

# ĐÁNH GIÁ CÁC CÔNG THỨC TÍNH TOÁN CƯỜNG ĐỘ CHỊU CẮT CỦA CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP TIẾT DIỆN CHỮ NHẬT

## EVALUATION OF SHEAR STRENGTH FORMULAS OF RECTANGULAR RC COLUMNS

PHAN VĂN TIẾN<sup>1</sup>, NGUYỄN SỸ MINH<sup>2</sup>, NGUYỄN TRỌNG HÀ<sup>1</sup>, TRẦN VĂN BÌNH<sup>2</sup>, NGUYỄN DUY DUẤN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Khoa Xây dựng, Trường Đại học Vinh

<sup>2</sup>Khoa Kỹ thuật công nghệ, Trường Đại học Hà Tĩnh

\*Tác giả đại diện, email: duyduankxd@vinhuni.edu.vn

**Tóm tắt:** Cường độ chịu cắt (hay là khả năng chịu cắt) là tham số cực kỳ quan trọng trong thiết kế cột bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt khi tính toán có xét đến ảnh hưởng của tải trọng ngang như gió hoặc động đất. Hiện tại, có nhiều tiêu chuẩn thiết kế và nghiên cứu đã đề xuất công thức tính toán cường độ chịu cắt của cột BTCT. Tuy nhiên, việc tính toán theo các công thức đã đề xuất trong các tài liệu vẫn còn có sự sai lệch nhiều so với kết quả thí nghiệm. Nghiên cứu này đánh giá các công thức tính toán khả năng chịu cắt của cột BTCT chữ nhật dựa trên bộ dữ liệu sưu tập gồm 735 thí nghiệm đã công bố. Bảy công thức tính toán được sử dụng để đánh giá trong nghiên cứu này, trong đó có năm công thức dựa trên tiêu chuẩn thiết kế bao gồm TCVN 5574 (2018), ACI 318 (2014), CSA (2014), EN 1998-1 (2004), FEMA 273 (1997) và hai nghiên cứu điển hình đã công bố là Ascheim - Moehle (1992) và Sezen – Moehle (2004). Cường độ chịu cắt của cột được tính toán dựa trên số liệu đầu vào của bộ dữ liệu sưu tập và sử dụng bảy công thức đã nêu. Cuối cùng, kết quả tính toán của các công thức được đánh giá dựa vào các đại lượng thống kê, bao gồm hệ số xác định và sai số quân phương. Kết quả đánh giá cho thấy rằng công thức của tiêu chuẩn EN 1998-1 (2004) cho dự báo tốt nhất, tiếp đến là công thức của Sezen-Moehle (2004), TCVN 5574 (2018) và tiêu chuẩn Canada CSA (2014). Các công thức này cho kết quả tính toán tương đối gần với thí nghiệm và thiên về an toàn hơn các công thức khác.

**Từ khóa:** Cột BTCT chữ nhật, cường độ chịu cắt, tiêu chuẩn thiết kế, công thức thực nghiệm, dữ liệu thí nghiệm.

**Abstract:** Shear strength is a crucial parameter in designing reinforced concrete (RC) columns considering the effects of lateral loads such as wind or earthquake. Currently, there are numerous design

codes and published studies, which proposed equations for calculating the shear strength of RC columns. However, a discrepancy is existing between calculated models and experimental results. The aim of this study is to evaluate calculated models for shear strength of rectangular RC columns based on 735 data sets, which are collected in the literature. Seven code-based and empirical models are investigated, in which five code-based models include TCVN 5574 (2018), ACI 318 (2014), CSA (2014), EN 1998-1 (2004), and FEMA 273 (1997), and two empirical models proposed by Ascheim - Moehle (1992) and Sezen – Moehle (2004). Shear strengths of RC columns are calculated for seven models using inputs of the experimental database. Finally, the results are evaluated using statistical indicators including coefficient of determination and root-mean-squared error. It reveals that EN 1998-1 (2004) is the best model, followed by Sezen-Moehle (2004), TCVN 5574 (2018), and Canada CSA (2014) since the results of those models are close to that of experiments and showing to be more conservative than the others.

**Keywords:** rectangular RC column, shear strength, design code, empirical formula, experimental data.

### 1. Đặt vấn đề

Cột bê tông cốt thép (BTCT) là cấu kiện chịu lực cực kỳ quan trọng trong các công trình nhà cửa và cầu. Sự hư hỏng hay phá hoại của cột là nguyên nhân chính dẫn đến sụp đổ công trình. Khả năng chịu lực của cấu kiện nói chung và cột BTCT nói riêng phụ thuộc vào nhiều yếu tố, có thể kể đến đó là kích thước hình học, chi tiết bố trí cốt thép, đặc trưng vật liệu và tải trọng tác dụng.

Có ba dạng phá hoại phổ biến của cột BTCT dưới

tác dụng của tải trọng ngang, đó là phá hoại uốn, phá hoại cắt và phá hoại kết hợp uốn-cắt. Phá hoại uốn là khi sự suy giảm khả năng chịu lực ngang xuất hiện sau khi cốt thép dọc chảy dẻo do các biến dạng uốn như bê tông bảo vệ bị bong ra, cốt thép dọc bị oằn hoặc là bê tông phần lõi bị nén vỡ. Phá hoại cắt xảy ra khi sự suy giảm khả năng chịu tải trọng ngang xuất hiện trước cốt thép dọc bị chảy dẻo do các nguy cơ phá hoại cắt gây ra như vết nứt chéo trong cột. Kiểu phá hoại kết hợp uốn-cắt xảy ra khi sự suy giảm khả năng chịu lực hình thành sau khi cốt thép dọc bị chảy dẻo nhưng vẫn có các nguy cơ phá hoại cắt. Một điều lưu ý rằng phá hoại cắt là dạng phá hoại không mong muốn khi thiết kế kết cấu BTCT và phải được chú ý để ngăn ngừa, đặc biệt là các công trình trong vùng có nguy cơ xảy ra động đất.

