

KHẢ NĂNG KHÁNG CHỌC THÙNG CỦA LIÊN KẾT SÀN PHẪNG BÊ TÔNG CỐT THÉP - CỘT ỐNG THÉP NHỒI BÊ TÔNG THEO ACI 318-14 VÀ EUROCODE 2

Nguyễn Thế Danh^{a,b,c}, Thái Sơn^{b,c}, Nguyễn Thị Bích Thủy^{b,c}, Nguyễn Văn Hiếu^a, Ngô Hữu Cường^{b,c,*}

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến Trúc TP. Hồ Chí Minh,
196 Pasteur, Quận 3, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh,
268 Lý Thường Kiệt, Quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cĐại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 11/7/2024, Sửa xong 25/11/2024, Chấp nhận đăng 4/12/2024

Tóm tắt

Nghiên cứu này phân tích hiệu quả kháng chọc thủng của các phương pháp gia cường kháng cắt được khảo sát trong các nghiên cứu thực nghiệm gần đây. Sau đó, các kết quả khảo sát thực nghiệm về khả năng kháng chọc thủng của liên kết được so sánh với công thức dự đoán trong các tiêu chuẩn ACI 318-14 và Eurocode 2. Các phân tích và so sánh cho thấy có một số chênh lệch đáng kể giữa kết quả dự đoán theo công thức trong tiêu chuẩn với các kết quả khảo sát thực nghiệm do các công thức chưa xem xét một cách đầy đủ sự ảnh hưởng của các thông số của liên kết. Do đó, một công thức hiệu chỉnh thông số chu vi vi tháp chọc thủng dựa trên tiêu chuẩn Eurocode 2 được đề xuất để dự đoán khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng bê tông cốt thép – cột ống thép nhồi bê tông. Kết quả so sánh với dữ liệu thực nghiệm cho thấy công thức đề xuất có thể dự đoán khả năng kháng chọc thủng của liên kết tốt hơn so với các công thức trong tiêu chuẩn ACI 318-14 và Eurocode 2.

Từ khoá: cột ống thép nhồi bê tông; sàn phẳng bê tông cốt thép; phá hoại chọc thủng; gia cường kháng cắt; nghiên cứu thực nghiệm.

THE PUNCHING SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE FLAT SLAB - CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMN CONNECTIONS ACCORDING TO ACI 318-14 AND EUROCODE 2

Abstract

This study discusses the effectiveness of the shear reinforcement methods investigated in the recent published literature. Then, the experimental results of the punching shear resistance of the connections are also compared with the predicted formulas in ACI 318-14 và Eurocode 2. The analysis and comparison show that there are some disparities between them due to the predicted formulas do not consider fully the effect of the design parameters of the connections. Therefore, a formula with modification of the critical section perimeters based on Eurocode 2 is proposed to predict the punching shear resistance of the RC flat slab – CFT column connections. The comparison of predicted results with experimental data shows the proposed formula can predict the punching shear resistances of the connections more accurately than those in ACI 318-14 và Eurocode 2.

Keywords: concrete-filled steel tubular columns; reinforced concrete flat slab; punching shear; shear reinforcement; experimental investigations.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(1V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(1V)-02) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Trong những thập niên gần đây, hệ kết cấu sàn phẳng bê tông cốt thép (BTCT) – cột ống thép nhồi bê tông (CFT) được sử dụng rộng rãi trong các công trình dân dụng và công nghiệp do những

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: ngohuucuong@hcmut.edu.vn (Cường, N. H.)

ưu điểm nổi trội về kiến trúc và kết cấu như giảm kích thước tiết diện cột, giảm chiều cao tầng, tăng chiều dài nhịp sàn, giảm trọng lượng bản thân công trình, rút ngắn thời gian thi công [1]. Tuy nhiên, tương tự như kết cấu sàn phẳng - cột BTCT truyền thống, sự tập trung ứng suất xung quanh vùng liên kết sàn - cột CFT có thể dẫn đến dạng phá hoại chọc thủng nguy hiểm mang tính giòn [2, 3]. Ngoài ra, điều kiện biên kém giữa bề mặt trơn của ống thép và sàn bê tông ảnh hưởng mạnh đến tính toàn khối của liên kết và có thể dẫn đến sự suy giảm độ cứng và khả năng kháng chọc thủng của liên kết [4]. Vì vậy, nhiều phương pháp gia cường kháng cắt đã được đề xuất và khảo sát trong các nghiên cứu thực nghiệm gần đây. Trong số đó, các dạng chi tiết dùng thép hình hoặc thép bản hàn chặt với ống thép được xem là phương pháp gia cường hiệu quả nhất.

