

So sánh khả năng chịu xoắn thuần túy của dầm BTCT theo tiêu chuẩn EC2-04, ACI 318-19 và TCVN 5574-2018

Comparison pure torsion strength of reinforced concrete beams according to EC2 -04, ACI 318 - 19 and TCVN 5574-2018

> NGUYỄN VĨNH SÁNG¹, PGS.TS NGUYỄN ANH DŨNG², PGS.TS NGUYỄN XUÂN HUY³, PGS.TS TRẦN CAO THANH NGỌC⁴

¹Phân hiệu Trường Đại học Thủy lợi; Email: sangnv@tlu.edu.vn

²Trường Đại học Thủy lợi; Email: dung.kcct@tlu.edu.vn

³Trường Đại học Giao thông vận tải; Email: nguyenxuanhuy@utc.edu.vn

⁴Trường Đại học Quốc tế - Đại học Quốc gia TP.HCM; Email: tctngoc@hcmiu.edu.vn

TÓM TẮT

Việc thiết kế chịu xoắn cho dầm bê tông cốt thép (BTCT) được sử dụng trong nhiều tiêu chuẩn của các nước trên thế giới nhưng quan điểm và phương pháp thiết kế vẫn có sự khác nhau. Tiêu chuẩn EC2-04 dựa vào mô hình ống thành mỏng chịu xoắn, tiêu chuẩn ACI318-19 dựa trên mô hình ống thành mỏng và mô hình giàn ảo cho trước và sau nứt. Trong khi đó theo TCVN 5574-2018 dựa trên lý thuyết uốn vênh. Mục tiêu của nghiên cứu này là khảo sát sự khác nhau giữa các tiêu chuẩn khi tính toán khả năng chịu xoắn của dầm BTCT. Khả năng chịu xoắn của dầm được tính toán theo các tiêu chuẩn EC2-04, ACI 318-19 và TCVN 5574-2018 cho 51 dầm bê tông cốt thép và so sánh với kết quả thí nghiệm. Góc nghiêng của các thanh chống chịu nén bê tông của mô hình giàn ảo lý tưởng được chọn bằng 45° trong tính toán.

Từ khóa: Cường độ chịu xoắn; xoắn thuần túy; thanh chịu nén bê tông; góc nghiêng; bê tông cốt thép.

ABSTRACT

The design of torsional strength of reinforced concrete beams is used in many standards of many countries around the world, but the provisions and design methods are still different. According to EC2-04 standard based on torsional strength thin-walled tube model, ACI318-19 standard is based on thin-walled tube model and truss - tie model for before and after cracking. Meanwhile, according to TCVN 5574-2018 based on the point of view of warped section. The objective of this study is to investigate the difference between the standards and the accuracy of calculating the torsional resistance of reinforced concrete beams. The predicted torsional strength based on successive design methods EC2 - 04, ACI 318 -19 and TCVN 5574-2018 is compared with the results of 51 reinforced concrete beams tested for pure torsional force. The angle of inclination of the concrete compressive support bars of the ideal truss and tie model is chosen 45°.

Keywords: Torsional strength; pure torsion; concrete compression struts; angle of inclination; reinforced concrete.

1. GIỚI THIỆU

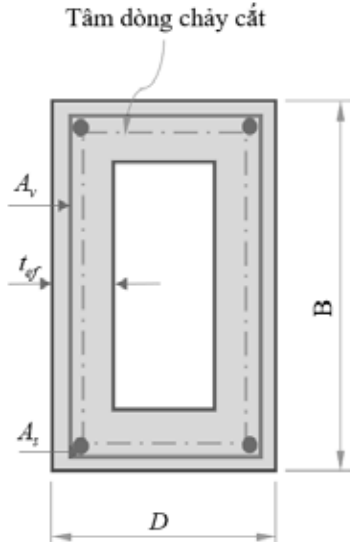
Dầm BTCT trong các tòa nhà, cầu và các kết cấu khác có thể chịu ứng suất xoắn ở mức đáng kể. Trong các kết cấu BTCT, thường gặp các cấu kiện chịu uốn xoắn đồng thời như dầm đỡ ban công, các bản sàn có dạng công xôn, dầm công xôn, dầm dạng cong, cầu thang xoắn... hoặc các cấu kiện khác khi mà lực tác dụng lên chúng không nằm trong mặt phẳng đi qua trục dọc của chúng [4]. Mô men xoắn có xu hướng làm xoắn các cấu kiện quanh trục dọc của các cấu kiện này. Khả năng chịu xoắn của dầm BTCT được đóng góp chủ yếu bởi cốt thép dọc, cốt thép đai và của bê tông xem như thanh chống nghiêng chịu nén. Quy trình đánh giá khả năng chịu xoắn của dầm BTCT theo

quy định thiết kế [1], [2] và [3] có sự khác biệt quan trọng ở một số chi tiết và cách tiếp cận. Mục đích của nghiên cứu là khảo sát và đánh giá sự khác nhau giữa ba tiêu chuẩn này trong thiết kế dầm BTCT chịu xoắn. Để đạt được mục đích đã nêu, khả năng chịu xoắn của dầm được quy định trong tiêu chuẩn [1], [2], [3] được áp dụng vào tính toán cho 51 dầm bê tông cốt thép được thực nghiệm theo. Các kết quả so sánh cho thấy được sự khác nhau giữa các tiêu chuẩn khi xác định khả năng chịu xoắn của dầm bê tông cốt thép.

