

Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của cột bê tông cốt thép có xét đến ảnh hưởng của lực nén

Study on factors influencing the shear strength of reinforced concrete columns considering the effect of axial load

Phạm Phú Anh Huy^{a,b*}, Lê Minh Bền^{a,b}, Phạm Bảo Đại^{a,b}
Pham Phu Anh Huy^{a,b*}, Le Minh Ben^{a,b}, Pham Bao Dai^{a,b}

^aViện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^aInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

^bKhoa Xây dựng, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bFaculty of Civil Engineering, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 14/4/2023, ngày phản biện xong: 05/6/2023, ngày chấp nhận đăng: 03/7/2023)

Tóm tắt

Cột bê tông cốt thép (BTCT) là bộ phận quan trọng trong kết cấu chịu lực công trình. Do vậy việc xác định chính xác khả năng chịu cắt của cột BTCT là một khâu quan trọng trong thiết kế hoặc tính toán gia cố kết cấu. Khả năng chịu cắt của cột BTCT chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố khác nhau, tuy nhiên tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông và BTCT của Việt Nam TCVN5574:2018 chưa đề cập và xét đến một cách đầy đủ các nhân tố ảnh hưởng này. Dựa trên hướng dẫn tính toán khả năng chịu cắt của tiêu chuẩn Việt Nam TCVN5574:2018, tiêu chuẩn Mỹ ACI318-19 và mô hình của tác giả Sezen & Moehle, bài báo phân tích các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của cột BTCT. Bên cạnh đó, sử dụng số liệu 69 cột thí nghiệm của Trung tâm Nghiên cứu Động đất Thái Bình Dương (Đại học Berkeley, Mỹ) để tính toán, so sánh và đánh giá khả năng chịu cắt của cột BTCT có tiết diện hình chữ nhật. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng các yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu cắt gồm đặc trưng cơ học của bê tông và cốt thép đại thông qua tỷ số ($\rho_v f_{yv}/f'_c$), tỷ số nén trong cột ($P/A_g f'_c$), độ dẻo của cột (μ), tỷ số giữa nhịp chịu cắt trên chiều cao làm việc của tiết diện (L/d). Bên cạnh đó, kết quả tính toán cũng chỉ ra rằng tiêu chuẩn ACI318-19 và mô hình của Sezen & Moehle dự báo khả năng chịu cắt chính xác hơn so với TCVN5574:2018.

Từ khóa: Cột bê tông cốt thép; khả năng chịu cắt; lực cắt; cốt đai; cốt thép ngang; khả năng chịu tải trọng ngang.

Abstract

Reinforced concrete (RC) columns are important components in the structural system. Therefore, accurately determining the shear capacity of RC columns is a crucial step in the design or structure retrofit calculation. The shear capacity of RC columns is influenced by various factors; however, the Vietnamese design standard TCVN5574:2018 for concrete and RC structures does not fully address and consider these influencing factors. Based on the calculation guidelines for shear capacity in the Vietnamese standard TCVN5574:2018, the American standard ACI318-19, and the model developed by Sezen & Moehle, this paper analyzes the important factors that affect the shear capacity of RC columns. Additionally, using data from 69 experimental columns conducted by the Pacific Earthquake Engineering Research Center (the University of California, Berkeley, USA), the shear capacity of rectangular RC columns is calculated, compared, and evaluated. The research results show that significant influencing factors on shear capacity

*Tác giả liên hệ: Phạm Phú Anh Huy

Email: phampanhhuy@duytan.edu.vn

include the mechanical properties of concrete and reinforcing steel through the ratio of $(\rho_v f_{yv}/f'_c)$, the axial load ratio $(P/A_g f'_c)$, the ductility of the column (μ), and the shear span-to-effective depth ratio (L/d) . Furthermore, the calculated results also indicate that the ACI318-19 standard and the Sezen & Moehle model provide more accurate predictions of shear capacity compared to TCVN5574:2018.

Keywords: RC columns; shear strength; shear force; stirrup; transverse reinforcement; lateral strength.

1. Đặt vấn đề

Cột BTCT là cấu kiện quan trọng trong tòa nhà, nếu cột BTCT bị phá hoại thì nguy cơ sẽ dẫn đến toàn thể công trình bị sụp đổ. Do vậy việc dự đoán chính xác khả năng chịu lực của cột BTCT trong thiết kế kết cấu mới hoặc thiết kế gia cố kết cấu hư hỏng là rất quan trọng. Khả năng chịu lực của cột BTCT được xác định là giá trị nhỏ nhất của khả năng chịu uốn và khả năng chịu cắt của cột [1–5]. Khả năng chịu uốn của cột BTCT được ước tính tương đối chính xác thông qua các phương pháp truyền thống như phương pháp phân tích mô men và độ cong [6], phương pháp khối ứng suất tương đương theo tiêu chuẩn ACI – Mỹ [7,8], hoặc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn [9], v.v... Phương N.V. và cộng sự [10] đã đề xuất một phương pháp và bảng tính thực hành tính toán khả năng chịu lực của cột BTCT sử dụng các mô hình phi tuyến mô phỏng quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu bê tông và cốt thép dưới dạng hai đoạn thẳng và ba đoạn thẳng theo TCVN 5574:2018 [11]. Kết quả kiểm chứng khá tin cậy bởi một chương trình thực nghiệm đã công bố, và phương pháp đề xuất được sử dụng để khảo sát trên hai cột BTCT thực tế. Tuy nhiên, việc xác định chính xác khả năng chịu cắt của cột BTCT hiện nay còn gặp nhiều khó khăn. Các công thức đề xuất của tiêu chuẩn các nước và các học giả trên thế giới cho kết quả tính toán chênh lệch nhau. Do vậy, cần có những khuyến nghị cần thiết cho người thiết kế trong việc đánh giá khả năng chịu cắt của cột BTCT theo các tiêu chuẩn và mô hình.

