179,30	1,20
	G2B4-1.6-1.5R-S2	45	0,02	200	44,54	100,48	-	150	104,31	148,86	219,30	1,47
	G2B7-3.2-1.2R-S2	45	0,01	200	44,54	100,48	-	150	104,31	148,86	138,50	0,93
G2B8-3.2-1.5R-S2	45	0,02	200	44,54	100,48	-	150	104,31	148,86	140,10	0,94	
L05-0		46	0,01	450	191,93	-	-	-	-	191,93	135,00	0,70

Tác giả	Tên mẫu	f'_c (Mpa)	ρ_n	b (mm)	V_c (kN)	A_v (mm ²)	f_{fw} (Mpa)	s (mm)	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (kN)	V_{exp} (kN)	$V_{exp}/V_{pred.}$
Evan C.Bentz [1]	M05-0	35	0,01	450	105,42	-	-	-	-	105,42	86,00	0,82
	S05-0	35	0,01	450	36,09	-	-	-	-	36,09	54,50	1,51
	L05-1	46	0,01	450	191,93	14,13	204	400	2,03	193,96	237,00	1,22
	L05-2	49	0,01	450	198,09	14,13	204	200	4,05	202,14	246,00	1,22
	L20-0	36	0,02	450	161,99	-	-	-	-	161,99	232,00	1,43
	M20-0	35	0,02	450	99,76	-	-	-	-	99,76	138,00	1,38
	S20-0	35	0,02	450	54,95	-	-	-	-	54,95	74,00	1,35
	L20-1	36	0,02	450	161,99	14,13	204	400	1,85	163,84	500,00	3,05
	M20-1	35	0,02	450	99,76	14,13	204	400	0,88	100,64	154,00	1,53
L20-2	42	0,02	450	174,96	14,13	204	200	3,71	178,67	690,00	3,86	
Mohsen A.Issa [2]	5-10N5	35,9	0,01	300	24,88	-	-	-	-	24,88	29,30	1,18
	5-13N5	35,9	0,01	300	29,07	-	-	-	-	29,07	38,70	1,33
	5-16N5	35,9	0,02	300	33,60	-	-	-	-	33,60	45,20	1,35
	6-16N7	35,9	0,02	300	33,34	-	-	-	-	33,34	40,20	1,21
	3-25N7	35,9	0,03	300	34,08	-	-	-	-	34,08	48,40	1,42
	4-25N7	35,9	0,04	300	37,51	-	-	-	-	37,51	51,50	1,37
	2-13SB1	35,9	0,01	200	35,18	157,00	265	127	27,03	62,21	147,50	2,37
	3-13SB1	35,9	0,01	200	40,19	157,00	265	127	27,03	67,21	195,80	2,91
	3-16SB1	35,9	0,01	200	45,81	157,00	265	127	26,54	72,35	214,00	2,96
	2-25B1	35,9	0,02	200	52,06	157,00	265	127	26,04	78,11	192,10	2,46
	3-16B2	35,9	0,01	200	38,64	157,00	265	127	26,54	65,17	134,70	2,07
3-16B3	35,9	0,01	200	34,54	157,00	265	127	26,54	61,07	91,50	1,50	

Bảng 2 (tiếp).

Kết quả tính toán theo CSA S806-02.

Tác giả	Tên mẫu	f'_c (Mpa)	ρ_n	b (mm)	V_c (kN)	A_v (mm ²)	f_{fw} (Mpa)	s (mm)	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (kN)	V_{exp} (kN)	$V_{exp}/V_{pred.}$
Đinh Trọng Huy [4]	D2A-FRP 12	43,16	0,01	150	23,64	-	-	-	-	23,64	27,85	1,18
	D2B-FRP 12	43,16	0,01	150	23,64	-	-	-	-	23,64	25,71	1,09
	D3A-FRP 14	43,16	0,01	150	25,93	-	-	-	-	25,93	32,14	1,24
	D3B-FRP 14	43,16	0,01	150	25,93	-	-	-	-	25,93	30,00	1,16
	D4A-FRP 16	43,16	0,01	150	28,51	-	-	-	-	28,51	34,28	1,20
	D4B-FRP 16	43,16	0,01	150	28,51	-	-	-	-	28,51	32,14	1,13
Ghazi Bahroz Jumaa [3]	SHR3	75,93	0,03	200	60,32	-	-	-	-	60,32	107,30	1,78
	MHR3	75,93	0,03	200	65,70	-	-	-	-	65,70	140,60	2,14
	LHR3	75,93	0,03	200	85,10	-	-	-	-	85,10	169,50	1,99
	SHR3S1	75,93	0,03	200	60,32	100,48	280	120	16,44	76,76	168,00	2,19
	MHR3S1	75,93	0,03	200	65,70	100,48	280	200	17,24	82,93	279,40	3,37
	LHR3S1	75,93	0,03	200	85,10	100,48	280	300	16,92	102,02	391,70	3,84
	SHR3S2	75,93	0,03	200	60,32	100,48	280	80	24,66	84,98	190,10	2,24
	MHR3S2	75,93	0,03	200	65,70	100,48	280	135	25,53	91,23	292,60	3,21
LHR3S2	75,93	0,03	200	85,10	100,48	280	200	25,39	110,48	402,20	3,64	
Ayman Abu- Obaida [14]	C20-R1-G3.5	24,00	0,01	150	29,15	-	-	-	-	29,15	85,00	2,92
	C20-R1-G5	24,00	0,01	150	31,50	-	-	-	-	31,50	92,00	2,92
	C20-R1-G7.5	24,00	0,02	150	36,06	-	-	-	-	36,06	165,00	4,58
	C20-R1.5-G3.5	24,00	0,01	150	25,47	-	-	-	-	25,47	88,00	3,46
	C20-R1.5-G5	24,00	0,01	150	27,52	-	-	-	-	27,52	115,00	4,18
	C20-R1.5-G7.5	24,00	0,02	150	31,50	-	-	-	-	31,50	126,00	4,00
Giá trị trung bình												1,83

Bảng 3.

Kết quả tính toán theo JSCE-1997.

