

PHÂN TÍCH ĐỘ TIN CẬY VỀ ỨNG XỬ CỦA ỐNG THÉP NHỒI BÊ TÔNG CHỊU NÉN DỌC TRỤC

Nguyễn Hồng Ân^{a,b,*}, Cao Văn Vui^{a,b,*}

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

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

Nhận ngày 24/6/2023, Sửa xong 08/9/2023, Chấp nhận đăng 11/9/2023

Tóm tắt

Bài báo này trình bày kết quả phân tích độ tin cậy về ứng xử của ống thép nhồi bê tông (CFST) chịu nén dọc trục. Mô hình phân tích ứng xử lực–biến dạng của CFST được xây dựng thông qua các ứng xử của vật liệu ống thép và bê tông có xét đến hiệu ứng kháng nở hông. Mô hình phân tích này được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả ứng xử lực–biến dạng thu được từ phân tích với kết quả ứng xử lực–biến dạng thu được từ thực nghiệm đã được công bố. Sau đó, mô hình này được sử dụng để phân tích độ tin cậy. Các biến ngẫu nhiên dùng để khảo sát gồm giới hạn chảy của thép, cường độ của bê tông, bề dày ống thép, và đường kính ống thép. Kỹ thuật mô phỏng Monte Carlo được thực hiện và thu được các đường cong quan hệ giữa tải trọng và biến dạng. Các đường cong này được sử dụng để phân tích độ tin cậy trên miền biến dạng. Kết quả cho thấy rằng độ lệch chuẩn và chỉ số độ tin cậy biến thiên ứng với sự biến thiên của biến dạng. Dạng biến thiên của độ lệch chuẩn và chỉ số độ tin cậy là khác nhau khi các biến số đầu vào được xét riêng biệt hoặc xét đồng thời. Khi các biến được xem xét riêng biệt, chỉ số độ tin cậy lớn hơn 15. Khi các biến đồng thời được xét, chỉ số độ tin cậy dao động quanh giá trị 10.

Từ khóa: ống thép nhồi bê tông (CFST); quan hệ tải trọng–biến dạng; độ tin cậy; tải dọc trục.

RELIABILITY ANALYSIS ON THE BEHAVIOR OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBES UNDER AXIAL COMPRESSION

Abstract

This paper presents the results of reliability analysis on the behavior of concrete-filled steel tubes (CFST) under axial compression. A model was developed to analyze the load–strain behavior of CFST using the models steel and concrete materials, taking the confinement effect into consideration. The model was verified by comparing the load–strain behavior obtained from the model with that obtained from experiments available in the literature. Then, the model was used for reliability analyses. Random variables used to investigate included the yield strength of steel, the strength of concrete, and the thickness and diameter of steel tubes. The Monte Carlo simulation technique was performed, and the load–strain relationship curves were obtained. These curves were used for reliability analyses in the strain domain. The results show that the standard deviation and the reliability index varied with the variation of the strain. The variation patterns of the standard deviation and the reliability indices were different when the input random variables were considered individually or simultaneously. When the variables were considered individually, the reliability index was greater than 15. When the variables were considered simultaneously, the reliability index fluctuated around 10.

Keywords: concrete filled steel tube (CFST); load–strain relationship; reliability; axial load.

[https://doi.org/10.31814/stce.huice2023-17\(4V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huice2023-17(4V)-07) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Ống thép nhồi bê tông (CFST) ngày càng được sử dụng phổ biến trong xây dựng vì những ưu điểm của nó. Những ưu điểm của CFST có thể được liệt kê như sau: nhẹ hơn bê tông cốt thép khi chịu

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: cvvui@hcmut.edu.vn (Vui, C. V.)

cùng một tải trọng như nhau, bê tông không bị bong tách vì bê tông bị ngăn cản bởi ống thép, bê tông ngăn cản sự mất ổn định cục bộ cho ống thép, không cần ván khuôn khi thi công, ống thép có thể chịu tải trọng trong quá trình đổ bê tông, hiệu ứng kháng nở hông làm cho cường độ và độ dẻo của bê tông tăng lên.

Có rất nhiều nghiên cứu dành cho các khía cạnh khác nhau của CFST, ví dụ, dạng phá hoại [1, 2], độ dẻo và độ bền [3–5], mối quan hệ tải trọng–biến dạng [6], năng lượng hấp thụ [5]. Các loại tải trọng khác nhau đã được sử dụng để nghiên cứu ứng xử của CFST: tải tĩnh [2, 6, 7], tải theo chu kỳ [3, 5, 8, 9], tải va đập [4, 10, 11], tải cơ và nhiệt [12, 13].

Ứng xử của CFST tròn chịu tải dọc trục đã thu hút nhiều nhà nghiên cứu. Yang và Han [14] đã nghiên cứu ứng xử của CFST bê tông thường và bê tông tái chế (RACFST) và nhận thấy rằng độ bền và độ dẻo của cột RACFST thấp hơn một ít so với cột CFST bê tông thường. Thayalan và cs. [15] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số khác nhau đến ứng xử của cột CFST chịu tải trọng lặp và tải đơn. Kết quả chỉ ra rằng độ bền của cột CFST chịu tải trọng lặp lại giảm tới 16% so với khi chịu tải đơn.

