

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG TRO BAY KHI CHỊU NÉN LỆCH TÂM PHẪNG

Vongchith Sykhampha^a, Nguyễn Trường Thăng^{b,*}

^aKhoa Đào tạo Sau Đại học, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 25/07/2021, Sửa xong 11/09/2021, Chấp nhận đăng 15/09/2021

Tóm tắt

Bài báo này giới thiệu một chương trình nghiên cứu thực nghiệm về khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng tro bay thay thế một phần xi măng làm chất kết dính khi chịu nén lệch tâm phẳng. Các thí nghiệm trên mẫu vật liệu bê tông có cường độ mẫu trụ trung bình 30 MPa được tiến hành để xác định hàm lượng tro bay thay thế xi măng hợp lý là 20% theo khối lượng. Bê tông tro bay này được áp dụng cho ba cặp mẫu cột có tiết diện chữ nhật 150×200 (mm), cao 1600 mm, đặt cốt thép dọc 4Φ14 có cường độ chảy 362,6 MPa. Trong thí nghiệm, các mẫu cột được nén với các độ lệch tâm ban đầu trong mặt phẳng là 0, 40 và 80 mm cho tới khi bị phá hoại. Số liệu thực nghiệm về biến dạng và khả năng chịu lực của các mẫu cột được so sánh với kết quả tính toán theo TCVN 5574:2018. Kết quả cho thấy hệ số uốn dọc tính toán theo TCVN 5574:2018 nằm trong khoảng sai số ±5,2% so với kết quả thí nghiệm. Tuy nhiên, khi sử dụng phương pháp biến dạng phi tuyến của TCVN 5574:2018, khả năng chịu lực của cột được dự báo thiên về thiếu an toàn với khoảng dung sai +11,9%. Từ đó, việc cải tiến các mô hình biến dạng hai đoạn thẳng hoặc ba đoạn thẳng đối với bê tông tro bay được kiến nghị trong phần cuối của bài báo.

Từ khóa: thực nghiệm; cột; bê tông cốt thép; lệch tâm phẳng; tro bay.

EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD BEARING CAPACITY OF REINFORCED FLY ASH CONCRETE COLUMNS SUBJECTED TO UNIAXIAL BENDING

Abstract

This paper introduces an experimental programme to determine the load bearing capacity of reinforced concrete columns using fly ash (FA) to partially replace ordinary Portland cement (OPC) as a binder when subjected to uniaxial bending. Material tests were conducted on concrete having mean cylinder strength of 30 MPa to determine the most favorable by weight replacement percentage of 20% for FA/OPC. This so-called 20% fly ash concrete (FAC) was used for three pairs of column specimens having 150×200 (mm) rectangular cross-sections, 1600 mm-height, and 4Φ14 longitudinal rebars with yield strength of 362.6 MPa. In the tests, the specimens were uni-axially loaded with various static eccentricities of 0, 40 and 80 mm until failure. The experimental measurements on deformation and load bearing capacity of the test specimens were compared to the calculation results based on design standard TCVN 5574:2018. It is shown that TCVN 5574:2018 is capable of providing good agreement with the test results in moment magnification factor with tolerance of ±5.2%. However, unconservative prediction for load bearing capacity with tolerance of +11.9% is observed when non-linear models for OPC concrete specified in TCVN 5574:2018 are applied. Hence, improvement of bi-linear and tri-linear models for FAC is suggested in the latter part of the paper.

Keywords: experiment, column; reinforced concrete; uniaxial; fly ash.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(5V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(5V)-07) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: thangnt2@nuce.edu.vn (Thăng, N. T.)

1. Giới thiệu

Ngày nay, yêu cầu về phát triển kinh tế hài hòa với bảo vệ môi trường ngày càng trở thành một xu hướng toàn cầu. Trong lĩnh vực xây dựng, việc nghiên cứu vật liệu mới bền vững với môi trường và áp dụng vào các kết cấu chịu lực bằng bê tông cốt thép (BTCT) đã và đang thu hút sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước.

Một trong những hướng nghiên cứu được phát triển mạnh gần đây là tận dụng các vật liệu phế thải công nghiệp như tro bay, xỉ lò cao, muội silica v.v... để tái sử dụng trong công nghiệp sản xuất bê tông [1–3]. Trong số đó, tro bay (fly ash - FA) được tạo ra từ quá trình đốt cháy nhiên liệu than đá của các nhà máy nhiệt điện với nhiệt độ lên tới 1500°C. Đây là một vật liệu có thành phần hóa học và tính chất vật lý phù hợp để làm chất kết dính trong bê tông tương tự như xi măng Portland (ordinary Portland cement - OPC) [1–4]. Ban đầu, tro bay được sử dụng với một lượng hạn chế như một loại phụ gia nhằm cải thiện tính công tác của bê tông. Một số tài liệu kỹ thuật [3–5] quy định lượng tro bay thêm vào không được vượt quá 30% khối lượng xi măng trong cấp phối nhằm đảm bảo các tính chất cơ lý của bê tông. Tuy nhiên, nếu quan niệm tro bay là một thành phần của cấp phối, được sử dụng để thay thế một phần xi măng như một chất kết dính, sẽ giúp giảm thiểu được lượng sản xuất xi măng, nhưng có thể ảnh hưởng tới các đặc trưng cơ lý của vật liệu cũng như khả năng chịu lực của kết cấu sử dụng bê tông tro bay. Một số nhà khoa học trong nước đã nghiên cứu ảnh hưởng của tro bay, silicafume và môi trường dưỡng hộ đến cường độ chịu nén của bê tông có hàm lượng tro bay thay thế xi măng là 20% [6, 7] và ảnh hưởng của tro bay thay thế một phần xi măng đến tính chất của bê tông thương phẩm [8]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này mới chỉ dừng ở mức độ vật liệu. Tro bay cũng đã được nghiên cứu để thay thế hoàn toàn xi măng (100% FA/OPC) làm chất kết dính, kết hợp với các chất hoạt hóa phù hợp để tạo ra loại bê tông geo-polymer có cường độ mẫu trụ trung bình đạt tới 50 MPa và được nghiên cứu áp dụng cho kết cấu chịu uốn [9]. Tuy nhiên, chưa có nhiều nghiên cứu ứng dụng của bê tông có tro bay thay thế một phần xi măng làm chất kết dính vào cấu kiện BTCT chịu nén uốn [10–17].

Trong bài báo này, một chương trình nghiên cứu về bê tông tro bay áp dụng cho cấu kiện BTCT chịu nén lệch tâm phẳng - thường được ứng dụng cho cọc đúc sẵn và cấu kiện cột chịu lực trong công trình xây dựng [18–21] - được thực hiện và trình bày theo các bước sau: (i) Tiến hành thí nghiệm trên các mẫu vật liệu với các tỷ lệ thay thế theo khối lượng từ 0 đến 40% FA/OPC cho bê tông cường độ mẫu trụ trung bình 30 MPa để tìm ra cấp phối tạo ra bê tông tro bay có đặc trưng cơ lý hợp lý nhất; (ii) Áp dụng cấp phối xác định được từ bước nghiên cứu trước để chế tạo và thí nghiệm ba cấp mẫu cột bê tông cốt thép (BTCT) nhằm khảo sát ảnh hưởng của độ lệch tâm theo một phương tới khả năng chịu lực của cột; và (iii) Kiểm chứng kết quả thí nghiệm thu được bằng tiêu chuẩn thiết kế kết cấu BTCT hiện hành TCVN 5574:2018 [22]. Từ đó, các nhận xét và kiến nghị được rút ra ở phần cuối của bài báo để kết cấu cột BTCT sử dụng bê tông có tro bay thay thế một phần xi măng làm chất kết dính có thể được ứng dụng một cách an toàn và hiệu quả trong thực tế.