Dạng chi tiết kháng cắt dùng thép hình được đề xuất đầu tiên bởi Corley and Hawkins [5], theo đó, các thanh thép chữ I hoặc C được hàn vuông góc với nhau theo dạng chữ thập và đặt trong phạm vi liên kết cột – sàn phẳng BTCT. Dạng chi tiết này sau đó được Lee và cs. [6], Kim và cs. [7], Yan và Wang [4, 8], Eder và cs. [9], Bompa và Elghazouli [10] cải tiến áp dụng cho liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT bằng cách hàn các thanh thép hình chữ I, T hoặc U vào bề mặt ngoài của ống thép. Một dạng chi tiết khác cũng được đề xuất trong nghiên cứu [4], theo đó, các thanh thép hộp tiết diện chữ nhật rỗng được hàn vuông góc với nhau đặt xuyên qua cột thép và được hàn chặt với ống thép. Ngoài ra, để đảm bảo tính liên tục của hệ thép hình kháng cắt, các nghiên cứu [8–10] đã đề xuất bổ sung các tấm thép nổi hàn xung quanh cột và hàn với các thanh thép hình. Gần đây, Chen và cs. [11] đề xuất một dạng chi tiết kháng cắt gồm các thanh thép hình chữ C hoặc L được hàn đầu lửng vào các mặt ngoài của ống thép. Trong các liên kết dùng chi tiết kháng cắt bằng thép hình, cốt thép chịu kéo của sàn được xuyên liên tục qua cột hoặc được neo bên ngoài mặt cột. Một số liên kết được bố trí các thanh thép gia cường xuyên qua cột tại vùng chịu nén của sàn nhằm tránh sự phá hoại liên tục sau chọc thủng (theo tiêu chuẩn ACI 352.1R-89 [12]). Để gia tăng khả năng kháng chọc thủng của liên kết, một số tác giả đề xuất bố trí thêm một hệ đỉnh kháng cắt xung quanh cột [1, 10, 13]. Ngoài ra, để tăng cường khả năng chịu tải trọng ngang, Lee và cs. [14] đề xuất các thanh thép dẹt được uốn thành dạng gẫy khúc nhiều nhánh bố trí ở hai bên các thanh thép hình và được hàn chặt vào bề mặt ngoài của cột CFT.

Các nghiên cứu khảo sát thực nghiệm đều cho thấy tất cả các mẫu sàn phẳng – cột CFT có chi tiết gia cường kháng cắt dùng thép hình đều có hiệu quả kháng chọc thủng cao hơn đáng kể so với mẫu sàn phẳng – cột BTCT truyền thống. Sự có mặt của chi tiết thép hình kháng cắt đã giúp đẩy chu vi thấp chọc thủng ra xa hơn khỏi bề mặt cột và vì vậy làm tăng đáng kể khả năng kháng chọc thủng của sàn [10]. Hiệu quả của dạng chi tiết liên kết này còn phụ thuộc vào kích thước tiết diện và chiều dài của thép hình [7, 8]. Nghiên cứu [7] đề xuất chiều dài của thép hình tối thiểu bằng khoảng bốn lần chiều dày sàn để sức kháng chọc thủng của sàn đạt tới giá trị giới hạn theo tiêu chuẩn ACI 318-11 [15]. Kết quả của các nghiên cứu [4, 8] cho thấy hệ gia cường kháng cắt bằng thép hình ứng xử như một cột mở rộng dẫn đến sự gia tăng chu vi thấp chọc thủng. Kết quả thí nghiệm cũng cho thấy việc sử dụng các tấm thép nổi giúp truyền lực cắt từ các bản cánh của thép hình vào cột dễ dàng hơn và tránh sự chảy dẻo có thể xảy ra ở ống thép cột [9]. Sự có mặt của các tấm thép nổi gia cường cũng giúp gia tăng độ cứng và khả năng kháng cắt của hệ thép hình, dẫn đến sự cải thiện về ứng xử kháng chọc thủng của liên kết [10].

Để giảm chi phí vật liệu và đơn giản hoá quá trình gia công chế tạo, một số nghiên cứu gần đây [11, 16–20] đã đề xuất các chi tiết gia cường dùng thép bản thay thế cho thép hình. Các chi tiết kháng cắt bằng thép bản có ưu điểm nổi bật so với thép hình là có thể chế tạo cho các cột có hình dạng tiết diện khác nhau và phù hợp với sàn có chiều dày không lớn. Dạng chi tiết gia cường bằng thép bản đề xuất bởi Su và Tian [16] được cấu tạo bởi một tấm thép hình vành khuyên được hàn vào cột tròn

CFT. Mặt dưới của bản thép vành khuyên trùng với cao trình đáy sàn. Dạng chi tiết liên kết này sau đó được Đinh Thị Như Thảo [17] cải tiến bằng cách bổ sung bốn cặp sườn đứng dạng vát bố trí dưới đáy bản thép vành khuyên. Một phần của sườn đứng ăn vào trong lõi bê tông cột nhằm tăng sự liên kết giữa sườn đứng với lõi bê tông và hạn chế sự bong tách cục bộ có thể xảy ra giữa bề mặt trong của ống thép và lõi bê tông cột. Tương tự, Lưu Thanh Bình [18] cũng đề xuất các chi tiết kháng cắt được cấu tạo bởi các bản thép gối và sườn đứng nhưng khác với nghiên cứu [17], các sườn đứng được đặt phía trên bản thép gối. Các bản gối có dạng hình vành khuyên hoặc dạng hình chữ nhật rời rạc.

Kết quả khảo sát thực nghiệm cho thấy dạng chi tiết liên kết dầm thép bản đề xuất bởi nghiên cứu [16] có khả năng chịu tải trọng đứng tốt, cải thiện đáng kể độ dẻo dai của liên kết và có khả năng chịu chuyển vị ngang lớn hơn nhiều so với liên kết giữa sàn phẳng và cột BTCT truyền thống. Dạng chi tiết kháng cắt kết hợp cả sườn ngang và sườn đứng [17–20] cũng giúp gia tăng đáng kể khả năng kháng chọc thủng, độ dẻo dai và khả năng hấp thụ năng lượng của các liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT so với liên kết sàn phẳng – cột BTCT truyền thống. Nói chung, mặc dù chưa có nhiều nghiên cứu về dạng chi tiết gia cường bằng thép bản nhưng các kết quả khảo sát thực nghiệm đã cho thấy dạng chi tiết này có khả năng kháng chọc thủng và hấp thụ năng lượng tốt, độ dẻo dai cao nhưng lại chế tạo thi công đơn giản hơn và giảm chi phí vật liệu hơn so với các liên kết dầm thép hình.