Tác giả	Tên mẫu	f_c (Mpa)	b_w (mm)	ρ_f	f_{vud}	V_c (kN)	A_{fv} (mm ²)	ϵ_{fv}	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp.}/V_{pred.}$
Long Nguyen Minh [7]	GB1-A	43,7	150	0,01	0,70	22,57	56,52	-	24,75	47,32	77,20	1,63
	GB2-A	43,7	150	0,02	0,70	25,86	56,52	-	24,75	50,61	84,30	1,67
	GB3-A	43,7	150	0,02	0,70	28,43	56,52	-	24,75	53,18	98,50	1,85
	GB1-B	55,6	150	0,01	0,76	23,07	56,52	-	24,75	47,82	84,50	1,77
	GB2-B	55,6	150	0,02	0,76	26,44	56,52	-	24,75	51,19	95,40	1,86
	GB3-B	55,6	150	0,02	0,76	29,06	56,52	-	24,75	53,82	108,10	2,01
Noor Azlina A.Hamid [13]	G1B1-1.5-0.6R-S1	30,0	200	0,01	0,62	32,11	100,48	-	261,09	293,19	233,20	0,80
	G1B2-1.5-0.8R-S1	30,0	200	0,01	0,62	35,34	100,48	-	261,09	296,42	281,60	0,95
	G1B3-1.5-0.6R-S2	30,0	200	0,01	0,62	32,11	100,48	-	87,03	119,13	139,00	1,17
	G1B4-1.5-0.8R-S2	30,0	200	0,01	0,62	35,34	100,48	-	87,03	122,37	181,30	1,48
	G1B7-3.0-0.6R-S2	30,0	200	0,01	0,62	32,11	100,48	-	87,03	119,13	92,80	0,78
	G1B8-3.0-0.8R-S2	30,0	200	0,01	0,62	35,34	100,48	-	87,03	122,37	125,60	1,03
	G2B1-1.6-1.2R-S1	45,0	200	0,01	0,71	44,47	100,48	-	247,38	291,85	255,00	0,87
	G2B2-1.6-1.5R-S1	45,0	200	0,02	0,71	47,90	100,48	-	247,38	295,29	280,20	0,95
	G2B3-1.6-1.2R-S2	45,0	200	0,01	0,71	44,47	100,48	-	82,46	126,93	179,30	1,41
	G2B4-1.6-1.5R-S2	45,0	200	0,02	0,71	47,90	100,48	-	82,46	130,36	219,30	1,68
	G2B7-3.2-1.2R-S2	45,0	200	0,01	0,71	44,47	100,48	-	82,46	126,93	138,50	1,09
	G2B8-3.2-1.5R-S2	45,0	200	0,02	0,71	47,90	100,48	-	82,46	130,36	140,10	1,07

Bảng 3 (tiếp).

Kết quả tính toán theo JSCE-1997.

Tác giả	Tên mẫu	f_c (Mpa)	b_w (mm)	ρ_f	f_{vud}	V_c (kN)	A_{fv} (mm ²)	ϵ_{fv}	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp.}/V_{pred.}$
Evan C.Bentz [1]	L05-0	46,0	450	0,01	0,72	138,89	-	-	-	138,89	135,00	0,97
	M05-0	35,0	450	0,01	0,65	71,68	-	-	-	71,68	86,00	1,20
	S05-0	35,0	450	0,01	0,65	38,74	-	-	-	38,74	54,50	1,41
	L05-1	46,0	450	0,01	0,72	138,89	14,13	0,001	1,56	140,46	237,00	1,69
	L05-2	49,0	450	0,01	0,73	139,55	14,13	0,001	2,28	141,83	246,00	1,73
	L20-0	36,0	450	0,02	0,66	190,03	-	-	-	190,03	232,00	1,22
	M20-0	35,0	450	0,02	0,65	107,30	-	-	-	107,30	138,00	1,29
	S20-0	35,0	450	0,02	0,65	59,60	-	-	-	59,60	74,00	1,24
	L20-1	36,0	450	0,02	0,66	190,03	14,13	0,002	2,53	192,56	500,00	2,60
	M20-1	35,0	450	0,02	0,65	107,30	14,13	0,002	1,22	108,52	154,00	1,42
	L20-2	42,0	450	0,02	0,70	200,05	14,13	0,002	3,87	203,91	690,00	3,38

Tác giả	Tên mẫu	f_c (Mpa)	b_w (mm)	ρ_f	f_{vud}	V_c (kN)	A_{fv} (mm ²)	ϵ_{fv}	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp.}/V_{pred.}$
Mohsen A.Issa [2]	5-10N5	35,9	300	0,01	0,66	30,14	-	-	-	30,14	29,30	0,97
	5-13N5	35,9	300	0,01	0,66	35,23	-	-	-	35,23	38,70	1,10
	5-16N5	35,9	300	0,02	0,66	40,72	-	-	-	40,72	45,20	1,11
	6-16N7	35,9	300	0,02	0,66	43,38	-	-	-	43,38	40,20	0,93
	3-25N7	35,9	300	0,03	0,66	44,35	-	-	-	44,35	48,40	1,09
	4-25N7	35,9	300	0,04	0,66	48,81	-	-	-	48,81	51,50	1,06
	2-13SB1	35,9	200	0,01	0,66	25,22	157,00	0,002	24,79	50,01	147,50	2,95
	3-13SB1	35,9	200	0,01	0,66	28,81	157,00	0,002	30,27	59,08	195,80	3,31
	3-16SB1	35,9	200	0,01	0,66	32,99	157,00	0,002	37,18	70,18	214,00	3,05
	2-25B1	35,9	200	0,02	0,66	37,67	157,00	0,003	45,47	83,14	192,10	2,31
	3-16B2	35,9	200	0,01	0,66	32,99	157,00	0,002	37,18	70,18	134,70	1,92
3-16B3	35,9	200	0,01	0,66	32,99	157,00	0,002	37,18	70,18	91,50	1,30	
Đinh Trọng Huy [4]	D2A-FRP 12	43,2	150	0,01	0,70	19,40	-	-	-	19,40	27,85	1,44
	D2B-FRP 12	43,2	150	0,01	0,70	19,40	-	-	-	19,40	25,71	1,33
	D3A-FRP 14	43,2	150	0,01	0,70	21,29	-	-	-	21,29	32,14	1,51
	D3B-FRP 14	43,2	150	0,01	0,70	21,29	-	-	-	21,29	30,00	1,41
	D4A-FRP 16	43,2	150	0,01	0,70	23,40	-	-	-	23,40	34,28	1,46
	D4B-FRP 16	43,2	150	0,01	0,70	23,40	-	-	-	23,40	32,14	1,37
Ghazi Bahroz Jumaa [3]	SHR3	75,9	200	0,03	0,85	46,05	-	-	-	46,05	107,30	2,33
	MHR3	75,9	200	0,03	0,85	69,68	-	-	-	69,68	140,60	2,02
	LHR3	75,9	200	0,03	0,85	90,66	-	-	-	90,66	169,50	1,87
	SHR3S1	75,9	200	0,03	0,85	46,05	100,48	0,002	21,27	67,33	168,00	2,50
	MHR3S1	75,9	200	0,03	0,85	69,68	100,48	0,003	27,99	97,67	279,40	2,86
	LHR3S1	75,9	200	0,03	0,85	90,66	100,48	0,003	31,46	122,11	391,70	3,21
	SHR3S2	75,9	200	0,03	0,85	46,05	100,48	0,002	26,05	72,11	190,10	2,64
	MHR3S2	75,9	200	0,03	0,85	69,68	100,48	0,002	34,08	103,76	292,60	2,82
LHR3S2	75,9	200	0,03	0,85	90,66	100,48	0,003	38,91	129,57	402,20	3,10	
Ayman Abu- Obaida [14]	C20-R1-G3.5	24,0	150	0,01	0,58	18,70	-	-	-	18,70	85,00	4,55
	C20-R1-G5	24,0	150	0,01	0,58	20,20	-	-	-	20,20	92,00	4,55
	C20-R1-G7.5	24,0	150	0,02	0,58	23,13	-	-	-	23,13	165,00	7,13
	C20-R1.5-G3.5	24,0	150	0,01	0,58	18,70	-	-	-	18,70	88,00	4,71
	C20-R1.5-G5	24,0	150	0,01	0,58	20,20	-	-	-	20,20	115,00	5,69
	C20-R1.5-G7.5	24,0	150	0,018	0,58	23,128	-	-	-	23,13	126,00	5,45
Giá trị trung bình												2,05