2. Nghiên cứu thực nghiệm trên mẫu thử vật liệu

2.1. Chương trình thực nghiệm

Mục đích của chương trình nghiên cứu thực nghiệm này là xác định đặc trưng cơ lý của các viên mẫu bê tông được chế tạo từ cấp phối dựa trên mẫu bê tông OPC đối chứng có cường độ mẫu trụ trung bình là 30 MPa (được đặt tên là MS-30-00), sử dụng tỷ lệ thay thế FA/OPC theo khối lượng lần lượt là 10, 20, 30 và 40% để tạo ra các nhóm mẫu tương ứng là MS-30-10, MS-30-20, MS-30-30 và MS-30-40 như trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần bê tông cho các mẫu thí nghiệm vật liệu

Tên mẫu	Hàm lượng tro bay thay thế xi măng	Chất kết dính (kg)		Cát (kg)	Đá dăm (kg)	Nước (kg)
		Xi măng PCB30	Tro bay			
MS-30-00	0%	380	0	760	1140	205
MS-30-10	10%	342 (339,0)	38 (37,7)	760 (753,3)	1140 (1130,2)	205 (203,2)
MS-30-20	20%	304 (298,7)	76 (74,7)	760 (746,8)	1140 (1120,2)	205 (201,4)
MS-30-30	30%	266 (259,1)	114 (111,1)	760 (740,3)	1140 (1110,5)	205 (199,7)
MS-30-40	40%	228 (220,2)	152 (146,8)	760 (734,0)	1140 (1101,0)	205 (198,0)

Số liệu trong Bảng 1 cho thấy trong khi khối lượng cốt liệu cát, đá dăm và tổng khối lượng của các chất kết dính đều không đổi và lần lượt là 760, 1140 và 380 kg, tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) cũng được giữ nguyên là 0,54 cho các mẫu thí nghiệm. Tuy nhiên, do sự chênh lệch về khối lượng thể tích giữa xi măng và tro bay, sau khi thay thế hai vật liệu này theo khối lượng sẽ làm thay đổi tổng thể tích của hỗn hợp bê tông. Do vậy, cần phải quy đổi khối lượng vật liệu về cấp phối cho 1 m³ bê tông theo các giá trị trong ngoặc đơn trong Bảng 1.

Các vật liệu sử dụng trong chế tạo bê tông tro bay cho nghiên cứu này gồm có:

- Tro bay có khối lượng riêng là 1,80 g/cm³; hàm lượng mất mát khi nung là 0,47; độ mịn Blaine là 2154 cm²/g; tính chất hóa học chính gồm hàm lượng CaO là 5,49% và của hợp chất SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ là 79,25%;

- Xi măng Portland PCB30 của Công ty Xi măng Vicem Hoàng Thạch có khối lượng riêng là 3,10 g/cm³;

- Cốt liệu nhỏ (cát thiên nhiên) và cốt liệu lớn (đá dăm) đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 [23] và TCVN 7572:2006 [24]. Cát thiên nhiên sử dụng loại có kích thước hạt lớn nhất là 5 mm khai thác từ sông Lô, tỉnh Phú Thọ, có khối lượng riêng là 2,64 g/cm³. Đá dăm có kích thước hạt lớn nhất là 20 mm, được khai thác tại tỉnh Hà Nam, với khối lượng riêng là 2,69 g/cm³.

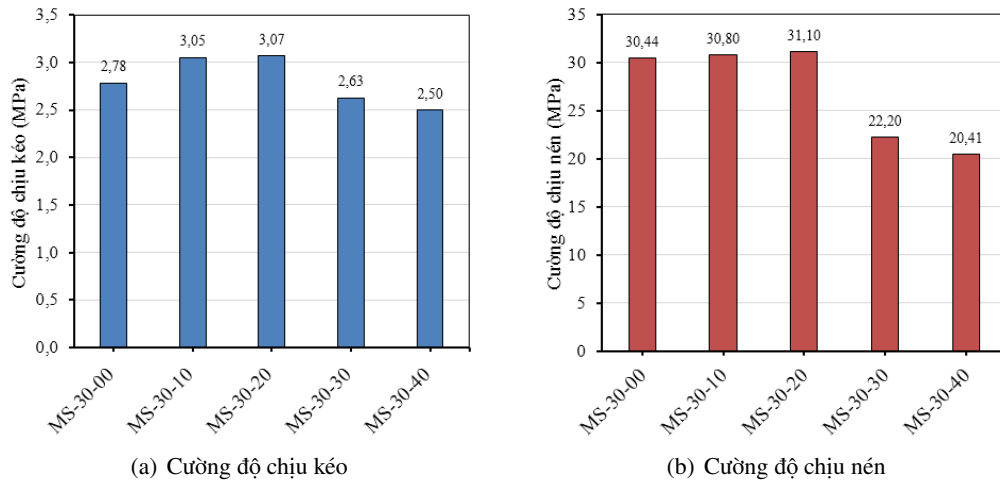
Với mỗi cấp phối, các viên mẫu lập phương cạnh 150 mm và mẫu trụ đường kính 150 mm, cao 300 mm, được đúc cho các tổ mẫu phục vụ thí nghiệm xác định cường độ chịu nén tại 7, 14, 28, 56 và 90 ngày tuổi, thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo và quan hệ ứng suất - biến dạng khi nén. Với ba viên mẫu cho một tổ mẫu, tổng cộng đã có 105 viên mẫu lập phương và 105 viên mẫu trụ được chế tạo và thí nghiệm tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định Công trình LAS XD-125, Trường Đại học Xây dựng.

Quy trình chế tạo và đúc các viên mẫu bê tông gồm các bước như sau: (i) Định lượng các thành phần cấp phối bê tông trong mẻ trộn; (ii) Trộn khô chất kết dính gồm xi măng và tro bay với nhau; (iii) Trộn khô chất kết dính với cát, sau đó trộn với đá dăm bằng máy trộn tay; (iv) Cho nước vào hỗn hợp khô và trộn đều; (v) Kiểm tra độ dẻo của hỗn hợp bê tông tươi bằng cách đo độ sụt; (vi) Đúc viên mẫu lập phương kích thước 150×150×150 (mm) và mẫu trụ kích thước 150×300 (mm); và (vii) Tháo khuôn và dưỡng hộ các viên mẫu bê tông.

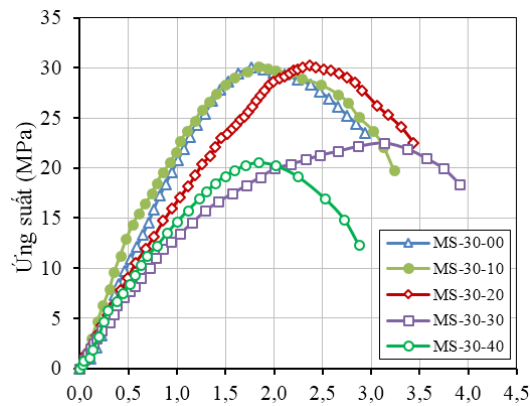
2.2. Kết quả thí nghiệm

Các đặc trưng cơ lý của các mẫu bê tông bao gồm cường độ chịu kéo thu được từ thí nghiệm ép chẻ mẫu trụ, cường độ chịu nén trên mẫu trụ tại 28 ngày tuổi được trình bày tương ứng trên Hình 1(a) và 1(b).