Do nước ta không nằm trong vùng có nguy cơ cao và ít xảy ra động đất ở mức trung bình và lớn, các nghiên cứu trong nước chỉ tập trung

vào xác định khả năng chịu cắt của dầm BTCT, không nhiều nghiên cứu chuyên sâu để đánh giá khả năng chịu cắt của cột BTCT. Ngay cả tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép TCVN5574:2018 [11] cũng chỉ tập trung chỉ dẫn tính toán khả năng chịu cắt cho dầm BTCT, không chỉ dẫn rõ ràng cho việc tính khả năng chịu cắt của cột BTCT. Sự khác nhau cơ bản giữa dầm và cột BTCT ở đây là trong dầm BTCT không có lực nén hoặc lực nén rất bé, trong khi cột BTCT thường xuất hiện lực nén lớn. Chính lực nén lớn này làm ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của nó. Bên cạnh đó, một số yếu tố khác như độ mảnh, độ dẻo, hàm lượng cốt đai, v.v... cũng sẽ ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của cột. Các yếu tố này sẽ được phân tích cụ thể trong mục tiếp theo của bài báo.

2. Phương pháp nghiên cứu

Khả năng chịu cắt của cột BTCT được xác định là tổng khả năng chịu cắt của bê tông (Q_b theo tiêu chuẩn Việt Nam, hoặc V_c theo tiêu chuẩn ACI-Mỹ) và khả năng chịu cắt của cốt đai (Q_{sw} theo tiêu chuẩn Việt Nam, hoặc V_s theo tiêu chuẩn ACI-Mỹ). Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574:2018 [11] chỉ dẫn tính toán khả năng chịu cắt của cấu kiện BTCT khi không có cốt thép xiên theo công thức sau:

$$Q = Q_b + Q_{sw} \quad (1)$$

Trong đó:

$$Q_b = \varphi_{b2} R_{bt} b h_0^2 / C \quad (2)$$

là khả năng chịu cắt của bê tông; với φ_{b2} là hệ số, kể đến ảnh hưởng của cốt thép dọc, lực bám dính và đặc điểm trạng thái ứng suất của bê tông nằm phía trên vết nứt xiên, lấy bằng 1,5;

R_{bt} là cường độ chịu kéo tính toán của bê tông; h_0 là chiều cao làm việc của tiết diện; C là hình chiếu của vết nứt nghiêng trên chiều dài của cầu kiện.

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} q_{sw} C \quad (3)$$

Khả năng chịu cắt của cốt đai được xác định theo phương trình (3); trong đó φ_{sw} là hệ số, kể đến sự suy giảm nội lực dọc theo chiều dài hình chiếu của tiết diện nghiêng C , lấy bằng 0,75; q_{sw} là lực trong cốt thép ngang trên một đơn vị chiều dài cầu kiện, $q_{sw} = R_{sw} A_{sw} / s_w$;

$$V_c = \begin{cases} \left(0.17\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{P}{6A_g} \right) bd \\ \left(0.66\lambda(\rho_w)^{\frac{1}{3}}\sqrt{f'_c} + \frac{P}{6A_g} \right) bd \end{cases} ; A_v \geq A_{v,min} \quad (5)$$

$$V_c = \left(0.66\lambda\lambda_s(\rho_w)^{\frac{1}{3}}\sqrt{f'_c} + \frac{P}{6A_g} \right) bd ; A_v < A_{v,min} \quad (6)$$

trong đó V_s là khả năng chịu cắt của cốt đai; $V_s = (f_{yv} A_v d) / s$; A_v là diện tích cốt đai; $A_{v,min} = \max(0.062\sqrt{f'_c} bs / f_{yv}; 0.35bs / f_{yv})$. Tiêu chuẩn ACI318-19 [8] cũng chỉ dẫn rằng V_c được tính toán theo phương trình (5) hoặc (6) không được lớn hơn $0.42\lambda\sqrt{f'_c} bd$; $P/6A_g$ trong phương trình trên không được lớn hơn $0.05f'_c$; $\lambda_s = \sqrt{2/(1+0.004d)} \leq 1$ là hệ số xét đến ảnh hưởng của kích thước tiết diện; $\rho_w = A_s/A_g$, giá trị A_s được sử dụng để tính

$$V_n = k(V_c + V_s) = k \left(\frac{0.5\sqrt{f'_c}}{a/d} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5\sqrt{f'_c} A_g}} \right) 0.8A_g + k(A_v f_{yv} d) / s \quad (7)$$

trong đó k là hệ số xét đến ảnh hưởng của độ dẻo μ làm giảm khả năng chịu cắt của cột. Với độ dẻo của kết cấu được đánh giá bằng tỷ số giữa biến dạng cực hạn (Δ_u) trên biến dạng dẻo (Δ_y) [1,12]. Sezen & Moehle [5] đã đề xuất cách xác định hệ số k như Hình 1. Hệ số k là hằng số khi độ dẻo kết cấu $\mu < 2$ hoặc $\mu > 6$, ngược lại hệ số k thay đổi tuyến tính khi $2 \leq \mu \leq 6$.

R_{sw} là cường độ tính toán của cốt đai; A_{sw} là diện tích cốt đai; s_w là khoảng cách giữa các cốt đai.

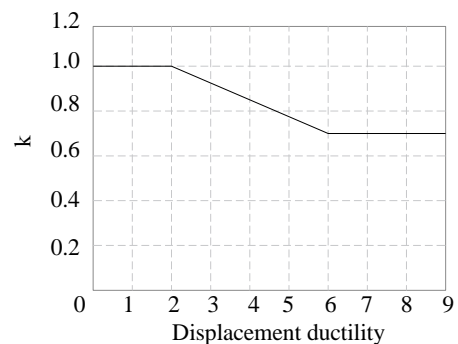
Bên cạnh đó, tiêu chuẩn ACI318-19 [8] dựa trên mô hình đàn với góc 45° đã chỉ dẫn tính toán khả năng chịu cắt của cột BTCT như sau:

$$V_n = V_c + V_s \quad (4)$$

trong đó V_n là khả năng chịu cắt của cột bê tông cốt thép; V_c là khả năng chịu cắt của bê tông được xác định theo các phương trình (5) hoặc (6).