2.3. Tiêu chuẩn Nhật Bản JSCE-1997 [11]

Khả năng chịu cắt của bê tông được xác định:

$$V_c = \frac{\beta_d \beta_p \beta_n f_{vud} b_w d}{\gamma_b} \quad (9)$$

Khả năng chịu cắt của cốt đai thanh FRP được xác định:

$$V_{fv} = \left[\frac{A_{fv} E_{fv} \epsilon_{fv} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{s} z \right] / \gamma_b \leq \frac{f_{fb}}{E_{fv}} b_w d \quad (10)$$

trong đó: β_d, β_p là các hệ số phụ thuộc vật liệu và tiết diện; β_n là hệ số tính đến lực dọc trục; γ_b là hệ số giảm ứng suất; α_s là góc nghiêng của cốt đai so với trục dầm; E_{fv} là môđun đàn hồi của cốt đai thanh FRP; f_{vud} và ϵ_{fv} được xác định theo công thức:

$$f_{vud} = 0.2 f_c^{\frac{1}{3}} \leq 0,72(MPa) \quad (11)$$

$$\epsilon_{fv} = 0,0001 \sqrt{f_{mcd} \frac{\rho_f E_f}{\rho_r E_r}} \left[1 + 2 \left(\frac{\delta_v}{f_{mcd}} \right) \right] \leq \frac{f_r}{E_r} \quad (12)$$

Cường độ chịu nén của bê tông kể đến hiệu ứng kích cỡ:

$$f'_{mcd} = \left(\frac{h}{100} \right)^{-1/10} f'_c \quad (13)$$

3. Đánh giá công thức thiết kế trong một số tiêu chuẩn

Một bộ dữ liệu thực nghiệm được thu thập bao gồm kết quả của 73 dầm bê tông cốt dọc thanh FRP, không có cốt đai, có cốt đai thanh FRP hoặc cốt đai thép thường. Nhóm dầm sử dụng cốt thanh GFRP và BFRP được đưa vào cùng nhóm vì cường độ chịu kéo và môđun đàn hồi của 2 loại cốt này không chênh lệch nhau nhiều. Phạm vi thay đổi của các thông số dầm tóm tắt như sau:

Bảng 4.

So sánh kết quả tính toán giữa các tiêu chuẩn với kết quả thực nghiệm dầm cốt thanh GFRP, BFRP.

Tiêu chuẩn	V_{exp}/V_{pred}			
	\bar{X}	SD	CoV	AAE
ACI440.1R-06	2,25	1,78	0,8	71,8
CSA S806-02	1,83	1,02	0,56	73,08
JSCE-1997	2,05	1,32	0,64	69,8

Bảng 5.

Kết quả tính toán theo ACI440.1R-06.

Tác giả	Tên mẫu	f'_c (MPa)	b_w (mm)	ρ_f	E_b (MPa)	c (mm)	V_c (kN)	f_{fv}	s (mm)	V_{fv} (kN)	$V_{pre.}$ (KN)	V_{exp} (KN)	$V_{exp}/V_{pred.}$
A.Ghani Razaqpur [5]	BR1	40,50	200	0,003	29911	32,41	16,50	-	-	-	16,50	36,11	2,19
	BR2/BA2	49,00	200	0,005	32900	42,54	23,82	-	-	-	23,82	46,95	1,97
	BR3	40,50	200	0,006	29911	49,16	25,03	-	-	-	25,03	47,23	1,89
	BR4	40,50	200	0,009	29911	56,82	28,93	-	-	-	28,93	42,71	1,48
	BA1	40,50	200	0,005	29911	44,39	22,60	-	-	-	22,60	96,18	4,26
	BA3	40,50	200	0,005	29911	44,39	22,60	-	-	-	22,60	46,99	2,08
	BA4	40,50	200	0,005	29911	44,39	22,60	-	-	-	22,60	38,45	1,70
Ashraf F. Ashour [15]	B-400-2	37,09	200	0,001	28623	38,39	18,71	-	-	-	18,71	65,76	3,52
	B-400-4	37,09	200	0,002	28623	53,00	25,82	-	-	-	25,82	72,23	2,80
	B-300-2	48,08	200	0,002	32589	30,67	17,01	-	-	-	17,01	65,76	3,87
	B-300-4	48,08	200	0,003	32589	42,33	23,48	-	-	-	23,48	65,76	2,80
Giá trị trung bình												2,59	

Bảng 6.

Kết quả tính toán theo CSA S806-02.

Tác giả	Tên mẫu	f'_c (Mpa)	ρ_n	b (mm)	V_c (kN)	A_v (mm ²)	f_{fv} (Mpa)	s (mm)	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (kN)	V_{exp} (kN)	$V_{exp}/V_{pred.}$
A.Ghani Razaqpur [5]	BR1	40,5	0,003	200	27,80	-	-	-	-	27,80	36,11	1,30
	BR2/BA2	49	0,005	200	37,32	-	-	-	-	37,32	46,95	1,26
	BR3	40,5	0,006	200	37,83	-	-	-	-	37,83	47,23	1,25
	BR4	40,5	0,009	200	42,29	-	-	-	-	42,29	42,71	1,01
	BA1	40,5	0,005	200	39,80	-	-	-	-	39,80	96,18	2,42
	BA3	40,5	0,005	200	31,82	-	-	-	-	31,82	46,99	1,48
	BA4	40,5	0,005	200	29,43	-	-	-	-	29,43	38,45	1,31
Ashraf F. Ashour [15]	B-400-2	37,09	0,001	200	34,66	-	-	-	-	34,66	65,76	1,90
	B-400-4	37,09	0,002	200	43,60	-	-	-	-	43,60	72,23	1,66
	B-300-2	48,08	0,002	200	27,93	-	-	-	-	27,93	65,76	2,35
	B-300-4	48,08	0,003	200	35,19	-	-	-	-	35,19	65,76	1,87
Giá trị trung bình												1,62

Bảng 7.

Kết quả tính toán theo JSCE-1997.

Tác giả	Tên mẫu	f'_c (Mpa)	b_w (mm)	ρ_f	f_{vud}	V_c (kN)	A_{fv} (mm ²)	ϵ_{fv}	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp.}/V_{pred.}$
A.Ghani Razaqpur [5]	BR1	40,5	200	0,003	0,69	25,40	-	-	-	25,40	36,11	1,42
	BR2/BA2	49,0	200	0,005	0,73	33,54	-	-	-	33,54	46,95	1,40
	BR3	40,5	200	0,006	0,69	34,56	-	-	-	34,56	47,23	1,37
	BR4	40,5	200	0,009	0,69	38,63	-	-	-	38,63	42,71	1,11

Tác giả	Tên mẫu	f_c (Mpa)	b_w (mm)	ρ_f	f_{vud}	V_c (kN)	A_{fv} (mm ²)	ϵ_{fv}	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp.}/V_{pred.}$
	BA1	40,5	200	0,005	0,69	32,00	-	-	-	32,00	96,18	3,01
	BA3	40,5	200	0,005	0,69	32,00	-	-	-	32,00	46,99	1,47
	BA4	40,5	200	0,005	0,69	32,00	-	-	-	32,00	38,45	1,20
Ashraf F. Ashour [15]	B-400-2	37,1	200	0,001	0,67	27,950	-	-	-	27,95	65,76	2,35
	B-400-4	37,1	200	0,002	0,67	35,165	-	-	-	35,17	72,23	2,05
	B-300-2	48,1	200	0,002	0,73	26,522	-	-	-	26,52	65,76	2,48
	B-300-4	48,1	200	0,003	0,73	33,415	-	-	-	33,42	65,76	1,97
Giá trị trung bình											1,80	