Quan hệ ứng suất - biến dạng khi nén đo được trên các mẫu trụ của cả 5 cấp phối bê tông trong Bảng 1 được thể hiện trên Hình 2.

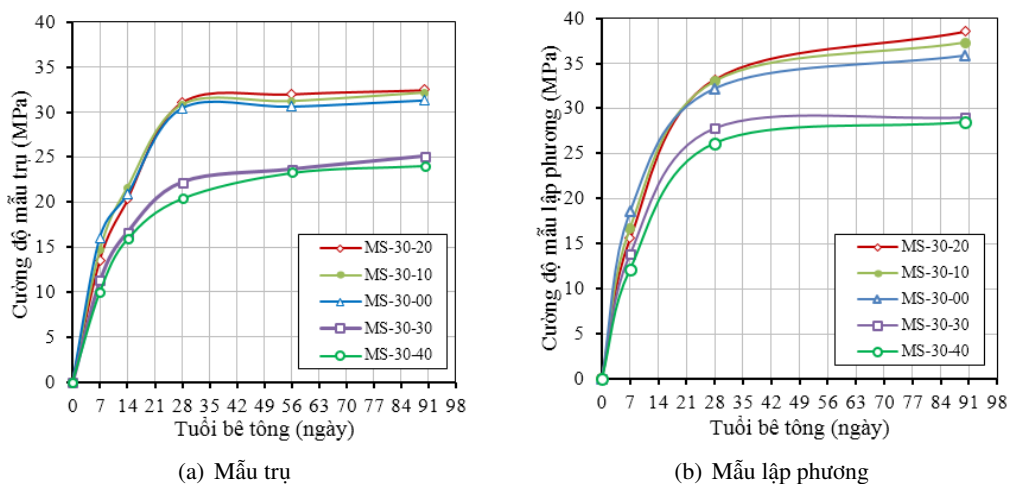


Hình 1. Kết quả thí nghiệm trên mẫu trụ



Hình 2. Kết quả thí nghiệm về quan hệ ứng suất - biến dạng khi nén

Kết quả thí nghiệm về sự phát triển của cường độ chịu nén trên mẫu trụ và mẫu lập phương theo thời gian được thể hiện tương ứng trên Hình 3(a) và 3(b).



Hình 3. Sự phát triển của cường độ chịu nén theo thời gian

2.3. Nhận xét

Kết quả thí nghiệm thu được từ các Hình 1 đến Hình 3 cho thấy:

- Với tỷ lệ thay thế 20% FA/OPC theo khối lượng, mẫu bê tông tương ứng là MS-30-20 có cường độ chịu kéo và chịu nén đều lớn nhất (tương ứng là 3,07 và 31,1 MPa - Hình 1) trong các mẫu có tỷ lệ thay thế từ 10 đến 40%.

- Trong khoảng thời gian trước 28 ngày tuổi, sự phát triển cường độ chịu nén theo thời gian của mẫu trụ và mẫu lập phương của cấp phối MS-30-10 là nhanh nhất. Tuy nhiên, từ 28 ngày tuổi trở đi, ưu thế này thuộc về mẫu bê tông MS-30-20 (Hình 3).

- Mặc dù có cải thiện về cường độ, nhưng bê tông cấp phối MS-30-20 có mô đun đàn hồi, thể hiện ở độ dốc ban đầu của đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng, thấp hơn so với bê tông của các cấp phối MS-30-00 và MS-30-10 (Hình 2).

- Với những tính chất nêu trên, với ưu tiên về tiêu chí cường độ và khối lượng thay thế xi măng cao hơn, mẫu bê tông MS-30-20 được lựa chọn cho bước nghiên cứu tiếp theo.

3. Nghiên cứu thực nghiệm trên mẫu cột bê tông cốt thép

Với các kết quả thí nghiệm thu được các mẫu thử vật liệu của cấp phối MS-30-20, tỷ lệ thay thế 20% FA/OPC theo khối lượng được áp dụng trong chương trình nghiên cứu thực nghiệm thứ hai trên các mẫu cột BTCT nhằm xác định khả năng chịu lực của cột khi chịu nén dọc trục với các độ lệch tâm khác nhau trong mặt phẳng chính của tiết diện cột. Chi tiết được trình bày trong các mục sau:

3.1. Thiết kế mẫu thí nghiệm

Trong chương trình thí nghiệm này, sáu mẫu cột BTCT có cấp phối bê tông với tỷ lệ thay thế 20% FA/OPC so với bê tông thường có cường độ chịu nén trung bình trên mẫu trụ là 30 MPa được chia thành ba nhóm như trong Bảng 2:

- Nhóm thứ nhất gồm hai mẫu cột giống nhau, ký hiệu C-30-00-1 và C-30-00-2: Đây là các cột chịu nén đúng tâm trong thí nghiệm (độ lệch tâm tĩnh học $e_1 = 0$);

- Nhóm thứ hai gồm hai mẫu cột giống nhau, ký hiệu C-30-40-1 và C-30-40-2. Trong thí nghiệm, các mẫu cột đều chịu nén lệch tâm phẳng với $e_1 = 40$ mm;

Bảng 2. Các mẫu thí nghiệm cột

Tên mẫu cột	Tỷ lệ thay thế FA/OPC %	Cốt thép dọc mm	Cốt thép đai mm	Độ lệch tâm e_1 mm	Số lượng mẫu cột	Tên viên mẫu thử	Số lượng viên mẫu lập phương và (mẫu trụ)		
							7 ngày	14 ngày	28 ngày
C-30-00-1	20	4Φ14	Φ6	0	1	C-30-00	3	3	6
C-30-00-2					1		(3)	(3)	(3)
C-30-40-1	20	4Φ14	Φ6	40	1	C-30-40			
C-30-40-2					1				
C-30-80-1	20	4Φ14	Φ6	80	1	C-30-80	3	3	6
C-30-80-2					1		(3)	(3)	(3)

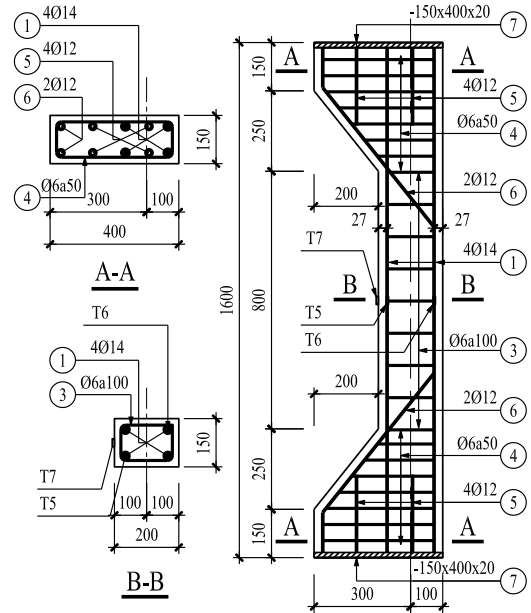
- Nhóm thứ ba gồm hai mẫu cột giống nhau, ký hiệu C-30-80-1 và C-30-80-2. Các mẫu cột đều chịu nén lệch tâm phẳng trong thí nghiệm với $e_1 = 80$ mm.

Do số lượng cấp pha có hạn, các mẫu trong nhóm C-30-00 và C-30-40 được đúc đồng thời trong đợt đầu tiên, kèm theo đó là 12 mẫu lập phương và 9 mẫu trụ bê tông phục vụ các thí nghiệm xác định cường độ vật liệu. Nhóm cột C-30-80 cùng với các mẫu thử vật liệu được đúc trong đợt thứ hai, sau khi dỡ cấp pha của hai nhóm cột trên.