2. So sánh khả năng kháng chọc thủng của liên kết giữa kết quả thực nghiệm và công thức trong tiêu chuẩn

Hiện nay, một số tiêu chuẩn như ACI 318-14 [21], Eurocode 2 [22], Model Code 2010 [23], ... đã có những điều khoản hướng dẫn tính toán khả năng kháng chọc thủng của liên kết giữa cột và sàn phẳng BTCT. Trong mục này, khả năng kháng chọc thủng của các liên kết sàn phẳng – cột CFT từ các kết quả thí nghiệm của các nghiên cứu [6–10, 17, 18] sẽ được so sánh với các kết quả tính toán theo các tiêu chuẩn ACI 318-14 và Eurocode 2.

Theo tiêu chuẩn ACI 318-14 [21], khả năng kháng chọc thủng của liên kết cột – sàn phẳng BTCT được xác định theo công thức sau:

$$V_{ACI} = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \frac{\sqrt{f_c'}}{6} b_0 d \\ \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \frac{\sqrt{f_c'}}{12} b_0 d \\ \frac{\sqrt{f_c'}}{3} b_0 d \end{array} \right. \quad (1)$$

trong đó f_c' (MPa) là cường độ chịu nén mẫu trụ của bê tông, d là chiều cao làm việc hiệu quả của sàn, β là tỉ số giữa cạnh dài và cạnh ngắn của cột, b_0 là chu vi của tháp chọc thủng được xác định như trong Hình 1, $\alpha_s = 40$ đối với cột giữa, 30 đối với cột biên và 20 đối với cột góc.

Theo tiêu chuẩn Eurocode 2 [22], khả năng kháng chọc thủng của liên kết cột – sàn phẳng BTCT được xác định theo công thức sau:

$$V_{EC2} = 0,18k(100\rho_l f_c')^{(1/3)} b_0 d \geq 0,035k^{(3/2)} f_c'^{(1/2)} b_0 d \quad (2)$$

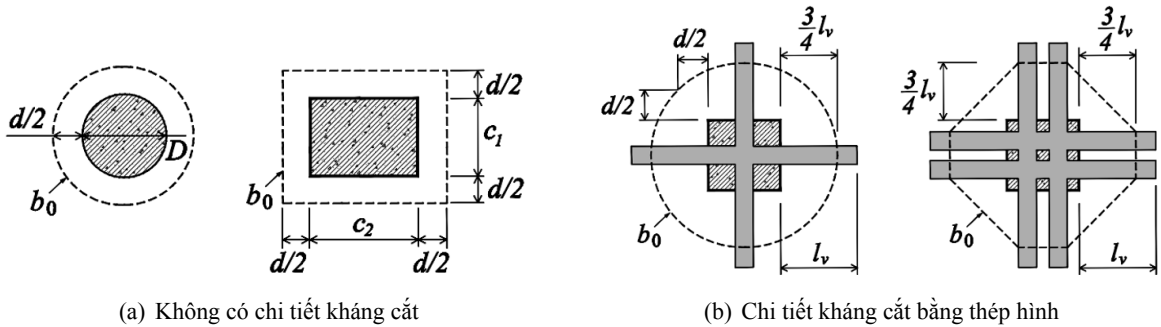
trong đó b_0 là chu vi của tháp chọc thủng được xác định như trong Hình 2, k là hệ số được xác định như sau:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (\text{đơn vị của } d \text{ là mm}) \quad (3)$$

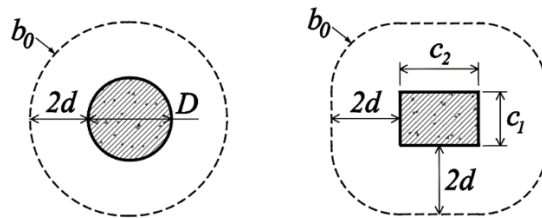
ρ_l là hàm lượng cốt thép chịu uốn của sàn được tính bởi công thức:

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{lx}\rho_{ly}} \leq 0,02 \quad (4)$$

trong đó ρ_{lx} và ρ_{ly} là hàm lượng cốt thép chịu uốn của sàn theo hai phương vuông góc trong phạm vi sàn xung quanh cột (bằng chiều dài cạnh cột cộng với khoảng cách $3d$ theo mỗi phương).



Hình 1. Chu vi thép chọc thủng theo tiêu chuẩn ACI 318-14 [21]



Hình 2. Chu vi thép chọc thủng theo tiêu chuẩn Eurocode 2 [22]

Khả năng kháng chọc thủng của các mẫu thí nghiệm từ các nghiên cứu [6–10, 17, 18] được tính toán theo các công thức trong tiêu chuẩn (1), (2) và kết quả được tổng hợp, so sánh trong các Bảng 1, 2 và 3. Lưu ý rằng, do tiêu chuẩn Eurocode 2 chưa có chỉ dẫn về chi tiết gia cường kháng cắt nên các kết quả tính toán theo Eurocode 2 trong các Bảng 2 và 3 không kể đến ảnh hưởng của chi tiết gia cường. Tương tự, tiêu chuẩn ACI 318-14 chưa có chỉ dẫn về chi tiết gia cường dùng thép bản nên các kết quả tính toán theo ACI 318-14 trong Bảng 3 cũng chưa xét đến ảnh hưởng của chi tiết gia cường dùng thép bản. Nói chung, các công thức trong tiêu chuẩn đã dự đoán tương đối gần đúng với các kết quả thực nghiệm với các giá trị trung bình và hệ số biến thiên COV của tỉ số V_{ACI}/V_{exp} và V_{EC2}/V_{exp} được thể hiện trong các Bảng 2 và 3. Tuy nhiên, vẫn còn một số chênh lệch đáng kể giữa kết quả tính toán theo công thức trong tiêu chuẩn và thí nghiệm trong một số trường hợp khảo sát.