Cường độ chịu cắt là tham số cực kỳ quan trọng trong thiết kế cột BTCT, đặc biệt khi tính toán có xét đến ảnh hưởng của tải trọng ngang như gió hoặc động đất. Hiện tại, có nhiều tiêu chuẩn thiết kế và nghiên cứu đã đề xuất công thức tính toán cường độ chịu cắt của cột BTCT. Có thể kể đến các tiêu chuẩn và hướng dẫn thiết kế điển hình bao gồm TCVN 5574 (2018) [1], ACI 318 (2014) [2], CSA (2014) [3], EN 1998-1 (2004) [4] và FEMA 273 (1997) [5]. Bên cạnh đó, có nhiều nghiên cứu trước đây đã đề xuất các công thức để tính toán cường độ chịu cắt của cột BTCT, ví dụ như Ascheim - Moehle (1992) [6] và Sezen - Moehle (2004) [7]. Tuy nhiên, việc tính toán theo các công thức đề xuất trong các tài liệu vừa nêu vẫn còn có sự chênh lệch so với kết quả thí nghiệm do khả năng chịu cắt phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như cơ cấu phá hoại cắt, đặc tính vật liệu, kích thước hình học, cấu tạo và tải trọng [8, 9]. Vì vậy, cần thiết phải có nghiên cứu so sánh và đánh giá về tính toán cường độ chịu cắt theo các tiêu chuẩn và các nghiên cứu khác nhau dựa trên một bộ dữ liệu đủ lớn và đáng tin cậy.

Lý do vừa nêu chính là động lực để các tác giả thực hiện nghiên cứu này. Một bộ dữ liệu gồm 735 thí nghiệm xác định khả năng chịu cắt của cột BTCT tiết diện chữ nhật được thu thập. Bảy công thức tính toán được khảo sát trong nghiên cứu này, trong đó có năm tiêu chuẩn thiết kế bao gồm TCVN 5574 (2018), ACI 318 (2014), CSA (2014), EN 1998-1

(2004), FEMA 273 (1997) và hai nghiên cứu điển hình là Ascheim - Moehle (1992) và Sezen - Moehle (2004). Sau đó, cường độ chịu cắt của cột được tính toán theo các công thức này. Cuối cùng, kết quả tính toán của các công thức được đánh giá dựa vào các đại lượng thống kê, bao gồm hệ số xác định và sai số quân phương.

### 2. Các công thức tính toán cường độ chịu cắt của cột BTCT chữ nhật

Trong nghiên cứu này, các tác giả đã xem xét công thức tính toán cường độ chịu cắt của cột trong 05 tiêu chuẩn thiết kế, bao gồm TCVN 5574 (2018), ACI 318 (2014), CSA (2014), EN 1998-1 (2004), và FEMA 273 (1997). Ngoài ra, 2 nghiên cứu điển hình đã công bố cũng được khảo sát đó là Ascheim - Moehle (1992) và Sezen - Moehle (2004). Lưu ý rằng công thức đề xuất của Sezen - Moehle (2004) được áp dụng trong tiêu chuẩn ASCE/SEI 41-06 (2006) [8]. Bảng 1 tóm tắt các công thức sử dụng trong nghiên cứu này. Dựa vào công thức trong bảng này, một số nhận xét rút ra như sau:

- Công thức tính toán khả năng chịu cắt của cấu kiện trong tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574 (2018) xem xét ảnh hưởng của kích thước tiết diện, cường độ bê tông, đặc tính cốt thép đai và các hệ số kể đến ảnh hưởng của lực dọc cũng như ứng suất của bê tông;

- Trong công thức của ACI 314 (2014), khả năng chịu cắt phụ thuộc vào kích thước tiết diện cột, đặc tính của cốt đai, cường độ chịu nén của bê tông và lực dọc. Trong khi đó, công thức khả năng chịu cắt của CSA (2014) còn xét đến ảnh hưởng của bê tông khi nứt và dạng phá hoại cắt theo đường chéo (góc nghiêng);

- Công thức của EN 1998-1 (2004) còn bổ sung thêm ảnh hưởng của độ mảnh và độ dẻo cột đến cường độ chịu cắt của cột. Tương tự, Sezen - Moehle (2004) cũng xem xét ảnh hưởng của tham số độ mảnh và độ dẻo trong tính toán khả năng chịu cắt. Đối với công thức của FEMA 273 (1997) và Ascheim - Moehle (1992), ngoài các tham số kích thước tiết diện cột, đặc tính của cốt đai, cường độ chịu nén của bê tông và lực dọc thì còn xét thêm tham số độ dẻo chuyển vị của cột BTCT.

# KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

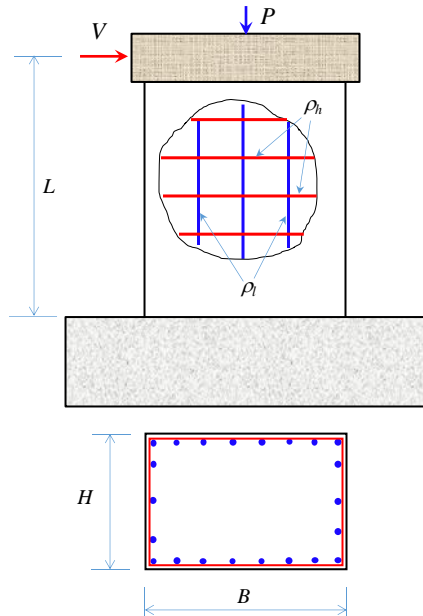
**Bảng 1. Tổng hợp các công thức tính toán cường độ chịu cắt của cột BTCT theo các tiêu chuẩn thiết kế và nghiên cứu trước đây sử dụng trong nghiên cứu này**

Tài liệu	Công thức tính
TCVN 5574 (2018)	$V = \varphi_n \left( \varphi_{b1} R_b b h_0 + \frac{A_{sw} R_{sw}}{s_w} h_0 \right) \quad (1)$ <p><math>\varphi_n</math> là hệ số kể đến ảnh hưởng của lực dọc;  <math>\varphi_{b1}</math> là hệ số kể đến ảnh hưởng của đặc điểm trạng thái ứng suất bê tông trong dải nghiêng, lấy bằng 0.3; <math>R_b</math> là cường độ chịu nén tính toán của bê tông đã bao gồm hệ số độ tin cậy <math>\gamma_c</math>; <math>b</math> là bề rộng tiết diện ngang; <math>h_0</math> là chiều cao hữu hiệu của tiết diện ngang; <math>h_0 = h - a</math> (<math>h</math> - chiều cao tiết diện, <math>a</math> là lớp bảo vệ bê tông); <math>A_{sw}</math> là diện tích cốt đai; <math>R_{sw}</math> là cường độ chảy dẻo của cốt đai; <math>s_w</math> là khoảng cách cốt đai.</p>
ACI 318 (2014)	$V = 0.166 \left( 1 + \frac{P}{13.8A_g} \right) b_w d \sqrt{f'_c} + \frac{A_{sh} f_{yh} d}{s} \quad (2)$ <p><math>P</math> là lực nén lên cột; <math>A_g</math> là diện tích tiết diện ngang; <math>b_w</math> là bề rộng tiết diện cột; <math>d = h - c</math> (<math>h</math> là chiều cao tiết diện, <math>c</math> là lớp bảo vệ bê tông); <math>f'_c</math> là cường độ chịu nén theo mẫu trụ của bê tông; <math>A_{sh}</math> là diện tích cốt đai; <math>f_{yh}</math> là cường độ chảy dẻo của cốt thép đai; <math>s</math> là khoảng cách cốt đai.</p>
CSA (2014)	$V = \min \left( \beta b_w d_v \sqrt{f'_c} + \frac{A_{sh} f_{yh} d}{s} \cot \theta; 0.25 f'_c b d \right) \quad (3)$ <p><math>d_v = 0.9d</math>; <math>b</math> là bề rộng tiết diện cột; <math>\beta</math> là hệ số kể đến khả năng chịu cắt của bê tông khi bị nứt, lấy bằng 0.21; <math>\theta</math> là góc nghiêng của ứng suất nén chéo và trục đứng của cột, lấy bằng <math>42^\circ</math>.</p>
EN 1998-1 (2004)	$V = V_p + k(V_c + V_w) \quad (4)$ $V_c = 0.16 \max(0.5; 100 \rho_l) \left( 1 - 0.16 \min \left( 5; \frac{a}{d} \right) \right) A_c \sqrt{f'_c}$ $V_w = \frac{A_{sw}}{s} (d - d') f_{yw}$ $V_p = \frac{d-x}{2a} \min(P; 0.55 A_c f'_c)$ <p><math>x</math> là chiều cao trục trung hòa; <math>d'</math> là chiều cao của lớp cốt thép chịu nén;  <math>k</math> là hệ số xét đến độ dẻo của cột; <math>k = 1 \sim 0.75</math> khi <math>\mu &lt; 1 \sim 6</math>  <math>A_c = b_w d</math>, (<math>d = 0.8h</math> - chiều cao hữu hiệu của tiết diện cột);</p>
FEMA 273 (1997)	$V = 0.29 \lambda \left( k + \frac{P}{13.8A_g} \right) b d \sqrt{f'_c} + \frac{A_{sh} f_{yh} d}{s} \quad (5)$ <p><math>\lambda</math> là hệ số phụ thuộc vào trọng lượng bê tông, lấy bằng 1.0;  <math>k = 1.0</math> - đối với yêu cầu độ dẻo thấp;  <math>k = 0</math> - đối với yêu cầu độ dẻo trung bình và cao.</p>
Ascheim-Moehle (1992)	$V = 0.3 \left( k + \frac{P}{13.8A_g} \right) 0.8 A_g \sqrt{f'_c} + \frac{A_{sh} f_{yh} d}{s \tan(30^\circ)} \quad (6)$ <p><math>k = \frac{4-\mu}{3}</math>, <math>\mu</math> là độ dẻo chuyển vị;  <math>d = 0.8H</math></p>
Sezen-Moehle (2004)	$V = k \left( \frac{0.5 \sqrt{f'_c}}{a/d} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 A_g \sqrt{f'_c}}} \right) 0.8 A_g + k \frac{A_{sh} f_{yh} d}{s}; \quad (7)$ <p><math>k</math> là hệ số xét đến độ dẻo của cột; <math>\mu</math> - độ dẻo chuyển vị;  <math>k = 1</math> khi <math>\mu &lt; 2.0</math>; <math>k = 0.7</math> khi <math>\mu &gt; 6.0</math>;  <math>0.7 \leq k = 1.15 - 0.075 \mu \leq 1.0</math> khi <math>2.0 \leq \mu \leq 6.0</math>  <math>a</math> là nhíp cắt, tức là khoảng cách từ điểm đặt lực ngang đến chân cột.</p>

