

Hiệu chỉnh mô hình bám dính - trượt của tấm sợi các-bon với bê tông

Trần Văn Phúc

Calibration of a Bond-Slip Model for the CFRP - Concrete Interface

Tóm tắt

Ứng xử bám dính - trượt giữa bê tông và tấm FRP quyết định đến hiệu quả gia cường của tấm FRP, do đó ảnh hưởng mạnh đến ứng xử và khả năng chịu lực của cấu kiện bê tông cốt thép được gia cường bằng tấm FRP. Bài báo này đề xuất hiệu chỉnh mô hình dự đoán ứng xử bám dính - trượt giữa tấm CFRP và bê tông có xét đến ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố như cường độ bê tông, độ cứng của tấm CFRP, keo dán, tỉ số bề rộng tấm dán và mẫu thí nghiệm dựa trên 45 mẫu thực nghiệm từ các nghiên cứu thực nghiệm đã có. Kết quả kiểm chứng trên 89 mẫu thực nghiệm cho thấy mô hình hiệu chỉnh được đề xuất dự đoán tốt kết quả thực nghiệm và ổn định hơn so với các mô hình hiện có. Mô hình hiệu chỉnh đề xuất có thể được sử dụng hiệu quả cho các nghiên cứu liên quan đến cấu kiện bê tông cốt thép gia cường dùng vật liệu FRP dán ngoài.

Từ khóa: mô hình bám dính hiệu chỉnh; liên kết CFRP - bê tông; phương pháp hồi quy; bản thực nghiệm; kiểm chứng

Abstract

The bond-slip behavior between concrete and FRP sheets determines the strengthening efficiency of the FRP sheets and therefore strongly influences the behavior and load-bearing capacity of reinforced concrete members strengthened externally with FRP sheets. This paper proposes a modified semi-empirical model to predict the bond-slip behavior between CFRP sheets and concrete, considering the interaction between factors such as concrete strength, CFRP sheet stiffness, adhesive, ratio of CFRP sheet width to specimen width, based on 45 specimens from existing experimental studies. Verification results of 89 specimens show that the modified model provides accurate predictions and is more stable than existing models. The modified model can be effectively used for research related to reinforced concrete elements reinforced with externally bonded FRP materials.

Key words: modified bond-slip model; CFRP sheet-concrete connection; regression method; semi-empirical method; verification

TS. Trần Văn Phúc

Khoa Xây dựng
Trường Đại học Kiến trúc Thành phố Hồ Chí Minh
Email: phuc.tranvan@uah.edu.vn; Điện thoại:
0967172905

Ngày hoàn thiện bài: 06/02/2026
Ngày duyệt đăng: 09/03/2026

1. Đặt vấn đề

Ứng xử bám dính - trượt giữa bê tông và tấm FRP quyết định đến hiệu quả gia cường của tấm FRP và vì vậy ảnh hưởng mạnh đến ứng xử và khả năng chịu lực của kết cấu bê tông gia cường tấm FRP [1], [2]. Các mô hình bám dính - trượt giữa tấm FRP và bê tông hiện có chủ yếu được xây dựng dựa trên phương pháp thực nghiệm hoặc bán thực nghiệm [3-13]. Trong số này, một số mô hình chỉ mới đề cập đến ảnh hưởng đơn điệu của cường độ bê tông đến ứng xử bám dính - trượt, chưa xét đến các yếu tố khác như độ cứng của tấm và keo, và được xây dựng dựa trên một số lượng mẫu hạn chế [4], [5], [8], [9], [13]. Bên cạnh đó, một số mô hình quá phức tạp vì chứa nhiều tham số khó xác định trong thí nghiệm [12]. Ngoài ra, hầu hết các mô hình trên đều chưa xét được ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố như cường độ, độ cứng tấm FRP và của lớp keo dán, tỉ số của bề rộng tấm FRP trên bề rộng của mẫu bê tông. Bài báo này đề xuất một mô hình mới để mô tả ứng xử bám dính - trượt giữa tấm CFRP và bê tông trong trường hợp tổng quát, có xét đến ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố như cường độ bê tông, độ cứng của tấm CFRP, keo dán, tỉ số bề rộng tấm dán và mẫu thí nghiệm dựa trên miền dữ liệu thực nghiệm rộng từ các nghiên cứu thực nghiệm đã có. Mô hình đề xuất được kỳ vọng phản ánh được bản chất của ứng xử bám dính - trượt của vật liệu CFRP với bê tông một cách hợp lý và xác thực hơn, nhằm phục vụ hiệu quả cho các nghiên cứu mô phỏng các kết cấu bê tông gia cường dùng vật liệu CFRP dán ngoài.

2. Hiệu chỉnh mô hình bám dính - trượt

2.1. Sơ lược về các mô hình bám dính - trượt hiện có

Nhiều mô hình bám dính - trượt đã được đề xuất, dựa trên nhiều phương pháp khác nhau từ thực nghiệm đến lý thuyết. Tuy nhiên, phần lớn các mô hình hiện có chưa xét được ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố như cường độ, độ cứng tấm FRP và của lớp keo dán, tỉ số của bề rộng tấm FRP trên bề rộng của mẫu bê tông. Tổng quan sơ lược về các mô hình hiện nay có thể chia thành bốn nhánh chính được trình bày như Hình 1.

