

Độ cứng hữu hiệu của dầm nối cao trong kết cấu lõi nhà cao tầng

Effective stiffness of rc deep coupling beams

> TRẦN CAO THANH NGỌC^{*1,2} PHẠM NGUYỄN LINH KHÁNH^{1,2}

¹Khoa KT&QLXD, Trường ĐH Quốc tế - Đại học Quốc gia TP.HCM

²Đại học Quốc gia TP.HCM

*Email: tctngoc@hcmiu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo tập trung vào độ cứng hữu hiệu của dầm nối cao trong kết cấu lõi nhà cao tầng với tỉ số số l/d nhỏ hơn hoặc bằng 2. Dữ liệu thí nghiệm gồm 48 mẫu thí nghiệm được báo cáo trong nghiên cứu trước liên quan đến các mẫu dầm nối cao bê tông cốt thép với $l/d \leq 2$ được tập hợp trong nghiên cứu này. Các phương pháp tính độ cứng hữu hiệu hiện hành như ACI 318, ASCE 41, NZS 3101, Paulay và Priestley, Vu *et al.* được trình bày. Kết quả so sánh với kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình đề xuất của Vu *et al.* cho kết quả độ cứng hữu hiệu của dầm nối cao bê tông cốt thép với độ tin cậy cao.

Từ khóa: Dầm nối; độ cứng hữu hiệu; ứng xử cắt.

ABSTRACT

This paper focuses on the effective stiffness of reinforced concrete deep coupling beams with an aspect ratio of lower or equal to 2. A database consisting of 48 conventional and diagonal reinforced concrete coupling beams is collected. The existing models in the design codes and previous research studies related to the effective stiffness of these structures such as ACI 318, ASCE 41, NZS 3101, Paulay and Priestley, Vu *et al.*'s ones are investigated and compared. The comparison indicates that the proposed model by Vu *et al.* produces the most accurate and reliable model.

Key words: Coupling Beam; effective stiffness; shear behaviour.

1. MỞ ĐẦU

Độ cứng hữu hiệu của kết cấu bê tông cốt thép đóng vai trò quan trọng trong phân tích ứng xử của loại kết cấu này. Giá trị của độ cứng hữu hiệu sẽ ảnh hưởng đến nội lực và chuyển vị của kết cấu. Ngoài ra tần số giao động và độ dẻo của toàn bộ kết cấu dưới tác động của động đất chịu ảnh hưởng rất lớn từ giá trị của độ cứng hữu hiệu này. Vai trò này của độ cứng hữu hiệu đã được cộng đồng nghiên cứu về động đất công nhận.

Vách chịu cắt là một trong những kết cấu chính chống lại tác động của tải trọng ngang do động đất gây ra trong nhà cao tầng. Kết cấu của vách chịu cắt thường hình thành từ những đơn vị vách

nhỏ được liên kết với nhau bởi các dầm nối. Những dầm nối này cho phép các lỗ rỗng như cửa sổ, cửa chính hình thành ở những vách chịu cắt này. Các dầm nối này đóng vai trò vô cùng quan trọng trong việc truyền lực cắt trong các đơn vị vách nhỏ của vách chịu cắt. Do đó độ cứng hữu hiệu của loại dầm nối này cần được tính toán chính xác để phân tích được phân bố nội lực trong hệ vách chịu cắt trong nhà cao tầng chịu tải trọng động đất.

Theo tiêu chuẩn NZS 3101 [1], Paulay và Priestly [2], Taranath [3], độ cứng hữu hiệu của dầm nối bê tông cốt thép phụ thuộc vào tỉ số (l/d) . Vu *et al.* [4] đã sử dụng giàn ảo để tính ra chuyển vị cắt của loại dầm này, sử dụng kết quả này Vu *et al.* [4] đã đề ra công thức để tính độ cứng hữu hiệu của loại dầm này. Vu *et al.* [4] chỉ ra rằng độ cứng hữu hiệu không chỉ phụ thuộc tỉ số (l/d) mà còn phụ thuộc vào cường độ bê tông, tỉ số thép dọc và thép ngang.

Han *et al.* [5] đã chỉ ra sự ảnh hưởng của thép đai đến cường độ và độ cứng của dầm nối. Thí nghiệm của Han *et al.* [5] đã cho thấy tăng tỉ số cốt đai làm tăng độ cứng của dầm nối. Ameen [6] đã thực hiện thí nghiệm để so sánh ứng xử của dầm nối với thép cường độ thường Grade 60 (420MPa) với thép cường độ cao Grade 120 (830MPa). Ameen [6] đã chỉ ra rằng việc sử dụng thép cường độ cao làm giảm độ cứng của dầm nối. Cả nghiên cứu của Han *et al.* [5] và Ameen [6] đều chỉ ra rằng hàm lượng cốt đai và cường độ thép dọc ảnh hưởng nhiều đến độ cứng hữu hiệu của dầm nối.