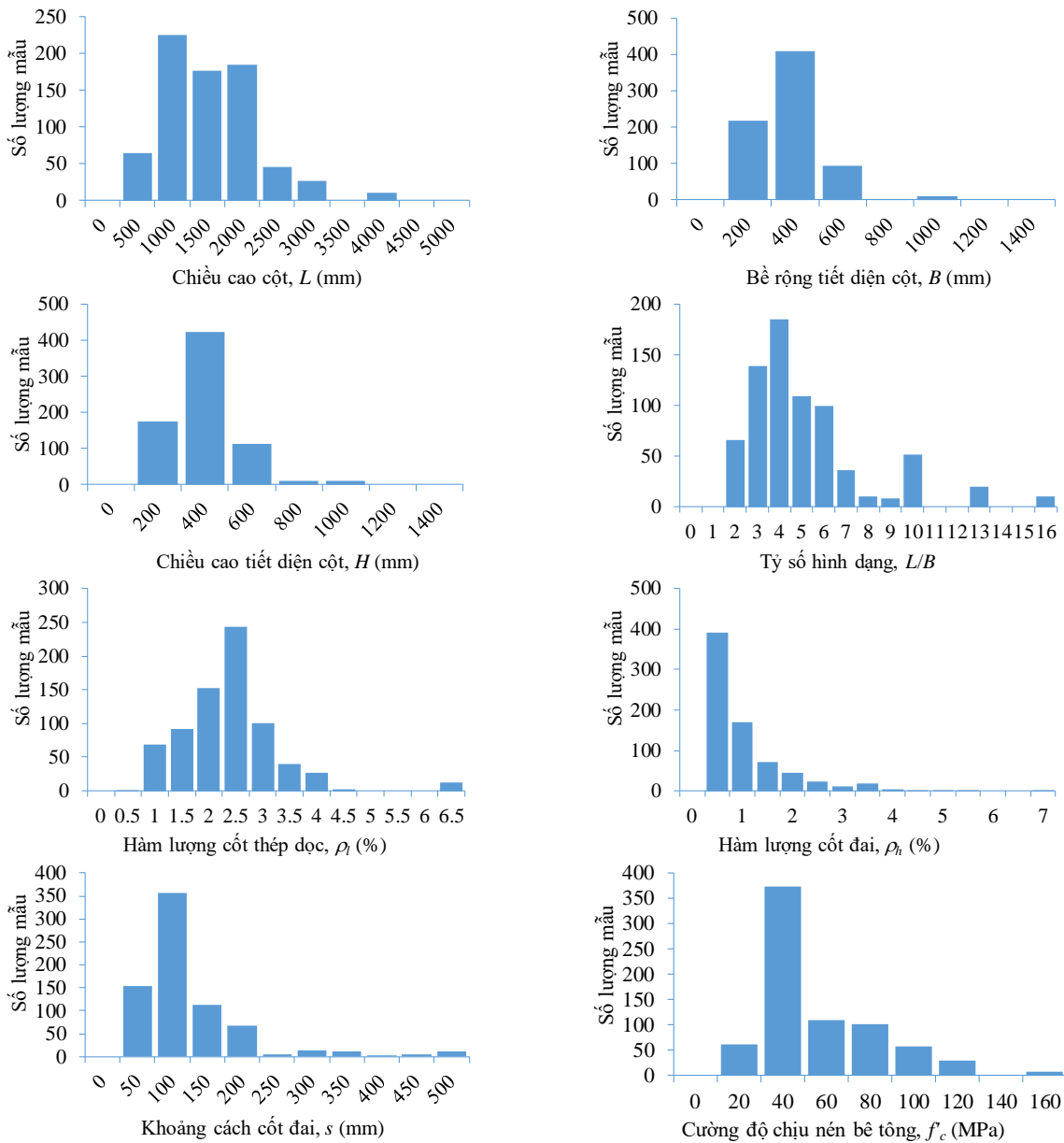
### 3. Bộ dữ liệu thí nghiệm sưu tập

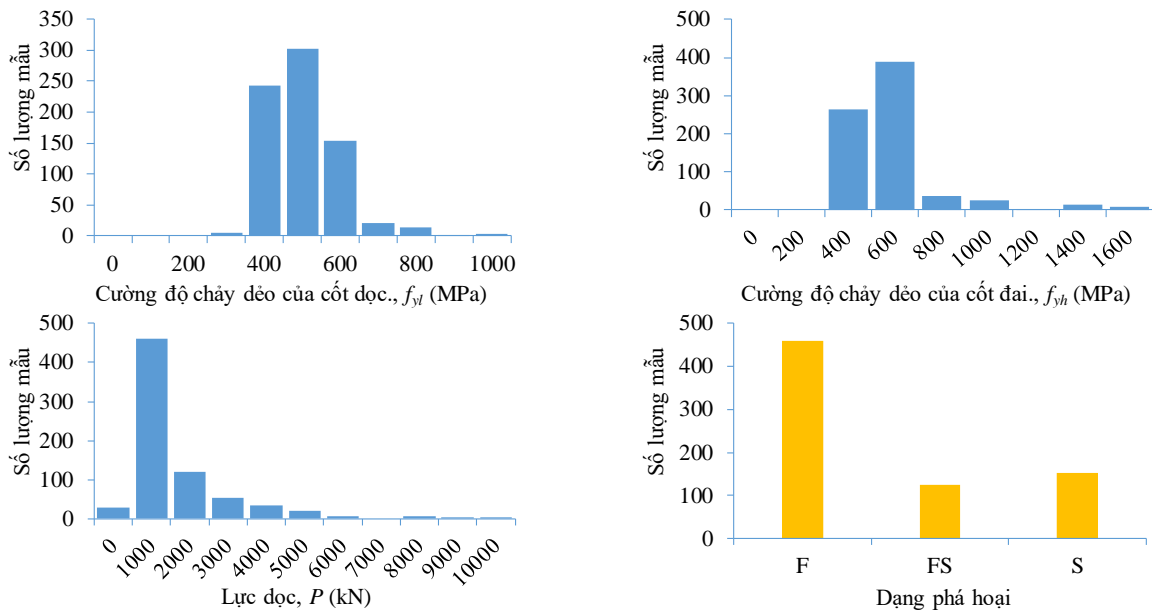
Các tác giả đã sưu tập một bộ gồm 735 dữ liệu kết quả thí nghiệm cột BTCT tiết diện chữ nhật trong các bài báo công bố từ năm 1979 đến 2021 [9-35]. Cần lưu ý rằng bộ dữ liệu này bao quát được phạm vi rất rộng của các tham số đầu vào như độ mảnh,

kích thước tiết diện, tỷ số nén và đặc trưng vật liệu sử dụng. Hình 1 trình bày các tham số hình học của cột, vật liệu sử dụng và tải trọng tác dụng lên cột chữ nhật BTCT. Lưu ý rằng lực dọc tác dụng lên cột là đúng tâm. Hình 2 thể hiện phân bố dữ liệu của các tham số đầu vào và 3 dạng phá hoại của cột BTCT.