Skalomenos và cs. [16] đã thực nghiệm ứng xử của các cột CFST sử dụng thép cường độ cao. Bảy cột CFST vuông và tròn đã được thí nghiệm. Kết quả chỉ ra rằng, so với các cột đối chứng được làm bằng thép thông thường, các cột CFST bằng thép cường độ cao thể hiện độ bền và khả năng biến dạng lớn hơn, đồng thời khả năng chống mất ổn định cục bộ cao hơn. Ngoài ra, một mô hình phân tích đơn giản đã được phát triển và được kiểm chứng bằng cách so sánh với các kết quả thực nghiệm. Wang và cs. [17] nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử dính kết giữa ống thép và bê tông của ống CFST bằng các thí nghiệm đẩy (push out test) bằng thép tấm-bê tông (SPC) và ống thép nhồi bê tông (CFST). Cơ chế liên kết của mẫu CFST được giải thích định lượng bằng cách phân tích toàn bộ lịch sử phát triển của các thành phần kết dính hóa học, liên kết vi mô, và ma sát. Một mô hình quan hệ độ dính kết–trượt có xét tới ý nghĩa vật lý và độ chính xác được đề xuất. Li và cs. [18] nghiên cứu thực nghiệm về đặc tính chịu nén của cột CFST với sự ăn mòn cục bộ. Đối với các cột CFST nằm trong nước, tốc độ ăn mòn của khu vực gần mặt nước cao hơn đáng kể so với các phần khác ở trên và dưới mặt nước, điều này dẫn đến ăn mòn cục bộ trong ống thép. Kết quả kiểm tra cho thấy, nguyên nhân hư hỏng là sự mất ổn định cục bộ ra ngoài của ống thép và bê tông bị nén vỡ tại nơi gần vị trí bị ăn mòn. Độ bền và độ cứng của trục bị ảnh hưởng bởi cả tỷ lệ ăn mòn theo chiều dày và tỷ lệ ăn mòn theo chiều cao, trong đó ảnh hưởng bởi tỷ lệ ăn mòn chiều dày chiếm ưu thế. Với việc xem xét ảnh hưởng của các mức độ ăn mòn khác nhau, một phương pháp dự đoán cường độ chịu nén dọc trục tối đa của cột CFST với sự ăn mòn cục bộ được đề xuất.

Zhu và cs. [19] nghiên cứu mô hình phân tích cho ống thép tròn nhồi bê tông cường độ cao chịu nén. Ứng xử nở hông của CFST tròn và các mô hình biến dạng nở hông–biến dạng dọc trục được đánh giá. Các mô hình này được đánh giá bằng các so sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm. Kết quả đánh giá cho thấy những hạn chế của các mô hình biến dạng dọc trục đã có, đặc biệt là ống CFST nhồi bê tông cường độ cao. Sau đó, một mô hình biến dạng dọc trục được cải tiến cho cả lõi bê tông cường độ cao và cường độ thường trong CFST được đề xuất để xét chính xác hơn ứng xử tương tác của ống thép và bê tông. Một mô hình phân tích của CFST với lõi bê tông mặt cắt tròn được đề xuất để mô phỏng sự phát triển của ứng suất giới hạn trong CFST. Mô hình phân tích đề xuất có thể dự đoán tốt khả năng chịu tải, đường cong quan hệ tải trọng–biến dạng, quan hệ biến dạng dọc trục–biến dạng bên của CFST với bê tông thường và bê tông cường độ cao. Chang và cs. [20] nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm CFST chịu nén dọc trục với các mức độ kháng nở hông khác nhau. Thí nghiệm được thực hiện trên 14 mẫu, bao gồm cột bê tông và cột ống nhựa PVC và mica nhồi bê tông, ống CFST chịu nén dọc trục. Các đường cong quan hệ tải trọng–biến dạng dọc trục và quá trình hư hỏng của cột

được phân tích. Kết quả chỉ ra rằng cường độ nén dọc trục cực hạn của các ống CFST tăng lên khi mức độ kháng nở hông tăng lên. Đường cong quan hệ tải trọng–biến dạng dọc trục của ống CFST có mức độ kháng nở hông cao có thể được chia thành năm giai đoạn. Khả năng chịu tải của cột CFST ứng với sự chảy dẻo của thép được phát triển dựa trên lý thuyết chảy dẻo. Các công thức lý thuyết về khả năng chịu tải cực hạn của cột CFST được trình bày và các kết quả được so sánh với các kết quả tính theo các tiêu chuẩn và kết quả thực nghiệm. Ahmed và cs. [21] phân tích phi tuyến tính của các cột CFST ngắn làm bằng thép không gỉ có mặt cắt ngang hình elip chịu nén dọc trục. Một mô hình toán học để khảo sát khả năng chịu nén dọc trục của các cột ngắn CFST loại này. Các mô hình vật liệu của thép không gỉ và bê tông kháng nở hông được sử dụng kết hợp trong mô hình số để khảo sát khả năng chịu nén dọc trục của chúng. Kết quả kiểm tra độc lập cho thấy độ chính xác của các dự đoán từ mô hình toán học.