2. QUY ĐỊNH THIẾT KẾ XOẮN THEO CÁC TIÊU CHUẨN

2.1 Quy định theo EC2-04

Thiết kế dầm BTCT chịu xoắn thuần túy trong [1] dựa trên giả thiết rằng dầm ứng xử như một ống có thành mỏng có chiều thành hiệu dụng như Hình 1. Khả năng chịu xoắn (T_{EC2}) của dầm BTCT được lấy nhỏ hơn trong các giá trị trong công thức (1) và (2) theo khả năng chịu lực của cốt thép đai và thép dọc tương ứng.



Hình 1. Mô hình tính toán khả năng chịu xoắn dầm BTCT dạng chữ nhật theo [1].

$$T_{EC2} = \frac{2A_k A_v f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (1)$$

$$T_{EC2} = \frac{2A_k A_s f_y}{U_k} \tan \theta \quad (2)$$

Trong đó: $A_k = (D - t_{ef})(B - t_{ef})$ là diện tích phần thành mỏng hiệu dụng (mm^2).

$U_k = 2(D + B - 2t_{ef})$ là chu vi trung bình của phần thành mỏng (mm). $t_{ef} = \max(A/P_c, 2c)$ là chiều dày hiệu dụng của thành mỏng (mm).

$A = B \times D$ là diện tích tiết diện dầm (mm^2). $P_c = 2(B + D)$ là chu vi của tiết diện dầm (mm). D, B là bề rộng dầm và chiều cao dầm tương ứng (mm) và c là khoảng cách từ mép ngoài bê tông đến trọng tâm thép đai (mm).

A_v, A_s là diện tích của một nhánh đai và tổng diện tích thép dọc (mm^2). s là khoảng cách thép đai (mm). f_{yt}, f_y là cường độ chảy dẻo của thép đai và cường độ chảy dẻo của thép dọc (MPa).

θ là góc nghiêng phá hoại của bê tông chịu nén (độ).

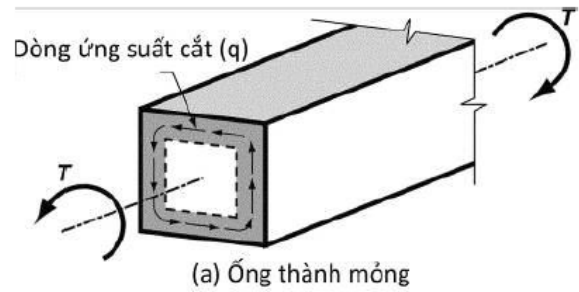
Các phương trình (1) và (2) liên quan đến khả năng chịu xoắn với cách bố trí cốt đai kín và cốt thép dọc, tương ứng. Đối với xoắn thuần túy, đánh giá (T_{EC2}) không được vượt quá khả năng chịu xoắn lớn nhất (T_{EC2}^{max}) của tiết diện dầm, thể hiện bởi khả năng chịu nén của thanh chống chéo bê tông.

$$T_{EC2}^{max} = 2\nu\alpha_c f'_c A_k t_{ef} \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

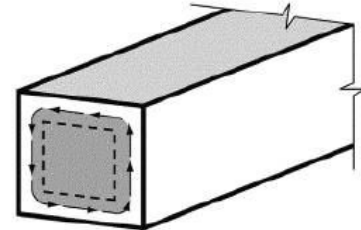
Trong đó: $\nu = 0,6 \left[1 - (f'_c / 250) \right]$ và α_c là lấy bằng 1 cho kết cấu không phải ứng suất trước. f'_c là cường độ chịu nén mẫu lăng trụ của bê tông (MPa)

2.2 Quy định theo ACI318-19

Việc tính toán khả năng chịu xoắn trong [2] dựa trên mô hình ống thành mỏng (Hình 2) và mô hình giàn ảo (Hình 3) trước và sau khi nứt.

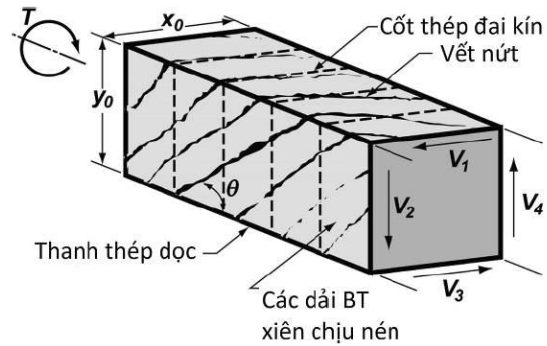


(a) Ống thành mỏng



(b) Diện tích được bao bởi chu vi vi dòng US cắt

Hình 2. Mô hình ống thành mỏng



Hình 3. Mô hình giàn ảo

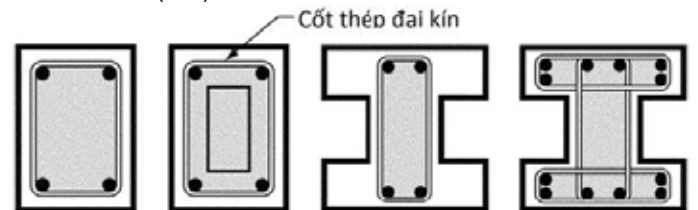
Mặc dù [2] dựa trên mô hình giàn ảo không gian để đánh giá khả năng chịu xoắn của dầm BTCT sau nứt, có sự khác nhau với quan điểm thiết kế theo [1]. Khả năng chịu xoắn (T_{ACI}) của dầm BTCT chịu xoắn thuần túy được lấy bằng giá trị nhỏ hơn của hai công thức sau (4) và (5) liên quan đến khả năng chịu lực của cốt đai và cốt thép dọc như sau:

$$T_{ACI} = \frac{2A_o A_v f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (4)$$

$$T_{ACI} = \frac{2A_o A_s f_y}{P_h} \tan \theta \quad (5)$$

Trong đó: $A_o = 0,85A_{oh}$ là diện tích được bao quanh đường chảy cắt (mm^2).

A_{oh} là diện tích phần lõi bên trong tính từ trọng tâm cốt đai (mm^2) được xác định như Hình 4. P_h là chu vi phần lõi được bao bởi cốt đai kín (mm).



Hình 4. Xác định diện tích A_{oh}

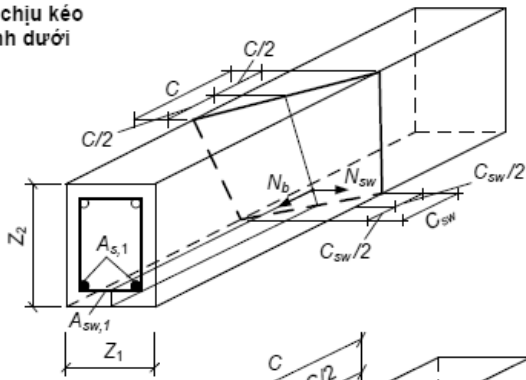
Hơn nữa, [2] chỉ ra rằng trong trường hợp xoắn thuần túy, khả năng chịu xoắn bị giới hạn bởi thành phần bê tông (T_{ACI}^{max}) được thể hiện bằng công thức:

$$T_{ACI}^{max} = \frac{17\sqrt{f_c} A_{oh}^2}{12P_h} \quad (6)$$

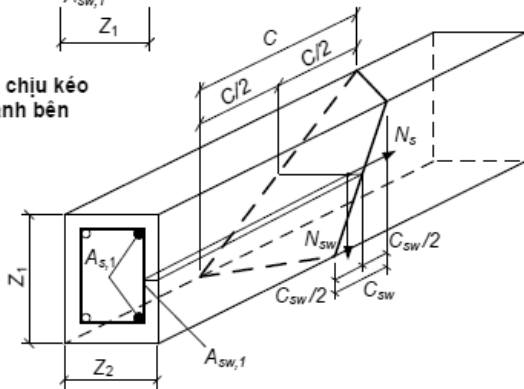
2.3 Quy định theo TCVN 5574-2018

Phương pháp xác định khả năng chịu xoắn của dầm BTCT trong tiêu chuẩn [3] là áp dụng lý thuyết tiết diện vành như (Hình 5) được phát triển bởi nhà khoa học người Nga Lessig. Theo [3] tính toán khả năng chịu xoắn của cấu kiện thì phải phải đảm bảo cho cấu kiện không bị phá hoại cả theo ứng suất nén chính và ứng suất kéo chính.

a) Cốt thép chịu kéo nằm ở cạnh dưới



b) Cốt thép chịu kéo nằm ở cạnh bên



Hình 5. Sơ đồ nội lực trong tiết diện không gian khi tính toán chịu mô men xoắn theo [3] Độ bền của cấu kiện giữa các tiết diện vành không gian khi chịu ứng suất kéo chính được kiểm tra theo điều kiện:

$$T_{TCVN} = T_{sw} + T_s \quad (7)$$

Trong đó:

T_{sw}, T_s lần lượt là khả năng chịu xoắn của cốt đai và khả năng chịu xoắn của cốt thép dọc được xác định như sau:

$$T_{sw} = 0,9 \frac{R_{sw} A_{sw1}}{s_w} \frac{Z_1 Z_2}{2Z_2 + Z_1} C \quad (8)$$

$$T_s = 0,9 R_s A_{s1} \frac{Z_1 Z_2}{C} \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} C &= \sqrt{\frac{R_s A_{s1} s_w (2Z_2 + Z_1)}{R_{sw} A_{sw1}}} \\ C &\leq \min \left\{ (2Z_2 + Z_1), Z_1 \sqrt{\frac{2(2Z_2 + Z_1)}{Z_1}} \right\} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Điều kiện hạn chế:

$$0,5 \leq \frac{R_{sw} A_{sw1}}{s_w} \frac{Z_1}{R_s A_{s1}} \leq 1,5 \quad (11)$$