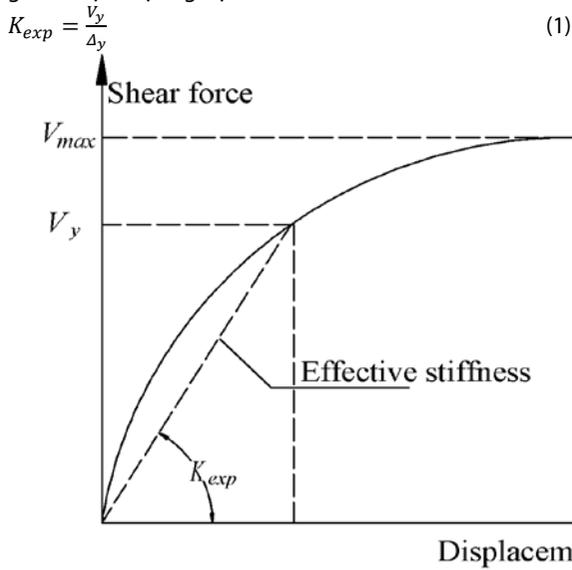
Trong số các tham số được đề cập ở trên, tỉ số (l/d) là một trong những tham số quan trọng nhất ảnh hưởng đến ứng xử cũng như hình thái phá hoại của dầm nối bê tông cốt thép. Dầm nối bê tông cốt thép thường được phân làm 3 nhóm tùy theo tỉ số (l/d) : dầm cao (với $l/d \leq 2$), dầm trung (với $2 < l/d \leq 4$), dầm dài (với $l/d > 4$). Hình thái phá hoại của dầm cao phụ thuộc vào lực cắt. Trong khi đó của dầm trung và dầm dài lần lượt do uốn-cắt và uốn. Tỉ lệ đóng góp của chuyển vị cắt trong tổng chuyển vị của dầm cao là nhiều hơn của dầm trung và dầm dài. Trong bài báo này, độ cứng hữu hiệu của dầm nối cao được tính toán từ thực nghiệm thu thập được trong các nghiên cứu và được so sánh với các phương pháp tính toán hiện hành trong các tiêu chuẩn thiết kế và các nghiên cứu trước.

2. ĐỘ CỨNG HỮU HIỆU CỦA DẦM NỐI CAO TRONG KẾT CẤU LỐI NHÀ CAO TẦNG

Độ cứng hữu hiệu

Trong kết cấu bê tông cốt thép, có 2 phương pháp hay được sử dụng để tính độ cứng hữu hiệu của kết cấu [4]. Cách thứ nhất sử dụng độ cứng của đường cắt tuyến trong biểu đồ lực chuyển vị tại vị trí lực 75% khả năng chịu cắt của kết cấu. Phương pháp thứ 2 sử dụng độ cứng của đường cắt tuyến tại cường độ chảy dẻo của cấu

kiện như hình 1. Cả 2 phương pháp đều cho kết quả khá tương đồng. Trong bài báo này sử dụng phương pháp thứ 2 để tính độ cứng hữu hiệu thực nghiệm của dầm nối.



Hình 1. Định nghĩa độ cứng hữu hiệu [4]

Điều kiện biên của dầm nối là ngàm ngàm, do đó giá trị thực nghiệm của mô men quán tính hữu hiệu:

$$I_e = \frac{l^3 K_{exp}}{12 E_c} \quad (2)$$

Trong đó E_c mô đun đàn hồi của bê tông, và l là chiều dài của dầm.

Tỉ số độ cứng thực nghiệm (κ_{exp}):

$$\kappa_{exp} = \frac{I_e}{I_g} \times 100\% \quad (3)$$

Trong đó I_g là mô men quán tính của dầm nối.