- Bề rộng dầm $b = 150 \div 450\text{mm}$;
- Chiều cao dầm $h = 250 \div 1000\text{mm}$;
- Tỷ lệ nhịp chịu cắt/chiều cao làm việc $a / d = 1 \div 7$;
- Cường độ chịu nén bê tông mẫu trụ $f_c = 24 \div 75\text{MPa}$;
- Hàm lượng cốt dọc thanh FRP $\rho_f = 0,5 \div 4(\%)$;
- Môđun đàn hồi cốt thanh FRP $E_f = 37000 \div 145000\text{MPa}$;

Các kết quả tính toán khả năng chịu cắt theo các tiêu chuẩn trên được so sánh với các kết quả thực nghiệm tương ứng nên các hệ số giảm độ bền, hệ số kháng cắt, hệ số giảm ứng suất đều lấy bằng 1,0. Các giá trị cường độ vật liệu đưa vào tính toán được lấy như các giá trị thí nghiệm vật liệu công bố trong các tài liệu tương ứng.

3.1. Dầm sử dụng cốt thanh GFRP, BFRP

Các nghiên cứu thực nghiệm của Minh và cộng sự [7], Hamid và cộng sự [13], Bentz và cộng sự [1], Huy [4], Abu-Obaida và cộng sự [14] trên các dầm đặt cốt dọc loại thanh GFRP, cốt đai thép hoặc GFRP hoặc không có cốt đai trong nhịp chịu cắt, của Issa và cộng sự [2], Jumaa và Yousif [3] trên các dầm cốt dọc loại thanh BFRP, cốt đai BFRP hoặc không có cốt đai trong nhịp chịu cắt được tổng hợp với các thông số như trong Bảng 1. Khả năng chịu cắt của dầm theo thực nghiệm, V_{exp} , khả năng chịu cắt của dầm theo các tiêu chuẩn, V_{pred} .

Để xác định tương quan giữa kết quả tính toán theo các tiêu chuẩn so với kết quả thực nghiệm, các giá trị như tỷ lệ trung bình V_{exp}/V_{pred} (\bar{X}), độ lệch chuẩn (SD), hệ số biến động (CoV), sai số tuyệt đối trung bình (AAE) của tỷ lệ V_{exp}/V_{pred} được so sánh trong Bảng 4.

Từ Bảng 4 có thể thấy, tiêu chuẩn CSA S806-02 cho kết quả dự báo khả năng chịu cắt gần sát với kết quả thực nghiệm nhất vì các hệ số \bar{X} , SD và CoV bé nhất. Tiêu chuẩn ACI440.1R-06 cho kết quả an toàn nhất khi 3 trên 4 thông số cho kết quả cao nhất. Ngoài ra, khi tính toán theo ACI440.1R-06 cho kết quả có tính biến động rất cao. Các kết quả ở các bảng 1, 2, 3 tính toán trên các dầm của Ayman Abu-Obaida và cộng sự [14] với tỷ lệ a/d thay đổi từ 1 đến 1,5 cho thấy tỷ số trung bình $V_{exp}/V_{pred} = 7,28$, cao hơn nhiều lần tỷ số trung bình V_{exp}/V_{pred} cho toàn bộ dữ liệu. Có thể giải thích lý do chính là vì tiêu chuẩn ACI440.1R-06 không tính đến ảnh hưởng của tỷ lệ a/d tới khả năng chịu cắt của dầm.

3.2. Dầm sử dụng cốt thanh CFRP

Các nghiên cứu thực nghiệm của Razaqpur và cộng sự [5], Ashour và cộng sự [15] trên các dầm đặt cốt dọc loại thanh CFRP, không có cốt đai trong nhịp chịu cắt được tổng như trong Bảng 5. Khả năng chịu cắt của dầm theo thực nghiệm, V_{exp} , khả năng chịu cắt của dầm theo các tiêu chuẩn, V_{pred} . Các kết quả tính toán khả năng chịu cắt theo các tiêu chuẩn được so sánh với các kết quả thực nghiệm tương ứng nên các hệ số giảm độ bền, hệ số kháng cắt, hệ số giảm ứng suất đều lấy bằng 1,0. Các giá trị cường độ vật liệu đưa vào tính toán được lấy như các giá trị thí nghiệm vật liệu công bố trong các tài liệu tương ứng.

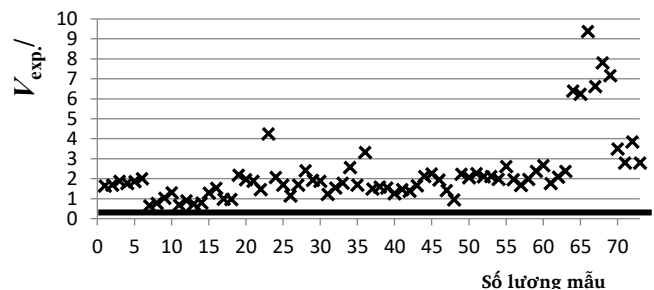
Bảng 8.

So sánh kết quả tính toán giữa các tiêu chuẩn với kết quả thực nghiệm dầm cốt thanh CFRP.

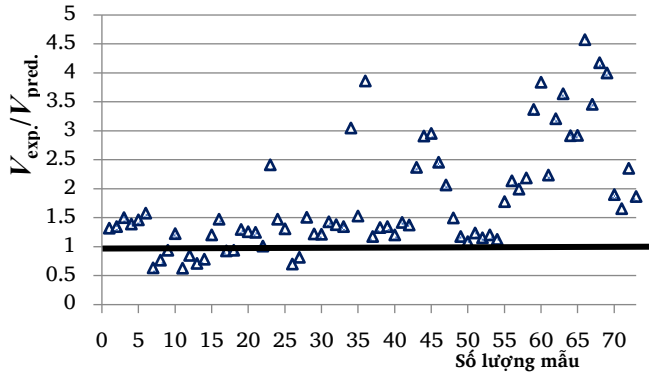
Tiêu chuẩn	$V_{exp.}/V_{pred.}$			
	\bar{X}	SD	CoV	AAE
ACI440.1R	2,59	0,93	0,42	34,27
CSA S806-02	1,62	0,46	0,28	21,49
JSCE-1997	1,8	0,61	0,34	24,81

Tương tự như khi tính toán cho dầm cốt thanh GFRP và BFRP, tiêu chuẩn CSA S806-02 cho kết quả tính toán gần sát với các kết quả thực nghiệm nhất. Tất cả 4 thông số so sánh của tiêu chuẩn ACI440.1R-06 đều có giá trị lớn nhất (Bảng 8). Điều này một lần nữa chứng tỏ tiêu chuẩn ACI440.1R-06 cho kết quả an toàn nhất trong 3 tiêu chuẩn trên. So sánh Bảng 4 và Bảng 8 có thể thấy kết quả dự báo theo 3 tiêu chuẩn cho dầm cốt thanh GFRP và BFRP nói chung an toàn hơn so với dầm cốt thanh CFRP nhưng độ phân tán kết quả cao hơn.