2.2. Hiệu chỉnh mô hình

2.2.1. Khái quát phương pháp

Ứng suất bám dính τ và độ trượt s của tấm CFRP liên kết với bê tông được xác định dựa trên phương pháp phân phối biến dạng lần lượt được xác định theo công thức (1) và (2) [4] như sau:

$$\tau_{i+1/2} = \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) E_f t_f}{(x_{i+1} - x_i)} \quad (1)$$

$$s(x) = s(x_i) + \varepsilon_i (x - x_i) + \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)(x - x_i)^2}{2(x_{i+1} - x_i)} \quad (2)$$

Trong đó:

$\tau_{i+1/2}$ = ứng suất giữa hai vị trí cảm biến i và $i+1$;

$\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}$ = biến dạng tại vị trí cảm biến i và $i+1$;

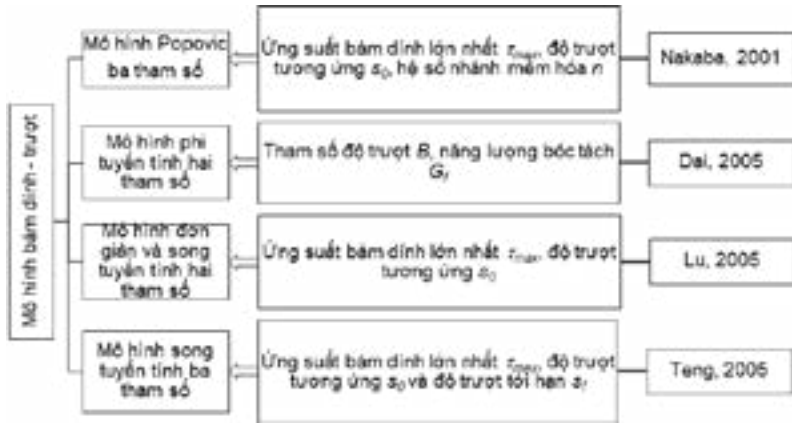
x_i, x_{i+1} = tọa độ cảm biến thứ i và $i+1$;

$s(x)$ = độ trượt tại vị trí đang xét;

$s(x_i)$ = độ trượt tại vị trí cảm biến i ;

$E_f t_f$ = độ cứng tấm CFRP.

Hàm hồi quy Popovics [14] được áp dụng để xây dựng quan hệ ứng suất bám dính và độ trượt, với ba tham số: ứng suất bám dính lớn nhất τ_{max} ; độ trượt tương ứng s_0 ; và hệ số nhánh mềm hóa n . Các tham số này được xác định từ phương pháp hồi quy phi tuyến tìm tương quan giữa các giá trị thực nghiệm với các yếu tố chiều dài dán tấm L_p , cường độ bê tông f_c và độ cứng tấm CFRP ($E_f t_f$) theo hàm dạng lũy thừa $y = ax^b$, cụ thể:



Hình 1: Các nhánh nghiên cứu chính về mô hình ứng suất bám dính - trượt của liên kết tấm FRP - bê tông hiện có

$$\tau = \tau_{\max} \frac{s}{s_0} \frac{n}{n - 1 + \left(\frac{s}{s_0} \right)^n} \quad (3)$$

$$\tau_{\max} = a_{t1} a_{t2} b_w (f_c)^{b_{t1}} (E_f t_f)^{b_{t2}} \quad (4)$$

$$s_0 = a_{s1} a_{s2} a_{s3} b_w (L)^{b_{s1}} (f_c)^{b_{s2}} (E_f t_f)^{b_{s3}} \quad (5)$$

$$n = a_{n1} b_w (f_c)^{b_{n1}} \quad (6)$$

Trong đó, các hệ số a_{t1} , a_{t2} , a_{s1} , a_{s2} , a_{s3} , a_{n1} , b_{t1} , b_{t2} , b_{s1} , b_{s2} , b_{s3} , b_{n1} có dạng m_{xy} ý nghĩa như sau:

$m = a, b$ với a là hệ số nhân phía trước, b là hệ số lũy thừa;

$x = \tau, s$, n với τ là ứng suất tính toán, s là độ trượt tính toán, n là tham số n tính toán;

$y = 1, 2, 3$ tương ứng với các bước tính toán tương quan với các yếu tố vật liệu.

Hệ số ảnh hưởng của yếu tố bề rộng tấm CFRP, b_w , được xác định theo Chen và Teng [15] như sau:

$$b_w = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/b_c}} \quad (7)$$

Dữ liệu hồi quy được tổng hợp từ các số liệu thực nghiệm thu từ nghiên cứu của [4], [7], [16-20]. Tổng số lượng 45 mẫu thực nghiệm được dùng để hiệu chỉnh mô hình ứng suất bám dính - độ trượt với phổ giá trị khảo sát tương đối rộng, gồm cường độ bê tông từ 22.4 đến 74 MPa, độ cứng của tấm CFRP từ 25.3 đến 75.9 N/mm, chiều dài dán tấm từ 150 đến 330 mm và tỉ số bề rộng tấm CFRP trên bề rộng mẫu từ 0.15 đến 0.75.

2.2.2. Quy trình xây dựng mô hình

(a) Xác định ứng suất bám dính lớn nhất $\tau_{\max}$

Công thức tính ứng suất bám dính lớn nhất được thực hiện theo các bước sau như sau:

Bước 1: Chuẩn bị số liệu

Các giá trị từ thực nghiệm như độ cứng tấm CFRP $E_f t_f$, chiều dày tấm t_f , chiều dài dán

L_b , cường độ chịu nén mẫu lăng trụ của bê tông f_c và hệ số ảnh hưởng của bề rộng tấm CFRP được tổng hợp. Các tham số ứng suất bám dính lớn nhất $\tau_{\max}$, độ trượt tương ứng s_0 , hệ số nhánh mềm hóa n được xác định theo phương pháp phân phối biến dạng.