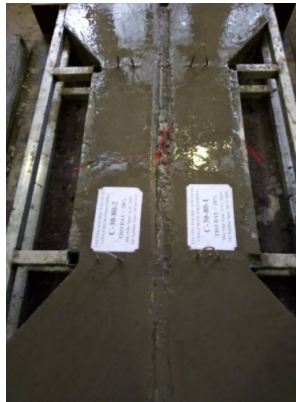
Với thông số nghiên cứu chính là độ lệch tâm phẳng, các mẫu cột được thiết kế giống nhau với tiết diện chữ nhật $b \times h = 150 \times 200$ (mm), chiều cao cột là 1600 mm. Trong đoạn 150 mm từ hai đầu, cột được mở rộng với tiết diện 150×400 (mm) nhằm tạo ra độ lệch tâm phẳng trong mặt phẳng uốn song song với cạnh $h = 200$ mm của tiết diện.

Cốt thép dọc chịu lực chính của cột là 4 Φ 14, nằm tại các góc của cốt đai Φ 6a100, với lớp bê tông bảo vệ là 20 mm. Hai đầu cột được gia cường bởi các cốt thép và bản thép nhằm tránh sự phá hoại cục bộ trong quá trình thí nghiệm (Hình 4). Giá trị cường độ trên ba mẫu thép Φ 14 dài 600 mm xác định trong thí nghiệm kéo tiêu chuẩn là 365,081; 363,782 và 367,030 MPa.

Trên Hình 5 và Hình 6 thể hiện quá trình chế tạo, đổ bê tông và dưỡng hộ cho các mẫu cột thí nghiệm.



Hình 4. Thiết kế cột thí nghiệm



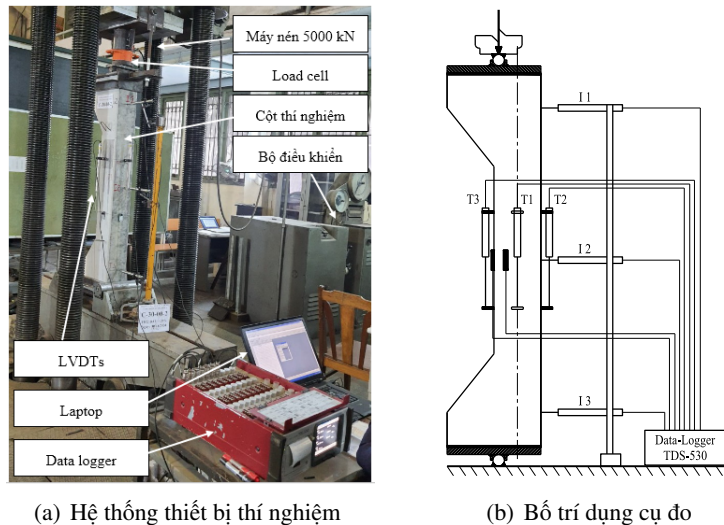
Hình 5. Thiết kế cột thí nghiệm

Quy trình chế tạo và đúc bê tông cho các mẫu cột bao gồm các bước như sau: (i) Gia công cấp pha; (ii) Lắp đặt cốt thép; (iii) Định lượng các thành phần cấp phối bê tông trong mẻ trộn; (iv) Trộn khô chất kết dính giữa xi măng và tro bay với tỷ lệ khối lượng của cấp phối MS-30-20 cho trong Bảng 1; (v) Trộn khô chất kết dính với cát, sau đó trộn với đá dăm bằng máy trộn tại phòng thí nghiệm; (vi) Cho nước vào hỗn hợp khô và trộn đều; (vii) Đúc mẫu cột BTCT, đồng thời đúc các mẫu

thử vật liệu gồm các viên mẫu lập phương kích thước $150 \times 150 \times 150$ (mm) và các viên mẫu trụ kích thước 150×300 (mm); (viii) Tháo khuôn và dưỡng hộ các mẫu thử đến 28 ngày tuổi bằng tấm ni-long theo TCVN 3015:1993 [25]. Sau khi đạt 28 ngày tuổi, dừng dưỡng hộ mẫu và chuẩn bị tiến hành thí nghiệm.

3.2. Bố trí các thiết bị đo và hệ thống thí nghiệm

Trên Hình 6 thể hiện việc bố trí hệ thống thí nghiệm xác định khả năng chịu lực của các mẫu cột khi chịu tác dụng của lực nén dọc trục với các độ lệch tâm khác nhau.



Hình 6. Hệ thống thiết bị và bố trí dụng cụ đo

Các thiết bị sử dụng trong thí nghiệm bao gồm:

- Tải trọng nén dọc trục được tác dụng bằng máy nén thủy lực của CHLB Nga có khả năng nén tối đa tới 5000 kN. Giá trị lực nén được đo bằng thiết bị đo lực (load-cell) đặt phía trên đầu cột;
- Chuyển vị dọc trục của cột được đo bằng 4 thiết bị đo chuyển vị (Linear Variable Displacement Transducer - LVDT) có số hiệu T1, T2, T3 và T4, được lắp trên cả bốn mặt của tiết diện ngang tại khu vực chính giữa cột, với khoảng đo là 100 mm;
- Chuyển vị ngang được đo bằng LVDT có số hiệu I1 và I3 (tại vị trí cách hai đầu cột 150 mm) và I2 tại chính giữa cột, với khoảng đo là 100 mm;
- Biến dạng trong bê tông và cốt thép tại tiết diện chính giữa cột được đo bằng các tem điện trở (strain-gauges) tương ứng cho một cột trong mỗi nhóm;
- Tất cả các thiết bị trên được kết nối với bộ thu thập và xử lý số liệu data-logger TDS-530 và máy tính để ghi lại các số đo về lực và chuyển vị.

Trong thí nghiệm, mẫu cột được cấu tạo gối liên kết khớp tại hai đầu thông qua hai thanh thép tròn được hàn vào tấm thép đầu máy nén (ở phía trên đầu cột) và tấm thép bệ máy nén (ở phía dưới chân cột). Một bản thép được hàn với bản thép số 7 (Hình 6(b)) trên đó cấu tạo hai gờ thép với khe hở nhỏ để có thể vừa tỳ vào thanh thép tròn, vừa tránh cho đầu cột không bị trượt ngang. Tại liên kết này, sử dụng mỡ cơ khí bôi trơn để cột có thể xoay tự do trong mặt phẳng uốn song song với cạnh h của tiết diện cột. Với liên kết hai đầu khớp và chống chuyển vị ngang này, khi chịu nén với lực dọc

N cùng độ lệch tâm ban đầu e_1 và độ lệch tâm ngẫu nhiên e_a , tiết diện nguy hiểm nhất tại chính giữa chiều cao cột sẽ có chuyển vị ngang là Δ và mô men tương ứng là $M = N(e_1 + e_a + \Delta)$.