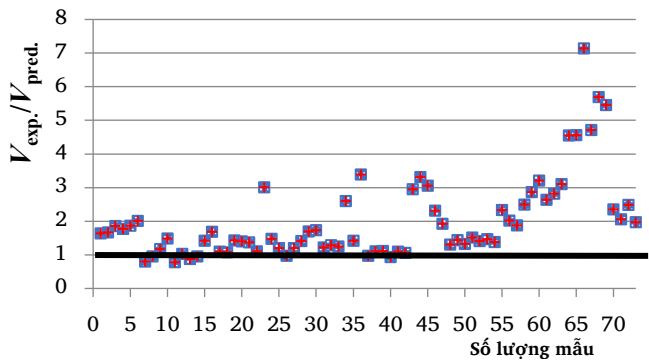
Từ Hình 1 đến Hình 3 thể hiện một cách so sánh khác giữa kết quả tính toán theo 3 tiêu chuẩn với kết quả thực nghiệm trên toàn bộ các dầm bê tông cốt dọc FRP chịu cắt.



Hình 1. Tỷ lệ $V_{exp.}/V_{pred.}$ theo tiêu chuẩn ACI440.1R.



Hình 2. Tỷ lệ V_{exp}/V_{pred} theo tiêu chuẩn CSA S806-02.



Hình 3. Tỷ lệ V_{exp}/V_{pred} theo tiêu chuẩn JSCE-1997.

Có thể thấy, tính theo tiêu chuẩn CSA S806-02, số lượng mẫu có tỷ lệ $V_{exp}/V_{pred} < 1$ là 08 mẫu, chiếm 10,9 % tổng số mẫu thử. Trong khi tính theo tiêu chuẩn ACI 440.1R-06 và JSCE-1997, số lượng mẫu có tỷ lệ $V_{exp}/V_{pred} < 1$ là 06 mẫu (8,2 %) và 04 mẫu (5,4 %), tương ứng. Từ các phân tích trên cho thấy, mặc dù tiêu chuẩn CSA S806-02 có các chỉ số thống kê tốt hơn hai tiêu chuẩn ACI 440.1R-06 và JSCE-1997 nhưng số lượng mẫu dự báo có kết quả tính toán nhỏ hơn giá trị thực nghiệm lại lớn nhất.

4. Đề xuất công thức dựa trên tiêu chuẩn TCVN 5574-2018

4.1. Cơ sở thiết lập công thức

a) Dựa trên công thức xác định khả năng chịu cắt của dầm bê tông theo ACI 318-19 [18] và ACI 440.1R-06 [9]

trong đó: f'_c là cường độ chịu nén của bê tông mẫu trụ; b_w là bề rộng tiết diện chữ nhật; d là chiều cao làm việc của tiết diện; c là chiều cao bê tông vùng nén; n_f là tỷ lệ mô đun đàn hồi của cốt thanh FRP với mô đun đàn hồi của bê tông.

Theo Bảng 9, tiêu chuẩn ACI 440.1R-06 cho rằng, vì mô đun đàn hồi của cốt dọc thanh FRP khá thấp so với cốt thép nên chiều cao vùng nén của bê tông giảm đáng kể, dẫn đến khả năng chịu cắt của bê tông vùng nén giảm so với dầm bê tông có cốt thép dọc. Do vậy để kể đến ảnh hưởng này, ACI 440.1R-06 thay vì sử dụng hệ số nhân 2 cho dầm bê tông cốt thép dọc họ sử dụng hệ số nhân $\left[\frac{2}{5} \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \right]$ cho cốt dọc FRP. Có thể thấy khả năng chịu cắt của bê tông khi sử dụng cốt dọc FRP là hàm của hàm lượng và

mô đun đàn hồi của cốt dọc thanh FRP và không phụ thuộc tỷ số $\frac{a}{d}$.

Vì không xét tới ảnh hưởng của tỷ lệ $\frac{a}{d}$ nên khả năng chịu cắt của bê tông dự báo theo ACI 440.1R-06 thấp hơn nhiều khả năng chịu cắt từ kết quả thực nghiệm khi tỷ số $\frac{a}{d} \leq 1,5$ như đã chỉ ra trong mục 3.1.

b) Dựa trên công thức xác định khả năng chịu cắt của dầm bê tông theo CSA A23.3-04 [19] và CSA- S806-02 [10]

Bảng 9.

Công thức xác định khả năng chịu cắt của dầm bê tông theo ACI 318-19 và ACI 440.1R-06.

ACI 318-Dầm bê tông cốt thép dọc	ACI 440.1R- Dầm bê tông cốt FRP dọc
$V_c = 2\sqrt{f'_c} b_w d$	$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c,$ $c = \left[\sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \right] d, n_f = \frac{E_f}{E_c}$

Bảng 10.

Công thức xác định khả năng chịu cắt của dầm bê tông theo CSA A23.3-04 và CSA- S806-02

CSA A23.3-04-Dầm bê tông cốt thép dọc	CSA- S806-Dầm bê tông cốt FRP dọc
$V_c = \phi_c \lambda \beta \sqrt{f'_c} b_w d$	$V_c = 0,035 \lambda \phi_c (f'_c \rho_f E_f \frac{V_f d}{M_f})^{\frac{1}{3}} b_w d,$ $\frac{V_f}{M_f} = \frac{1}{a}$

Theo Bảng 10, có thể thấy công thức của CSA- S806 cho thấy khả năng chịu cắt của bê tông không những phụ thuộc vào hàm lượng và mô đun đàn hồi của cốt dọc FRP mà còn phụ thuộc tỷ số $\frac{d}{a}$ theo lũy thừa $\frac{1}{3}$.

So với dầm bê tông cốt thép dọc, khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt dọc thanh FRP đã được hiệu chỉnh chủ yếu qua hệ số $(\rho_f \cdot E_f \cdot \frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}$.

c) Theo đề nghị của Tottori và Wakui [16], khả năng chịu cắt của bê tông dầm bê tông cốt thanh FRP có thể bằng khả năng chịu cắt của bê tông dầm bê tông cốt thép nhân với hệ số $\left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{1/3}$.

Từ các phân tích trên có thể thấy, các tiêu chuẩn tiên tiến trên thế giới đều đưa ra công thức dự báo khả năng chịu cắt của bê tông trong cấu kiện bê tông cốt dọc thanh FRP dựa trên công thức tính toán khả năng chịu cắt trong cấu kiện bê tông cốt thép thường nhưng có điều chỉnh thông qua hệ số phụ thuộc vào hàm lượng cốt dọc và mô đun đàn hồi của cốt dọc FRP. Do đó chúng tôi đề xuất sử dụng hệ số ϕ_{FRP} tính đến ảnh hưởng của hàm lượng và độ cứng của cốt thanh FRP đến khả năng chịu cắt của dầm. Hệ số ϕ_{FRP} được xác định như trong mục dưới đây.

Bảng 11.

Kết quả tính toán theo công thức đề xuất.