Khi $\frac{R_{sw} A_{sw1}}{s_w} \frac{Z_1}{R_s A_{s1}} < 0,5$, ứng suất trong thép đai đạt R_{sw} nhưng

cốt thép dọc chưa đạt đến cường độ chịu kéo tính toán R_s . Trường hợp này T_{sw} được tính theo hệ thức (8) nhưng T_s được xác định bởi:

$$T_s = 0,9 \frac{R_{sw} A_{sw1}}{s_w} Z_1 \frac{Z_1 Z_2}{C} \quad (8a)$$

Khi $\frac{R_{sw} A_{sw1}}{s_w} \frac{Z_1}{R_s A_{s1}} > 1,5$, ứng suất trong thép đai chưa đạt R_{sw}

nhưng cốt thép dọc đạt đến cường độ chịu kéo tính toán R_s . Trường hợp này T_s được tính theo công thức (9) nhưng T_{sw} được xác định bởi:

$$T_{sw} = 0,9 (1,5 R_s A_{s1}) \frac{Z_2}{2Z_2 + Z_1} C \quad (9a)$$

Để đảm bảo vữa bê tông không bị phá hoại do ứng suất nén chính gây ra, khả năng chịu xoắn không được vượt quá giá trị:

$$T_{TCVN}^{NC} = 0,1 R_b b^2 h \quad (12)$$

Trong đó, b và h lần lượt là cạnh nhỏ và lớn của tiết diện chữ nhật.

2.4 Quy định xác định góc nghiêng θ trong tiêu chuẩn EC-4 và ACI318-19

Góc nghiêng θ xuất hiện trong các biểu thức đánh giá khả năng chịu xoắn trước đây cho dầm BTCT được thể hiện là góc giữa trục dầm và các thanh chống chịu nén bê tông của giàn không gian lý tưởng được sử dụng để mô hình hóa ứng xử của dầm dưới tác dụng của lực xoắn. Trong khi các giới hạn ($22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$) được khuyến nghị bởi [1], [6] đã quy định rằng giá trị của θ phải bằng 45° đối với thiết kế dầm BTCT trong. Theo [2] thì góc nghiêng θ thay đổi từ 30° đến 60° . Đối với các cấu kiện không ứng lực trước thì [2] khuyến cáo lấy $\theta = 45^\circ$, đối với các cấu kiện ứng lực trước thì lấy $\theta = 37,5^\circ$. Trong khi [3] xét góc nghiêng θ dựa trên chiều dài hình chiếu của cạnh chịu nén của tiết diện không gian lên trục dọc cấu kiện ký hiệu là C đã trình bày ở trên. Giá trị của $\theta = 45^\circ$ được xem xét trong nghiên cứu này cho hai tiêu chuẩn [1] và [2].

3. KHẢ NĂNG CHỊU XOẮN CỦA DẦM BTCT THÔNG QUA VÍ DỤ TÍNH TOÁN

3.1 Khả năng chịu xoắn của dầm BTCT thông qua thí nghiệm

Tổng tất cả 51 mẫu thí nghiệm được sử dụng để so sánh với kết quả tính toán theo các nghiên cứu của [5], [7-9] được tổng hợp trong Bảng 1. Trong đó, năm 1995 Rasmussen và Baker [8] đã tiến hành thí nghiệm trên 12 mẫu dầm bê tông cốt thép chịu xoắn thuần túy với tham số chính được xem xét là cường độ chịu nén bê tông từ 35 (MPa) đến 80 (MPa). Kết quả cho thấy rằng, bê tông cường độ cao cho khả năng chịu xoắn tốt hơn. Fang và Shiao [7] năm 2004 đã nghiên cứu biến dạng và khả năng chịu xoắn của 16 dầm bê tông cốt thép chịu xoắn thuần túy. Cường độ chịu nén và hàm lượng cốt thép khác nhau được xem xét trong nghiên cứu này. Năm 1968, Hsu [9] đã thử nghiệm 21 dầm bê tông cốt thép chịu xoắn thuần túy. Ảnh hưởng của các thông số khác nhau đến ứng xử chịu xoắn của dầm: cường độ chịu nén bê tông, hàm lượng cốt đai và thép dọc, tỷ lệ bề rộng và chiều cao dầm. Kết quả nghiên cứu cho thấy các vết nứt hình thành trong dầm khác với dự đoán theo nguyên lý của Saint Venant. Ở Việt Nam, năm 2018 Nguyễn Trung Hiếu và Lý Trần Cường [5] đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm BTCT chịu xoắn thuần túy được gia cường bằng vật liệu tấm sợi các bon CFRP. Mẫu thử nghiệm bao gồm 06 mẫu, trong đó có 02 mẫu BTCT làm đối chứng và 04 mẫu có gia cường CFRP.