3.3. Quy trình thí nghiệm

Thí nghiệm trên các mẫu cột được tiến hành tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định Công trình LAS XD-125 - Trường Đại học Xây dựng, với quy trình như sau:

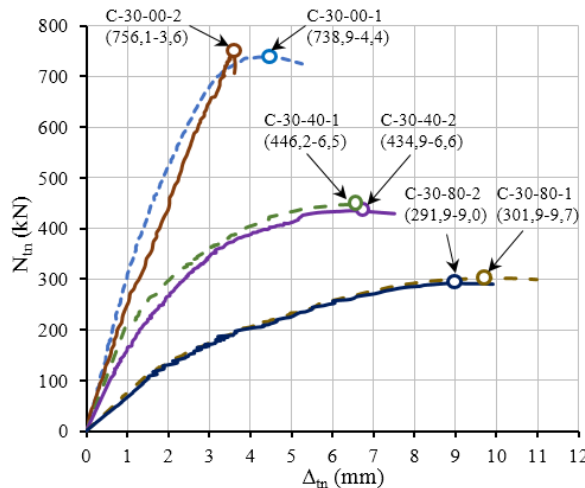
- Bước 1: Gia tải thử với tải trọng bằng với cấp tải đầu tiên là 10 kN trở lên, kiểm tra sự làm việc của mô hình thí nghiệm và các dụng cụ đo. Khi tất cả thiết bị làm việc bình thường, hạ tải về 0. Ghi chép số liệu ban đầu trên các dụng cụ đo;

- Bước 2: Tiến hành gia tải từng cấp tải trong khoảng 5% giá trị dự báo khả năng chịu lực của cột. Lưu số liệu trên các dụng cụ đo ở từng cấp tải trọng;

- Bước 3: Khi giá trị lực dọc tác dụng lên cột không tăng được nữa và xuất hiện phá hoại của bê tông vùng nén trên tiết diện nguy hiểm nhất tại giữa chiều cao cột, lưu lại số liệu về lực dọc lớn nhất và chuyển vị tương ứng. Sau đó dừng bơm dầu cho máy nén và tiến hành hạ tải thí nghiệm theo từng cấp tải có giá trị không vượt quá 10% giá trị tải trọng thí nghiệm.

3.4. Kết quả thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm về quan hệ giữa lực nén dọc (N_m) và chuyển vị ngang tại giữa cột (Δ_m) được trình bày trên Hình 7.



Hình 7. Kết quả thí nghiệm cột

Khả năng chịu lực lớn nhất N_m và chuyển vị ngang tại giữa chiều cao cột Δ_m tương ứng của mỗi mẫu cột được biểu diễn trong Bảng 3.

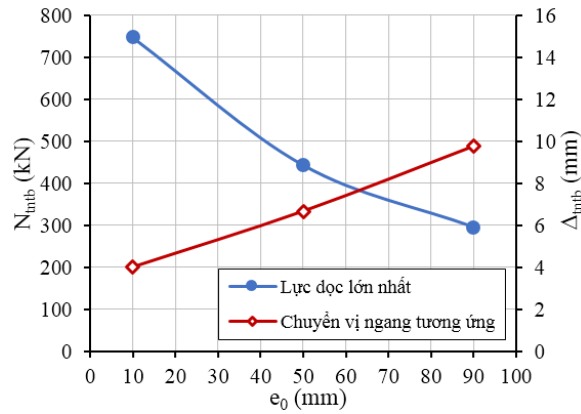
Độ lệch tâm ban đầu e_0 được xác định bằng tổng của độ lệch tâm tĩnh học e_1 và độ lệch tâm ngẫu nhiên $e_a = \max(L_c/600; h_c/30; 10) = \max(1630/600; 200/30; 10) = 10$ mm [22]. Như vậy, giá trị e_0 của ba nhóm cột C-30-00, C-30-40 và C-30-80 lần lượt là 10, 50 và 90 mm. Từ đó xác định được giá trị thí nghiệm của mô men uốn lớn nhất trong cột tại tiết diện chính giữa chiều cao cột là $M_m = N_m(e_0 + \Delta_m)$.

Với các giá trị trung bình của kết quả thí nghiệm trình bày trong Bảng 3, Hình 8 biểu diễn ảnh hưởng của độ lệch tâm e_0 tới kết quả thí nghiệm cột trên hai khía cạnh: (i) Khả năng chịu lực dọc

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm các mẫu cột

Nhóm	C-30-00 ($e_1 = 0$)		C-30-40 ($e_1 = 40$ mm)		C-30-80 ($e_1 = 80$ mm)	
Mẫu	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
N_m (kN)	738,90	756,19	446,15	434,90	301,96	291,83
N_{mtb} (kN)	747,55		440,53		296,90	
Δ_m (mm)	4,39	3,60	6,46	6,57	9,77	9,01
Δ_{mtb} (mm)	4,00		6,52		9,39	
M_m (kNm)	10,635	10,288	25,191	24,601	30,127	28,850

lớn nhất N_{mtb} tỷ lệ nghịch với độ lệch tâm ban đầu e_0 ; và (ii) Chuyển vị ngang tại giữa chiều cao cột tương ứng với lực dọc lớn nhất Δ_{mtb} tỷ lệ thuận với độ lệch tâm ban đầu e_0 .



Hình 8. Ảnh hưởng của độ lệch tâm tới kết quả thí nghiệm cột



Hình 9. Dạng phá hoại của mẫu cột C-30-40-1

3.5. Nhận xét

Từ các kết quả thí nghiệm thu được từ mục trên, có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Kết quả thí nghiệm về khả năng chịu lực lớn nhất N_m và chuyển vị ngang tương ứng tại giữa chiều cao cột Δ_m của các cột trong một nhóm là khá gần nhau, chứng tỏ độ tin cậy của thí nghiệm;
- Quy luật độ lệch tâm ảnh hưởng tiêu cực tới độ bền nén của cột cũng áp dụng với cột BTCT sử dụng tro bay thay thế một phần xi măng làm chất kết dính, tương tự như với cột BTCT thường. Tuy nhiên, bước đầu cần kiểm chứng độ chính xác khi áp dụng các lý thuyết hiện có của kết cấu BTCT thường để dự báo độ bền nén cho cột BTCT sử dụng tro bay thay thế một phần xi măng làm chất kết dính.

4. Kiểm chứng kết quả thí nghiệm

Trong mục này, tiêu chuẩn thiết kế kết cấu BTCT hiện hành TCVN 5574:2018 [22] được sử dụng để tính toán và kiểm chứng hệ số uốn dọc và khả năng chịu lực lớn nhất khi bị nén lệch tâm phẳng của các mẫu cột thí nghiệm.

Giá trị cường độ tại 28 ngày tuổi thu được trên ba mẫu lập phương cạnh $a = 150$ mm được đúc cùng với các cột nhóm C-30-00 và C-30-40 là $R_1 = 31,911$; $R_2 = 31,111$ và $R_3 = 31,911$ MPa; Giá trị trung bình là $R_m = 31,664$ MPa; Độ lệch quân phương $\sigma = 0,462$; Hệ số biến động $\nu = 0,015$; Giá trị cường độ đặc trưng với xác suất đảm bảo 95% ($S = 1,64$) là $B = 30,877$ MPa; Cường độ tiêu chuẩn chuyển đổi sang cường độ mẫu lăng trụ $R_{bn} = B(0,77 - 0,001B) = 22,829$ MPa. Do xác định bằng thực nghiệm nên hệ số an toàn $\gamma_{bc} = 1,0$. Cường độ tính toán áp dụng cho các mẫu cột nhóm C-30-00 và C-30-40 là $R_b = 22,829$ MPa [22].

Tương tự như vậy, từ giá trị cường độ tại 28 ngày tuổi thí nghiệm trên ba mẫu lập phương cạnh $a = 150$ mm được đúc cùng với các mẫu cột nhóm C-30-80 là $R_1 = 32,222$; $R_2 = 32,0$ và $R_3 = 30,889$ MPa, xác định được cường độ tính toán áp dụng cho mẫu C-30-80 là $R_b = 22,578$ MPa.