Song và Xiang [22] phân tích phần tử hữu hạn (FEA) để nghiên cứu ứng xử của cột CFST với bê tông cường độ cao (UHSC) chịu tải dọc trục. Một mô hình ứng suất–biến dạng mới của UHSC kháng nở hông bởi ống thép tròn được đề xuất bằng cách hiệu chỉnh lại mô hình bê tông cường độ thường đã có. So sánh giữa các dự đoán của mô hình FEA và kết quả thử nghiệm chỉ ra rằng mô hình FEA đề xuất có thể mô phỏng chính xác đặc tính giòn của UHSC trong các cột CFST tròn. Dựa trên mô hình FEA được đề xuất, ứng xử của cột tròn ống thép UHSC chịu tải dọc trục, bao gồm mối quan hệ giữa tải trọng và biến dạng, sự phát triển ứng suất, hiệu ứng kháng nở hông và thiết kế tối ưu hóa sơ bộ, được phân tích và thảo luận. Cuối cùng, một nghiên cứu tham số được thực hiện để xét ảnh hưởng của các thông số chính đến đường cong tải trọng–biến dạng và chỉ số sử dụng cường độ của cột tròn ống thép UHSC chịu tải dọc trục trong toàn bộ quá trình gia tải. Wang và cs. [23] đã nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của kích thước đến khả năng chịu tải của CFST với các tỷ lệ đường kính ngoài và độ dày (D/t) khác nhau khi chịu tải trọng nén dọc trục. Kết quả cho thấy rằng sự gia tăng của tỷ lệ D/t làm giảm ứng suất cực đại lớn nhất. Khi tỷ số D/t tăng lên, ứng suất và hiệu ứng kháng nở hông giảm, trong khi ứng suất dọc của ống thép tăng lên. Ouyang và Kwan [24] đã phát triển một mô hình mới để thực hiện phân tích phần tử hữu hạn (FE) của các cột CFST vuông dưới tải dọc trục. Mô hình xem xét đến biến dạng ngang, ứng xử của bê tông kháng nở hông, ứng xử dẻo của thép, và tương tác giữa bê tông và thép. Kết quả mà mô hình thu được khá phù hợp với kết quả thí nghiệm. Kết quả cũng chỉ ra rằng việc tăng bán kính góc mang lại khả năng kháng nở hông tốt hơn. Alrebeh và Ekmekyapar [25] đã nghiên cứu ứng xử của cột CFST với sườn cứng bên ngoài và bên trong chịu tải trọng dọc trục. Mười tám cột đã được thử nghiệm và kết quả cho thấy rằng sự kết hợp của cột CFST với sườn cứng bên ngoài và bên trong đã làm tăng đáng kể độ dẻo và khả năng chịu tải so với các cột của mẫu đối chứng. Cao và cs. [26] đã nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của ống CFST khi tải dọc trục theo chu kỳ. Các thí nghiệm được thực hiện cho 42 mẫu CFST cho đến khi mẫu bị phá hoại. Kết quả cho thấy rằng tải theo chu kỳ làm giảm nhẹ khả năng chịu tải nhưng làm tăng đáng kể biến dạng cực hạn. Cao [27] đã nghiên cứu thực nghiệm đặc trưng cơ học của CFST sử dụng bê tông tái chế (RACFST) dưới tác dụng của tải dọc trục. Tổng số 24 mẫu RACFST và 12 mẫu CFST bê tông thường được thí nghiệm. Kết quả chỉ ra rằng RACFST có đặc tính cơ học thấp hơn một ít, nhưng mức độ suy giảm thấp hơn khi chúng làm việc trong miền sau ứng suất cực đại.

Có một số lượng lớn các nghiên cứu về ứng xử và tính chất cơ học của CFST. Tuy nhiên, độ tin cậy của CFST dường như ít được nghiên cứu và do đó cần được nghiên cứu thêm. Nghiên cứu này phân tích độ tin cậy của các tham số khác nhau đến ứng xử của CFST dưới tác dụng của tải dọc trục. Kỹ thuật mô phỏng Monte Carlo được sử dụng để mô phỏng ứng xử của CFST dưới tác dụng của tải dọc trục dựa trên sự thay đổi của các biến ngẫu nhiên là các tham số chi phối khả năng chịu tải dọc trục của CFST. Kết quả mô phỏng được phân tích để thấy được vai trò khác nhau của các tham số đến

ứng xử của CFST dưới tác dụng của tải dọc trục.

2. Phân tích ứng xử lực–biến dạng của CFST

2.1. Mô hình ứng suất–biến dạng của thép

Mô hình ứng suất–biến dạng song tuyến tính của thép đã được sử dụng trong Eurocode 2 [28]. Do đó, mô hình này được chọn để sử dụng trong bài báo này. Mô đun đàn hồi của thép là $E_s = 2 \times 10^5$ MPa. Giới hạn chảy, f_y , và giới hạn bền, f_u , của thép được sử dụng từ các kết quả thí nghiệm hoặc có thể được xác định theo biểu thức (1) hoặc (2) [29]. Biến dạng bền được lấy là $\varepsilon_u = 0,025$ theo khuyến nghị của Eurocode 2 [28].

$$f_u = \left(1,6 - 2 \times 10^{-3} (f_y - 200)\right) f_y \quad \text{nếu } 200 \text{ MPa} \leq f_y \leq 400 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$f_u = \left(1,2 - 3,75 \times 10^{-4} (f_y - 400)\right) f_y \quad \text{nếu } 400 \text{ MPa} < f_y \leq 800 \text{ MPa} \quad (2)$$

2.2. Mô hình ứng suất–biến dạng của bê tông

Khi không bị kháng nở hông, quan hệ ứng suất–biến dạng của bê tông có thể được mô tả bởi mô hình Hognestad [30]. Tuy nhiên, hiệu ứng kháng nở hông đã làm tăng đáng kể khả năng chịu nén của bê tông. Ví dụ như mô hình Park và cs. [31] có xét đến hiệu ứng kháng nở hông của bê tông bởi cốt đai. So với [31], mô hình Mander và cs. [32] phù hợp cho kháng nở hông đều của ống thép nhồi bê tông vì ứng suất kháng nở hông phân bố đều và vì vậy khả năng chịu nén của bê tông tăng. Mô hình này đã được chứng minh là phù hợp cho CFST [3], do đó, được sử dụng trong bài báo này và được biểu diễn bởi phương trình (3). Các tham số của phương trình (3) được xác định theo các phương trình (4)–(10), trong đó, f'_{cc} là cường độ chịu nén của bê tông kháng nở hông, ε_c là biến dạng của bê tông chịu nén dọc trục, f'_{co} là cường độ của bê tông không kháng nở hông, $\varepsilon_{co} = 0,002$ là biến dạng ứng với ứng suất lớn nhất của bê tông không kháng nở hông, E_c là mô đun đàn hồi của bê tông, E_{sec} là mô đun cát tuyến (secant modulus) của bê tông, f_l là ứng suất kháng nở hông, f_{yh} là cường độ chảy của cốt thép kháng nở hông, $k_e = \frac{A_e}{A_{cc}}$ là tỷ số giữa diện tích có hiệu quả kháng nở hông và diện tích bê tông, A_e diện tích có hiệu quả kháng nở hông, A_{cc} diện tích bê tông. Đối với ống CFST: $A_e = A_{cc}$, vì vậy, $k_e = 1$ và ứng suất kháng nở hông được xác định theo biểu thức (11). Đồng thời, cường độ chịu nén của bê tông kháng nở hông được xác định bằng biểu thức (12).