Bảng 1: Tóm tắt kết quả thí nghiệm dầm BTCT chịu xoắn thuần túy

Nghiên cứu	Mẫu	bhx (mm)	f'_c (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	A_v (mm ²)	f_{yv} (MPa)	s (mm)	T_{Test} (kN.m)
[5]	B-1	150x200	20	314.16	325	28.3	240	100	6.1
	B-2	150x200	20	314.16	325	28.3	240	100	6.0
Fang và Shiau [7]	H-06-06	350x500	78.5	1188	440	71	440	100	92.0
	H-06-12	350x500	78.5	2027	410	71	440	100	115.1
	H-12-12	350x500	78.5	2027	410	71	440	50	155.3
	H-12-16	350x500	78.5	2850	520	71	440	50	196.0
	H-20-20	350x500	78.5	3420	560	127	440	55	239.0
	H-07-10	350x500	68.4	1710	500	71	420	90	126.7
	H-14-10	350x500	68.4	1710	500	127	360	80	135.2
	H-07-16	350x500	68.4	2850	500	71	420	90	144.5
	N-06-06	350x500	35.5	1188	440	71	440	100	79.7
	N-06-12	350x500	35.5	2027	410	71	440	100	95.2
	N-12-12	350x500	35.5	2027	410	71	440	50	116.8
	N-12-16	350x500	35.5	2850	520	71	440	50	138.0
	N-20-20	350x500	35.5	3420	560	127	440	55	158.0
	N-07-10	350x500	33.5	1710	500	71	420	90	111.7
N-14-10	350x500	33.5	1710	500	127	360	80	125.0	
N-07-16	350x500	33.5	2850	500	71	420	90	117.3	
Rasmussen [8]	B 30.1	160x275	41.7	1544	620	79	665	90	16.6
	B 30.2	160x275	38.2	1544	638	79	669	90	15.3
	B 30.3	160x275	36.3	1544	605	79	672	90	15.3
	B 50.1	160x275	61.8	1544	612	79	665	90	20.0
	B 50.2	160x275	57.1	1544	614	79	665	90	18.5
	B50.3	160x275	61.7	1544	612	79	665	90	19.1
	B 70.1	160x275	77.3	1544	617	79	658	90	20.1
	B 70.2	160x275	76.9	1544	614	79	656	90	20.7
	B 70.3	160x275	76.2	1544	617	79	663	90	21.0
	B 30.1	160x275	41.7	1544	620	79	665	90	16.6
	B 30.2	160x275	38.2	1544	638	79	669	90	15.3
B 30.3	160x275	36.3	1544	605	79	672	90	15.3	
Hsu 1968 [9]	B1	254x381	27.58	531	313.71	79	341.29	152	22.3
	B2	254x381	28.61	804	316.47	133	319.92	181	29.3
	B2	254x381	28.61	804	316.47	133	319.92	127	37.5
	B4	254x381	30.54	1521	319.92	133	323.36	92	47.3
	B5	254x381	29.03	1963	332.33	133	321.3	70	56.2
	B6	254x381	28.82	2642	331.64	133	322.67	57	61.7
	B7	254x381	25.99	531	319.92	133	318.54	127	26.9
	B8	254x381	26.75	531	321.99	133	319.92	57	32.5
	B9	254x381	28.82	1134	319.23	79	342.67	152	29.8
	B10	254x381	26.48	2642	334.4	79	341.98	152	34.3
	M1	254x381	29.85	804	326.12	79	353.01	149	30.4
	M2	254x381	30.54	1134	328.88	79	357.15	105	40.6
	M3	254x381	26.75	1521	321.99	133	326.12	140	43.8
	M4	254x381	26.54	1963	318.54	133	326.81	105	49.6
	M5	254x381	27.99	2642	335.09	133	330.95	83	55.7
	M6	254x381	29.37	2945	317.85	133	340.6	70	60.1
	I2	254x381	45.23	804	325.43	79	348.87	98	36.0
	I3	254x381	44.75	1134	343.36	133	333.71	127	45.6
I4	254x381	44.95	1521	315.09	133	326.12	92	58.1	
I5	254x381	45.02	1963	310.26	133	325.43	70	70.7	
I6	254x381	45.78	2642	325.43	133	328.88	57	76.7	

3.2 Khả năng chịu xoắn theo các tiêu chuẩn và thảo luận

Kết quả tính toán khả năng chịu xoắn dầm BTCT theo [1], [2] và [3] được thể hiện ở Bảng 2 và Bảng 3. Kết quả cho thấy việc tính toán theo tiêu chuẩn ACI 318-19 [2] luôn nhỏ hơn thực nghiệm, điều đó mang lại an toàn cho bài toán thiết kế kháng xoắn trong thực tế. Trái lại theo [1] và [3] có những trường hợp cho giá trị cao hơn giá trị của thí nghiệm, giá trị vượt lớn nhất theo [1], [3] tương ứng là 1,58 và 2,09 thể hiện trong Bảng 2. Ngoài ra, theo Bảng 3 cũng cho thấy rằng, giá trị tính toán theo TCVN 5574-2018 [3] cho giá trị cao hơn so với [1], [2]. Điều này được giải thích là do khi tính

toán khả năng chịu xoắn của dầm BTCT theo [3] bằng tổng cả khả năng chịu xoắn của thép đai và thép dọc. Trong khi đó, [1], [2] chỉ xét đến khả năng chịu xoắn của cốt đai hoặc cốt dọc nhưng không lớn hơn khả năng chịu xoắn của bê tông để tránh bê tông bị ép vỡ. Mặt khác, giá trị tính toán của ACI 318-19 [2] cũng nhỏ hơn EC2-04 [1], nguyên nhân bởi khả năng chịu xoắn theo [2] bị giới hạn bởi sự nén vỡ bê tông và điều kiện áp dụng trong tính toán này là góc nghiêng $\theta = 45^0$.