Kết quả thí nghiệm kéo trên ba mẫu cốt thép $\Phi 14$ dài 600 mm là $R_1 = 365,081$; $R_2 = 363,782$ và $R_3 = 367,030$ MPa. Như vậy cường độ trung bình $R_m = 365,298$ MPa và cường độ đặc trưng là $f_y = 362,617$ MPa.

Mô đun đàn hồi xác định từ đường cong ứng suất - biến dạng khi chịu nén của bê tông sử dụng tro bay là $E_b = 20332$ MPa; mô đun đàn hồi của cốt thép là $E_s = 205$ GPa. Hệ số giới hạn chiều cao vùng bê tông chịu nén là $\xi_R = 0,531$ [22].

4.1. Hệ số uốn dọc

Xét mẫu cột C-30-80-2, giá trị lực dọc phá hoại thu được từ thí nghiệm là $N_m = 291,83$ kN, chuyển vị ngang lớn nhất tại giữa cột khi phá hoại là $\Delta_m = 9,01$ mm.

Các số liệu hình học bao gồm bề rộng tiết diện cột $b = 150$ mm; chiều cao tiết diện cột $h = 200$ mm; khoảng cách từ mép bê tông chịu kéo (nén) đến trọng tâm tiết diện cốt thép chịu kéo (nén): $a = 27$ mm ($a' = 27$ mm); chiều dài tính toán cột: $L_0 = 1630$ mm (tính đến trọng tâm khớp nối hai đầu cột); chiều cao làm việc của tiết diện $h_0 = h - a = 173$ mm; khoảng cách giữa trọng tâm tiết diện cốt thép chịu kéo và nén $z_s = h_0 - a' = 146$ mm; Độ lệch tâm ngẫu nhiên: $e_a = 10$ mm; Diện tích tiết diện cốt thép chịu kéo ($2\Phi 14$) và nén ($2\Phi 14$) $A_s = A'_s = 307,9$ mm².

Với kết cấu cột của hệ thí nghiệm là tĩnh định, xác định được độ lệch tâm ban đầu là $e_0 = e_1 + e_a = 90$ mm trong đó độ lệch tâm tĩnh học $e_1 = 80$ mm và độ lệch tâm ngẫu nhiên $e_a = 10$ mm. Như vậy, độ lệch tâm tương đối của lực dọc là $\delta = e_0/h = 90/200 = 0,45 \in [0,15; 1,5]$.

Hệ số xét đến ảnh hưởng của tải trọng tác dụng dài hạn được tính theo công thức $\varphi_L = 1 + \frac{M_{L1}}{M_L}$ và không lớn hơn 2. Để đơn giản và thiên về an toàn, trong tính toán lấy $\varphi_L = 2$. Thay φ_L và δ_e tính được hệ số $k_b = \frac{0,15}{\varphi_L (0,3 + \delta_e)} = 0,100$.

Mô men quán tính của diện tích tiết diện của bê tông đối với trọng tâm tiết diện ngang của cầu kiện là $I_b = bh^3/12 = 100.000.000 \text{ mm}^4$.

Mô men quán tính của diện tích tiết diện của cốt thép dọc đối với trọng tâm tiết diện ngang của cầu kiện là $I_s = (A_s + A'_s)(0,5h - a)^2 = 3.281.343 \text{ mm}^4$.

Thay các giá trị trên tính được độ cứng của cầu kiện ở trạng thái giới hạn về độ bền là $D = k_b E_b I + 0,7 E_s I_s = 662.708.056.567 \text{ Nmm}^2$.

Lực tới hạn quy ước: $N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{L_0^2} = 2.461,766 \text{ kN}$.

Hệ số uốn dọc η tính toán là $\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} = 1,132$, với $N = N_m = 291,83 \text{ kN}$.

Hệ số uốn dọc thực nghiệm là $\eta_m = (e_0 + \Delta_m) / e_0 = (90 + 9,01) / 90 = 1,100$.

Hệ số so sánh giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm: $k_\eta = \frac{\eta_{tt}}{\eta_m} = \frac{1,132}{1,100} = 1,029$.

Tính toán tương tự cho các mẫu thí nghiệm còn lại, kết quả được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả kiểm chứng của TCVN 5574:2018 về hệ số uốn dọc

Nhóm	C-30-00 ($e_1 = 0$)		C-30-40 ($e_1 = 40 \text{ mm}$)		C-30-80 ($e_1 = 80 \text{ mm}$)	
Mẫu	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
δ_e	0,15		0,25		0,45	
k_b	0,167		0,136		0,100	
$D \text{ (Nmm}^2\text{)}$	8,097E+11		7,841E+11		6,742E+11	
$N_{cr} \text{ (kN)}$	3.007,945		2.779,074		2.504,428	
η_{tt}	1,326	1,336	1,191	1,186	1,137	1,132
η_m	1,439	1,361	1,129	1,131	1,109	1,100
k_η	0,921	0,982	1,055	1,048	1,026	1,029
Trung bình	0,952		1,052		1,028	

Bảng 4 cho thấy kết quả trung bình của ba nhóm mẫu lần lượt là 0,952; 1,052 và 1,028. Như vậy TCVN 5574:2018 có khả năng tính toán hệ số uốn dọc với sai số trong khoảng $\pm 5,2\%$ so với kết quả thí nghiệm.

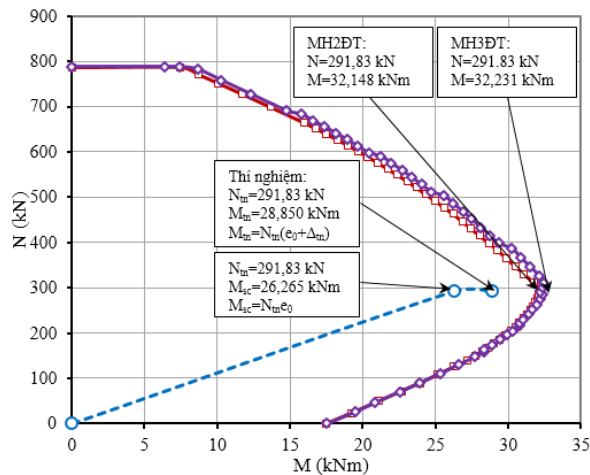
4.2. Khả năng chịu lực

Trong mục này, 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 (MH2ĐT) và ba đoạn thẳng (MH3ĐT) của TCVN 5574:2018 do các tác giả đề xuất năm 2020 [20] được sử dụng để tính toán khả năng chịu lực của các cột thí nghiệm chịu nén lệch tâm phẳng dưới dạng biểu đồ tương tác. Phương pháp nội suy và phương pháp trung bình có trọng số được sử dụng để đánh giá hệ số an toàn (SF) bằng cách xác định vị trí trong mặt phẳng của điểm nội lực tới hạn so với đường biểu đồ tương tác [20], kết quả được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 5. Hệ số an toàn khi sử dụng mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông OPC

Nhóm	C-30-00 ($e_1 = 0$)		C-30-40 ($e_1 = 40$ mm)		C-30-80 ($e_1 = 80$ mm)	
Mẫu	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
SF-MH2ĐT	1,014	1,000	1,047	1,073	1,049	1,093
Trung bình	1,007		1,060		1,071	
SF-MH3ĐT	1,023	1,009	1,068	1,094	1,069	1,115
Trung bình	1,016		1,081		1,092	

Trong bài báo này, hệ số an toàn (SF) cũng được đánh giá theo tiêu chí so sánh mô men uốn lý thuyết và mô men uốn thực nghiệm tại cùng một mức lực nén lớn nhất thu được từ thí nghiệm. Xét mẫu thí nghiệm C-30-80-2, khả năng chịu lực trong mặt phẳng uốn song song với cạnh h của tiết diện cột được thể hiện dưới dạng hai biểu đồ tương tác (N, M) tương ứng với mô hình MH2ĐT và MH3ĐT cho bê tông OPC. Như biểu diễn trên Hình 10, tại cùng mức lực dọc $N_m = 291,83$ kN, khả năng chịu mô men của cột theo MH2ĐT và MH3ĐT lần lượt là 32,148 và 32,231 kNm.