$$f_c = \frac{f'_c x r}{r - 1 + x^r} \quad (3)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (6)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad [33] \quad (7)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (8)$$

$$f'_l = k_e f_l \quad (9)$$

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_s f_{yh} \quad (10)$$

$$f'_l = k_e f_l = \frac{1}{2} \rho_s f_{yh} \quad (11)$$

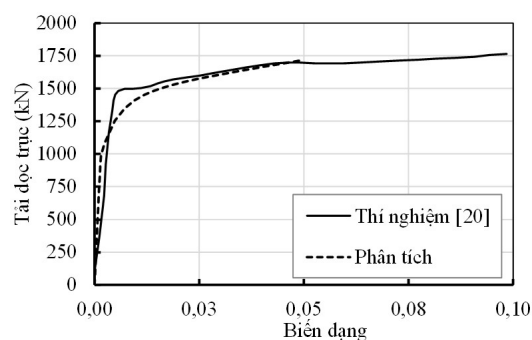
$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1,254 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (12)$$

2.3. Phân tích quan hệ tải trọng–biến dạng và kiểm chứng kết quả phân tích

Tải trọng của CFST được tính bởi phương trình (13) [20]. Trong biểu thức này, D và t lần lượt là đường kính ngoài và độ dày của ống thép; A_c và A_s lần lượt là diện tích mặt cắt ngang của bê tông và ống thép; f_y là giới hạn chảy của ống thép; và f'_c là cường độ chịu nén của bê tông.

$$N = A_s f_y + A_c f'_c \quad (13)$$

Mẫu CFST2-5-2 thí nghiệm bởi Chang và cs. [20] được chọn để mô phỏng. Mẫu có đường kính ngoài khá lớn $D = 168$ mm, bề dày ống thép $t = 5,06$ mm. Chiều dài ống là $L = 588$ mm. Cường độ chảy dẻo của thép là $f_y = 291,31$ MPa. Cường độ chịu nén của bê tông là $f'_c = 34,13$ MPa. Để có được đường cong tải trọng–biến dạng từ phân tích, mô hình ứng suất–biến dạng của bê tông và thép được xác định. Miền biến dạng được chia thành nhiều khoảng nhỏ. Ứng với mỗi giá trị biến dạng, ứng suất của bê tông và của thép được xác định từ các mô hình ứng suất–biến dạng nêu trên. Từ đó, tải trọng được xác định theo phương trình (13). Quá trình tính toán trên được thực hiện cho toàn miền biến dạng. Kết quả tính toán được vẽ thành đường cong quan hệ tải trọng–biến dạng. Hình 1 trình bày kết quả phân tích theo mô hình phân tích nêu trên và được so sánh với kết quả thí nghiệm của Chang và cs. [20]. Kết quả cho thấy rằng, mặc dù có một số chi tiết khác nhau, kết quả phân tích xấp xỉ tốt với kết quả thí nghiệm.



Hình 1. Kết quả phân tích được so sánh với kết quả thí nghiệm

3. Phân tích độ tin cậy

Có bốn tham số trong các công thức để xác định khả năng chịu tải dọc trục của CFST tròn được chỉ ra ở Bảng 1. Bốn tham số này được sử dụng làm biến ngẫu nhiên để phân tích độ tin cậy. Các biến ngẫu nhiên được giả định tuân theo các phân phối chuẩn. Các tham số phân phối như giá trị trung bình và hệ số biến thiên (COV) được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số được xem là biến số

TT	Tham số	Trung bình	COV	Tài liệu tham khảo
1	Giới hạn chảy của thép f_y	235 MPa	0,05	[34]
2	Cường độ chịu nén của bê tông f'_c	30 MPa	0,12	[34]
3	Đường kính D của ống CFST	300 mm	0,04	[34]
4	Độ dày của ống thép t	5 mm	0,04	[34]

Kỹ thuật mô phỏng Monte Carlo được sử dụng trong bài báo này. Trình tự mô phỏng như sau:
Giai đoạn 1:

1. Phát sinh số f_{yi}, f'_{ci}, t_i , và D_i cho các biến bằng cách sử dụng các phân phối và tham số phân bố như đã nêu trên.

2. Dựa vào các giá trị phát sinh trong bước 1, các mô hình ứng suất–biến dạng của bê tông và thép được xác định.

3. Dựa vào các mô hình ứng suất–biến dạng trong bước 2, ứng xử tải trọng–biến dạng của ống CFST được xác định.

4. Lặp lại bước 1 cho đến khi có được n đường cong tải trọng–biến dạng.

Giai đoạn 2:

1. Chia miền biến dạng thành N khoảng.

2. Tại khoảng giá trị biến dạng ε_i , n giá trị tải trọng N được xác định từ n đường cong tải trọng–biến dạng.

3. Từ n giá trị N , tính giá trị trung bình bằng biểu thức (14), trong đó $x_i = N_i$ là tải trọng thu được từ đường cong thứ i :

$$\mu_X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

4. Tính độ lệch chuẩn bằng biểu thức (15).

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - n(\bar{x})^2}{n-1}} \quad (15)$$

5. Tính chỉ số độ tin cậy bằng biểu thức (16).

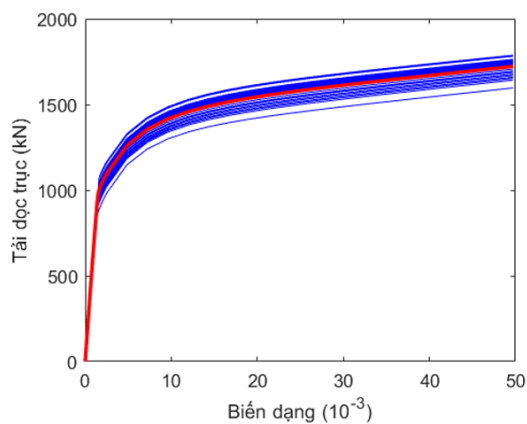
$$\beta = \frac{\mu_X}{\sigma_X} \quad (16)$$

Trong số các bước trên, bước 1 của giai đoạn 1 được mô tả chi tiết như sau. Để phát sinh giá trị cho biến ngẫu nhiên, các giá trị u_1, u_2, \dots, u_n có phân phối đều (uniform distribution) được phát sinh. Các giá trị này lớn hơn hoặc bằng 0 và nhỏ hơn hoặc bằng 1. Khi đó, tương ứng với một giá trị u_i , một giá trị của biến ngẫu nhiên nhận được từ phương trình (17), trong đó hàm Φ^{-1} là hàm nghịch đảo của phân phối chuẩn chuẩn hóa (standard normal distribution). Độ lệch chuẩn của các biến được tính bằng tích số của giá trị trung bình và COV đã được trình bày trong Bảng 1. Giá trị trung bình và độ lệch chuẩn được sử dụng cho việc phát sinh các biến ngẫu nhiên theo phương trình (17).