ρ_w được lấy bằng tổng diện tích cốt dọc nằm ở vị trí lớn hơn 2/3 chiều cao của tiết diện tính từ mép chịu nén; λ là hệ số xét đến loại bê tông và được lấy $\lambda = 1$ cho bê tông nặng.

Ngoài ra, Sezen & Moehle [5] cũng dựa trên mô hình đàn 45° đề xuất công thức tính khả năng chịu cắt của cột bê BTCT có xét đến ảnh hưởng độ dẻo của kết cấu (μ) như thể hiện trong phương trình (7).

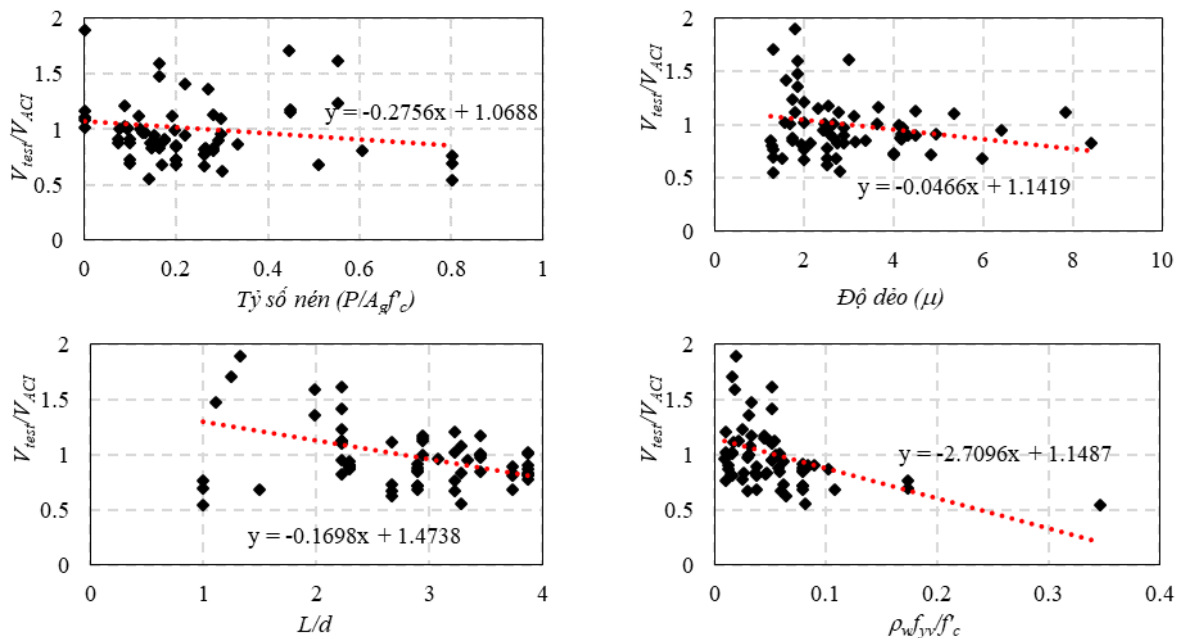


Hình 1. Cách xác định hệ số k theo Sezen & Moehle [5]