Hình 1. Đặc trưng hình học, vật liệu và tải trọng tác dụng lên cột BTCT chữ nhật



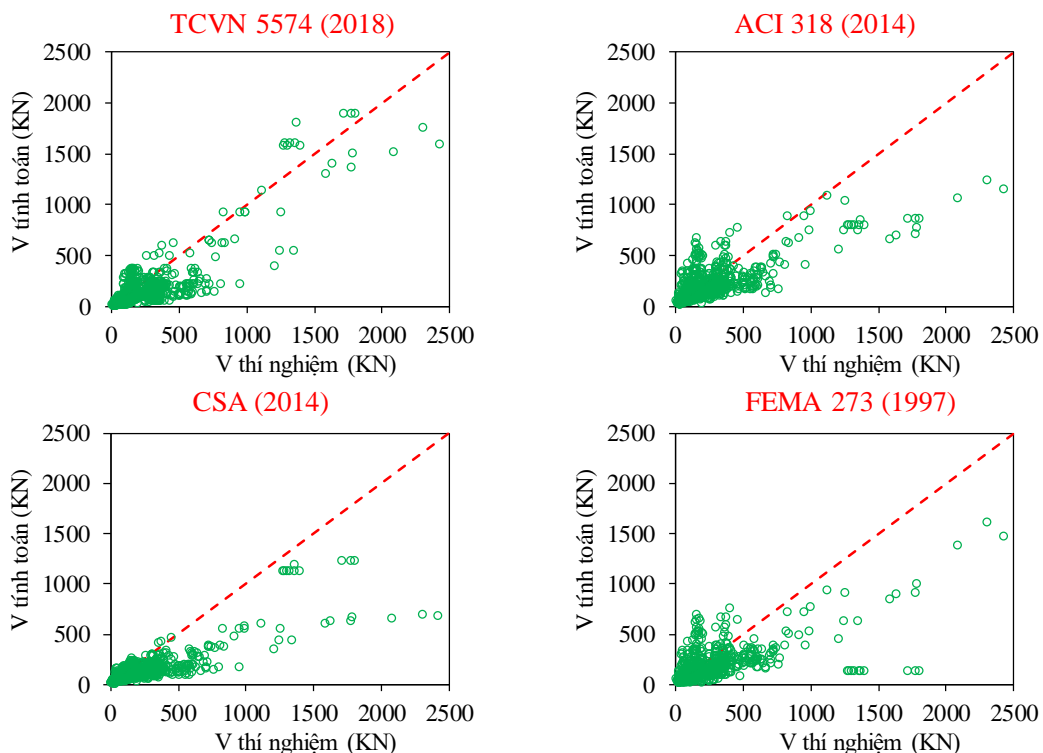


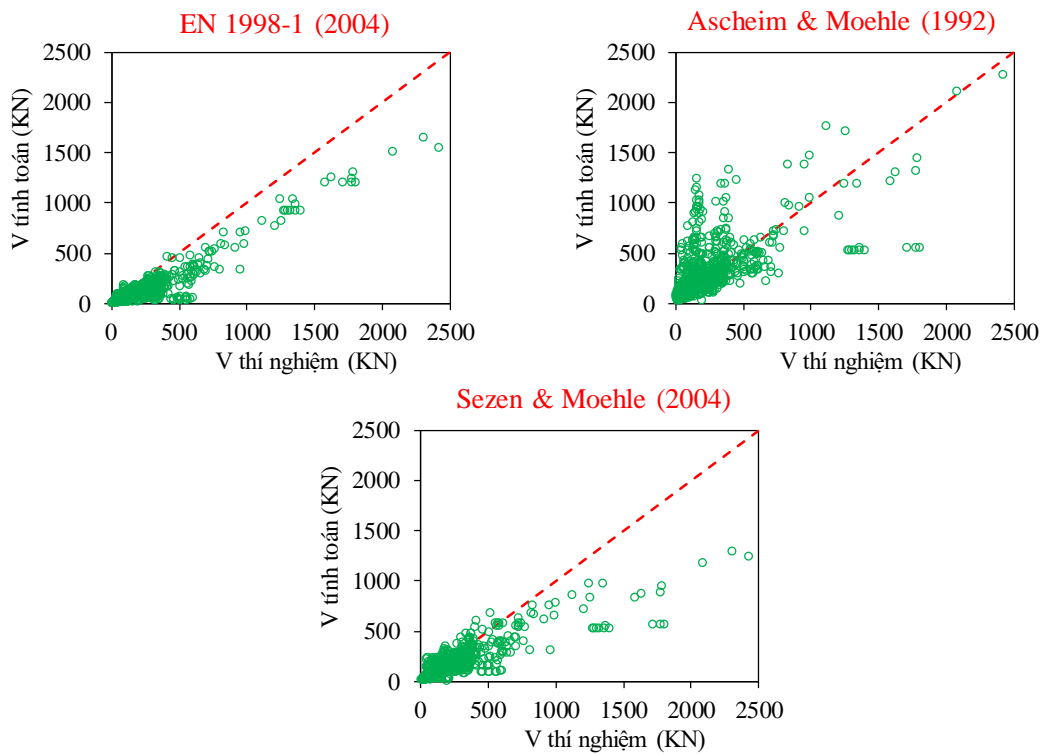
Hình 2. Phân bố các tham số đầu vào và dạng phá hoại của cột trong bộ dữ liệu

## 4. Đánh giá tính toán cường độ chịu cắt của cột BTCT theo các công thức

Hình 3 trình bày phân bố kết quả tính toán cường độ chịu cắt của cột BTCT chữ nhật theo các công thức và kết quả thí nghiệm. Đường nét đứt thể hiện đường chuẩn 1:1, các dữ liệu nằm trên đường này biểu thị kết quả tính toán bằng với kết quả thí nghiệm. Kết quả cho thấy rằng công thức EN 1998-1 (2004) và CSA (2014) cho kết quả tính toán nằm dưới đường chuẩn 1:1, tức là bé hơn so với kết quả thí nghiệm.

Độ phân tán của kết quả từ các công thức này là nhỏ hơn so với các công thức khác. Ngoài ra, công thức của Sezen-Moehle (2004) và tiêu chuẩn TCVN 5574 (2018) cũng cho kết quả hầu hết là nhỏ hơn so với thí nghiệm. Kết quả tính toán từ các công thức ACI 318 (2014), FEMA 273 (1997) và Ascheim-Moehle (1992) có sự phân tán khá lớn, đặc biệt là các mẫu cột có cường độ chịu cắt lớn hơn 1000 kN. Sự sai khác này có thể do việc xem xét sự có mặt của hệ số phụ thuộc độ dẻo của cột và ảnh hưởng của lực nén chéo trong cột đến cường độ chịu cắt.





Hình 2. So sánh cường độ chịu cắt giữa kết quả thí nghiệm và các công thức tính toán trong các tiêu chuẩn và nghiên cứu đã công bố