Bước 2: Xác định tương quan với cường độ bê tông

Tương quan giữa $\frac{\tau_{\max}}{b_w}$ và f_c có dạng như sau:

$$\frac{\tau_{\max}}{b_w} = a_{t1} (f_c)^{b_{t1}} \quad (8)$$

Từ phương pháp hồi quy phi tuyến, các hệ số $a_{t1}=0.3670$ và $b_{t1}=0.51$ được xác định (Hình 2a).

Bước 3: Xác định tương quan với độ cứng tấm

Tương quan giữa $\frac{\tau_{\max}}{b_w (f_c)^{b_{t1}}}$ và $E_f t_f$ được xác định như sau:

$$\frac{\tau_{\max}}{b_w (f_c)^{b_{t1}}} = a_{t2} (E_f t_f)^{b_{t2}} \quad (9)$$

Các hệ số $a_{t2}=0.8750$ và $b_{t2}=0.25$ được xác định bằng phương pháp hồi quy phi tuyến (Hình 2b).

Từ đó, ứng suất bám dính lớn nhất có thể được xác định như sau:

$$\begin{cases} \tau_{\max} = 0.47 b_w (f_c)^{0.51} (E_f t_f)^{0.12} & \text{ khi } f_c < 32 \text{ MPa} \\ \tau_{\max} = 0.32 b_w (f_c)^{0.51} (E_f t_f)^{0.25} & \text{ khi } f_c \geq 32 \text{ MPa} \end{cases} \quad (10)$$

Lưu ý rằng, đơn vị tính toán của các đại lượng $\tau_{\max}$, f_c , E_f trong các công thức trên là MPa; t_f là mm và b_w không có thứ nguyên do quan hệ được xây dựng dựa trên phương pháp hồi quy thực nghiệm.

(b) Xác định độ trượt s_0 tương ứng với $\tau_{\max}$

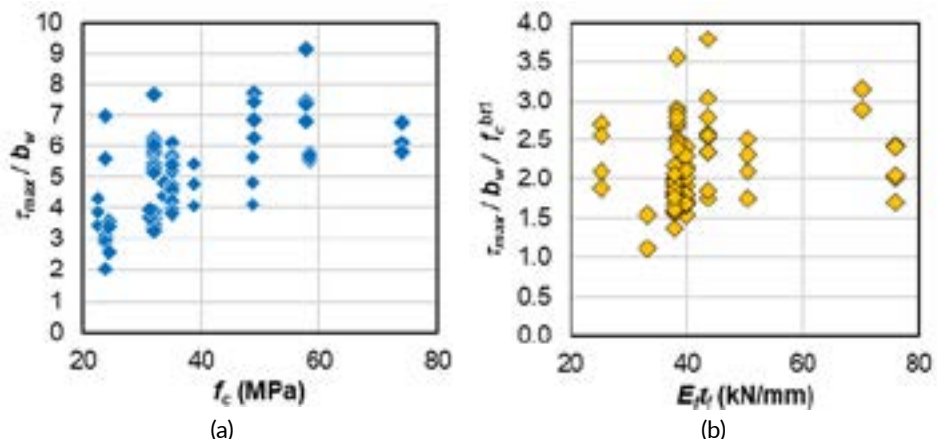
Công thức tính độ trượt tương ứng với ứng suất bám dính lớn nhất được thực hiện theo các bước sau như sau:

Bước 1: Chuẩn bị số liệu

Xem Mục (a).

Bước 2: Xác định tương quan với độ cứng tấm

Tương quan giữa s_0/b_w và $E_f t_f$ được xác định cụ thể như sau:



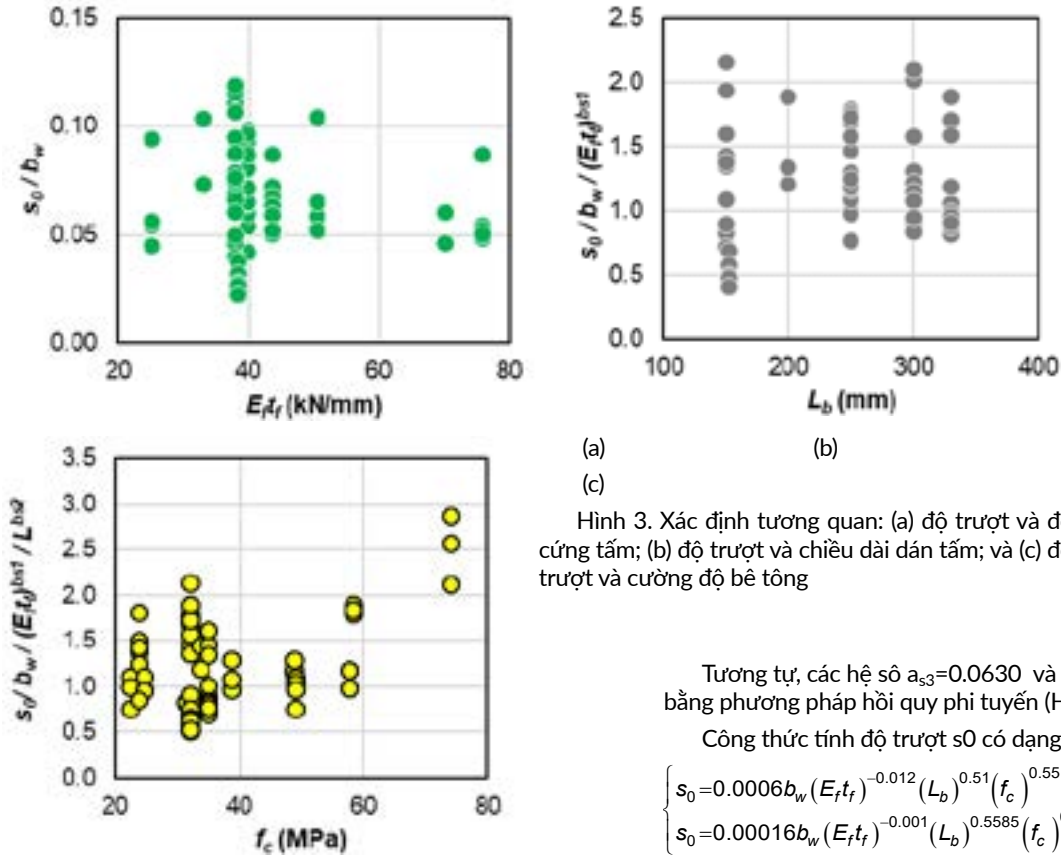
Hình 2: Xác định tương quan: (a) ứng suất và cường độ bê tông; và (b) ứng suất và độ cứng tấm CFRP