Cốt thép dọc và ngang tương đương cho dầm có thép xiên

Đối với dầm nối có cốt thép xiên như hình 2. Cốt đai tương đương được tính như sau:

$$A_v^{equ} = 2 A_{sd} \sin \alpha \quad (4)$$

Trong đó A_{sd} là tổng diện tích thép ở mỗi nhóm thép xiên và α là góc xiên của thép xiên. Giả sử cốt đai tương đương này phân bố

đều dọc theo chiều dài của dầm, diện tích cốt đai tương đương trong khoảng cách s được tính như sau:

$$A_{vd} = A_v^{equ} \times s/l \quad (5)$$

Do đó, tổng tỉ số cốt đai trong khoảng cách s :

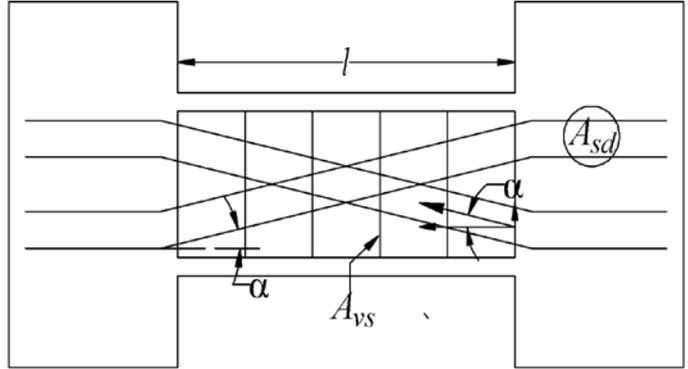
$$\rho_v = \frac{A_{vd} + A_{vs}}{bs} \quad (6)$$

Trong đó b là chiều rộng của dầm và A_{vs} là diện tích cốt đai trong khoảng cách s .

Cốt dọc tương đương được tính như sau:

$$\rho_l = \frac{A_{sd} \cos \alpha}{bd} \quad (7)$$

Trong đó d là chiều cao hữu hiệu của dầm nối.



Hình 2. Cốt thép trong dầm nối có thép xiên

3. CÁC PHƯƠNG PHÁP TÍNH HIỆN HÀNH

Hệ số chiết giảm đơn giản được sử dụng trong hầu hết các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành như ACI 318 [7], ASCE 41 [8] và FEMA 356 [9] để tính độ cứng hữu hiệu của dầm nối bê tông cốt thép. ACI 318 [7] và ASCE 41 [8] tính độ cứng hữu hiệu của loại dầm này lần lượt là $0.35 E_c I_g$ và $0.3 E_c I_g$. Trong đó FEMA 356 [9] kiến nghị hệ số chiết giảm cao hơn so với 2 tiêu chuẩn trên, hệ số này trong tiêu chuẩn FEMA 356 [9] là 0.5. Tiêu chuẩn NZS 3101 [1], Paulay và Priestley [2], và Taranath [3] đã chỉ ra rằng tỉ số l/d ảnh hưởng đáng kể đến độ cứng này của dầm nối, và đã đề xuất công thức của độ cứng liên quan đến tỉ số này như được liệt kê trong bảng 1. Vu et al. [4] đã đề ra công thức để tính độ cứng hữu hiệu của loại dầm này. Vu et al. [4] chỉ ra rằng độ cứng hữu hiệu không chỉ phụ thuộc tỉ số (l/d) mà còn phụ thuộc và cường độ bê tông, tỉ số thép dọc và thép ngang.

Bảng 1. Công thức hiện hành tính độ cứng hữu hiệu của dầm nối

	Dầm nối thường	Dầm nối có thép xiên
ACI 318 [7]		$0.35 E_c I_g$
ASCE 41 [8]		$0.3 E_c I_g$
FEMA 356 [9]		$0.5 E_c I_g$
NZS 3101 [1]	$I_e = \frac{0.4 I_g}{1 + 8 \left(\frac{d}{l}\right)^2}$	$I_e = \frac{A I_g}{B + C \left(\frac{d}{l}\right)^2}$
Paulay and Priestley [2]	$I_e = \frac{0.2 I_g}{1 + 3 \left(\frac{d}{l}\right)^2}$	$I_e = \frac{0.4 I_g}{1 + 3 \left(\frac{d}{l}\right)^2}$
Taranath [3]	$I_e = \frac{I_g}{1 + 2.4 \left(\frac{d}{l}\right)^3 (1 + \nu)}$	
Vu et al. [4]	$\frac{I_e}{I_g} = 0.67 \left(1.8 \frac{l}{d} + 0.4 \frac{l^2}{d^2} \right) (0.9 + 0.7 \rho_v + 1.1 \rho_l) \left(1 + \frac{11}{f'_c} \right)$	$\frac{I_e}{I_g} = 0.65 \left(1.6 + 0.9 \frac{l}{d} \right) (0.4 + 1.7 \rho_{sd}) \left(0.7 + \frac{14}{f'_c} \right)$

Trong đó A, B và C là hệ số phụ thuộc và chuyển vị dẻo, ν là tỉ số poisson, f'_c là cường độ bê tông, ρ_{sd} là tỉ số thép xiên ($\rho_{sd} = \frac{A_{sd}}{0.9db}$).