Để đánh giá kết quả tính toán cường độ chịu cắt của cột BTCT theo các công thức trong Bảng 1, các tham số thống kê được sử dụng bao gồm hệ số xác định ( $R^2$ ) và sai số quân phương ( $RMSE$ ). Lưu ý rằng giá trị  $R^2$  đặc trưng cho phần trăm dữ liệu gần nhất với đường hồi quy;  $R^2$  càng cao thì công thức tính toán càng tốt và ngược lại. Còn tham số  $RMSE$  là dùng để đại diện cho mức độ chênh lệch (sai số) giữa giá trị tính toán và giá trị thí nghiệm; nếu  $RMSE$  càng bé thì công thức tính toán càng chính xác và ngược

lại.

$$R^2 = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2\right)}{\left(\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{o})^2\right)} \tag{8}$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2} \tag{9}$$

trong đó:  $t_i$  và  $o_i$  tương ứng là kết quả thí nghiệm và tính toán của dữ liệu thứ  $i$ ;  $n$  là số lượng dữ liệu;  $\bar{o}$  là giá trị trung bình của các kết quả tính toán.

Bảng 2. Tham số thống kê đánh giá các công thức tính toán cường độ chịu cắt

TT	Công thức tính	$R^2$	$RMSE$	Đặc trưng thống kê của tỷ số $V_{tính toán} / V_{thí nghiệm}$				
				Min	Max	Mean	SD	CV
1	TCVN 5574 (2018)	0.742	165	0.16	9.59	1.01	0.76	0.75
2	ACI 318 (2014)	0.608	202	0.19	20.88	1.40	1.42	1.01
3	CSA (2014)	0.680	220	0.18	9.88	0.93	0.74	0.80
4	EN 1998-1 (2004)	0.892	163	0.07	4.84	0.64	0.37	0.57
5	FEMA 273 (1997)	0.448	238	0.07	19.62	1.15	1.33	1.15
6	Ascheim-Moehle (1992)	0.476	251	0.21	35.78	2.14	2.41	1.13
7	Sezen-Moehle (2004)	0.766	185	0.09	8.51	1.02	0.71	0.69