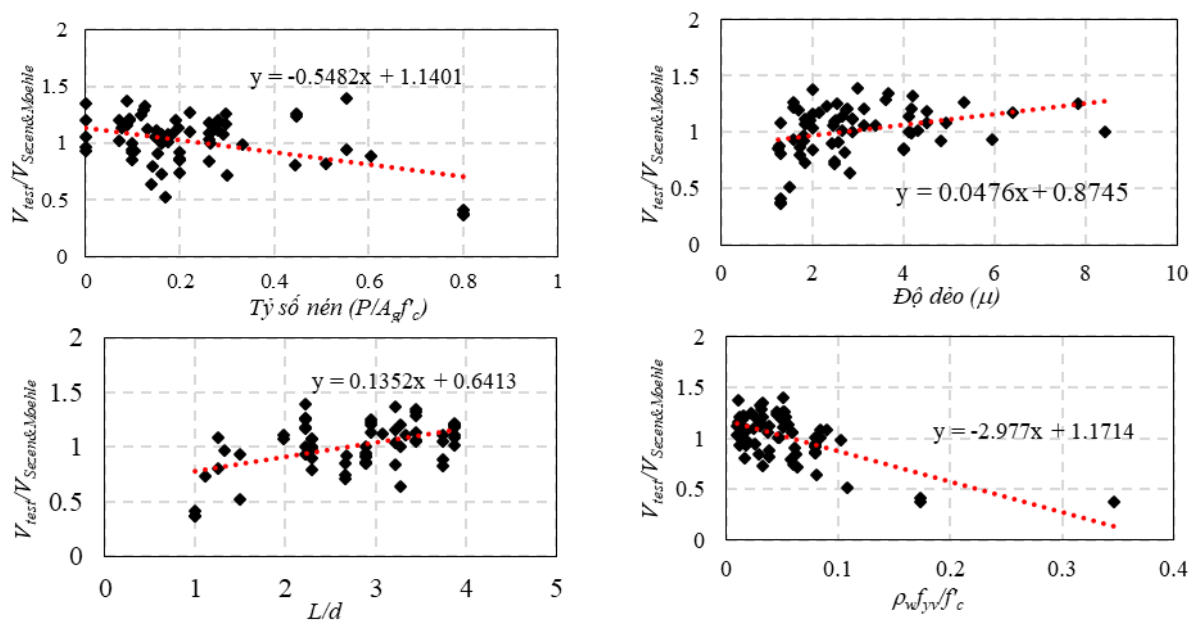
3. Kết quả nghiên cứu

Nhóm nghiên cứu đã thu thập và xử lý số liệu thí nghiệm của 69 cột BTCT có tiết diện hình chữ nhật do Trung tâm Nghiên cứu Động đất Thái Bình Dương [13] thực hiện. Bên cạnh đó, dựa trên chỉ dẫn tính toán khả năng chịu cắt của cột BTCT theo tiêu chuẩn TCVN5574:2018 [11], ACI318-19 [8], và mô hình của Sezen & Moehle [5], nhóm tác giả đã thực hiện nhiều tính toán và phân tích để xác định các yếu tố chính ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của cột BTCT. Kết quả tính toán chi tiết được thể hiện ở Phụ lục 1 (đính kèm bài báo này). Qua kết quả tính toán và phân tích có thể thấy rằng ngoài các yếu tố truyền thống mà TCVN5574:2018 [11] đã kể đến còn có một số yếu tố quan trọng khác cũng ảnh hưởng đến

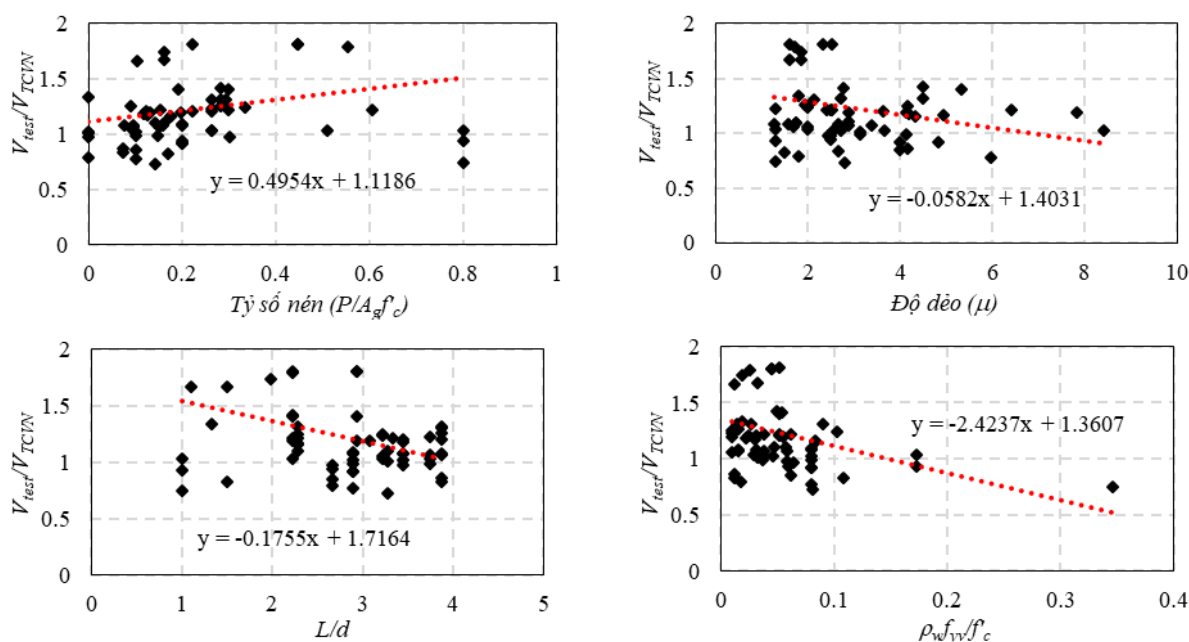
khả năng chịu cắt của cột BTCT. Cụ thể các yếu tố như: lực nén trong cột được thể hiện qua tỷ số nén ($P/A_g f'_c$), độ dẻo của cột (μ), tỷ số nhíp chịu cắt trên chiều cao làm việc của tiết diện (L/d), đặc trưng cơ học của bê tông và cốt thép đai thông qua thông số chỉ số cốt thép đai ($\rho_v f_{yv}/f'_c$). Trong đó f'_c, f_{yv} là cường độ chịu nén của bê tông và cường độ của cốt đai; P là lực nén trong cột; $A_g = b \times h$ là diện tích mặt cắt ngang của cột; L là nhíp chịu cắt, được lấy bằng chiều dài cột nếu thí nghiệm là cột công-son (single curvature), và lấy bằng $1/2$ chiều dài cột nếu thí nghiệm là cột có 2 đầu liên kết cứng (double curvature); ρ_v là hàm lượng cốt đai trong cột. Các Hình 2, 3 và 4 thể hiện tương quan giữa các thông số ảnh hưởng trên với tỷ số $V_{test}/V_{ACI}, V_{test}/V_{TCVN}, V_{test}/V_{Sezen\&Moehle}$.



Hình 2. Quan hệ giữa các đại lượng ảnh hưởng với V_{test}/V_{ACI}



Hình 3. Quan hệ giữa các đại lượng ảnh hưởng với $V_{test}/V_{Sezen\&Moehle}$



Hình 4. Quan hệ giữa các đại lượng ảnh hưởng với V_{test}/V_{TCVN}

4. Thảo luận

Từ kết quả tính toán và so sánh giữa các tiêu chuẩn và mô hình cho thấy các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của cột BTCT bao gồm cường độ chịu kéo của bê tông (R_{bt} theo tiêu chuẩn TCVN5574:2018 [11], hoặc thể hiện thông qua cường độ chịu nén f'_c theo tiêu chuẩn

ACI318-19 [8]), cường độ của cốt đai (R_{sw} hoặc f_{yv}), diện tích cốt đai (A_{sw} hoặc A_v), kích thước tiết diện ($A_g = b \times h$), lực nén trong cột thông qua tỷ số nén ($P/A_g f'_c$), độ dèo của cột (μ), tỷ số nhịp chịu cắt trên chiều cao làm việc (L/d), chỉ số cốt đai ($\rho_v f_{yv} / f'_c$). Tuy nhiên TCVN 5574:2018 [11] không đề cập đến sự

ảnh hưởng của 4 thông số như $P/A_g f'_c, \mu, L/d, \rho_v f_{yv}/f'_c$ trong chỉ dẫn tính toán khả năng chịu cắt cho cấu kiện BTCT. Trong khi tiêu chuẩn ACI318-19 [8] và mô hình Sezen & Moehle có xét đến nhưng không đầy đủ.