Bảng 2. Tính toán và kiểm chứng công thức tính ứng suất bám dính lớn nhất, τ_{max}

TT	Tham khảo	Số hiệu mẫu	$\tau_{max,exp}$	f_c	E_f	Tác giả		Neubauer (1999) [3]		Nakaba (2001) [4]		Monti (2003) [6]		Lu (2005) [9]	
				MPa	N/mm	$\tau_{max,pre}$	τ_{pre}/τ_{exp}	$\tau_{max,pre}$	τ_{pre}/τ_{exp}	$\tau_{max,pre}$	τ_{pre}/τ_{exp}	$\tau_{max,pre}$	τ_{pre}/τ_{exp}	$\tau_{max,pre}$	τ_{pre}/τ_{exp}
1		C5-HCF	9.13	57.6	70.1	7.32	0.8	7.68	0.84	7.56	0.83	8.87	0.97	6.03	0.66
2		C5-SCF	7.49	57.6	43.6	6.5	0.87	7.68	1.03	7.56	1.01	8.87	1.18	6.03	0.81
3		C5-SCFH	6.79	57.6	43.6	6.5	0.96	7.68	1.13	7.56	1.11	8.87	1.31	6.03	0.89
4		C5-SCFL	7.33	57.6	43.6	6.5	0.89	7.68	1.05	7.56	1.03	8.87	1.21	6.03	0.82
5	Nakaba (2001) [4]	M5-HCF	7.71	49	70.1	6.74	0.87	7.08	0.92	7.33	0.95	8.18	1.06	5.57	0.72
6		M5-SCF	6.25	49	43.6	5.98	0.96	7.08	1.13	7.33	1.17	8.18	1.31	5.57	0.89
7		M5-SCFH	6.83	49	43.6	5.98	0.88	7.08	1.04	7.33	1.07	8.18	1.2	5.57	0.81
8		M5-SCFL	7.44	49	43.6	5.98	0.8	7.08	0.95	7.33	0.99	8.18	1.1	5.57	0.75
9		C2-SCF	6.99	23.8	43.6	3.72	0.53	4.94	0.71	6.39	0.91	5.7	0.82	3.88	0.55
10		C2P-SCF	5.6	23.8	43.6	3.72	0.66	4.94	0.88	6.39	1.14	5.7	1.02	3.88	0.69
11		D21-10	5.35	21	224.9	4.75	0.89	4.89	0.91	6.24	1.17	4.89	0.91	4.07	0.76
12		D21-15	4.07	21	224.9	4.75	1.17	4.89	1.2	6.24	1.53	4.89	1.2	4.07	1
13	Yang (2003) [21]	D21-20	3.56	21	224.9	4.75	1.34	4.89	1.37	6.24	1.75	4.89	1.37	4.07	1.14
14		D21-25	3.62	21	224.9	4.75	1.31	4.89	1.35	6.24	1.72	4.89	1.35	4.07	1.13
15		D28-10	5.03	28	224.9	5.51	1.09	5.64	1.12	6.59	1.31	5.64	1.12	4.7	0.94
16		D28-15	7.31	28	224.9	5.51	0.75	5.64	0.77	6.59	0.9	5.64	0.77	4.7	0.64
17		D28-20	3.73	28	224.9	5.51	1.48	5.64	1.51	6.59	1.77	5.64	1.51	4.7	1.26
18		D28-25	2.77	28	224.9	5.51	1.99	5.64	2.04	6.59	2.38	5.64	2.04	4.7	1.7
19		CC-1	5.01	45.8	30	5.26	1.05	6.85	1.37	7.24	1.44	7.91	1.58	5.38	1.07
20		CC-2	4.61	45.8	30	5.26	1.14	6.85	1.49	7.24	1.57	7.91	1.72	5.38	1.17
21	Kamiharako (2003) [22]	CC-3	4.3	36.3	30	4.68	1.09	6.1	1.42	6.93	1.61	7.04	1.64	4.79	1.11
22		CR1L1	5.58	35	25.3	5.21	0.93	7.08	1.27	6.88	1.23	6.47	1.16	4.43	0.79
23		CR1L1	7.22	35	25.3	5.21	0.72	7.08	0.98	6.88	0.95	6.47	0.9	4.43	0.61
24		CR1L1	6.8	35	25.3	5.21	0.77	7.08	1.04	6.88	1.01	6.47	0.95	4.43	0.65
25		CR1L2	5.58	35	50.6	6.19	1.11	7.08	1.27	6.88	1.23	6.47	1.16	4.43	0.79
26		CR1L2	6.67	35	50.6	6.19	0.93	7.08	1.06	6.88	1.03	6.47	0.97	4.43	0.66
27		CR1L2	6.13	35	50.6	6.19	1.01	7.08	1.16	6.88	1.12	6.47	1.05	4.43	0.72
28		CR1L3	5.36	35	75.9	6.85	1.28	7.08	1.32	6.88	1.28	6.47	1.21	4.43	0.83
29	Dai (2005) [7]	CR1L3	6.47	35	75.9	6.85	1.06	7.08	1.09	6.88	1.06	6.47	1	4.43	0.69
30		CR1L3	6.4	35	75.9	6.85	1.07	7.08	1.11	6.88	1.07	6.47	1.01	4.43	0.69
31		CR1L3	5.45	35	75.9	6.85	1.26	7.08	1.3	6.88	1.26	6.47	1.19	4.43	0.81
32		CR2L1	4.99	35	25.3	5.21	1.04	7.08	1.42	6.88	1.38	6.47	1.3	4.43	0.89
33		CR2L2	4.68	35	50.6	6.19	1.32	7.08	1.51	6.88	1.47	6.47	1.38	4.43	0.95
34		CR2L3	4.51	35	75.9	6.85	1.52	7.08	1.57	6.88	1.52	6.47	1.43	4.43	0.98
35		G-I-1	25.09	25.1	17	3.82	0.15	5.34	0.21	6.46	0.26	5.34	0.21	4.45	0.18
36		G-I-2	25.09	25.1	17	3.82	0.15	5.34	0.21	6.46	0.26	5.34	0.21	4.45	0.18
37	Guo (2005) [8]	G-I-3	25.09	25.1	17	3.82	0.15	5.34	0.21	6.46	0.26	5.34	0.21	4.45	0.18
38		G-I-4	25.09	25.1	17	3.82	0.15	5.34	0.21	6.46	0.26	5.34	0.21	4.45	0.18
39		G-I-5	25.09	25.1	17	3.82	0.15	5.34	0.21	6.46	0.26	5.34	0.21	4.45	0.18
40		G-II-7	25.13	25.1	17	3.82	0.15	5.35	0.21	6.46	0.26	5.35	0.21	4.46	0.18
41	Yao (2005) [23]	G-III-9	32.82	32.8	17	4.31	0.13	6.11	0.19	6.79	0.21	6.11	0.19	5.09	0.16
42		I-1	6.62	23	42.2	4.07	0.62	5.12	0.77	6.35	0.96	5.12	0.77	4.26	0.64
43		I-16	5.43	23	42.2	4.07	0.75	5.12	0.94	6.35	1.17	5.12	0.94	4.26	0.79
44		C2-1	3.71	31.4	43.6	4.29	1.16	5.67	1.53	6.74	1.82	6.55	1.76	4.45	1.2
45	Ko & Sato (2007) [16]	C2-2	3.93	31.4	43.6	4.29	1.09	5.67	1.44	6.74	1.71	6.55	1.67	4.45	1.13