Bảng 2 trình bày kết quả các tham số thống kê  $R^2$  và  $RMSE$  cho từng công thức tính toán. Ngoài ra, các đặc trưng thống kê của tỷ số giữa cường độ chịu cắt tính toán và cường độ chịu cắt theo thí nghiệm ( $V_{tính toán} / V_{thí nghiệm}$ ) cũng được tính toán để đánh giá. Các đặc trưng thống kê này bao gồm giá trị nhỏ nhất (Min), giá trị lớn nhất (Max), giá trị trung bình

(Mean), độ lệch chuẩn (SD) và hệ số biến động (CV). Kết quả tính toán cho thấy rằng, công thức dự báo theo tiêu chuẩn Châu Âu EN 1998-1 (2004) cho khả năng tính toán cường độ chịu cắt tốt nhất với giá trị  $R^2$  cao nhất (= 0.892) và sai số quân phương  $RMSE$  nhỏ nhất (= 163 kN). Tiếp theo, các công thức tính toán của Sezen-Moehle (2004), tiêu chuẩn TCVN

5574 (2018) và tiêu chuẩn Canada CSA (2014) lần lượt có giá trị  $R^2$  bằng 0.766, 0.742 và 0.68 và giá trị  $RMSE$  bằng 185 kN, 165 kN và 220 kN. Ngoài ra, một điều lưu ý là tỷ số  $V_{tính toán}/V_{thí nghiệm}$  của các công thức này đều nhỏ hơn 1.0, có nghĩa là kết quả tính toán nhỏ hơn kết quả thí nghiệm. Do đó, các công thức tính toán này là thiên về an toàn. Trong khi đó, các công thức tính toán của Ascheim-Moehle (1992), FEMA 273 (1997) và ACI 318 (2014) cho kết quả dự báo với mức độ chính xác thấp hơn so với 04 công thức vừa nêu ở trên.

Với kết quả này, công thức của tiêu chuẩn Châu Âu EN 1998-1 (2004), nghiên cứu của Sezen-Moehle (2004), tiêu chuẩn TCVN 5574 (2018) và tiêu chuẩn Canada CSA (2014) được đề xuất sử dụng cho việc tính toán cường độ chịu tải của cột BTCT tiết diện chữ nhật. Đây là chú ý quan trọng đối với các kỹ sư trong quá trình tính toán thiết kế cột BTCT chữ nhật.

### 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày và phân tích các công thức tính toán theo các tiêu chuẩn thiết kế và nghiên cứu trước đây. Một bộ số liệu lớn gồm 735 kết quả thí nghiệm cột BTCT tiết diện chữ nhật được sưu tập để đưa vào so sánh và đánh giá tính toán cường độ chịu tải theo các công thức khác nhau. Các tham số thống kê sử dụng để đánh giá bao gồm hệ số xác định và sai số quân phương. Một số kết luận được rút ra như sau.

(1) Cường độ chịu tải của cột BTCT không những phụ thuộc vào đặc trưng tiết diện ngang và vật liệu sử dụng, nó còn phụ thuộc vào khoảng cách cốt thép đai và lực dọc tác dụng lên cột.

(2) Một số công thức tính toán cường độ chịu tải xét đến độ dẻo chuyển vị ngang của cột ( $\mu$ ). Ngoài các tham số về kích thước hình học của cột và vật liệu sử dụng, thì vai trò của hệ số phụ thuộc độ dẻo cũng như góc nén chéo do lực dọc cũng rất quan trọng, ảnh hưởng lớn đến kết quả tính toán cường độ chịu tải của cột BTCT.

(3) Qua việc so sánh cường độ chịu tải của cột theo kết quả thí nghiệm và các công thức có thể thấy rằng công thức của tiêu chuẩn Châu Âu EN 1998-1 (2004), tiêu chuẩn Canada CSA (2014), nghiên cứu Sezen-Moehle (2004) và TCVN 5574 (2018) cho kết quả thiên về an toàn và gần với thí nghiệm.

(4) Kết quả tính toán theo công thức ACI 318 (2014), FEMA 273 (1997) và Ascheim-Moehle (1992) có độ phân tán lớn hơn so với các công thức khác.

(5) Công thức của EN 1998-1 (2004), Sezen-Moehle (2004), TCVN 5574 (2018) và CSA (2014) được đề xuất ưu tiên sử dụng trong việc tính toán cường độ chịu tải của cột BTCT tiết diện chữ nhật.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong khuôn khổ đề tài mã số B2022-TDV-09. Các tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ này.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. TCVN 5574 (2018). *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*. Tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam.
2. ACI-318-14. (2014). *“Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary”*. American Concrete Institute.
3. CSA (2014). *“Design of concrete structures (CSA A23.3-14)”*. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada.
4. EN 1998-1 (2004). Eurocode 8: *“Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules”*. Seismic Actions and Rules for Buildings.
5. FEMA 273 (1997). *“NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings”*. In Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C, USA.
6. Ascheim M., Moehle J. (1992). *“Shear strength and deformability of RC bridge columns subjected to inelastic cyclic displacements”*, No. UCB/EERC-92/04.
7. Sezen, H., Moehle, J. P. (2004). *“Shear strength model for lightly reinforced concrete columns”*. *Journal of Structural Engineering*, 130(11), 1692-1703.
8. Azadi Kakavand M. R., Sezen H., & Taciroglu E. (2021). *“Data-driven models for predicting the shear strength of rectangular and circular reinforced concrete columns”*. *Journal of Structural Engineering*, 147(1), 04020301.
9. Yu B., Liu S., Li B. (2019). *“Probabilistic calibration for shear strength models of reinforced concrete columns”*. *Journal of Structural Engineering*, 145(5), 04019026.
10. ASCE/SEI-41-06. (2007). *“Seismic rehabilitation of existing buildings (ASCE/SEI 41-06)”*. In Seismic Rehabilitation Standards Committee, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
11. Ghannoum W, Sivaramakrishnan B, Pujol S, Catlin A, Fernando S, Yoosuf N et al. *“ACI 369 rectangular column database”*. Network for Earthquake Engineering Simulation (database), Dataset, DOI. 2012;10:D36688J50.
12. Belkacem MA, Bechtoula H, Bourahla N, Belkacem AA. (2019). *“Effect of axial load and transverse reinforcements on the seismic performance of reinforced concrete columns”*. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13, 831-851.