Chú ý rằng ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép chịu uốn của sàn được kể đến trong tiêu chuẩn Eurocode 2 trong khi tiêu chuẩn ACI 318-14 không xét đến thông số này. Trong khi đó, đã có nhiều

Bảng 1. Thông số của các liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT có chi tiết kháng cắt dùng thép hình

Nghiên cứu	Mẫu thí nghiệm	c (mm)	d (mm)	b_v (mm)	h_v (mm)	l_v (mm)	f'_c (MPa)	ρ_l (%)
Kim và cs. [7]	SH670-WT19	400	164	100	100	670	22,8	1,1
	SH320-WT19	400	164	100	100	320	22,8	0,64

Nghiên cứu	Mẫu thí nghiệm	c (mm)	d (mm)	b_v (mm)	h_v (mm)	l_v (mm)	f'_c (MPa)	ρ_l (%)
	SH490-S200	400	164	100	100	490	22,8	0,64
	SH620-S300	400	264	150	150	620	22,8	0,48
	SH770-C500	500	161	100	100	770	22,8	1,47
	SH-AR1.5	480	164	100	100	290	22,8	0,69
	SH-AR2.0	540	164	100	100	230	22,8	0,69
Lee và cs. [6]	FPP-SH	400	164	100	100	320	17,08	0,64
	FPP-ST	400	164	50	89	200	18,12	0,64
	HP-SH	400	164	100	100	320	28,92	0,64
	HK-ST	400	164	50	89	200	28,92	0,64
	FP-ST	400	164	50	89	200	28,92	0,64
	HP-ST	400	164	50	89	200	28,92	0,64
Bompa và Elghazouli [10]	HS03-00	280	175	100	100	370	37,5	0,33
	HS13-C0	280	175	100	100	370	36,5	1,33
	HS07-C0	280	178	100	100	370	39,2	0,75
Yan và Wang [8]	SP1	200	168	44	102	100	35	0,57
Eder và cs. [9]	Type-A	180	123	76	102	410	37,5	1,01

Ghi chú: c là kích thước cạnh cột, d là chiều cao làm việc hiệu quả của sàn, b_v , h_v và l_v tương ứng là bề rộng bản cánh, chiều cao và chiều dài của thép hình.

Bảng 2. Khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT có chi tiết kháng cắt dùng thép hình theo các công thức trong tiêu chuẩn

Thí nghiệm	Mẫu	V_{exp} (kN)	V_{ACI} (kN)	$\frac{V_{ACI}}{V_{exp}}$	V_{EC2} (kN)	$\frac{V_{EC2}}{V_{exp}}$
Kim và cs. [7]	SH670-WT19	1007,4	992,62	0,99	665,67	0,66
	SH320-WT19	674,3	721,64	1,07	555,71	0,82
	SH490-S200	754,4	893,47	1,18	555,71	0,74
	SH620-S300	1433,9	1755,71	1,22	970,39	0,68
	SH770-C500	1134,7	1057,37	0,93	794,89	0,70
	SH-AR1.5	648,7	750,34	1,16	619,63	0,96
	SH-AR2.0	654,4	725,74	1,11	656,99	1,00
Lee và cs. [6]	FPP-SH	626,61	624,60	1,00	504,70	0,81
	FPP-ST	563,60	526,16	0,93	514,75	0,91
	HP-SH	578	812,74	1,41	601,55	1,04
	HK-ST	580,55	673,92	1,16	601,55	1,04
	FP-ST	596,62	664,72	1,11	601,55	1,01
	HP-ST	563,70	664,72	1,18	601,55	1,07
Bompa và Elghazouli [10]	HS03-00	582	937,06	1,61	500,36	0,86
	HS13-C0	991	924,48	0,93	789,13	0,80
	HS07-C0	880	974,49	1,11	683,81	0,78
Yan và Wang [8]	SP1	416,8	469,24	1,13	499,27	1,20

Thí nghiệm	Mẫu	V_{exp} (kN)	V_{ACI} (kN)	$\frac{V_{ACI}}{V_{exp}}$	V_{EC2} (kN)	$\frac{V_{EC2}}{V_{exp}}$
Eder và cs. [9]	Type-A	450	622,35	1,38	383,27	0,85
	Trung bình (Mean)			1,15		0,88
	Độ hội tụ (COV)			0,16		0,17

Ghi chú: V_{exp} , V_{ACI} và V_{EC2} tương ứng là khả năng kháng chọc thủng theo thực nghiệm, tiêu chuẩn ACI 318-14 và Eurocode 2.