4. DỮ LIỆU THÍ NGHIỆM VÀ SO SÁNH KẾT QUẢ VỚI CÁC PHƯƠNG PHÁP TÍNH HIỆN HÀNH

Dữ liệu thí nghiệm được báo cáo trong nghiên cứu trước liên quan đến các mẫu dầm nổi cao bê tông cốt thép với $l/d \leq 2$ được tập hợp như trong bảng 2 để so sánh độ chính xác của các công thức

tính độ cứng hiện hành trong các tiêu chuẩn thiết kế và các nghiên cứu trước. Các thông số cũng như tỉ số độ cứng thực nghiệm được thể hiện chi tiết trong bảng 2.

Bảng 2. Dữ liệu dầm nổi cao bê tông cốt thép

		Beam	Type	l/d	ρ_v (%)	ρ_l (%)	f'_c (MPa)	f_{yt} (MPa)	κ_{exp} (%)
1	Paulay [10]	B311	CCB	1.29	0.88	1.5	35	320.6	6.51
2		B312	CCB	1.29	1.65	1.5	35	320.6	6.88
3		B313	CCB	1.29	2.52	1.5	45	320.6	6.67
4		B314	CCB	1.29	2.52	1.5	45	320.6	6.72
5		B391	CCB	1.03	0.88	1.03	32	315.8	4.14
6		B392	CCB	1.03	0.88	1.03	38	315.8	4.15
7		B393	CCB	1.03	1.62	1.03	31	315.8	4.77
8		B394	CCB	1.03	2.52	1.03	43	315.8	4.68
9		B241	CCB	2	0.41	1.67	24.2	320.6	13.04
10		B242	CCB	2	0.88	1.67	38	320.6	10.84
11		B243	CCB	2	0.88	1.67	31	320.6	12.06
12		B244	CCB	2	1.58	1.67	36	320.6	13.93
13	Binney [11]	B315	CCB	1.29	2.44	1.49	37.9	308.2	7.31
14	Kwan and Zhao [12]	MCB1	CCB	1.17	1.12	0.47	40.9	525	1.09
15		MCB2	CCB	1.4	1.12	0.46	40.9	525	2.51
16		MCB3	CCB	1.75	1.12	0.47	40.9	525	4.65
17		MCB4	CCB	2	1.12	0.51	40.9	525	5.3
18	Kwan and Zhao [13]	CCB1	CCB	1.17	1.12	0.47	37.8	525	1.18
19		CCB2	CCB	1.4	1.12	0.46	37.8	525	2.49
20		CCB3	CCB	1.75	1.12	0.58	37.8	525	4.15
21		CCB4	CCB	2	1.12	0.51	37.8	525	4.2
22		CCB12	CCB	1.17	1.68	0.47	37.8	525	1.56
23	Galano and Vignoli [14]	P01	CCB	1.5	0.84	0.52	48.9	567	3.4
24		P02	CCB	1.5	0.84	0.52	44.5	567	3.4
25		P03	CCB	1.5	0.84	0.52	52.4	567	3.4
26		P04	CCB	1.5	0.84	0.52	48.7	567	3.4
27	Breña and Ihtiyar [15]	CB1	CCB	1.34	1.27	0.79	39	517	1.58
28		CB3	CCB	1.34	1.27	0.79	31	517	2.11
29	Binney [11]	B316	DCB	1.29	1.26	1.1	33	288.2	6.72
30		B317	DCB	1.29	1.23	1.06	51	306.1	7.8
31		B395	DCB	1.03	1.44	0.77	36	288.9	4.07
32	Kwan and Zhao [12]	CCB11	DCB	1	1.04	0.36	38	517.1	1.15
33	Galano and Vignoli [14]	P05	DCB	1.5	0.63	0.46	40	567	3.2

34		P06	DCB	1.5	0.63	0.46	46	567	3.2
35		P07	DCB	1.5	0.63	0.46	54	567	3.2
36		P08	DCB	1.5	0.63	0.46	53	567	3.2
37		P10	DCB	1.5	0.55	0.46	47	567	3.5
38		P11	DCB	1.5	0.55	0.46	40	567	3.5
39		P12	DCB	1.5	0.55	0.46	42	567	3.5
40	Ishikawa and Kimura [16]	Specimen 1	DCB	1.78	0.4	0.55	42.19	523	3.24
41		Specimen 2	DCB	1.78	0.5	0.82	45.88	523	4.15
42		Specimen 5	DCB	1.78	0.71	0.82	26.75	523	4.85
43		Specimen 6	DCB	1.78	1.04	0.82	51.23	523	5.06
44		Specimen 7	DCB	1.78	0.5	0.82	51.74	523	3.62
45		Specimen 8	DCB	1.78	0.5	0.81	45.28	387	4.33
46		Specimen 9	DCB	1.78	0.5	0.81	45.81	724	3.8
47		Tassios <i>et al.</i> [17]	CB-2A	DCB	1	0.79	0.44	28.5	504
48	CB-2B		DCB	1.67	0.66	0.76	26.3	504	2.68