46	Subramaniam (2007) [17]	W 1	6.83	32.1	38.4	5.1	0.75	6.26	0.92	6.76	0.99	7	1.02	4.72	0.69
47		W 2	6.27	32.1	38.4	5.1	0.81	6.26	1	6.76	1.08	7	1.12	4.72	0.75
48		W 3	6.7	32.1	38.4	5.1	0.76	6.26	0.93	6.76	1.01	7	1.04	4.72	0.7
49		W 4	6.66	32.1	38.4	5.33	0.8	6.54	0.98	6.76	1.02	7.34	1.1	4.92	0.74
50		W 5	8.74	32.1	38.4	5.33	0.61	6.54	0.75	6.76	0.77	7.34	0.84	4.92	0.56
51		W 6	6.66	32.1	38.4	5.72	0.86	7.02	1.05	6.76	1.02	7.94	1.19	5.26	0.79
52		W 7	6.65	32.1	38.4	5.72	0.86	7.02	1.05	6.76	1.02	7.94	1.19	5.26	0.79
53		W 8	7.36	32.1	38.4	5.72	0.78	7.02	0.95	6.76	0.92	7.94	1.08	5.26	0.71
54		W 9	6.72	32.1	38.4	5.92	0.88	7.26	1.08	6.76	1.01	8.25	1.23	5.43	0.81
55		W 10	6.51	32.1	38.4	5.92	0.91	7.26	1.11	6.76	1.04	8.25	1.27	5.43	0.83
56	Trần Quốc Cường (2014) [18]	S1-30	0.05	24.5	38	0.04	0.98	0.04	0.96	0.07	1.44	0.05	1.13	0.23	5.02
57		S2-30	0.05	24.5	38	0.04	0.86	0.04	0.84	0.07	1.27	0.05	1	0.23	4.43
58		S3-30	0.04	24.5	38	0.04	1	0.04	0.98	0.07	1.48	0.05	1.16	0.23	5.13
59		S1-50	0.07	33.7	38	0.05	0.73	0.04	0.64	0.07	0.97	0.05	0.76	0.23	3.37
60		S3-50	0.06	33.7	38	0.05	0.88	0.04	0.78	0.07	1.18	0.05	0.93	0.23	4.11
61		S1-70	0.09	58.2	38	0.08	0.86	0.04	0.49	0.07	0.74	0.05	0.58	0.23	2.57
62		S2-70	0.08	58.2	38	0.08	0.91	0.04	0.52	0.07	0.78	0.05	0.61	0.23	2.72
63		S3-70	0.09	58.2	38	0.08	0.89	0.04	0.51	0.07	0.76	0.05	0.6	0.23	2.66
64		S1-90	0.13	74	38	0.09	0.69	0.04	0.32	0.07	0.49	0.05	0.38	0.23	1.7
65		S2-90	0.12	74	38	0.09	0.77	0.04	0.36	0.07	0.55	0.05	0.43	0.23	1.9
66	Ko (2014) [24]	S3-90	0.1	74	38	0.09	0.93	0.04	0.44	0.07	0.66	0.05	0.52	0.23	2.3
67		C1A-1	7.12	31.4	198	4.6	0.65	5.07	0.71	6.74	0.95	5.35	0.75	3.74	0.52
68		C1A-2	4.8	31.4	198	4.6	0.96	5.07	1.06	6.74	1.4	5.35	1.11	3.74	0.78
69		C1A-3	4.37	31.4	198	4.6	1.05	5.07	1.16	6.74	1.54	5.35	1.22	3.74	0.86
70		C1C-2	4.54	31.4	214.5	5.55	1.22	6.06	1.34	6.74	1.48	6.55	1.44	4.45	0.98
71		C2-1	5.16	30.2	175	4.44	0.86	4.97	0.96	6.69	1.3	5.24	1.02	3.66	0.71
72		C2-2	3.82	30.2	175	4.44	1.16	4.97	1.3	6.69	1.75	5.24	1.37	3.66	0.96
73		C2-3	5.29	30.2	175	4.44	0.84	4.97	0.94	6.69	1.26	5.24	0.99	3.66	0.69
74		C3-2	5.58	27.7	198	4.31	0.77	4.76	0.85	6.58	1.18	5.02	0.9	3.51	0.63
75		C4-2	3.97	30.2	238	4.61	1.16	4.97	1.25	6.69	1.68	5.24	1.32	3.66	0.92
76	Nguyễn Phạm Tuấn Minh (2015) [19]	SC-M300-L200	3.48	23.8	38	4.09	1.18	5.52	1.59	6.39	1.84	6.01	1.73	4.06	1.17
77		SC-M300-L250	3.21	23.8	38	4.09	1.28	5.52	1.72	6.39	1.99	6.01	1.87	4.06	1.26
78		SC-M300-L300	3.28	23.8	38	4.09	1.25	5.52	1.68	6.39	1.95	6.01	1.83	4.06	1.24
79		SC-M450-L200	3.84	32.1	38	5.21	1.36	6.41	1.67	6.76	1.76	6.97	1.82	4.71	1.23
80		SC-M450-L250	4.27	32.1	38	5.21	1.22	6.41	1.5	6.76	1.58	6.97	1.63	4.71	1.1
81		SC-M450-L300	4.36	32.1	38	5.21	1.19	6.41	1.47	6.76	1.55	6.97	1.6	4.71	1.08
82		SC-M300-L200	2.29	23.8	33.2	4.03	1.76	5.52	2.41	6.39	2.79	6.01	2.62	4.06	1.77
83		SC-M450-L200	3.68	32.1	33.2	5.03	1.37	6.41	1.74	6.76	1.84	6.97	1.9	4.71	1.28
84		SC-LAB-1	4.02	32.1	39.8	5.27	1.31	6.41	1.59	6.76	1.68	6.97	1.73	4.71	1.17
85		SC-LAB-2	4.07	32.1	39.8	5.27	1.29	6.41	1.57	6.76	1.66	6.97	1.71	4.71	1.16
86	Huỳnh Nguyễn Vĩ (2017) [20]	SC-LAB-3	4.12	32.1	39.8	5.27	1.28	6.41	1.56	6.76	1.64	6.97	1.69	4.71	1.14
87		SC-LAB-4	4.34	32.1	39.8	5.27	1.21	6.41	1.48	6.76	1.56	6.97	1.61	4.71	1.09
88		SC-LAB-5	4.05	32.1	39.8	5.27	1.3	6.41	1.58	6.76	1.67	6.97	1.72	4.71	1.16
89		SC-LAB-6	4.07	32.1	39.8	5.27	1.29	6.41	1.57	6.76	1.66	6.97	1.71	4.71	1.16
						Min	0.13	Min	0.71	Min	0.21	Min	0.19	Min	0.16
						Max	1.99	Max	2.41	Max	2.79	Max	2.62	Max	1.77
						M	0.99	M	1.28	M	1.31	M	1.24	M	0.87
						STD	0.33	STD	0.3	STD	0.44	STD	0.43	STD	0.29
						CoV	0.33	CoV	0.23	CoV	0.34	CoV	0.35	CoV	0.33