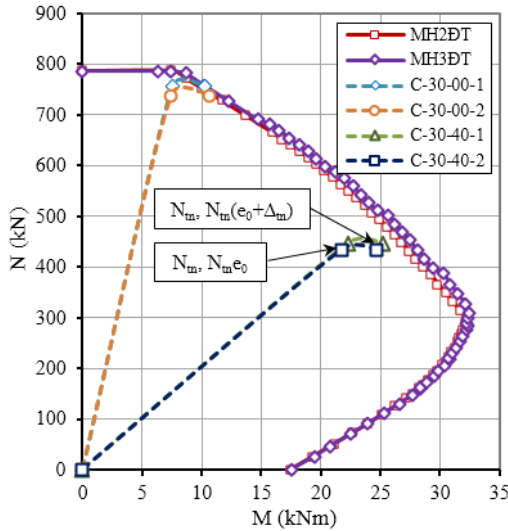
Hình 10. Kiểm chứng khả năng chịu lực của mẫu cột C-30-80-2

Như vậy các hệ số so sánh tương ứng với MH2ĐT và MH3ĐT là:

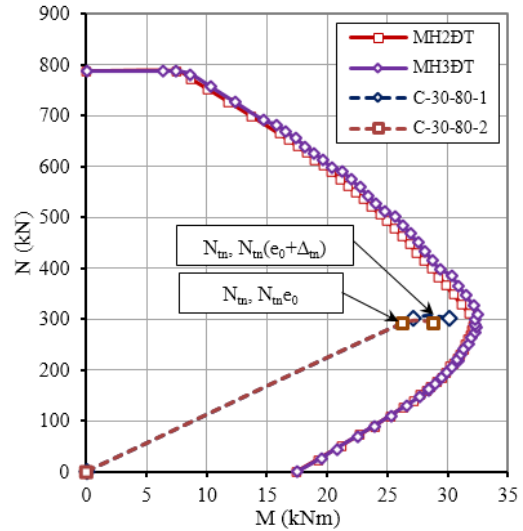
$$k_M^{MH2ĐT} = \frac{M_{MH2ĐT}}{M_m} = \frac{32,148}{28,850} = 1,114; \quad k_M^{MH3ĐT} = \frac{M_{MH3ĐT}}{M_m} = \frac{32,231}{28,850} = 1,117$$

Tính toán tương tự cho các cột còn lại, kết quả được trình bày trong Hình 11 và Bảng 6. Trên Hình 10 và Hình 11, các đoạn thẳng nối gốc tọa độ với điểm có tọa độ ($N_m, N_m e_0$) biểu diễn một cách tương đối mô men sơ cấp phát triển tại chính giữa chiều cao cột khi chịu lực nén tăng dần từ 0 cùng với độ lệch tâm ban đầu e_0 . Các đoạn thẳng đi ngang nối tiếp sang điểm ($N_m, N_m(e_0 + \Delta e_m)$) biểu diễn một cách tương đối sự phát triển của mô men thứ cấp do hiệu ứng bậc hai.

Với kết quả khá tương đồng với phương pháp hệ số an toàn trong Bảng 5, Bảng 6 cho thấy khi áp dụng MH2ĐT, hệ số đối chứng trung bình về khả năng chịu lực của 3 nhóm mẫu lần lượt là 0,990; 1,088 và 1,089. Tương tự với MH3ĐT, kết quả đối chứng trung bình về khả năng chịu lực của ba nhóm mẫu lần lượt là 1,043; 1,119 và 1,095. Như vậy, mô hình biến dạng phi tuyến cho bê tông OPC



(a) Nhóm mẫu đợt 1 (C-30-00 và C-30-40)



(b) Nhóm mẫu đợt 2 (C-30-80)

Hình 11. Kiểm chứng khả năng chịu lực của các nhóm mẫu cột

Bảng 6. Kết quả kiểm chứng của TCVN 5574:2018 về khả năng chịu lực

Nhóm	C-30-00 ($e_1 = 0$)		C-30-40 ($e_1 = 40$ mm)		C-30-80 ($e_1 = 80$ mm)	
Mẫu	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
M_m	10,635	10,288	25,191	24,601	30,127	28,850
$M_{MH2ĐT}$	10,963	9,763	26,836	27,298	32,050	32,148
$k_{MH2ĐT}$	1,031	0,949	1,065	1,110	1,064	1,114
Trung bình	0,990		1,088		1,089	
$M_{MH3ĐT}$	11,499	10,339	27,661	28,054	32,352	32,231
$k_{MH3ĐT}$	1,081	1,005	1,098	1,140	1,074	1,117
Trung bình	1,043		1,119		1,095	

của TCVN 5574:2018 dự báo khả năng chịu lực của các mẫu cột thí nghiệm với hệ số kiểm chứng lớn hơn đơn vị (thiên về thiếu an toàn) với dung sai lớn nhất là +11,9%.

4.3. Nhận xét

Một số nhận xét có thể được rút ra từ các mục 4.1 và 4.2 như sau:

- Trong cùng một nhóm cột, kết quả kiểm chứng thu được có giá trị khá gần nhau và gần với giá trị trung bình;

- TCVN 5574:2018 [22] phân biệt hai trường hợp lệch tâm đối với cột BTCT: (i) Trường hợp lệch tâm lớn (LTL) khi chiều cao vùng nén quy đổi $x \leq \xi_R h_0$; và (ii) Trường hợp lệch tâm bé (LTB) khi $x > \xi_R h_0$. Với các giá trị cường độ vật liệu đo được, xác định được hệ số giới hạn chiều cao vùng nén là $\xi_R = 0,531$. Với các cột thí nghiệm được đặt thép dọc đối xứng $A_s = A'_s$ và $R_s = R_{sc}$, điều kiện xảy ra LTL là $\alpha_n = N/R_b b h_0 \leq \xi_R$. Từ đó, có thể xác định được tính chất lệch tâm của các cột thí nghiệm như trong Bảng 7.

Bảng 7. Tính chất lệch tâm của các cột thí nghiệm

Nhóm	C-30-00 ($e_1 = 0$)		C-30-40 ($e_1 = 40$ mm)		C-30-80 ($e_1 = 80$ mm)	
Mẫu	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
N_m (kN)	738,9	756,19	446,15	434,90	301,96	291,83
α_n	1,247	1,276	0,753	0,734	0,515	0,497
Lệch tâm	LTB	LTB	LTB	LTB	LTL	LTL

- Các Hình 10 và 11 cho thấy đối với cả cột chịu LTB và LTL, phương pháp mô hình biến dạng phi tuyến của TCVN 5574:2018 đều dự báo khả năng chịu lực lớn hơn kết quả thí nghiệm ($k > 1$) - thiên về thiếu an toàn. Nguyên nhân là do tiêu chuẩn trên chỉ áp dụng cho bê tông thường, yếu tố suy giảm của mô đun đàn hồi của bê tông tro bay thu được từ thí nghiệm (Hình 2) chưa được kể đến trong mô hình biến dạng phi tuyến của vật liệu. Như vậy, để thu được kết quả thiên về an toàn, một nghiên cứu tiếp theo đang được các tác giả thực hiện theo hướng áp dụng phương pháp mô hình biến dạng phi tuyến kết hợp với những điều chỉnh của quan hệ ứng suất - biến dạng dưới dạng hai đoạn thẳng hoặc ba đoạn thẳng thu được từ thí nghiệm trên các mẫu vật liệu bê tông tro bay kết hợp giảm độ cứng và kiểm chứng với số đo về biến dạng trên mẫu thí nghiệm kết cấu.