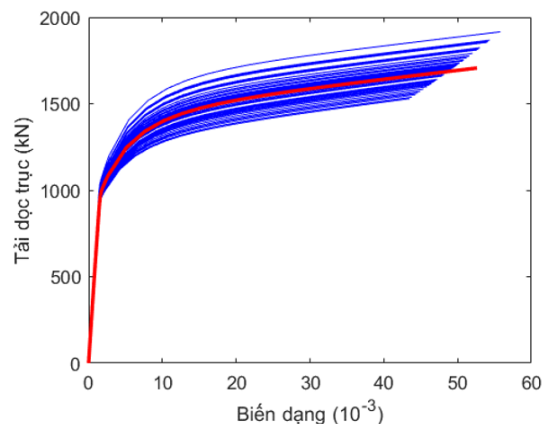
$$z_i = \Phi^{-1}(u_i) \quad (17)$$

4. Kết quả phân tích độ tin cậy và thảo luận

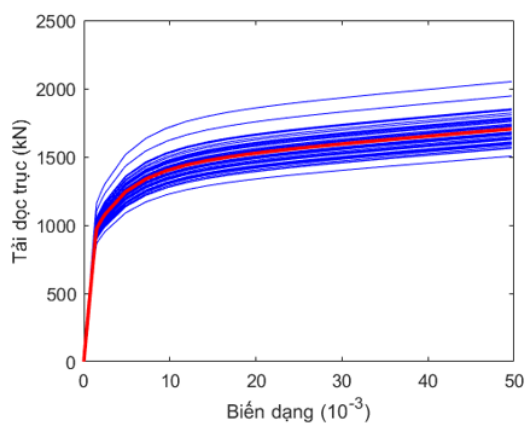
Số mô phỏng được chọn cho mỗi biến trong bài báo này là $n = 50$. Như vậy có tổng cộng 200 mô phỏng khi xét riêng từng biến và có 200 mô phỏng khi toàn bộ các biến được xem xét đồng thời. Hình 2(a)–(d) trình bày kết quả phân tích ứng xử lực–biến dạng của ống CFST khi các biến lần lượt được xem xét trong khi các biến còn lại được xem là hằng số. Hình 2(e) trình bày kết quả phân tích ứng xử lực–biến dạng của ống CFST khi toàn bộ các biến được xem xét đồng thời, trong đó, bốn tham số đều được xem là các biến ngẫu nhiên với các tham số phân phối ở Bảng 1. Sự kết hợp 4 giá trị của bốn biến này cũng được thực hiện ngẫu nhiên và được thay vào biểu thức (13) để tính sức chịu tải. Đường cong trung bình cũng được tính toán và thể hiện bởi đường màu đỏ trong các hình này. Kết quả trên Hình 2 cho thấy khi toàn bộ các biến được xem xét, đường cong lực–biến dạng có độ lệch



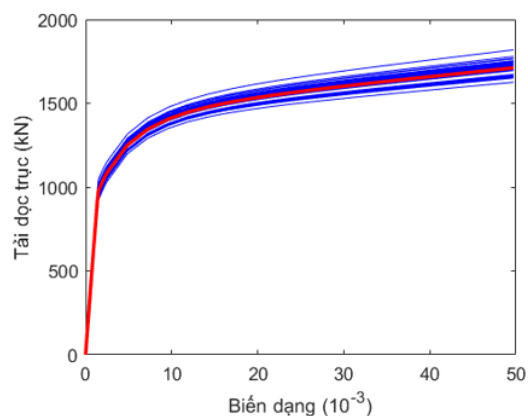
(a) Khi biến giới hạn chảy của thép f_y được xét



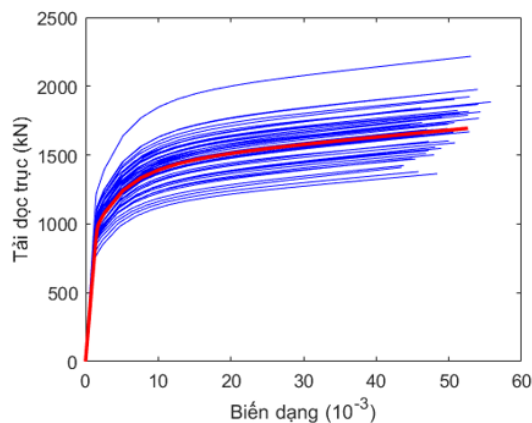
(b) Khi biến cường độ chịu nén của bê tông f'_c được xét



(c) Khi biến đường kính D của ống CFST được xét



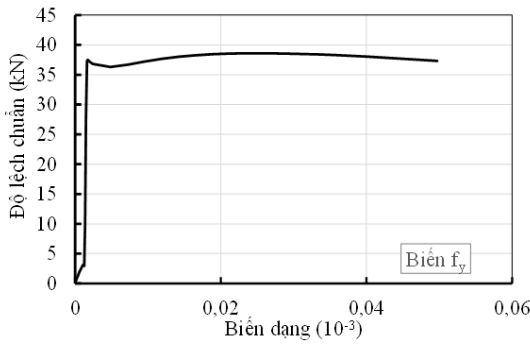
(d) Khi biến độ dày của ống thép t được xét