13. Wang D, Li H-N, Li G. (2013). "Experimental study on dynamic mechanical properties of reinforced concrete column". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32:1793-806.
14. Xiao J, Zhang C. (2008). "Seismic behavior of RC columns with circular, square and diamond sections". *Construction and Building Materials*, 22, 801-810.
15. Rodrigues H, Furtado A, Arêde A. (2016). "Behavior of rectangular reinforced-concrete columns under biaxial cyclic loading and variable axial loads". *Journal of Structural Engineering*, 142, 04015085.
16. Melo J, Varum H, Rossetto T. (2015). "Experimental cyclic behaviour of RC columns with plain bars and proposal for Eurocode 8 formula improvement". *Engineering Structures*, 88, 22-36.
17. Ho JCM. (2012). "Experimental tests on high-strength concrete columns subjected to combined medium axial load and flexure". *Advances in Structural Engineering*, 15, 1359-1374.
18. Wu D, Ding Y, Su J, Li Z-X, Zong L, Feng K. (2021). "Effects of tie detailing configurations on reinforcement buckling and seismic performance of high-strength RC columns". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147, 106791.
19. Tran CTN. (2010). "Experimental and analytical studies on the seismic behavior of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement". PhD thesis, Nanyang Technological University Singapore.
20. Ou Y-C, Kurniawan DP, Handika N. (2013). "Shear behavior of reinforced concrete columns with high-strength steel and concrete under low axial load". *ACI Special Publication*, 293, 1-12.
21. Li Y-A, Huang Y-T, Hwang S-J. (2014). "Seismic response of reinforced concrete short columns failed in shear". *ACI Structural Journal*, 111(4), 945.
22. Popa V, Cotofana D, Vacareanu R. (2014). "Effective stiffness and displacement capacity of short reinforced concrete columns with low concrete quality". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 2705-2721.
23. Jin C, Pan Z, Meng S, Qiao Z. (2015). "Seismic behavior of shear-critical reinforced high-strength concrete columns". *Journal of Structural Engineering*, 141, 04014198.
24. EL-Attar MM, El-Karmoty HZ, EL-Moneim AA. (2016). "The behavior of ultra-high-strength reinforced concrete columns under axial and cyclic lateral loads". *HBRC Journal*, 12, 284-295.
25. Eom T-S, Kang S-M, Park H-G, Choi T-W, Jin J-M. (2014). "Cyclic loading test for reinforced concrete columns with continuous rectangular and polygonal hoops". *Engineering Structures*, 67, 39-49.
26. Opabola EA, Elwood KJ, Oliver S. (2019). "Deformation capacity of reinforced concrete columns with smooth reinforcement". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 2509-2532.
27. Goksu C, Yilmaz H, Chowdhury S, Orakcal K, Ilki A. (2014). "The effect of lap splice length on the cyclic lateral load behavior of RC members with low-strength concrete and plain bars". *Advances in Structural Engineering*, 17, 639-658.
28. Zhang Y, Zheng S, Rong X, Dong L, Zheng H. (2019). "Seismic performance of reinforced concrete short columns subjected to freeze-thaw cycles". *Applied Sciences*, 9, 2708.
29. Bousias S, Spathis A-L, Fardis MN. (2007). "Seismic retrofitting of columns with lap spliced smooth bars through FRP or concrete jackets". *Journal of Earthquake Engineering*, 11, 653-674.
30. Arani KK, Di Ludovico M, Marefat MS, Prota A, Manfredi G. (2014). "Lateral response evaluation of old type reinforced concrete columns with smooth bars". *ACI Structural Journal*, 111, 827-838.
31. Di Ludovico M, Verderame G, Prota A, Manfredi G, Cosenza E. (2014). "Cyclic behavior of nonconforming full-scale RC columns". *Journal of Structural Engineering*, 140, 04013107.
32. Pham TP, Li B. (2014). "Seismic performance of reinforced concrete columns with plain longitudinal reinforcing bars". *ACI Structural Journal*, 111, 561.
33. Zhang J, Cai R, Li C, Liu X. (2020). "Seismic behavior of high-strength concrete columns reinforced with high-strength steel bars". *Engineering Structures*, 218, 110861.
34. Dinh NH, Park S-h, Choi K-K. (2020). "Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by textile-reinforced mortar jackets". *Structure and Infrastructure Engineering*, 16, 1364-1381.
35. Kim C-G, Park H-G, Eom T-S. (2019). "Effects of Type of Bar Lap Splice on Reinforced Concrete Columns Subjected to Cyclic Loading". *ACI Structural Journal*, 116(2), 183-194.

Ngày nhận bài: 07/8/2022.

Ngày nhận bài sửa: 21/8/2022.

Ngày chấp nhận đăng: 23/8/2022.