Bảng 3. Khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT có chi tiết kháng cắt dùng thép bản theo các công thức trong tiêu chuẩn

Nghiên cứu	Mẫu thí nghiệm	V_{exp} (kN)	c (mm)	d (mm)	f_c' (MPa)	ρ_l (%)	V_{ACI} (kN)	$\frac{V_{ACI}}{V_{exp}}$	V_{EC2} (kN)	$\frac{V_{EC2}}{V_{exp}}$
Lưu Thanh Bình [18]	S-T1-16	943	400	166	40,4	0,77	625,38	0,66	628,24	0,67
	S-T1-10	776	400	166	36,2	0,77	591,98	0,76	605,67	0,78
	S-T3-16a	921	400	166	40,4	0,77	625,38	0,68	628,24	0,68
	S-T3-16b	930	400	166	40,4	0,77	625,38	0,67	628,24	0,68
	S-T3-10	796	400	166	36,2	0,77	591,98	0,74	605,67	0,76
	S-T4	693	400	166	39,7	0,77	619,94	0,89	624,59	0,90
Đinh Thị Nhu Thảo [17]	S-T2-16	944	400	166	40,4	0,77	625,38	0,66	628,24	0,67
	Trung bình (Mean)							0,73		0,74
	Độ hội tụ (COV)							0,12		0,12

nghiên cứu thực nghiệm (Kinnunen và Nylander [24], Guandalini và cs. [25], Bompa và Elghazouli [10]) chứng minh sự ảnh hưởng đáng kể của hàm lượng cốt thép chịu uốn của sàn đến khả năng kháng chọc thủng của liên kết thông qua hiệu ứng cài chốt (dowel effect). Điều này dẫn đến sự chênh lệch đáng kể giữa kết quả tính toán theo tiêu chuẩn ACI 318-14 và thực nghiệm trong một số trường hợp mẫu sàn có hàm lượng cốt thép thấp như mẫu HS03-00 [10] chênh lệch tới 61% hay mẫu SH620-S300 [7] chênh lệch khoảng 22%.

Ảnh hưởng của chi tiết gia cường kháng cắt bằng thép hình hoặc thép bản chưa được xét đến trong tiêu chuẩn Eurocode 2 nên dẫn đến khả năng kháng chọc thủng của các liên kết tính toán theo tiêu chuẩn Eurocode 2 thấp hơn đáng kể (tới 34%) so với kết quả thí nghiệm trong nhiều trường hợp khảo sát. Trong khi đó, tiêu chuẩn ACI 318-14 có xét đến ảnh hưởng của chi tiết gia cường kháng cắt bằng thép hình với chu vi thấp chọc thủng được mở rộng đến $3l_v/4$ kể từ mép ngoài của cột với l_v là chiều dài vưon ra của thép hình (Hình 1). Điều này dẫn đến trường hợp khi chiều dài của thép hình càng lớn thì khả năng kháng chọc thủng của liên kết được dự đoán càng tăng. Tuy nhiên, theo nghiên cứu [4], khi chiều dài của thép hình đạt đến một giá trị hiệu quả thì khả năng kháng chọc thủng của liên kết hầu như không tăng nữa do thép hình đã bị chảy dẻo và phá hoại cục bộ. Đây là lý do dẫn đến khả năng kháng chọc thủng của liên kết tính toán theo tiêu chuẩn ACI 318-14 cao hơn đáng kể so với kết quả thí nghiệm trong một số trường hợp khảo sát mẫu liên kết có chiều dài thép hình lớn, chẳng hạn mẫu Type-A [9] hay mẫu SH490-S200 [7]. Ngoài ra, tiêu chuẩn ACI 318-14 chưa có chỉ dẫn về xét đến ảnh hưởng của các chi tiết gia cường kháng cắt bằng thép bản nên các kết quả tính toán theo ACI 318-14 đều nhỏ hơn đáng kể (tới 34%) so với thí nghiệm trong hầu hết các mẫu liên kết gia cường

bằng thép bản.

Ngoài ra, các kết quả thí nghiệm cũng cho thấy ảnh hưởng của các thông số khác đến khả năng kháng chọc thủng của các liên kết như: tính liên tục của cốt thép chịu uốn của sàn (xuyên liên tục hay không xuyên qua cột), thép gia cường sau chọc thủng, kích thước tiết diện thép hình, vị trí của thép hình theo phương đứng trong sàn, sự có mặt của tấm thép nổi gia cường, ... Tuy nhiên, các thông số này chưa được xem xét trong các công thức trong tiêu chuẩn. Do vậy, đây cũng có thể là lý do dẫn đến các chênh lệch đáng kể giữa các kết quả dự đoán so với thí nghiệm trong một số trường hợp khảo sát.

3. Công thức dự đoán khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT

Dựa vào các phân tích và so sánh ở trên, có thể thấy rằng khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT phụ thuộc vào các thông số như chiều dày sàn, cường độ của bê tông, hàm lượng cốt thép chịu uốn của sàn, kích thước và đặc điểm chế tạo của chi tiết gia cường kháng cắt, sự liên tục của cốt thép sàn xuyên qua cột, sự có mặt của tấm thép nổi gia cường, ... Tuy nhiên, các thông số này chưa được xem xét một cách đầy đủ trong các công thức trong tiêu chuẩn ACI 318-14 hay Eurocode 2. Điều này đã dẫn đến một số sai lệch đáng kể giữa kết quả khảo sát thực nghiệm và công thức trong tiêu chuẩn như đã được phân tích ở trên. Trong đó, tiêu chuẩn ACI 318-14 mặc dù đã có kể đến ảnh hưởng của chi tiết gia cường dùng thép hình nhưng chưa có chỉ dẫn về chi tiết gia cường dùng thép bản, đặc biệt chưa xét đến ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép chịu uốn của sàn. Trong khi đó, Eurocode 2 có xét đến hàm lượng cốt thép chịu uốn của sàn nhưng lại chưa có các chỉ dẫn kể đến ảnh hưởng của chi tiết gia cường kháng cắt đến khả năng chọc thủng của liên kết. Vì vậy, nghiên cứu này đề xuất một công thức hiệu chỉnh dựa trên tiêu chuẩn Eurocode 2 có xét đến ảnh hưởng của chi tiết gia cường dùng thép hình hoặc thép bản.