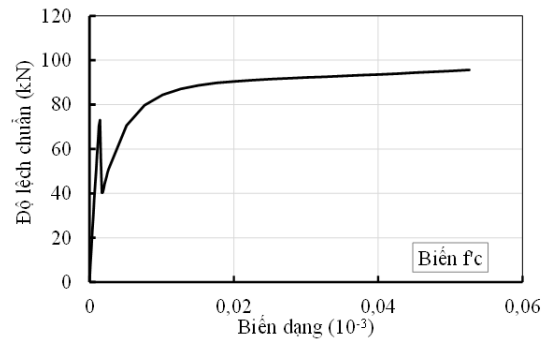
(e) Khi các biến đồng thời được xét

Hình 2. Quan hệ tải trọng–biến dạng của ống CFST dưới tác dụng của tải dọc trục

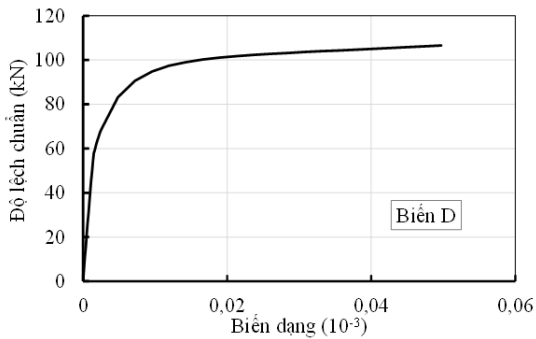
chuẩn lớn nhất (Hình 2(e)). Biến cường độ chịu nén của bê tông và đường kính ống thép cho ra độ lệch chuẩn của đường cong lực–biến dạng trung bình (Hình 2(b)–(c)). Trong khi đó, biến bề dày của ống thép và cường độ của thép ít có ảnh hưởng đến đường cong ứng xử lực–biến dạng (Hình 2(a)–(d)).



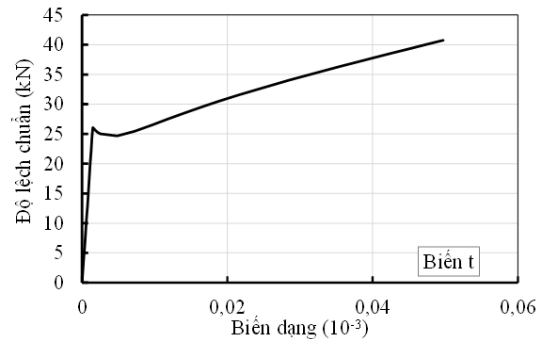
(a) Khi biến giới hạn chảy của thép f_y được xét



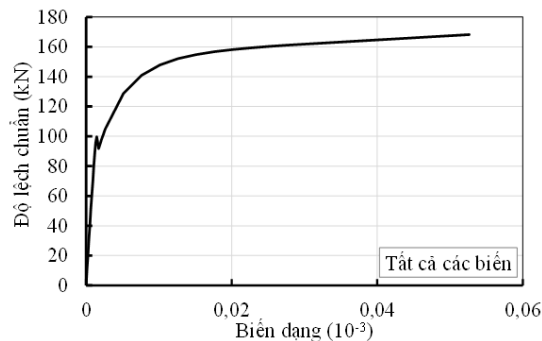
(b) Khi biến cường độ chịu nén của bê tông f'_c được xét



(c) Khi biến đường kính D của ống CFST được xét



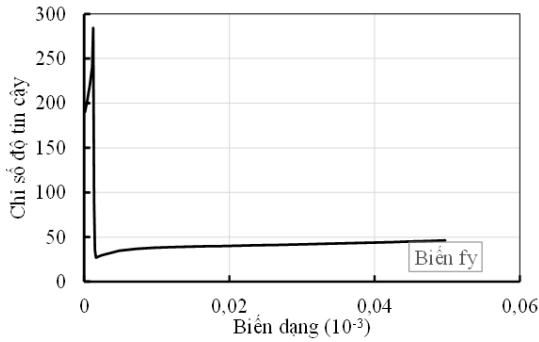
(d) Khi biến độ dày của ống thép t được xét



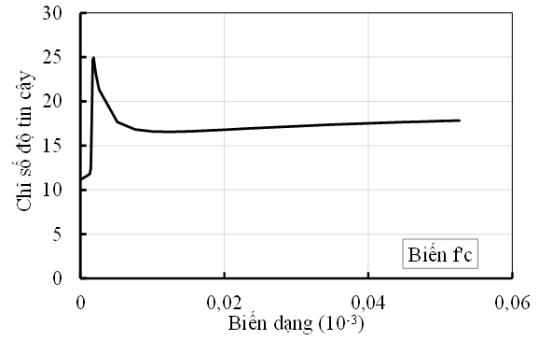
(e) Khi các biến đồng thời được xét

Hình 3. Độ lệch chuẩn

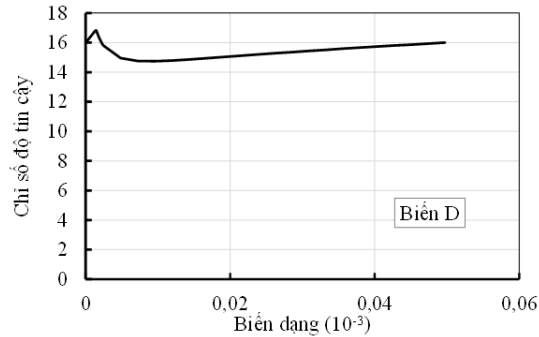
Toàn miền biến dạng được chia thành các khoảng nhỏ. Ứng với một giá trị biến dạng, 50 trị số của lực được xác định từ 50 đường cong mô phỏng. 50 giá trị lực này được sử dụng để phân tích độ tin cậy ứng với giá trị biến dạng đó. Cụ thể, 50 giá trị này được sử dụng để tính giá trị trung bình và độ lệch chuẩn. Từ đó, chỉ số độ tin cậy của lực ứng với biến dạng đó được tính toán. Quá trình tính toán này thực hiện cho toàn miền biến dạng. Hình 3 trình bày sự thay đổi của độ lệch chuẩn của lực trên toàn miền biến dạng. Nhìn chung, dạng đồ thị của các độ lệch chuẩn là khác nhau. Cụ thể, độ lệch chuẩn tăng dần trong miền đàn hồi, giảm nhẹ khi thép bị chảy dẻo, rồi sau đó có xu hướng tăng. Độ lệch chuẩn do biến ngẫu nhiên f_y và bề dày t là nhỏ nhất ($\sim 25\text{--}37$ kN), tiếp theo là độ lệch chuẩn do biến cường độ bê tông và đường kính ống thép ($90\text{--}105$ kN). Khi các biến đồng thời được xem xét thì độ lệch chuẩn là cao nhất (~ 160 kN).