Bảng 2: So sánh kết quả theo EC2-04 [1], ACI 318-19 [2] và TCVN 5574-2018 [3].

Nghiên cứu	Mẫu	T_{Test} (kN.m)	T_{EC2} (kN.m)	$\frac{T_{EC2}}{T_{Test}}$	T_{ACI} (kN.m)	$\frac{T_{ACI}}{T_{Test}}$	T_{TCVN} (kN.m)	$\frac{T_{TCVN}}{T_{Test}}$
[5]	B-1	6.1	4.57	0.75	4.70	0.77	3.67	0.60
	B-2	6.0	4.57	0.76	4.70	0.78	3.67	0.61
Fang và Shiau [7]	H-06-06	92.0	61.29	0.67	71.89	0.78	68.51	0.74
	H-06-12	115.1	61.29	0.53	71.89	0.62	68.84	0.60
	H-12-12	155.3	122.58	0.79	127.33	0.82	123.58	0.80
	H-12-16	196.0	122.58	0.63	143.78	0.73	137.68	0.70
	H-20-20	239.0	199.33	0.83	149.03	0.62	223.89	0.94
	H-07-10	126.7	65.01	0.51	76.25	0.60	73.01	0.58
	H-14-10	135.2	112.12	0.83	129.19	0.96	116.49	0.86
	H-07-16	144.5	65.01	0.45	76.25	0.53	73.01	0.51
	N-06-06	79.7	61.29	0.77	71.89	0.90	68.84	0.86
	N-06-12	95.2	61.29	0.64	71.89	0.76	68.84	0.72
	N-12-12	116.8	122.58	1.05	102.98	0.88	123.59	1.06
	N-12-16	138.0	122.58	0.89	102.98	0.75	123.59	0.90
	N-20-20	158.0	184.55	1.17	100.22	0.63	169.70	1.07
	N-07-10	111.7	65.01	0.58	76.25	0.68	73.02	0.65
N-14-10	125.0	112.12	0.90	97.36	0.78	123.43	0.99	
N-07-16	117.3	65.01	0.55	76.25	0.65	73.02	0.62	
Rasmussen [8]	B 30.1	16.6	25.89	1.56	10.24	0.62	31.47	1.89
	B 30.2	15.3	24.12	1.58	9.80	0.64	31.66	2.07
	B 30.3	15.3	23.12	1.52	9.55	0.63	31.80	2.09
	B 50.1	20.0	28.67	1.44	12.47	0.62	31.26	1.57
	B 50.2	18.5	28.67	1.55	11.98	0.65	31.27	1.69
	B50.3	19.1	28.67	1.50	12.46	0.65	31.33	1.64
	B 70.1	20.1	28.37	1.41	13.94	0.70	31.26	1.56
	B 70.2	20.7	28.28	1.36	13.91	0.67	31.32	1.51
	B 70.3	21.0	28.58	1.36	13.84	0.66	31.29	1.49
	B 30.1	16.6	25.89	1.56	10.24	0.62	31.34	1.89
	B 30.2	15.3	24.12	1.58	9.80	0.64	31.42	2.05
	B 30.3	15.3	23.12	1.52	9.55	0.63	31.45	2.06
	Hsu 1968 [9]	B1	22.3	18.71	0.84	18.62	0.84	17.98
B2		29.3	25.48	0.87	28.09	0.96	26.41	0.90
B2		37.5	28.57	0.76	28.09	0.75	30.84	0.82
B4		47.3	50.67	1.07	36.26	0.77	50.77	1.07
B5		56.2	63.58	1.13	35.35	0.63	73.23	1.30
B6		61.7	63.18	1.02	35.22	0.57	86.76	1.41
B7		26.9	19.08	0.71	18.76	0.70	24.93	0.93
B8		32.5	19.20	0.59	18.88	0.58	34.91	1.07
B9		29.8	19.30	0.65	22.09	0.74	21.18	0.71
B10		34.3	19.26	0.56	22.04	0.64	21.43	0.62
M1		30.4	20.29	0.67	23.21	0.76	21.87	0.72
M2		40.6	29.12	0.72	33.33	0.82	31.04	0.77
M3		43.8	33.58	0.77	33.94	0.77	37.46	0.85