Tác giả	Tên mẫu	f_c'	R_{bt}	b	ρ_f	E_t/E_s	Φ_{frp}	d (mm)	a (mm)	V_c (kN)	V_c ($a/d=3$)	$V_{c,min}$ (TCVN)	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp./}$ $V_{pred.}$
Long Nguyen Minh [7]	GB1-A	43,7	2,97	150	0,010	0,19	0,35	265	600	27,646		59	35,22	62,87	77,20	1,23
	GB2-A	43,7	2,97	150	0,015	0,19	0,38	265	600	29,595		59	35,22	64,82	84,30	1,30
	GB3-A	43,7	2,97	150	0,020	0,19	0,40	265	600	31,031		59	35,22	66,26	98,50	1,49
	GB1-B	55,6	3,35	150	0,010	0,19	0,35	265	600	31,179		67	35,22	66,40	84,50	1,27
	GB2-B	55,6	3,35	150	0,015	0,19	0,38	265	600	33,377		67	35,22	68,60	95,40	1,39
	GB3-B	55,6	3,35	150	0,020	0,19	0,40	265	600	34,997		67	35,22	70,22	108,10	1,54
Ashraf F. Ashour [15]	B-400-2	37,1	2,74	200	0,001	0,71	0,31	250	375	42,014		69	-	42,01	65,76	1,57
	B-400-4	37,1	2,74	200	0,002	0,71	0,34	250	375	47,126		69	-	47,13	72,23	1,53
	B-300-2	48,1	3,12	200	0,002	0,71	0,32	250	375	50,361		78	-	50,36	65,76	1,31
	B-300-4	48,1	3,12	200	0,003	0,71	0,36	250	375	56,528		78	-	56,53	65,76	1,16

Bảng 11 (tiếp).

Kết quả tính toán theo công thức đề xuất.

Tác giả	Tên mẫu	f_c'	R_{bt}	b	ρ_f	E_t/E_s	Φ_{frp}	d (mm)	a (mm)	V_c (kN)	V_c ($a/d=3$)	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp./}$ $V_{pred.}$
Noor Azlina A. Hamid [13]	G1B1-1.5-0.6R-S1	30,0	2,46	200	0,006	0,28	0,35	362	550	60,838		243,33	304,16	233,20	0,77
	G1B2-1.5-0.8R-S1	30,0	2,46	200	0,008	0,28	0,36	362	550	63,826		243,33	307,15	281,60	0,92
	G1B3-1.5-0.6R-S2	30,0	2,46	200	0,006	0,28	0,35	362	550	60,838		81,11	141,95	139,00	0,98
	G1B4-1.5-0.8R-S2	30,0	2,46	200	0,008	0,28	0,36	362	550	63,826		81,11	144,93	181,30	1,25
	G1B7-3.0-0.6R-S2	30,0	2,46	200	0,006	0,28	0,35	362	1100	30,419		81,11	111,53	92,80	0,83
	G1B8-3.0-0.8R-S2	30,0	2,46	200	0,008	0,28	0,36	362	1100	31,913		81,11	113,02	125,60	1,11
	G2B1-1.6-1.2R-S1	45,0	3,02	200	0,012	0,28	0,39	343	550	75,086		230,55	305,64	255,00	0,83
	G2B2-1.6-1.5R-S1	45,0	3,02	200	0,015	0,28	0,40	343	550	77,931		230,55	308,49	280,20	0,91
	G2B3-1.6-1.2R-S2	45,0	3,02	200	0,012	0,28	0,39	343	550	75,086		76,85	151,94	179,30	1,18
	G2B4-1.6-1.5R-S2	45,0	3,02	200	0,015	0,28	0,40	343	550	77,931		76,85	154,78	219,30	1,42
A.Ghani Razaqpur [5]	BR1	40,5	2,86	200	0,003	0,73	0,35	225	601	25,280		-	25,28	36,11	1,43
	BR2/BA2	49,0	3,15	200	0,005	0,73	0,39	225	601	31,212		-	31,21	46,95	1,50
	BR3	40,5	2,86	200	0,006	0,73	0,41	225	601	29,490		-	29,49	47,23	1,60
	BR4	40,5	2,86	200	0,009	0,73	0,43	225	601	31,180		-	31,18	42,71	1,37
	BA1	40,5	2,86	200	0,005	0,73	0,39	225	410	41,628		-	41,63	96,18	2,31
	BA3	40,5	2,86	200	0,005	0,73	0,39	225	801	21,282	25,255	-	25,25	46,99	1,86
	BA4	40,5	2,86	200	0,005	0,73	0,39	225	1013	16,836	25,255	-	25,25	38,45	1,52
Evan C.Bentz [1]	L05-0	46,0	3,05	450	0,005	0,19	0,31	937	3050	185,111	200,849	-	200,85	135,00	0,67
	M05-0	35,0	2,66	450	0,005	0,19	0,31	438	1525	70,564	81,896	-	81,90	86,00	1,05
	S05-0	35,0	2,66	450	0,005	0,19	0,31	194	762	27,705	36,273	-	36,27	54,50	1,50

Tác giả	Tên mẫu	f_c'	R_{bt}	b	ρ_f	E_f/E_s	Φ_{frp}	d (mm)	a (mm)	V_c (kN)	$V_c (a/d=3)$	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp./ V_{pred.}}$
	L05-1	46,0	3,05	450	0,005	0,19	0,31	937	3050	185,111		5,40	190,51	237,00	1,24
	L05-2	49,0	3,15	450	0,005	0,19	0,31	937	3050	191,052		10,80	201,86	246,00	1,22
	L20-0	36,0	2,70	450	0,020	0,19	0,39	857	3050	172,596	204,752	-	204,75	232,00	1,13
	M20-0	35,0	2,66	450	0,020	0,19	0,39	405	1525	76,014	95,408	-	95,41	138,00	1,45
	S20-0	35,0	2,66	450	0,020	0,19	0,39	188	762	32,780	44,288	-	44,29	74,00	1,67
	L20-1	36,0	2,70	450	0,020	0,19	0,39	857	3050	172,596	204,752	4,94	209,69	500,00	2,38
	M20-1	35,0	2,66	450	0,020	0,19	0,39	405	1525	76,014	95,408	2,33	97,74	154,00	1,58
L20-2	42,0	2,92	450	0,020	0,19	0,39	857	3050	186,425	221,157	9,88	231,04	690,00	2,99	
Mohsen A.Issa [2]	5-10N5	35,9	2,70	300	0,008	0,27	0,36	170	961	13,095	24,663	-	24,66	29,30	1,19
	5-13N5	35,9	2,70	300	0,013	0,26	0,39	170	961	14,156	17,103	-	17,10	38,70	2,26
	5-16N5	35,9	2,70	300	0,021	0,26	0,42	170	961	15,219	28,663	-	28,66	45,20	1,58
	6-16N7	35,9	2,70	300	0,025	0,26	0,43	170	1190	12,680	29,587	-	29,59	40,20	1,36
	3-25N7	35,9	2,70	300	0,031	0,24	0,44	165	1155	12,630	29,470	-	29,47	48,40	1,64
	4-25N7	35,9	2,70	300	0,041	0,24	0,46	165	1155	13,250	30,918	-	30,92	51,50	1,67
	2-13SB1	35,9	2,70	200	0,005	0,26	0,33	275	413	48,832		72,07	120,90	147,50	1,22
	3-13SB1	35,9	2,70	200	0,007	0,26	0,35	275	413	52,193		72,07	124,27	195,80	1,58
	3-16SB1	35,9	2,70	200	0,012	0,26	0,38	270	405	55,216		70,76	125,98	214,00	1,70
	2-25B1	35,9	2,70	200	0,019	0,24	0,41	265	398	58,317		69,45	127,77	192,10	1,50
	3-16B2	35,9	2,70	200	0,012	0,26	0,38	270	675	33,130		70,76	103,89	134,70	1,30
3-16B3	35,9	2,70	200	0,012	0,26	0,38	270	945	23,664	27,608	70,76	98,37	91,50	0,93	

Bảng 11 (tiếp).