Dựa trên kết quả tính toán sự ảnh hưởng của 4 thông số trên đến các tỷ số V_{test}/V_{ACI} , $V_{test}/V_{Sezen\&Moehle}$, và V_{test}/V_{TCVN} được thể hiện ở Hình 2, 3 và 4, chúng ta có thể thấy:

- Khi tăng tỷ số nén ($P/A_g f'_c$), V_{test}/V_{ACI} và $V_{test}/V_{Sezen\&Moehle}$ có xu hướng giảm, trong khi V_{test}/V_{TCVN} có xu hướng tăng.

- Khi tăng độ dẻo (μ), V_{test}/V_{ACI} và $V_{test}/V_{Sezen\&Moehle}$ có xu hướng giảm, trong khi V_{test}/V_{TCVN} có xu hướng tăng.

- Khi tăng tỷ số L/d , V_{test}/V_{ACI} và $V_{test}/V_{Sezen\&Moehle}$ có xu hướng giảm, trong khi V_{test}/V_{TCVN} có xu hướng tăng.

- Khi tăng tỷ số $\rho_v f_{yv}/f'_c$, V_{test}/V_{ACI} , $V_{test}/V_{Sezen\&Moehle}$ và V_{test}/V_{TCVN} có xu hướng giảm.

Bên cạnh đó, mức độ tương quan giữa 4 yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của 69 cột thí nghiệm mà nhóm tác giả thu thập số liệu được thể hiện thông qua hệ số tương quan trong Bảng 2. Có thể thấy rằng các yếu tố ảnh hưởng truyền thống như kích thước tiết diện ($A_g = b \times h$), cường độ bê tông (f'_c), và diện tích cốt đai (A_v) có hệ số tương quan dương và ở mức độ quan hệ trung bình (hệ số tương quan = $[0,3 \div 0,7]$) và mạnh (hệ số tương quan $> 0,7$), chứng tỏ các yếu tố này có ảnh hưởng lớn và có quan hệ thuận chiều với khả năng chịu cắt của cột. Điều này phản ánh đúng các đại lượng ảnh hưởng chính trong công thức xác định khả năng chịu cắt của cột theo TCVN 5574:2018 [11]. Tuy nhiên, từ Bảng 1 cũng có thể thấy rằng, các yếu tố còn lại như lực nén trong cột (P) hay tỷ số nén ($P/A_g f'_c$), độ dẻo của cột (μ), tỷ số nhịp chịu cắt trên chiều cao làm việc (L/d), và chỉ số cốt đai ($\rho_v f_{yv}/f'_c$) cũng có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu cắt của cột. Trong khi các yếu tố ảnh hưởng này chưa được xét đến hoặc xét đến chưa đầy đủ trong TCVN 5574:2018 [11], ACI318-19 [8] và Sezen & Moehle [5].

Bảng 1. Hệ số tương quan giữa các đại lượng nghiên cứu với kết quả 69 cột thí nghiệm

	$A_g = b \times h$	f'_c	A_v	L/d	μ	P hay $(\frac{P}{A_g f'_c})$	$\rho_v f_{yv}/f'_c$
Hệ số tương quan (correlation factor) với kết quả thí nghiệm khả năng chịu cắt của 69 cột thí nghiệm	0,889	0,431	0,652	0,226	-0,356	0,647	-0,381

Mặt khác, kết quả tính toán khả năng chịu cắt của cột BTCT theo các tiêu chuẩn và mô hình thể hiện ở Phụ lục 1 (đính kèm bài báo này) cho thấy rằng:

- Tiêu chuẩn ACI318-19 [8] cho kết quả dự báo khả năng chịu cắt với độ chính xác tốt nhất (trung bình sai số 1,005, hệ số biến động 0,334).

- Mô hình của Sezen & Moehle [5] dự báo với sai số trung bình là 1,014 và hệ số biến động là 0,224.

- Ngược lại, tiêu chuẩn TCVN5574:2018 [11] cho sai số lớn nhất (trung bình sai số là 1,23 và hệ số biến động là 0,314).

Có thể thấy TCVN5574:2018 [11] cho kết quả tính toán với sai số và hệ số biến động lớn

hơn so với mô hình còn lại. Điều này có thể giải thích là do TCVN5574:2018 [11] chưa kể đến một số nhân tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của cột BTCT như tỷ số nén trong cột, độ dẻo, tỷ số giữa nhịp chịu cắt trên chiều cao làm việc, và chỉ số cốt đai.

5. Kết luận

Thông qua các công thức xác định khả năng chịu cắt của cột BTCT theo TCVN5574:2018, ACI318-19, và mô hình của Sezen & Moehle, kết hợp với việc phân tích các số liệu thí nghiệm trên 69 mẫu cột BTCT của Trung tâm Nghiên cứu Động đất Thái Bình Dương (Mỹ), chúng ta có thể thấy rằng:

- Khả năng chịu cắt của cột BTCT chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố khác nhau. Ngoài các yếu tố ảnh hưởng truyền thống như TCVN5574:2018 đã đề cập, còn có một số yếu tố khác cũng không kém phần quan trọng như tỷ số nén ($P/A_g f'_c$), độ dẻo (μ), tỷ số giữa nhịp chịu cắt trên chiều cao làm việc (L/d), và chỉ số cốt đai ($\rho_v f_{yv}/f'_c$).