Ghi chú: M (Mean): giá trị trung bình; STD: độ lệch chuẩn; CoV: hệ số biến thiên.



(a)

(b)

(c)

Hình 3. Xác định tương quan: (a) độ trượt và độ cứng tấm; (b) độ trượt và chiều dài dán tấm; và (c) trượt và cường độ bê tông

Tương tự, các hệ số $a_{s3}=0.0630$ và $b_{s3}=0.8$ được xác định bằng phương pháp hồi quy phi tuyến (Hình 3c).

Công thức tính độ trượt s_0 có dạng như sau:

$$\begin{cases} s_0 = 0.0006b_w(E_t t_f)^{-0.012}(L_b)^{0.51}(f_c)^{0.55} & \text{khí } f_c < 32\text{MPa} \\ s_0 = 0.00016b_w(E_t t_f)^{-0.001}(L_b)^{0.5585}(f_c)^{0.8} & \text{khí } f_c \geq 32\text{MPa} \end{cases} \quad (14)$$

(c) Xác định tham số n

Tương tự, bằng cách sử dụng hồi quy công thức tính tham số n có dạng như sau:

$$n = 5.357b_w(f_c)^{-0.12} \quad (15)$$

Mô hình ứng suất bám dính - độ trượt hiệu chỉnh được tổng hợp và trình bày lại trong Bảng 1.