Kết quả tính toán theo công thức đề xuất.

Tác giả	Tên mẫu	f_c'	R_{bt}	b	ρ_f	E_f/E_s	Φ_{frp}	d (mm)	a (mm)	V_c (kN)	$V_c (a/d=3)$	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp./ V_{pred.}}$
Đình Trọng Huy [4]	D2A-FRP 12	43,2	2,96	150	0,005	0,23	0,33	270	600	26,318		-	26,32	27,85	1,06
	D2B-FRP 12	43,2	2,96	150	0,005	0,23	0,33	270	600	26,318		-	26,32	25,71	0,98
	D3A-FRP 14	43,2	2,96	150	0,007	0,23	0,34	270	600	27,567		-	27,57	32,14	1,17
	D3B-FRP 14	43,2	2,96	150	0,007	0,23	0,34	270	600	27,567		-	27,57	30,00	1,09
	D4A-FRP 16	43,2	2,96	150	0,009	0,23	0,36	270	600	28,904		-	28,90	34,28	1,19
	D4B-FRP 16	43,2	2,96	150	0,009	0,23	0,36	270	600	28,904		-	28,90	32,14	1,11
Ghazi Bahroz Jumaa [3]	SHR3	75,9	3,92	200	0,030	0,29	0,45	234	610	47,693		-	47,69	107,30	2,25
	MHR3	75,9	3,92	200	0,029	0,29	0,45	408	1070	82,833		-	82,83	140,60	1,70
	LHR3	75,9	3,92	200	0,027	0,29	0,45	602	1570	120,815		-	120,82	169,50	1,40
	SHR3S1	75,9	3,92	200	0,030	0,29	0,45	234	610	47,693		43,84	91,53	168,00	1,84
	MHR3S1	75,9	3,92	200	0,029	0,29	0,45	408	1070	82,833		45,96	128,79	279,40	2,17
	LHR3S1	75,9	3,92	200	0,027	0,29	0,45	602	1570	120,815		45,13	165,95	391,70	2,36
	SHR3S2	75,9	3,92	200	0,030	0,29	0,45	234	610	47,693		65,75	113,45	190,10	1,68
	MHR3S2	75,9	3,92	200	0,029	0,29	0,45	408	1070	82,833		68,09	150,92	292,60	1,94
LHR3S2	75,9	3,92	200	0,027	0,29	0,45	602	1570	120,815		67,70	188,51	402,20	2,13	
Ayman Abu- Obaida [14]	C20-R1-G3.5	24,0	2,20	150	0,008	0,28	0,36	250	250	44,996		-	45,00	85,00	1,89
	C20-R1-G5	24,0	2,20	150	0,012	0,24	0,38	250	250	46,774		-	46,77	92,00	1,97
	C20-R1-G7.5	24,0	2,20	150	0,018	0,24	0,40	250	250	50,044		-	50,04	165,00	3,30

Tác giả	Tên mẫu	f_c'	R_{bt}	b	ρ_f	E_f/E_s	Φ_{FRP}	d (mm)	a (mm)	V_c (kN)	V_c (a/d=3)	V_{fv} (kN)	$V_{pred.}$ (KN)	$V_{exp.}$ (KN)	$V_{exp.}/V_{pred.}$
	C20-R1.5-G3.5	24,0	2,20	150	0,008	0,28	0,36	250	375	29,997		-	30,00	88,00	2,93
	C20-R1.5-G5	24,0	2,20	150	0,012	0,24	0,38	250	375	31,183		-	31,18	115,00	3,69
	C20-R1.5-G7.5	24,0	2,20	150	0,018	0,24	0,40	250	375	33,363		-	33,36	126,00	3,78
Giá trị trung bình															1,57

4.2. Thiết lập công thức

Giả thiết thiết lập công thức:

- Ở trạng thái tải trọng cực hạn, khả năng chịu cắt và uốn của dầm là do sự tham gia chịu lực của vùng bê tông chịu nén chưa bị nứt, cốt ngang cắt qua vết nứt nghiêng và sự truyền lực cắt qua cốt dọc thanh FRP; Vết nứt nghiêng góc 45° theo phương trục dầm;

- Nếu sử dụng cốt ngang thanh FRP thì quan hệ ứng suất-biến dạng của nó là tuyến tính đến khi bị phá hoại;

Dựa trên các công thức xác định khả năng chịu cắt của bê tông vùng nén cho dầm bê tông cốt thép theo TCVN 5574-2018 [12], công thức xác định khả năng chịu cắt của bê tông vùng nén cho dầm cốt dọc thanh FRP như sau:

$$V_c = \frac{1,5R_{bt}bd^2}{a} \varphi_{FRP}, \text{ điều kiện } \frac{a}{d} \geq 1 \quad (14)$$

Trong đó:

- 1,5 là hệ số kể đến ảnh hưởng của cốt thép dọc, lực bám dính [12].

- Nếu sử dụng cường độ chịu kéo chéo tách, f_{ct} thay cho cường độ chịu kéo trực tiếp, R_{bt} thì có thể lấy $R_{bt} = 0,9 f_{ct}$ [17]; Trường hợp không có kết quả thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo chéo thì có thể tính gần đúng cường độ chịu kéo $R_{bt} \approx 0,5 f_c^{1/2}$ [18].

- $\varphi_{FRP} = \left(\frac{\rho_f E_f}{E_s}\right)^{1/6}$ là hệ số kể đến ảnh hưởng của cốt dọc FRP. Số

mũ $\frac{1}{6}$ được xác định bằng thử dần thông qua các số liệu thực nghiệm trong Bảng 1 đến Bảng 3.

Trong công thức (14) khoảng cách từ điểm đặt lực tập trung đến gối tựa, a, chính là chiều dài hình chiếu tiết diện nghiêng nguy hiểm lên phương dọc trục dầm, C (theo TCVN5574-2018). Trong trường hợp dầm có góc nghiêng vết nứt do phá hoại cắt nhỏ hơn 45°, theo TCVN5574-2018 [12] khi đó lấy giá trị a (C) trong khoảng d (h_o) và 3d ($3h_o$), với h_o là chiều cao làm việc của dầm.