- Tiêu chuẩn ACI318-19 và mô hình Sezen & Moehle cho kết quả dự báo khả năng chịu cắt với độ chính xác tốt hơn so với tiêu chuẩn TCVN5574:2018. Điều này có thể giải thích là do TCVN5574:2018 chưa kể đến một số nhân tố quan trọng khác cũng ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của cột BTCT như đã đề cập ở trên.

Qua đây, các tác giả cũng kiến nghị khi dự báo khả năng chịu cắt của cột BTCT, đặc biệt là cột có xét tới động đất cần xét đến các yếu tố ảnh hưởng trên để dự báo khả năng chịu cắt được chính xác và an toàn hơn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Anh Huy PP, Yuen TYP, Hung C-C, Mosalam KM. (2022). Seismic behaviour of full-scale lightly reinforced concrete columns under high axial loads. *Journal of Building Engineering*; 56:p104817. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104817>.
- [2] Pham HP. (2022). Shear strength model of large-scale reinforced concrete rectangular columns with light transverse reinforcement. *Asian Journal of Civil Engineering*. 24(1): p. 219-244. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00499-9>.
- [3] Sezen H, Moehle JP. (2002). Seismic Behavior of Shear-Critical Reinforced Concrete Building Columns. *Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts: Earthquake Engineering Research Institute*.
- [4] Priestley MJN, Verma R, Xiao Y. (1994). Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 120(8): p. 2310-2329.
- [5] Sezen H, Moehle JP. (2004). Shear strength model for lightly reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*; 130(11): p. 1692-1703. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:11\(1692\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:11(1692)).
- [6] MJN Priestley, F Seible, GM Calvi. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. UK: John Wiley & Sons.
- [7] Mostafaei H, Vecchio FJ. (2008). Uniaxial Shear-Flexure Model for Reinforced Concrete Elements. *Journal of Structural Engineering*; 134(9): p. 1538-1547. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:9\(1538\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:9(1538)).
- [8] American Concrete Institute. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. Farmington Hills, MI: ACI.
- [9] Zhong A, Sofi M, Lumantarna E, Zhou Z, Mendis P. (2021). Flexural Capacity Prediction Model For Steel Fibre-Reinforced Concrete Beams. *Int J Concr Struct Mater*; 15(1): p. 28. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00461-0>.
- [10] Phương NV, Vongchith S, Thắng NT. (2020). Xác định khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép sử dụng các mô hình vật liệu phi tuyến của TCVN 5574:2018. *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCNXD) - ĐHXD*; 14(3V): p. 93-107. [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(3V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(3V)-09).
- [11] Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng - Bộ Xây dựng. (2018). *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế (TCVN5574:2018)*. Hà Nội: Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [12] Arslan G, Kiristioglu I. (2016). Influence of Displacement Ductility on Concrete Contribution to Shear Strength. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*; 60:p379-386. <https://doi.org/10.3311/PPci.7605>.
- [13] Berry M, Parrish M, Eberhard M. (2013). *PEER Structural Performance Database, User Manual, ver 1.2*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Phụ lục 1. Số liệu tính toán khả năng chịu cắt của cột BTCT theo các tiêu chuẩn và mô hình

TT	Tác giả/Cấu kiện thí nghiệm	b (mm)	h (mm)	μ	a/d	f'_c (MPa)	s (mm)	A_v (mm ²)	P_v	d (mm)	$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\frac{P_v f_{yv}}{f'_c}$	ACI318-19 (kN)	Sezen & Moehle (kN)	TCVN 5574:2018 (kN)	V_{test} (kN)	$\frac{V_{test}}{V_{ACI}}$	$\frac{V_{test}}{V_{Sezen\&Moehle}}$	$\frac{V_{test}}{V_{TCVN}}$
1	Aboutaha et al. 1999, SC3	914,4	457,2	1,8	2,67	21,9	406	354	0,0010	419	0,00	0,017	366	439	513	407	1,112	0,926	0,793
2	Aboutaha et al. 1999, SC9	457,2	914,4	1,8	1,33	16,0	406	142	0,0008	876	0,00	0,019	319	625	452	605	1,899	0,968	1,338
5	Bett et al. 1985, No. 1-1	305	305	1,6	1,5	29,9	210	57	0,0009	280	0,10	0,012	106	230	129	214	2,009	0,932	1,666
3	Arakawa et al. 1989, OA2	180	180	1,3	1,25	31,8	64	25	0,0022	170	0,18	0,017	56	119	51	129	2,287	1,083	2,518
4	Arakawa et al. 1989, OA5	180	180	1,3	1,25	33,0	64	25	0,0022	170	0,45	0,016	77	164	52	132	1,709	0,806	2,540
8	Lynn et al. 1996, 3SLH18	457,2	457,2	2	3,22	26,9	457	142	0,0007	419	0,09	0,010	271	239	263	328	1,210	1,374	1,249
9	Lynn et al. 1998, 3CLH18	457,2	457,2	2	3,22	26,9	457	142	0,0007	419	0,09	0,010	271	239	263	277	1,022	1,160	1,055
10	Lynn et al. 1998, 3CMD12	457,2	457,2	2	3,22	27,6	305	284	0,0020	419	0,26	0,029	531	420	343	355	0,668	0,845	1,034
11	Lynn et al. 1998, 3CMH18	457,2	457,2	2	3,22	27,6	457	142	0,0007	419	0,26	0,010	427	316	266	328	0,767	1,037	1,236
12	Nagasaka 1982, HPRC10-63	200	200	1,5	1,5	21,6	35	48	0,0068	188	0,17	0,108	127	167	105	87	0,686	0,520	0,827
13	Umehara and Jirsa 1982, 2CUS	410	230	1,85	1,98	42,0	89	113	0,0031	205	0,27	0,031	303	370	203	412	1,360	1,114	2,025
14	Umehara and Jirsa 1982, CUS	230	410	1,85	1,11	34,9	89	57	0,0028	385	0,16	0,033	219	444	194	324	1,476	0,730	1,673
15	Umehara and Jirsa 1982, CUW	410	230	1,85	1,98	34,9	89	57	0,0015	205	0,16	0,018	166	246	152	265	1,595	1,077	1,742
16	Zhou et al. 1987, No. 104-08	160	160	1,3	1	19,8	40	39	0,0061	148	0,80	0,173	114	211	84	79	0,696	0,375	0,937
17	Zhou et al. 1987, No. 114-08	160	160	1,3	1	19,8	40	39	0,0061	148	0,80	0,173	114	211	84	87	0,766	0,413	1,032
18	Zhou et al. 1987, No. 124-08	160	160	1,3	1	19,8	40	79	0,0123	148	0,80	0,346	198	292	145	108	0,546	0,370	0,745
19	Sezen (2002), 2CLD12	457	457	2,88	3,739	21,1	305	237	0,0017	394	0,15	0,038	351	282	294	315	0,898	1,116	1,072
20	Sezen (2002), 2CHD12	457	457	1,29	3,739	21,1	305	237	0,0017	394	0,61	0,038	445	407	294	359	0,807	0,883	1,222
21	Sezen (2002), 2CVD12	457	457	2,72	3,739	20,9	305	237	0,0017	394	0,51	0,038	443	366	293	301	0,680	0,823	1,028
22	Sezen (2002), 2CLD12M	457	457	3,14	3,739	21,8	305	237	0,0017	394	0,15	0,037	353	278	297	294	0,834	1,057	0,990
23	Lynn et al. (1996), 3CLH18	457	457	1,58	3,866	25,6	457	209	0,0010	381	0,09	0,016	266	222	251	271	1,020	1,219	1,082
24	Lynn et al. (1996), 3SLH18	457	457	1,69	3,866	25,6	457	209	0,0010	381	0,09	0,016	266	222	251	267	1,005	1,201	1,066