Tỉ số trung bình của thí nghiệm chia cho mô hình của các phương pháp tính của ACI 318 [7], ASCE 41 [8], NZS 3101 [1], Paulay và Priestley [2], Vu *et al.* [4] lần lượt là 0.200, 0.220, 0.501, 0.490 và 0.950. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất của Vu *et al.* [4] cho kết quả với độ tin cậy cao.

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày kết quả so sánh các công thức tính toán hiện hành độ cứng hữu hiệu của dầm nối cao trong kết cấu lõi bê tông cốt thép nhà cao tầng. Dữ liệu thí nghiệm được báo cáo trong nghiên cứu trước liên quan đến các mẫu dầm nối cao bê tông cốt thép với $l/d \leq 2$ được tập hợp. Tổng quan các mô hình tính toán độ cứng hữu hiệu của loại kết cấu này được giới thiệu trong bài báo này. Các phương pháp tính độ cứng hữu hiệu của kết quả thực nghiệm cũng được giới thiệu. Kết quả so sánh với thực nghiệm cho thấy: tỉ số trung bình của thí nghiệm chia cho mô hình của các phương pháp tính của ACI 318 [7], ASCE 41 [8], NZS 3101 [10], Paulay và Priestley [11], Vu *et al.* [4] lần lượt là 0.200, 0.220, 0.501, 0.490 và 0.950. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất của Vu *et al.* [4] cho kết quả với độ tin cậy cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] NZS 3101., (1995) "Concrete structures standard" Wellington: Standards New Zealand
- [2] Paulay T. and Priestley, M.J.N. (1992) "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings" New York, Wiley.
- [3] Taranath B. S. (1998) "Steel, concrete, and composite design of tall buildings. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- [4] Vu, N.S., Li, B. and Beyer, K. (2014) "Effective stiffness of reinforced concrete coupling beams" *Engineering Structures*, 76, 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.014>.
- [5] Han, S. W., Kim, S. B., and Kim, T. (2019) "Effect of transverse reinforcement on the seismic behavior of diagonally reinforced concrete coupling beams" *Engineering Structures*, 196, 109307. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109307>.
- [6] Ameen, S. (2018) "Diagonally reinforced concrete coupling beams with high-strength steel bars", Ph.D Thesis, The university of Kansas, USA, 157 pp.

[7] American Concrete Institute (ACI)., (2019) "Building Code Requirements for Structural Concrete" ACI 318-19, Farmington Hills, MI.

[8] ASCE/SEI 41-06 (2007) "Seismic rehabilitation of existing buildings" American Society of Civil Engineers. Reston, USA.

[9] FEMA 356. (2000) "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings" Federal Emergency Management Agency, Washington DC, USA.

[10] Paulay T. (1969) "The coupling of shear walls." Ph.D Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

[11] Binney JR. (1972) "Diagonally reinforced coupling beams. Master of Engineering." University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

[12] Kwan, A.K.H., and Zhao, Z.Z., (2002) "Testing of coupling beams with equal end rotations maintained and local joint deformation allowed." *Proc Inst Civil Eng: Struct Build*, 152, 67–78. <https://doi.org/10.1680/stbu.2002.152.1.67>.

[13] Kwan A.K.H, and Zhao, Z.Z., (2002) "Cyclic behaviour of deep reinforced concrete coupling beams." *Proc Inst Civil Eng: Struct Build*, 152, 283–293. <https://doi.org/10.1680/stbu.2002.152.3.283>.

[14] Galano L and Vignoli A. (2000) "Seismic behavior of short coupling beams with different reinforcement layouts." *ACI Structural Journal*, 97, 876–885.

[15] Breña S.F. and Ihtiyar O. (2011) "Performance of conventionally reinforced coupling beams subjected to cyclic loading." *ASCE Journal of Structural Engineering*, 137, 665-676. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000316](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000316).

[16] Ishikawa, Y., and Kimura, H. (1996) "Experimental study on seismic behavior of R/C diagonally reinforced short beams. 11th World conference on earthquake engineering.

[17] Tassios T.P., Moretti M., and Bezas A. (1996) "On the behavior and ductility of reinforced concrete coupling beams of shear walls." *ACI Structural Journal*, 93, 711-720.