Lấy $E_s = 200000\text{MPa}$ thay vào biểu thức φ_{FRP} và công thức (14) có công thức gần đúng:

$$V_c = \frac{1}{5} \frac{R_{bt}bd^2}{a} (\rho_f E_f)^{1/6} \quad (15)$$

Khả năng chịu cắt của cốt đai: $V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (16)$

Khả năng chịu cắt danh nghĩa của dầm: $V_u = V_c + V_f \quad (17)$

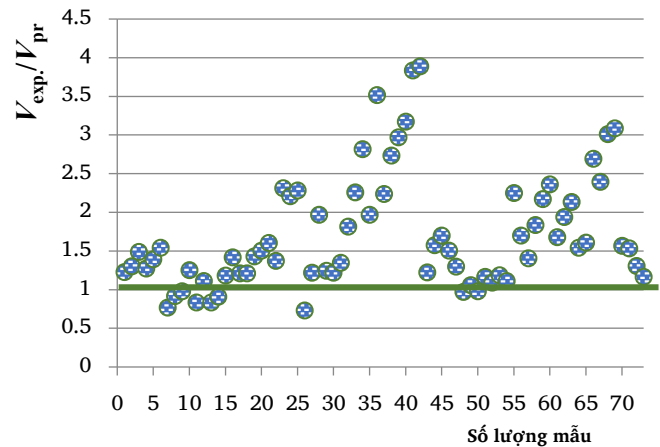
4.3. Đánh giá công thức đề xuất

Kết quả tính toán theo công thức đề xuất được thể hiện ở Bảng 11. So sánh kết quả tính toán theo công thức đề xuất với thực nghiệm được thể hiện ở Bảng 12. Tỷ lệ $V_{exp.}/V_{pred.}$ theo công thức đề xuất được thể hiện ở Hình 4. So sánh chỉ số thống kê của công thức đề xuất với các tiêu chuẩn cho toàn bộ mẫu được thể hiện ở Bảng 13.

Bảng 12.

So sánh kết quả tính toán theo công thức đề xuất với thực nghiệm Công thức đề xuất $V_{exp.}/V_{pred.}$

Công thức đề xuất	$V_{exp.}/V_{pred.}$			
	\bar{X}	SD	CoV	AAE
	1,57	0,62	0,40	50,50



Hình 4. Tỷ lệ $V_{exp.}/V_{pred.}$ theo công thức đề xuất.

Bảng 13.

So sánh chỉ số thống kê của công thức đề xuất với các tiêu chuẩn.

Phương pháp	$V_{exp.}/V_{pred.}$			
	\bar{X}	SD	CoV	AAE
ACI440.1R	2,25	1,68	0,73	66,30
CSA S806	1,79	0,95	0,53	65,51
JSCE-1197	2,01	1,23	0,61	63,15
Đề xuất	1,57	0,62	0,40	50,50

So sánh Bảng 12 với các Bảng 4 và Bảng 8 thấy rằng, các chỉ số thống kê thu được từ công thức đề xuất là nhỏ nhất. Mặt khác số lượng mẫu có tỷ lệ $V_{exp}/V_{pred} < 1$ là 06 mẫu (chiếm 8,2 % như ở Hình 4), tương đương tiêu chuẩn ACI 440.1R.

5- Kết luận và kiến nghị

Từ các phân tích, tính toán, tổng hợp và đề xuất công thức dự báo khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép FRP theo TCVN 5574:2018 ở trên, so sánh kết quả tính toán với 73 kết quả thực nghiệm của nhiều tác giả khác nhau và trong phạm vi khảo sát cho thấy:

Các tiêu chuẩn thiết kế khả năng chịu cắt cho dầm bê tông cốt thép FRP, cốt đai FRP hoặc cốt đai thép thường đều cho kết quả khá an toàn so với kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên hệ số biến động, độ lệch chuẩn và sai số tuyệt đối trung bình khá cao;

Hai tiêu chuẩn ACI 440.1R-06 và JSCE-1997 có các chỉ số thống kê cao hơn tiêu chuẩn CSA S806-02 (trung bình lớn hơn lần lượt là 35 % và 13 % tương ứng) và cho thấy là quá an toàn, dẫn đến lãng phí vật liệu;

Công thức đề xuất dự báo khả năng chịu cắt cho dầm bê tông cốt FRP phù hợp với các kết quả thực nghiệm và cho các chỉ số thống kê nhỏ nhất. Công thức có hình thức tương tự như cho dầm bê tông cốt thép thường nhưng có thêm hệ số điều chỉnh (hệ số nhân) ϕ_{FRP} khi sử dụng cốt dọc thanh FRP.

Công thức đề xuất cho phép thiết kế kinh tế hơn với các cấu kiện dầm bê tông cốt thép FRP chịu cắt tuy nhiên cần kiểm chứng công thức đề xuất trên phạm vi dữ liệu thực nghiệm rộng hơn bao gồm cả cốt thép AFRP.

Với nhiều ưu điểm của cốt FRP, tiêu chuẩn của Việt Nam cần sớm có các chỉ dẫn thiết kế đối với kết cấu dầm bê tông cốt thép FRP và có thể xem xét áp dụng công thức đề xuất trong tính toán khả năng chịu cắt của loại dầm này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Bentz, E.C., L. Massam, and M.P. Collins, *Shear Strength of Large Concrete Members with FRP Reinforcement*. Journal of Composites for Construction, 2010. **14**(6): p. 637-646.
- [2] Issa, M.A., T. Ovitigala, and M. Ibrahim, *Shear Behavior of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams with and without Basalt FRP Stirrups*. Journal of Composites for Construction, 2016. **20**(4): p. 04015083.
- [3] Jumaa, G.B. and A.R. Yousif, *Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups*. Construction and Building Materials, 2019. **209**: p. 77-94.
- [4] Huy, Đ.T., *Nghiên cứu khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt sợi thủy tinh*, Luận văn thạc sĩ kỹ thuật, 2015, Đại học Kiến Trúc Hà Nội.
- [5] Razaqpur, A.G. and S. Spadea, *Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Members with Stirrups*. Journal of Composites for Construction, 2015. **19**(1): p. 04014025.
- [6] Kueres, S. and J. Hegger, *Variable strut inclination model for shear design of FRP reinforced concrete members with shear reinforcement*. Engineering Structures, 2020. **206**: p. 110154.
- [7] Rovnak, M. and L. Nguyen-Minh, *Shear resistance of GFRP-reinforced concrete beams*. Magazine of Concrete Research, 2011. **63**: p. 215-233.
- [8] Hoult, N.A., et al., *Does the Use of FRP Reinforcement Change the One-Way Shear Behavior of Reinforced Concrete Slabs?* Journal of Composites for Construction, 2008. **12**(2): p. 125-133.
- [9] ACI (American Concrete Institute), *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI 440.1R-06, 2006, Farmington Hills, MI.
- [10] CSA (Canadian Standards Association), *Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers*, CAN/CSAS806-02, 2002: Mississauga, ON, Canada.
- [11] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*, 1997: Research Committee on Continuous Fiber Reinforced Material, Tokyo
- [12] TCVN 5574-2018, *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – tiêu chuẩn thiết kế*, 2018: Bộ Xây Dựng Hà Nội.
- [13] Noor Azlina A. Hamid, et al., *Shear Strength Prediction for Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars*. ISCEE 2016.
- [14] Abu-Obaida, A., B. El-Ariss, and T. El-Maaddawy, *Behavior of Short-Span Concrete Members Internally Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Journal of Composites for Construction, 2018. **22**(5).
- [15] Ashour, A.F. and I.F. Kara, *Size effect on shear strength of FRP reinforced concrete beams*. Composites Part B: Engineering, 2014. **60**: p. 612-620.
- [16] Tottori S and Wakui H, *Shear capacity of RC and PC beams using FRP reinforcement*. In: Fiber-reinforced-plastic reinforcement for concrete structures, SP-138. Detroit: American Concrete Institute, 1993: p. 615-32.
- [17] P. Bamforth, et al., *Properties of Concrete for use in Eurocode 2*. The Concrete Centre, 2008.
- [18] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), Reported by ACI Committee 318.
- [19] CSA "Design of concrete structures", Standard A23.3-04.