TT	Tác giả/Cấu kiện thí nghiệm	b (mm)	h (mm)	μ	a/d	f'_c (MPa)	s (mm)	A_v (mm ²)	P_v	d (mm)	$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\frac{P_v f_{yv}}{f'_c}$	ACI318-19 (kN)	Sezen & Moehle (kN)	TCVN 5574:2018 (kN)	V_{test} (kN)	$\frac{V_{test}}{V_{ACI}}$	$\frac{V_{test}}{V_{Senzen\&Moehle}}$	$\frac{V_{test}}{V_{TCVN}}$
25	Lynn et al. (1996), 2CLH18	457	457	4,17	3,866	33,1	457	209	0,0010	381	0,07	0,012	265	199	278	240	0,906	1,204	0,864
26	Lynn et al. (1996), 2SLH18	457	457	2,65	3,866	33,1	457	209	0,0010	381	0,07	0,012	265	227	278	231	0,872	1,020	0,832
27	Lynn et al. (1996), 2CMH18	457	457	1,94	3,866	25,7	457	209	0,0010	381	0,28	0,016	390	285	251	316	0,810	1,110	1,260
28	Lynn et al. (1996), 3CMH18	457	457	2,14	3,866	27,6	457	209	0,0010	381	0,26	0,014	411	287	258	338	0,823	1,179	1,310
29	Lynn et al. (1996), 3CMH12	457	457	2,5	3,866	27,6	305	237	0,0017	381	0,26	0,025	459	326	295	356	0,775	1,093	1,208
30	Lynn et al. (1996), 3SMD12	457	457	2,73	3,866	25,7	305	237	0,0017	381	0,28	0,026	455	315	287	378	0,831	1,199	1,315
31	Ohue et al. (1985), 2D16RS	200	200	1,74	2,286	32,1	50	57	0,0057	175	0,14	0,057	116	128	93	102	0,881	0,795	1,099
32	Ohue et al. (1985), 4D13RS	200	200	2,42	2,286	29,9	50	57	0,0057	175	0,15	0,061	117	123	91	111	0,946	0,904	1,217
33	Esaki (1996), H-2-1/5	200	200	4,94	2,286	23,0	50	52	0,0052	175	0,18	0,084	113	95	88	103	0,908	1,081	1,167
34	HEsaki (1996), T-2-1/5	200	200	4,32	2,286	23,0	75	78	0,0052	175	0,18	0,084	113	101	88	102	0,899	1,010	1,156
35	Esaki (1996), H-2-1/3	200	200	4,5	2,286	23,0	40	45	0,0056	175	0,29	0,090	134	112	92	121	0,901	1,079	1,313
36	Esaki (1996), HT-2-1/3	200	200	4,16	2,286	20,2	60	67	0,0056	175	0,33	0,103	129	113	90	112	0,868	0,987	1,247
37	Li et al.(1995), U7	400	400	4	2,667	29,0	120	226	0,0047	375	0,10	0,062	449	387	384	328	0,730	0,847	0,855
38	Li et al.(1995), U8	400	400	2,5	2,667	33,5	120	250	0,0052	375	0,20	0,059	581	530	419	393	0,677	0,741	0,938
39	Li et al.(1995), U9	400	400	2,5	2,667	34,1	120	274	0,0057	375	0,30	0,064	690	601	442	430	0,623	0,716	0,973
40	Saatcioglu and Ozceb (1989), U1	350	350	3,12	3,279	43,6	150	158	0,0030	305	0,00	0,032	255	228	272	275	1,080	1,205	1,013
41	Saatcioglu and Ozceb (1989), U2	350	350	2,87	3,279	30,2	150	158	0,0030	305	0,16	0,047	324	269	245	270	0,832	1,005	1,103
42	Saatcioglu and Ozceb (1989), U3	350	350	2,81	3,279	34,8	75	158	0,0060	305	0,14	0,081	481	418	368	268	0,557	0,641	0,729
43	Yalcin (1997), BR-S1	550	550	2,88	3,081	45,0	300	165	0,0010	482	0,13	0,009	598	515	485	578	0,967	1,122	1,193
44	Ikeda (1968), 43	200	200	4,13	2,89	19,6	100	56	0,0028	173	0,10	0,080	84	74	75	74	0,876	1,005	0,987
45	Ikeda (1968), 44	200	200	2,56	2,89	19,6	100	56	0,0028	173	0,10	0,080	84	84	75	77	0,912	0,917	1,027
46	Ikeda (1968), 45	200	200	1,74	2,89	19,6	100	56	0,0028	173	0,20	0,080	96	95	75	82	0,857	0,865	1,093
47	Ikeda (1968), 46	200	200	1,26	2,89	19,6	100	56	0,0028	173	0,20	0,080	96	95	75	81	0,846	0,855	1,080
48	Ikeda (1968), 62	200	200	5,96	2,89	19,6	100	56	0,0028	173	0,10	0,080	84	62	75	58	0,687	0,941	0,773