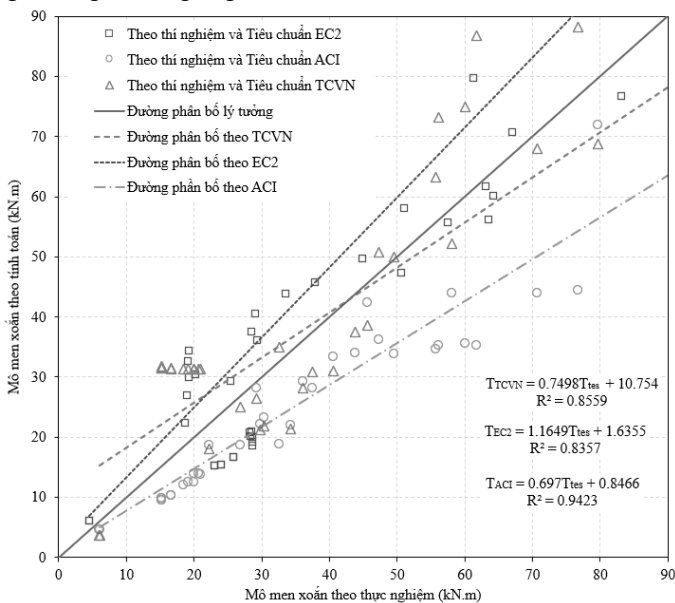
	M4	49.6	44.87	0.90	33.80	0.68	49.95	1.01
	M5	55.7	57.48	1.03	34.71	0.62	63.19	1.13
	M6	60.1	64.22	1.07	35.56	0.59	74.92	1.25
	I2	36.0	29.38	0.82	29.24	0.81	28.23	0.78
	I3	45.6	37.88	0.83	42.37	0.93	38.52	0.84
	I4	58.1	51.10	0.88	43.99	0.76	52.26	0.90
	I5	70.7	67.02	0.95	44.03	0.62	67.93	0.96
	I6	76.7	83.17	1.08	44.40	0.58	88.20	1.15
Trung bình				0.708		0.964		1.085
Độ lệch chuẩn				0.104		0.338		0.447
Hệ số biến thiên CV (%)				14.66		35.03		41.24

Bảng 3: Chênh lệch theo EC2-04 [1], ACI 318-19 [2] và TCVN 5574-2018 [3].

Nghiên cứu	Mẫu	T_{Test} (kN.m)	T_{EC2} (kN.m)	$\frac{T_{EC2} - T_{Test}}{T_{Test}}$ (%)	T_{ACI} (kN.m)	$\frac{T_{ACI} - T_{Test}}{T_{Test}}$ (%)	T_{TCVN} (kN.m)	$\frac{T_{TCVN} - T_{Test}}{T_{Test}}$ (%)
[5]	B-1	6.1	4.57	23.03	4.70	25.01	3.67	39.82
	B-2	6.0	4.57	21.74	4.70	23.76	3.67	38.82
Fang và Shiau [7]	H-06-06	92.0	61.29	21.86	71.89	33.38	68.51	25.53
	H-06-12	115.1	61.29	37.54	71.89	46.75	68.84	40.19
	H-12-12	155.3	122.58	18.01	127.33	21.07	123.58	20.42
	H-12-16	196.0	122.58	26.64	143.78	37.46	137.68	29.76
	H-20-20	239.0	199.33	37.64	149.03	16.60	223.89	6.32
	H-07-10	126.7	65.01	39.82	76.25	48.69	73.01	42.38
	H-14-10	135.2	112.12	4.45	129.19	17.07	116.49	13.84
	H-07-16	144.5	65.01	47.23	76.25	55.01	73.01	49.47
	N-06-06	79.7	61.29	9.80	71.89	23.10	68.84	13.63
	N-06-12	95.2	61.29	24.48	71.89	35.62	68.84	27.69
	N-12-12	116.8	122.58	11.83	102.98	4.95	123.59	5.81
	N-12-16	138.0	122.58	25.38	102.98	11.17	123.59	10.44
	N-20-20	158.0	184.55	36.57	100.22	16.80	169.70	7.41
N-07-10	111.7	65.01	31.74	76.25	41.80	73.02	34.63	
N-14-10	125.0	112.12	22.11	97.36	10.30	123.43	1.26	
N-07-16	117.3	65.01	35.00	76.25	44.58	73.02	37.75	
Rasmussen [8]	B 30.1	16.6	25.89	38.38	10.24	55.79	31.47	89.35
	B 30.2	15.3	24.12	35.90	9.80	57.73	31.66	107.06
	B 30.3	15.3	23.12	37.35	9.55	51.63	31.80	108.52
	B 50.1	20.0	28.67	37.51	12.47	43.71	31.26	56.69
	B 50.2	18.5	28.67	35.08	11.98	55.31	31.27	69.39
	B50.3	19.1	28.67	34.88	12.46	49.87	31.33	63.77
	B 70.1	20.1	28.37	30.49	13.94	41.42	31.26	55.83
	B 70.2	20.7	28.28	32.95	13.91	36.36	31.32	51.01
	B 70.3	21.0	28.58	33.95	13.84	36.37	31.29	49.28
	B 30.1	16.6	25.89	38.38	10.24	55.79	31.34	88.57
	B 30.2	15.3	24.12	35.90	9.80	57.73	31.42	105.49
	B 30.3	15.3	23.12	37.35	9.55	51.63	31.45	106.23
	Hsu 1968 [9]	B1	22.3	18.71	16.37	18.62	15.96	17.98
B2		29.3	25.48	4.00	28.09	12.93	26.41	9.75
B2		37.5	28.57	25.11	28.09	23.83	30.84	17.78
B4		47.3	50.67	23.41	36.26	7.03	50.77	7.24
B5		56.2	63.58	37.04	35.35	13.22	73.23	30.41
B6		61.7	63.18	42.90	35.22	2.41	86.76	40.64
B7		26.9	19.08	30.25	18.76	29.06	24.93	7.29
B8		32.5	19.20	41.98	18.88	41.00	34.91	7.28
B9		29.8	19.30	25.94	22.09	35.28	21.18	28.99
B10		34.3	19.26	35.82	22.04	43.91	21.43	37.61
M1	30.4	20.29	23.62	23.21	33.25	21.87	28.04	