Mô hình dự đoán ứng suất bám dính - trượt hiệu chỉnh dựa trên phương pháp hồi quy hàm Popovic đã kể đến ảnh hưởng tương tác của cường độ bê tông, độ cứng của tấm CFRP, chiều dài dán, tỉ số bề rộng tấm dán và mẫu thí nghiệm. Lớp keo dán là yếu tố quan trọng trong cơ chế truyền lực giữa tấm dán và bề mặt bê tông, được kể đến gián tiếp trong các hệ số thực nghiệm tương quan với độ cứng của tấm CFRP và cường độ bê tông.

3. Kiểm chứng và thảo luận

Mô hình ứng suất bám dính - độ trượt hiệu chỉnh được kiểm chứng và so sánh với các mô hình của các tác giả Neubauer và Rostasy [3], Nakaba và cộng sự [4], Monti và cộng sự [6], Lu và cộng sự [9] trên số liệu của 89 mẫu thực nghiệm từ các nghiên cứu của tác giả [4], [7], [8], [16-24]. Kết quả kiểm chứng và so sánh được tổng hợp trong Bảng 2.

Hình 4 biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt theo mô hình đề xuất, được tính toán theo mô hình tại Bảng 1. Từ kết quả kiểm chứng trên cho thấy mô hình hiệu chỉnh dự đoán cường độ bám dính của tấm CFRP gần với kết quả thực nghiệm hơn so với các mô hình hiện có. Ứng suất bám dính lớn nhất dự đoán theo công thức hiệu chỉnh cho giá trị trung bình (Mean), độ lệch

$$\frac{s_0}{b_w} = a_{s1}(E_t t_f)^{b_{s1}} \quad (11)$$

Tương tự, phương pháp hồi quy phi tuyến được dùng để xác định các hệ số $a_{s1}=0.0553$ và $b_{s1}=-0.001$ (Hình 3a).

Bước 3: Xác định tương quan với chiều dài dán L_b

Tương quan giữa $\frac{s_0}{b_w(E_t t_f)^{b_{s1}}}$ và L_b được biểu diễn như sau:

$$\frac{s_0}{b_w(E_t t_f)^{b_{s1}}} = a_{t2}(L_b)^{b_{s2}} \quad (12)$$

Các hệ số $a_{s2}=0.0458$ và $b_{s2}=0.5585$ được xác định bằng phương pháp hồi quy phi tuyến (Hình 3b).

Bước 4: Xác định tương quan với cường độ bê tông

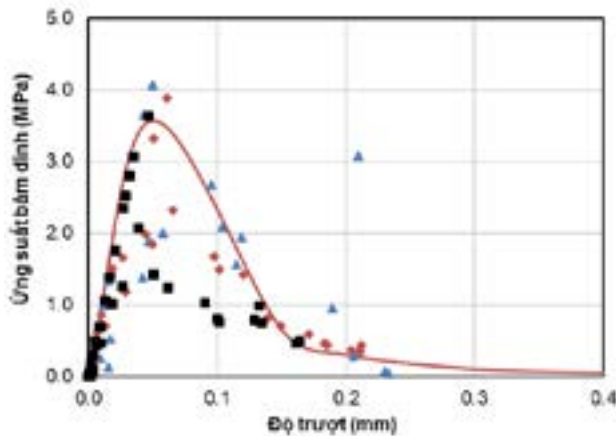
Tương quan giữa $\frac{\tau_{\max}}{b_w(E_t t_f)^{b_{s1}}(L_b)^{b_{s2}}}$ và f_c có dạng như sau:

$$\frac{\tau_{\max}}{b_w(E_t t_f)^{b_{s1}}(L_b)^{b_{s2}}} = a_{s3}(f_c)^{b_{s3}} \quad (13)$$

Bảng 1. Mô hình ứng suất bám dính - trượt hiệu chỉnh

$\tau = \tau_{\max} \frac{s}{s_0} \frac{n}{n-1 + \left(\frac{s}{s_0}\right)^n}$	$\begin{cases} \tau_{\max} = 0.47b_w(f_c)^{0.51}(E_t t_f)^{0.12} & \text{khí } f_c < 32\text{MPa} \\ \tau_{\max} = 0.32b_w(f_c)^{0.51}(E_t t_f)^{0.25} & \text{khí } f_c \geq 32\text{MPa} \end{cases}$
	$\begin{cases} s_0 = 0.0006b_w(E_t t_f)^{-0.012}(L_b)^{0.51}(f_c)^{0.55} & \text{khí } f_c < 32\text{MPa} \\ s_0 = 0.00016b_w(E_t t_f)^{-0.001}(L_b)^{0.5585}(f_c)^{0.8} & \text{khí } f_c \geq 32\text{MPa} \end{cases}$
	$n = 5.357b_w(f_c)^{-0.12}$

chuẩn (STD) và hệ số biến thiên tương ứng (CoV) của tỷ số giá trị dự đoán trên thực nghiệm ($\tau_{max,pre} / \tau_{max,exp}$) lần lượt là 0.99, 0.33 và 0.33.