TT	Tác giả/Cấu kiện thí nghiệm	b (mm)	h (mm)	μ	a/d	f'_c (MPa)	s (mm)	A_v (mm ²)	P_v	d (mm)	$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\frac{P_v f_{yv}}{f'_c}$	ACI318-19 (kN)	Sezen & Moehle (kN)	TCVN 5574:2018 (kN)	V_{test} (kN)	$\frac{V_{test}}{V_{ACI}}$	$\frac{V_{test}}{V_{Senzen\&Moehle}}$	$\frac{V_{test}}{V_{TCVN}}$
49	Ikeda (1968), 63	200	200	4	2,89	19,6	100	56	0,0028	173	0,20	0,080	96	81	75	69	0,721	0,856	0,920
50	Ikeda (1968), 64	200	200	4,82	2,89	19,6	100	56	0,0028	173	0,20	0,080	96	75	75	69	0,721	0,923	0,920
51	Umemura and Endo (1970), 205	200	200	2,51	3,333	17,7	100	56	0,0028	180	0,22	0,051	75	64	59	71	0,947	1,106	1,212
52	Umemura and Endo (1970), 207	200	200	1,6	2,222	17,7	100	56	0,0028	180	0,22	0,051	75	84	59	106	1,413	1,264	1,810
53	Umemura and Endo (1970), 208	200	200	2,99	2,222	17,7	100	56	0,0028	180	0,55	0,051	83	97	59	135	1,618	1,393	2,305
54	Umemura and Endo (1970), 214	200	200	1,73	2,222	17,7	200	56	0,0014	180	0,55	0,026	67	88	46	83	1,237	0,939	1,792
55	Umemura and Endo (1970), 220	200	200	7,83	2,222	32,9	120	26	0,0011	180	0,12	0,022	70	62	66	78	1,121	1,251	1,187
56	Umemura and Endo (1970), 231	200	200	8,42	2,222	14,8	100	26	0,0013	180	0,26	0,046	62	51	50	51	0,827	1,002	1,029
57	Umemura and Endo (1970), 232	200	200	6,4	2,222	13,1	100	26	0,0013	180	0,30	0,052	61	50	48	58	0,953	1,170	1,216
58	Umemura and Endo (1970), 233	200	200	4,5	2,222	13,9	100	26	0,0013	180	0,28	0,049	61	58	49	69	1,127	1,184	1,420
59	Umemura and Endo (1970), 234	200	200	5,33	2,222	13,1	100	26	0,0013	180	0,30	0,052	61	53	48	67	1,101	1,261	1,404
60	Kokusho (1964), 372	200	200	4,12	2,941	19,9	100	62	0,0031	170	0,20	0,055	74	65	62	74	0,997	1,138	1,194
61	Kokusho (1964), 373	200	200	2,78	2,941	20,4	100	62	0,0031	170	0,19	0,053	78	73	62	88	1,122	1,203	1,411
62	Kokusho and Fukuharo (1965), 452	200	200	2,53	2,941	21,9	100	62	0,0031	170	0,45	0,045	93	88	61	110	1,178	1,253	1,807
63	Kokusho and Fukuharo (1965), 454	200	200	2,32	2,941	21,9	100	62	0,0031	170	0,45	0,045	96	89	61	110	1,149	1,233	1,807
64	Wight and Sozen (1995), 40.033a	152	284	4,19	3,449	34,7	344	173	0,0033	254	0,13	0,030	99	73	82	96	0,972	1,322	1,178
65	Wight and Sozen (1995), 40.033	152	284	3,62	3,449	33,6	344	173	0,0033	254	0,12	0,031	97	75	81	97	1,004	1,291	1,203
66	Wight and Sozen (1995), 25.033	152	284	2,65	3,449	33,6	344	173	0,0033	254	0,08	0,031	87	76	81	87	1,004	1,140	1,079
67	Wight and Sozen (1995), 00.033	152	284	3,67	3,449	32,0	344	173	0,0033	254	0,00	0,033	69	60	79	81	1,167	1,348	1,020
68	Wight and Sozen (1995), 40.048	152	284	3,38	3,449	26,1	344	251	0,0048	254	0,16	0,058	111	90	88	95	0,852	1,059	1,074
69	Wight and Sozen (1995), 00.048	152	284	2,45	3,449	25,9	344	251	0,0048	254	0,00	0,059	85	81	88	86	1,014	1,057	0,974
Trung bình																	1,005	1,014	1,23
Hệ số biến động																	0,334	0,224	0,314

(Ghi chú: kết quả tính toán đã có quy đổi cường độ giữa tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 và ACI318-19)