M2	40.6	29.12	17.83	33.33	28.20	31.04	23.48
M3	43.8	33.58	22.59	33.94	23.40	37.46	14.55
M4	49.6	44.87	31.85	33.80	9.54	49.95	0.71
M5	55.7	57.48	37.68	34.71	3.19	63.19	13.44
M6	60.1	64.22	40.84	35.56	6.84	74.92	24.64
I2	36.0	29.38	18.88	29.24	18.48	28.23	21.67
I3	45.6	37.88	7.18	42.37	17.02	38.52	15.61
I4	58.1	51.10	24.25	43.99	12.01	52.26	10.01
I5	70.7	67.02	37.75	44.03	5.25	67.93	3.96
I6	76.7	83.17	42.13	44.40	8.42	88.20	14.97

Để mở rộng so sánh thống kê giữa các tiêu chuẩn EC2-04 [1], ACI 318-19 [2] và TCVN 5574-2018 [3] trong dự đoán khả năng chịu xoắn của dầm BTCT, một phân tích hồi quy đã được thực hiện cho thí nghiệm xoắn thuần túy của 51 mẫu thử được thu thập và tính toán theo ba tiêu chuẩn trên và mô hình phân bố tuyến tính được sử dụng trong phân tích này. Hình 6 cho thấy các mối quan hệ giữa thí nghiệm và tính toán theo [1], [2] và [3] được so sánh cùng đường phân bố lý tưởng (khả năng chịu xoắn theo thực nghiệm bằng tính toán). Đường phân bố chuẩn theo [1] cao hơn đường phân bố lý tưởng, trái lại thì theo [2] lại thấp hơn. Còn theo [3] thì lớn hơn khi giá trị khả năng chịu xoắn nhỏ hơn 45 kN.m và sau đó có xu hướng nhỏ hơn sự phân bố lý tưởng. Ngoài ra, hệ số tương quan (R^2) thu được theo [1], [2] và [3] cho giá trị chấp thuận tốt (gần bằng 1) tương ứng là 0,8357; 0,9423; 0,8559.



Hình 6. Tương quan phân bố giữa thực nghiệm và theo tính toán

4. KẾT LUẬN

Lý thuyết xác định khả năng chịu xoắn thuần túy của dầm BTCT quy định trong các tiêu chuẩn thiết kế [1], [2], [3] được trình bày và áp dụng vào tính toán cho 51 mẫu thử theo các nghiên cứu thực nghiệm. Các kết quả so sánh giữa các khả năng chịu xoắn xác định theo lý thuyết và thí nghiệm chỉ ra rằng, khả năng chịu xoắn xác định theo [2] luôn nhỏ hơn thí nghiệm đảm bảo an toàn trong tính toán thiết kế. Trong khi đó, theo [1] và [3] một số trường hợp có xu hướng lớn hơn và [3] cho giá trị lớn nhất vì tính toán có xét đến tổng khả năng chịu xoắn của cốt đai và thép dọc. Kết quả tính toán theo [1], [2], [3] có sự khác nhau vì mỗi tiêu chuẩn có một cách tiếp cận khác nhau khi đi xác định khả năng chịu xoắn của cấu kiện dầm BTCT. Trong đó, [1] phụ thuộc vào công thức phân

tích để đánh giá khả năng chịu xoắn lớn nhất của dầm bê tông có tính đến ảnh hưởng của khả năng chịu lực của thanh chống chéo bê tông và góc nghiêng (θ), trong khi công thức được nêu bởi [2] là ban đầu xuất phát trên cơ sở kiểm soát vết nứt. Giá trị được chấp nhận cho góc nghiêng (θ) bằng 45° dẫn đến khả năng chịu xoắn dự đoán chính xác cho các dầm được kiểm tra bằng cách sử dụng phương pháp [1] và [3] cao hơn so với việc sử dụng phương pháp [2].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Européen commette for standardisation (CEN), *Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1)*. Lausanne, Switzerland., 2004.
- [2] ACI Committee 318, *Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318M-19)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019.
- [3] TCVN 5574:2018, "Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế," *Bộ Khoa học và Công nghệ*, 2018.
- [4] Lê Minh Long, "Tính toán cấu kiện chịu xoắn theo ACI318-08," *Viện Khoa học Công nghệ xây dựng*, 2010.
- [5] Nguyễn Trung Hiếu, Lý Trần Cường, "Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường dầm bê tông cốt thép chịu xoắn bằng vật liệu tấm sợi các bon CFRP," *Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ*, trang 28-35, 2017.
- [6] Européen commette for standardisation (CEN), *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1)*. Lausanne, Switzerland, 2004.
- [7] Fang, I.-K., Shiau, J.-K., "Torsional behaviour of normal and high strength concrete beams". *ACI Structural Journal*. 101. 304-313. 2004.
- [8] Rasmussen, L. J., Baker, G., "Torsion in reinforced normal and high strength concrete beams - Part 1": *Experimental test series*. *ACI Structural Journal*. 92. 56-62, 1995.
- [9] Hsu, T. T. C., "Torsion of structural concrete - Behaviour of reinforced concrete rectangular members". *Torsion of structural concrete, SP-18*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., pp. 261-306, 1968.