Hình 4. Mô hình ứng suất bám dính - độ trượt hiệu chỉnh của liên kết tấm CFRP và bê tông

4. Kết luận

Bài báo này hiệu chỉnh mô hình dự đoán ứng xử bám dính - trượt giữa tấm CFRP và bê tông có xét đến ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố như cường độ bê tông, độ cứng của tấm CFRP, keo dán, tỉ số bề rộng tấm dán và mẫu thí nghiệm. Mô hình hiệu chỉnh được xây dựng dựa trên phương pháp hồi quy hàm dạng Popovic từ cơ sở dữ liệu 45 mẫu thực nghiệm của nhiều nghiên cứu khác nhau với miền giá trị rộng của các thông số hình học và tính chất cơ lý của vật liệu như chiều dài dán tấm từ 150 đến 330mm, bề rộng tấm, cường độ bê tông từ 22.4 đến 74 MPa, độ cứng tấm CFRP từ 25.3 đến 75.9 N/mm. Kết quả kiểm chứng trên 89 mẫu cho thấy công thức tính ứng suất lớn nhất cho thấy mô hình hiệu chỉnh dự đoán kết quả gần thực nghiệm hơn so với các mô hình hiện có với độ chính xác đáng tin cậy thể hiện qua giá trị trung bình (Mean), độ lệch chuẩn (STD) và hệ số biến thiên tương ứng (CoV) của tỷ số cường độ bám dính tính toán và thực nghiệm lần lượt là 0.99, 0.33 và 0.33. Mô hình hiện tại chủ yếu áp dụng cho tấm CFRP trong miền giá trị khảo sát; việc mở rộng cho các loại vật liệu FRP khác và điều kiện làm việc phức tạp hơn cần được nghiên cứu trong tương lai./.

Tài liệu tham khảo

- Rajai Z. Al-Rousan, Ahmad M. Abu-Elhija. "Predicting the bond-slip relationship between concrete and CFRP using anchoring holes technique", *Case Studies in Construction Materials*, Vo. 13, e00462, 2020.
- Anil Ö, Çevik A. "Bond-slip model between anchored CFRP strip and concrete by using ANN", *Structural Concrete*, Vol. 24, No. 4, pp. 4841-4868, 2023. <https://doi.org/10.1002/suco.202200896>
- Neubauer, U. and Rostasy, F. "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates", *Proceedings of the Seventh International Conference on Structural Faults and Repair*, Edinburgh, pp. 407-16, 1997.
- Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T. and Yoshizawa, H. "Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 3, pp. 359-367, 2001.
- Savoia M., Ferracuti B. & Mazzotti C. "Non linear bondslip law for FRP-concrete interface". In *FRPRCS-6; Proc.intern. symp.*, Singapore, 2003.
- G Monti, M Renzelli, P Luciani. "FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones. Proc., Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures", *The Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6)*, 2003.
- Dai, J., Ueda, T. and Sato, Y. "Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9 No. 1, pp. 52-62, 2005.
- Guo, Z., Cao, S., Sun, W. and Lin, X. "Experimental study on bond stress-slip behaviour between FRP sheets and concrete", *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, pp. 77-84, 2005.
- Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P. and Jiang, J.J. "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete", *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 6, pp. 920-937, 2005.
- Zhou, Y.W., Wu, Y.F. and Yun, Y. "Analytical modeling of the bond-slip relationship at FRP-concrete interfaces for adhesively-bonded joints". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, No. 6, pp. 423-433, 2010.
- Liu, K. and Wu, F. "Analytical identification of bond-slip relationship of EBFPR joints". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 4, pp. 1955-1963, 2012.
- H. Abdel Baky, U.A. Ebead, K.W. Neale. "Nonlinear micromechanics-based bond-slip model for FRP/concrete interfaces", *Engineering Structures*, Volume 39, pp. 11-23, 2012.
- Hugo C. Bicaia, Carlos Chastre, Manuel A.G. Silva. "Linear and nonlinear analysis of bond-slip models for interfaces between FRP composites and concrete", *Composites Part B: Engineering*, Volume 45, No. 1, pp. 1554-1568, 2013.
- Popovics, S. "A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 5, pp. 583-599, 1973.
- Chen, J.F. and Teng, J.G. "Anchorage strength models for FRP and steel plates glued to concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp. 784-791, 2001.
- Ko, H. and Sato, Y. "Bond Stress - Slip Relationship between FRP Sheet", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 4, pp. 419-426, 2007.
- Subramaniam, K.V., Carloni, C. and Nobile, L. "Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, No. 4, pp. 578-594, 2007.
- Trần Quốc Cường. "Phân tích ứng xử kháng cắt của dầm bê tông cốt thép gia cường tấm FRP dạng U dùng phần tử liên kết mặt bằng phương pháp PTHH", *Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh*, 2014.
- Nguyễn Phạm Tuấn Minh. "Ảnh hưởng tương tác của cường độ bê tông và chiều dài dán của tấm FRP đến ứng xử bám dính trượt giữa tấm FRP và bê tông", *Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh*, 2015.
- Huỳnh Nguyễn Vĩ. "Ảnh hưởng của môi trường xâm thực đến độ bền bám dính của tấm sợi gia cường với bê tông", *Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh*, 2017.
- Yang, Z.J. and Chen, J.F. "Finite element modelling of multiple cohesive tie-break in FRP strengthened concrete beams". *International Journal of Fracture*, Vol. 124, pp. 69-78, 2003.
- Kamiharako, A., Shimomura, T. and Maruyama, K. "The Influence of the substrate on the bond behavior of continuous fiber sheet", *Proc Japan Concr Inst*, pp. 1735-40, 2003.
- Yao, J., Teng, J.G. and Chen, J.F. "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 99-113, 2005.
- Ko, H., Matthys, S., Palmieri, A. and Sato, Y. "Development of a simplified bond stress-slip model for bonded FRP-concrete interfaces", *Construction and Building Materials*, Vol. 68, pp. 142-157, 2014.