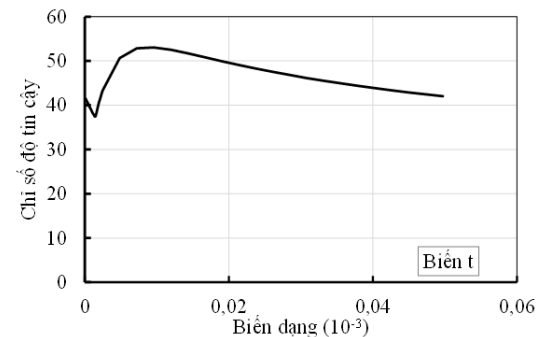
(a) Khi biến giới hạn chảy của thép f_y được xét



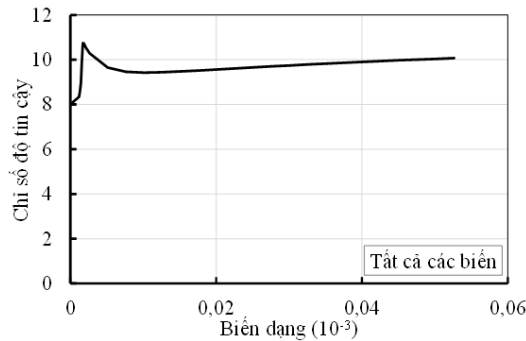
(b) Khi biến cường độ chịu nén của bê tông f'_c được xét



(c) Khi biến đường kính D của ống CFST được xét



(d) Khi biến độ dày của ống thép t được xét



(e) Khi các biến đồng thời được xét

Hình 4. Độ tin cậy

Độ tin cậy được xác định bởi tỷ số giữa giá trị trung bình (thể hiện bởi đường cong quan hệ giữa tải trọng–biến dạng trình bày trên Hình 2) và độ lệch chuẩn (trình bày trên Hình 3). Kết quả chỉ số độ tin cậy cho các trường hợp biến xem xét đồng thời và riêng biệt được trình bày trên Hình 4. Khi chỉ có cường độ f_y của thép được xét, độ tin cậy khá cao khi biến dạng nhỏ. Nhưng khi biến dạng tăng, độ tin cậy biến thiên từ 30–50 như thể hiện trên Hình 4(a). Khoảng tin cậy này cũng tương tự như trường hợp khi chỉ có biến bề dày t của ống thép được xem xét, như trình bày trên Hình 4(d). Khi cường độ của bê tông f'_c hoặc đường kính D được xét là biến ngẫu nhiên, độ tin cậy dao động trong khoảng 15–18, nhỏ hơn nhiều so với các trường hợp trước. Khi các biến đồng thời được xét, độ tin cậy khá thấp, chỉ dao động quanh giá trị khoảng 10. Chỉ số độ tin cậy thấp nhất trong trường hợp các biến đồng thời được xem xét có thể được giải thích bằng sự đóng góp từ các biến riêng biệt. Như đã

nêu bên trên, khảo sát độ tin cậy do các biến riêng biệt gây ra là để xem xét ảnh hưởng của duy nhất biến đó đối với độ tin cậy. Trong khi đó, khảo sát độ tin cậy khi các biến đồng thời được xem xét là trường hợp sát với thực tế hơn.

5. Kết luận

Bài báo này trình bày kết quả phân tích độ tin cậy về ứng xử lực–biến dạng của ống CFST dưới tác dụng của tải dọc trục. Mô hình phân tích ứng xử lực–biến dạng của ống thép được xây dựng dựa trên các mô hình của vật liệu có xét đến ảnh hưởng kháng nở hông của ống thép cho bê tông. Mô hình phân tích này được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả ứng xử lực–biến dạng thu được từ phân tích với kết quả ứng xử lực–biến dạng thu được từ thực nghiệm và đã được công bố. Sau đó, mô hình được sử dụng để phân tích độ tin cậy. Các biến được xem xét bao gồm cường độ chảy f_y của thép, cường độ nén f'_c của bê tông, đường kính D của CFST, và độ dày t của ống thép. Các mô phỏng Monte Carlo được thực hiện cho bốn biến riêng biệt và cho bốn biến đồng thời. Chỉ số độ tin cậy đã được tính toán và phân tích. Kết quả cho thấy rằng độ lệch chuẩn và chỉ số độ tin cậy biến thiên ứng với sự biến thiên của biến dạng. Dạng biến thiên của độ lệch chuẩn và chỉ số độ tin cậy thay đổi khác nhau khi các biến đầu vào được xét riêng biệt hoặc xét đồng thời. Khi các biến được xem xét riêng biệt, chỉ số độ tin cậy lớn hơn 15. Khi các biến đồng thời được xét, chỉ số độ tin cậy dao động quanh giá trị 10.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số T-KTXD-2022-05.