Các kết quả khảo sát thực nghiệm đều cho thấy sự có mặt của chi tiết kháng cắt bằng thép hình hoặc thép bản đã giúp đẩy chu vi tháp chọc thủng ra xa hơn khỏi bề mặt cột. Ngoài ra, theo các nghiên cứu [4, 8], hệ gia cường kháng cắt ứng xử như một cột mở rộng dẫn đến sự gia tăng chu vi tháp chọc thủng. Hình dạng và kích thước của cột mở rộng có thể được xác định dựa vào dạng phá hoại ở mặt chịu kéo của sàn. Dựa vào kết quả của các nghiên cứu [6, 7], cột mở rộng trong liên kết có chi tiết kháng cắt dùng thép hình có thể được giả thiết có dạng hình thoi với các đỉnh nằm trên các thanh thép hình kháng cắt như minh họa trên Hình 3(a) với khoảng cách mở rộng là $k_e l_v$ trong đó l_v là chiều dài vươn ra của thép hình từ mép ngoài của cột, k_e là hệ số kể đến ảnh hưởng của chiều dài thép hình đến sự mở rộng của chu vi tháp chọc thủng. Trong khi đó, dựa vào kết quả của các nghiên cứu [17, 18], cột mở rộng trong liên kết có chi tiết kháng cắt dùng thép bản có thể được giả thiết có hình dạng giống như cột ban đầu và được mở rộng một khoảng bằng với chiều dài vươn ra l_h của bản thép gồi như minh họa trong Hình 3(b). Dựa theo tiêu chuẩn Eurocode 2, chu vi tháp chọc thủng của liên kết dùng thép hình và thép bản được đề xuất mở rộng một khoảng cách $2d$ kể từ mép ngoài của cột mở rộng như minh họa trên Hình 3.

Khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng BTCT - cột CFT được hiệu chỉnh dựa trên tiêu chuẩn Eurocode 2 [22] như sau:

$$V_{prop} = 0,18k(100\rho_l f_c')^{(1/3)} b_0^* d \quad (5)$$

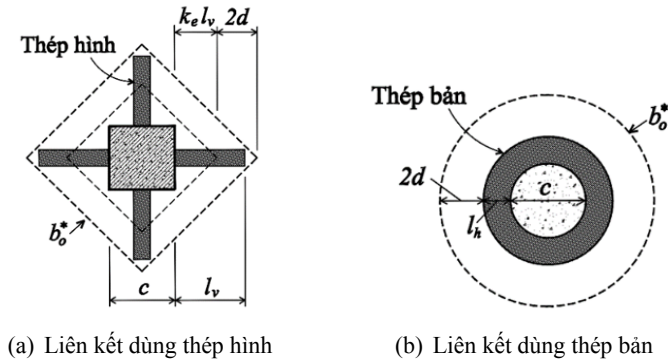
trong đó b_0^* là chu vi của tháp chọc thủng đề xuất được xác định theo Hình 3.

Đối với liên kết có chi tiết kháng cắt dùng thép hình:

$$b_0^* = 4\sqrt{2}(c/2 + k_e l_v + 2d) \quad (6)$$

Đối với liên kết có chi tiết kháng cắt dùng thép bản:

$$b_0^* = 2\pi(c/2 + l_h + 2d) \quad (7)$$



Hình 3. Chu vi tháp chọc thủng đề xuất

Dựa vào các kết quả thực nghiệm từ các nghiên cứu [6–10, 17, 18], công thức (6) và (7) được đề xuất áp dụng tương ứng đối với các liên kết dùng thép hình có chiều cao tiết diện lớn hơn hoặc bằng khoảng $0,5h$ và liên kết dùng thép bản có chiều dày bản gối lớn hơn hoặc bằng $0,05h$ với h là chiều dày sàn. Ngoài ra, dựa trên sự so sánh và kiểm chứng với các kết quả thực nghiệm về khả năng chọc thủng của các liên kết dùng thép hình trong các nghiên cứu [6–10] cho thấy rằng ứng với $k_e \approx 0,6$ cho kết quả dự đoán gần nhất với dữ liệu thực nghiệm với độ phân tán nhỏ nhất, theo đó, giá trị trung bình và hệ số biến thiên COV của tỉ số V_{prop}/V_{exp} lần lượt là 1,01 và 0,10 (Bảng 4). Do vậy, hệ số k_e trong công thức (6) được đề xuất lấy bằng 0,6.

Các kết quả tính toán khả năng kháng chọc thủng của liên kết theo công thức hiệu chỉnh (5) được thể hiện trong các Bảng 4 và 5. Các so sánh giữa kết quả thực nghiệm với công thức trong tiêu chuẩn và công thức hiệu chỉnh được thể hiện trong Hình 4. Kết quả so sánh với dữ liệu thực nghiệm cho thấy rằng công thức hiệu chỉnh có thể dự đoán khả năng chọc thủng của liên kết tốt hơn so với các công thức tiêu chuẩn ACI 318-14 và Eurocode 2. Tuy nhiên, do sự hạn chế về số lượng của các kết quả thực nghiệm, độ tin cậy của công thức đề xuất nên được kiểm chứng thêm nữa với các kết quả thực nghiệm và mô phỏng số trong các nghiên cứu tiếp theo.