5. Kết luận

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm và kiểm chứng bằng lý thuyết của bài báo này được tóm tắt như sau:

- Đối với bê tông có cường độ trung bình mẫu trụ là 30 MPa, tỷ lệ tro bay thay thế 20% khối lượng xi măng làm chất kết dính là tỷ lệ hợp lý nhất do làm tăng cường độ chịu kéo và chịu nén, sự phát triển của cường độ chịu nén sau 28 ngày tuổi, cũng như hiệu quả thay thế khối lượng xi măng, mặc dù vẫn chấp nhận một độ suy giảm nhất định về mô đun đàn hồi;

- So sánh số liệu thí nghiệm trên ba cặp mẫu cột bê tông cốt thép sử dụng bê tông tro bay 20% với kết quả tính toán theo TCVN 5574:2018 cho thấy:

+ TCVN 5574:2018 có khả năng dự báo khá chính xác hệ số uốn dọc, với dung sai nằm trong khoảng $\pm 5,2\%$;

+ Phương pháp biến dạng phi tuyến của TCVN 5574:2018 dự báo khả năng chịu lực thiên về thiếu an toàn cho cả cột thí nghiệm chịu lệch tâm bé và lệch tâm lớn với dung sai trong khoảng $+11,9\%$;

- Để đạt được kết quả dự báo thiên về an toàn cho cột bê tông cốt thép sử dụng bê tông tro bay từ mô hình lý thuyết, kiến nghị sử dụng phương pháp biến dạng phi tuyến của TCVN 5574:2018 với một số cải tiến phù hợp cho các mô hình biến dạng hai đoạn thẳng hoặc ba đoạn thẳng cho bê tông tro bay.

Kết quả nghiên cứu của bài báo đã cho thấy khả năng ứng dụng bê tông có tro bay thay thế một phần xi măng làm chất kết dính vào cấu kiện BTCT chịu nén, như vậy vừa thu được hiệu quả về kinh tế (tái sử dụng chất thải công nghiệp, tiết kiệm chi phí thu gom, xử lý), vừa đạt được mục tiêu bảo vệ môi trường (giảm thiểu khí CO₂ gây hiệu ứng nhà kính do công nghiệp sản xuất xi măng). Mặt khác, đề tài giúp cho các kỹ sư thực hành hiểu rõ hơn sự làm việc và tính ứng dụng của vật liệu kết cấu sử dụng bê tông thân thiện môi trường.

Lời cảm ơn

Các tác giả chân thành cảm ơn Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã hỗ trợ tài chính thông qua đề tài khoa học công nghệ mã số 44-2021/KHXD-TD; PGS. TS. Nguyễn Trung Hiếu và các cán bộ kỹ thuật của Phòng Thí nghiệm và Kiểm định công trình LAS XD-125 đã nhiệt tình giúp đỡ trong quá trình thực hiện các thí nghiệm được trình bày trong bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Phan, H. (2003). *Analysis of usage of fly ash wasted from thermal power plants in Vietnam*. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan (Be402): 56–61.
- [2] ASTM C618-12a (2014). *Standard specification for Coal fly ash and raw or calcined natural Pozzolan for use in concrete*. ASTM International, West Conshohocken, United States.
- [3] Thang, N. T., Vongchith, S. (2019). On the ability of applying fly ash for concrete in Lao PDR. *Vietnam Journal of Construction*, (621):65–70.
- [4] ACI 232.2R-18 (2018). *Report on the use of fly ash in concrete*. American Concrete Institute.
- [5] Mallisa, H., Turuallo, G. (2017). [The maximum percentage of fly ash to replace part of original Portland cement \(OPC\) in producing high strength concrete](#). *AIP Conference Proceedings*, 1903(1):030012.
- [6] Chính, N. V., Thuật, Đ. C. (2020). [Ảnh hưởng của tro bay, silicafume và môi trường dưỡng hộ đến cường độ chịu nén của bê tông](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 14(3V):60–72.
- [7] Huy, S. N., Tam, L. T. T., Phuoc, H. T. (2017). Effect of fly ash content on the compressive strength development of concrete. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 2: 31–36.
- [8] Lâm, N. T., Linh, N. N., Nam, T. V., Kiên, V. D., Khải, T. V., Hiếu, P. Đ. (2020). [Ảnh hưởng của tro bay thay thế một phần xi măng đến tính chất của bê tông thường phẩm](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 14(4V):96–105.
- [9] Pham, D. Q., Nguyen, T. N., Le, S. T., Pham, T. T., Ngo, T. D. (2021). [The structural behaviours of steel reinforced geopolymer concrete beams: An experimental and numerical investigation](#). *Structures*, 33:567–580.
- [10] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., Rattanasak, U. (2009). [Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers](#). *Waste Management*, 29(2):539–543.
- [11] Marthong, C., Agrawal, T. P. (2012). Effect of fly ash additive on concrete properties. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(4):1986–1991.
- [12] Kao, Y.-C., Chiu, C.-K., Ueda, T., Juan, Y.-J. (2018). [Experimental Investigation on Mechanical Properties of SBR-Modified Mortar with Fly Ash for Patch Repair Material](#). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(8):382–395.
- [13] Srinivasa, R. V., Seshagiri, R. M. V., Shrihari, S. (2019). [Strength Conversion Factors for Concrete Based On Specimen Geometry, Aggregate Size and Direction of Loading](#). *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2):2125–2130.
- [14] Salla, S. R., Modhera, C. D., Babu, U. R. (2021). [An Experimental Study on Various Industrial Wastes in Concrete for Sustainable Construction](#). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(2):133–148.
- [15] Yoo, S.-W., Choi, Y. C., Choi, W. (2017). [Compression Behavior of Confined Columns with High-Volume Fly Ash Concrete](#). *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017:1–11.
- [16] Thang, N. T., Phuong, N. V. (2017). [Experimental study on ultimate strength of normal sections in reinforced concrete beams](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE*, 11 (6):44–52.
- [17] Thắng, N. T. (2019). [Tính toán cốt đai cho dầm bê tông cốt thép chịu đồng thời lực phân bố đều và lực tập trung](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 13(1V):25–34.
- [18] Minh, P. Q., Phong, N. T., Thắng, N. T., Tùng, V. M. (2021). *Kết cấu bê tông cốt thép - Phần cấu kiện cơ bản*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.

- [19] Thắng, N. T., Ninh, N. T. (2016). Biểu đồ tương tác của cột bê tông cốt thép ở nhiệt độ cao theo tiêu chuẩn châu Âu EC2. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 28:55–61.
- [20] Phương, N. V., Vongchith, S., Thắng, N. T. (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 (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 14(3V):93–107.
- [21] Tâm, T. V., Tùng, P. T., Ninh, N. T., Vượng, P. N. (2019). [Xây dựng phần mềm tính toán khả năng chịu lực của cầu kiện bê tông cốt thép chịu nén lệch tâm xiên có tiết diện bất kỳ theo TCVN 5574:2018](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 13(4V):47–57.
- [22] TCVN 5574:2018. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [23] TCVN 7570:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [24] TCVN 7572:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [25] TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.