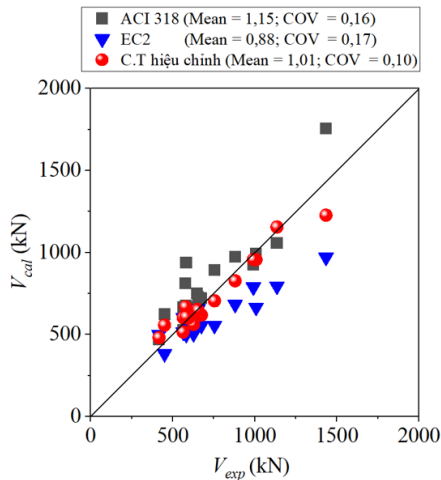
Bảng 4. Khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT có chi tiết kháng cắt dùng thép hình tính theo công thức hiệu chỉnh

Thí nghiệm	Mẫu	V_{exp} (kN)	c (mm)	d (mm)	l_v (mm)	f'_c (MPa)	ρ_l (%)	V_{prop} (kN)	$\frac{V_{prop}}{V_{exp}}$
Kim và cs. [7]	SH670-WT19	1007,4	400	164	670	22,8	1,10	956,59	0,95
	SH320-WT19	674,3	400	164	320	22,8	0,64	618,26	0,92
	SH490-S200	754,4	400	164	490	22,8	0,64	705,85	0,94
	SH620-S300	1433,9	400	264	620	22,8	0,48	1227,91	0,86
	SH770-C500	1134,7	500	161	770	22,8	1,47	1155,66	1,02
	SH-AR1,5	648,7	480	164	290	22,8	0,69	653,33	1,01
	SH-AR2,0	654,4	540	164	230	22,8	0,69	648,05	0,99
Lee và cs. [6]	FPP-SH	626,61	400	164	320	17,08	0,64	561,51	0,90
	FPP-ST	563,6	400	164	200	18,12	0,64	515,41	0,91
	HP-SH	578	400	164	320	28,92	0,64	669,26	1,16
	HK-ST	580,55	400	164	200	28,92	0,64	602,33	1,04
	FP-ST	596,62	400	164	200	28,92	0,64	602,33	1,01
	HP-ST	563,7	400	164	200	28,92	0,64	602,33	1,07

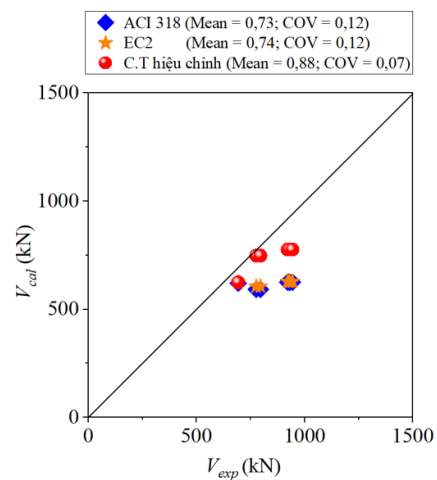
Thí nghiệm	Mẫu	V_{exp} (kN)	c (mm)	d (mm)	l_v (mm)	f'_c (MPa)	ρ_l (%)	V_{prop} (kN)	$\frac{V_{prop}}{V_{exp}}$
Bompa và Elghazouli [10]	HS03-00	582	280	175	370	37,5	0,33	607,18	1,04
	HS13-C0	991	280	175	370	36,5	1,33	957,60	0,97
	HS07-C0	880	280	178	370	39,2	0,75	827,39	0,94
Yan và Wang [8]	SP1	416,8	200	168	100	35	0,57	481,20	1,15
Eder và cs. [9]	Type-A	450	180	123	410	37,5	1,01	556,93	1,24
Mean									1,01
COV									0,10

Bảng 5. Khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT có chi tiết kháng cắt dùng thép bản tính theo công thức hiệu chỉnh

Thí nghiệm	Mẫu	V_{exp} (kN)	c (mm)	d (mm)	l_h (mm)	f'_c (MPa)	ρ_l (%)	V_{prop} (kN)	$\frac{V_{prop}}{V_{exp}}$
Lưu Thanh Bình [18]	S-T1-16	943	400	166	125	40,4	0,77	775,85	0,82
	S-T1-10	776	400	166	125	36,2	0,77	747,98	0,96
	S-T3-16a	921	400	166	125	40,4	0,77	775,85	0,84
	S-T3-16b	930	400	166	125	40,4	0,77	775,85	0,83
	S-T3-10	796	400	166	125	36,2	0,77	747,98	0,94
	S-T4	693	400	166	0	39,7	0,77	624,59	0,90
Đinh Thị Như Thảo [17]	S-T2-16	944	400	166	125	40,4	0,77	775,85	0,82
Mean									0,88
COV									0,067



(a) Liên kết dùng thép hình



(b) Liên kết dùng thép bản

Hình 4. So sánh khả năng kháng chọc thủng giữa kết quả thực nghiệm (V_{exp}) với các công thức trong tiêu chuẩn và công thức hiệu chỉnh (V_{cal})

4. Kết luận

Các nghiên cứu khảo sát thực nghiệm gần đây đã cho thấy các phương pháp gia cường kháng cắt dùng thép hình hoặc thép bản giúp gia tăng đáng kể khả năng kháng chọc thủng và đảm bảo tính toàn khối của các liên kết giữa sàn phẳng BTCT và cột CFT. Khả năng kháng chọc thủng của liên kết phụ thuộc vào các thông số như chiều dài vươn ra của chi tiết thép hình hoặc thép bản, phương pháp chế tạo và vị trí theo phương đứng của thép hình hoặc thép bản trong sàn, hàm lượng cốt thép chịu uốn của sàn, v.v... Tuy nhiên, các thông số này chưa được xem xét một cách đầy đủ trong một số tiêu chuẩn như ACI 318-14 và Eurocode 2. Do vậy, nghiên cứu này đề xuất một công thức hiệu chỉnh dựa trên tiêu chuẩn Eurocode 2 để dự đoán khả năng kháng chọc thủng của liên kết sàn phẳng BTCT – cột CFT. Kết quả tính toán và so sánh đã cho thấy công thức hiệu chỉnh có thể dự đoán khả năng kháng chọc thủng của liên kết với độ chính xác khá tốt và có độ phân tán thấp so với thực nghiệm thể hiện qua giá trị trung bình và hệ số biến thiên COV của tỉ số V_{prop}/V_{exp} là 1,01 và 0,10 đối với liên kết dùng thép hình, 0,88 và 0,067 đối với liên kết dùng thép bản.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Satoh, H., Shimazaki, K. (2004). Experimental research on load resistance performance of CFT column/flat plate connection. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [2] King, S., Delatte, N. J. (2004). Collapse of 2000 commonwealth avenue: Punching shear case study. *Journal of Performance of constructed facilities*, 18(1):54–61.
- [3] Goswami, A., Adhikary, S. D., Li, B. (2019). Predicting the punching shear failure of concrete slabs under low velocity impact loading. *Engineering Structures*, 184:37–51.
- [4] Yan, P. Y., Wang, Y. C. (2016). Hybrid steel tubular column/flat slab construction — Development of a shearhead system to improve punching shear resistance. *Journal of Constructional Steel Research*, 119: 154–168.
- [5] Corley, W. G., Hawkins, N. M. (1968). Shearhead reinforcement for slabs. *ACI Journal Proceedings*, 65 (10):811–824.
- [6] Lee, C.-H., Kim, J.-W., Song, J.-G. (2008). Punching shear strength and post-punching behavior of CFT column to RC flat plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(4):418–428.
- [7] Kim, J.-W., Lee, C.-H., Kang, T. H.-K. (2014). Shearhead reinforcement for concrete slab to concrete-filled tube column connections. *ACI Structural Journal*, 111(3):629–638.
- [8] Yan, P., Wang, Y. C. (2014). Behaviour of steel tube-reinforced concrete flat slab shearhead systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 167(11):667–677.
- [9] Eder, M. A., Vollum, R. L., Elghazouli, A. Y. (2011). Inelastic behaviour of tubular column-to-flat slab connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(7):1164–1173.
- [10] Bompa, D. V., Elghazouli, A. Y. (2016). Structural performance of RC flat slabs connected to steel columns with shear heads. *Engineering Structures*, 117:161–183.
- [11] Chen, C.-C., Giduquio, M. B., Liu Chang, S.-C., Cheng, M.-Y. (2020). Punching shear capacity of RC slab-CFT column connections. *Engineering Structures*, 218:110785.
- [12] Wight, J. K., Cagley, J. R., Criswell, M. E., Durrani, A. J., Ehsani, M. R., Garcia, L. E., Hawkins, N. M., Hanson, N. W., Joglekar, M. R., Kopczynski, C. S. et al. (1988). Recommendations for design of slab-column connections in monolithic reinforced concrete structures. *ACI Structural Journal*, 85(6):675–696.
- [13] Yamaguchi, T., Shimazaki, K., Satou, H. (2008). An experimental study on vertical load resistance of CFT column-flat plate joints. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*.
- [14] Lee, C.-H., Kang, T. H. K., Kim, J.-W., Song, J.-K., Kim, S. (2019). Seismic performance of concrete-filled tube column-reinforced concrete slab connections with shearhead keys. *ACI Structural Journal*, 116 (2):233–244.

- [15] ACI Committee 318 (2011). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*. American Concrete Institute, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [16] Su, Y., Tian, Y. (2009). [Experimental study of RC slab-CFT column connections under seismic deformations](#). *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, CRC Press, 337–342.
- [17] Thao, D. T. N. (2019). *Ứng xử kháng chọc thủng của liên kết cột ống thép nhồi bê tông và sàn phẳng bê tông cốt thép*. Luận án tiến sĩ, Đại học Đà Nẵng.
- [18] Bình, L. T. (2022). *Ứng xử chọc thủng của liên kết giữa cột ống thép nhồi bê tông và sàn phẳng bê tông cốt thép dùng chi tiết liên kết cải tiến*. Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh.
- [19] Bình, L. T., Cường, N. H., Long, N. M. (2022). [Khảo sát thực nghiệm ứng xử chọc thủng của liên kết sàn bê tông ứng suất trước–cột CFT sử dụng chi tiết liên kết dạng bản](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD)–ĐHXDHN*, 16(2V):14–29.
- [20] Luu-Thanh, B., Nguyen-Minh, L., Namba, T., Nakagawa, K., Oki, K., Ngo-Huu, C. (2022). [Distinguished punching shear behaviour of unbonded post-tensioned concrete slab–CFT column vs reinforced concrete slab–CFT column connections](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE)–HUCE*, 16(3):29–45.
- [21] ACI Committee 318 (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, MI 48331 USA.
- [22] European standard EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for building*. Brussels, Belgium.
- [23] Fédération internationale du béton (fib) (2013). *Model Code for Structural Concrete 2010*. Lausanne, Switzerland: Ernst & Sohn.
- [24] Kinnunen, S., Nylander, H. (1960). *Punching of concrete slabs without shear reinforcement*. Transaction of the Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- [25] Guandalini, S., Burdet, O., Muttoni, A. (2009). [Punching tests of slabs with low reinforcement ratios](#). *ACI Structural Journal*, 106(1):87–95.