Tài liệu tham khảo

- [1] Xiao, Y., Shan, J., Zheng, Q., Chen, B., Shen, Y. (2009). [Experimental studies on concrete filled steel tubes under high strain rate loading](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10):569–577.
- [2] Dundu, M. (2012). [Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns](#). *Thin-Walled Structures*, 56:62–70.
- [3] Abed, F., AlHamaydeh, M., Abdalla, S. (2013). [Experimental and numerical investigations of the compressive behavior of concrete filled steel tubes \(CFSTs\)](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 80: 429–439.
- [4] Han, L.-H., Hou, C.-C., Zhao, X.-L., Rasmussen, K. J. R. (2014). [Behaviour of high-strength concrete filled steel tubes under transverse impact loading](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 92:25–39.
- [5] Elremaily, A., Aziznamini, A. (2002). [Behavior and strength of circular concrete-filled tube columns](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 58(12):1567–1591.
- [6] Lee, S.-H., Uy, B., Kim, S.-H., Choi, Y.-H., Choi, S.-M. (2011). [Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular \(CFST\) column under eccentric loading](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 67(1):1–13.
- [7] Le, K., Cao, V. (2021). [Numerical study of circular concrete filled steel tubes subjected to pure torsion](#). *Buildings*, 11(9):397.
- [8] Cao, V. V., Vo, C. T., Nguyen, P. T., Ashraf, M. (2021). [Experimental behaviour of circular concrete filled steel tube columns under lateral cyclic loading](#). *Earthquakes and Structures*, 21(5):445–460.
- [9] Phan, H. D. (2021). [Numerical analysis of seismic behavior of square concrete filled steel tubular columns](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(2):127–140.
- [10] Zhang, F., Wu, C., Wang, H., Zhou, Y. (2015). [Numerical simulation of concrete filled steel tube columns against BLAST loads](#). *Thin-Walled Structures*, 92:82–92.
- [11] Kang, L., Fan, W., Liu, B., Liu, Y. (2021). [Numerically efficient analysis of concrete-filled steel tubular columns under lateral impact loading](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 179:106564.
- [12] Yin, J., Zha, X.-x., Li, L.-y. (2006). [Fire resistance of axially loaded concrete filled steel tube columns](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 62(7):723–729.

- [13] Meng, F.-Q., Zhu, M.-C., Clifton, G. C., Ukanwa, K. U., Lim, J. B. P. (2020). [Performance of square steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns subject to non-uniform fire](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 166:105909.
- [14] Yang, Y.-F., Han, L.-H. (2006). [Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 62(12):1310–1324.
- [15] Thayalan, P., Aly, T., Patnaikuni, I. (2009). [Behaviour of concrete-filled steel tubes under static and variable repeated loading](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4):900–908.
- [16] Skalomenos, K. A., Hayashi, K., Nishi, R., Inamasu, H., Nakashima, M. (2016). [Experimental behavior of concrete-filled steel tube columns using ultrahigh-strength steel](#). *Journal of Structural Engineering*, 142(9).
- [17] Wang, F.-C., Xie, W.-Q., Li, B., Han, L.-H. (2022). [Experimental study and design of bond behavior in concrete-filled steel tubes \(CFST\)](#). *Engineering Structures*, 268:114750.
- [18] Li, M., Yao, L., He, L., Mao, X., Li, G. (2022). [Experimental study on the compressive behavior of concrete filled steel tubular columns with regional corrosion](#). *Structures*, 35:882–892.
- [19] Zhu, J.-Y., Chen, J., Chan, T.-M. (2021). [Analytical model for circular high strength concrete filled steel tubes under compression](#). *Engineering Structures*, 244:112720.
- [20] Chang, Y., Chen, W., Xiao, Q., Rong, E., Peng, L. (2021). [Theoretical and experimental study on axial compression concrete-filled tubes with different confinements](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 185:106862.
- [21] Ahmed, M., Ci, J., Yan, X.-F., Chen, S. (2021). [Nonlinear analysis of elliptical concrete-filled stainless steel tubular short columns under axial compression](#). *Structures*, 32:1374–1385.
- [22] Song, T.-Y., Xiang, K. (2020). [Performance of axially-loaded concrete-filled steel tubular circular columns using ultra-high strength concrete](#). *Structures*, 24:163–176.
- [23] Wang, W., Ma, H., Li, Z., Tang, Z. (2017). [Size effect in circular concrete-filled steel tubes with different diameter-to-thickness ratios under axial compression](#). *Engineering Structures*, 151:554–567.
- [24] Ouyang, Y., Kwan, A. (2018). [Finite element analysis of square concrete-filled steel tube \(CFST\) columns under axial compressive load](#). *Engineering Structures*, 156:443–459.
- [25] Alrebeh, S. K., Ekmekyapar, T. (2019). [Structural performance of short concrete-filled steel tube columns with external and internal stiffening under axial compression](#). *Structures*, 20:702–716.
- [26] Cao, V. V., Le, Q. D., Nguyen, P. T. (2019). [Experimental behaviour of concrete-filled steel tubes under cyclic axial compression](#). *Advances in Structural Engineering*, 23(1):74–88.
- [27] Van Cao, V. (2019). [Experimental behaviour of recycled aggregate concrete-filled steel tubes under axial loading](#). *International Journal of Civil Engineering*, 17(8):1341–1351.
- [28] CEN (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
- [29] Tao, Z., Wang, Z.-B., Yu, Q. (2013). [Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 89:121–131.
- [30] Hognestad, E. (1951). Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. *Bulletin Series No 399, Urbana: Engineering Experimental Station, The University of Illinois*.
- [31] Park, R., Priestley, M. J. N., Gill, W. D. (1982). [Ductility of square-confined concrete columns](#). *Journal of the Structural Division*, 108(4):929–950.
- [32] Mander, J. B., Priestley, M. J., Park, R. (1988). [Theoretical stress-strain model for confined concrete](#). *Journal of structural engineering*, 114(8):1804–1826.
- [33] ACI (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08) and commentary*. 38800 Country Club Drive, Farmington Hills, MI 48331, U.S.A.: American Concrete Institute.
- [34] Eamon, C. D., Jensen, E. (2012). [Reliability analysis of prestressed concrete beams exposed to fire](#). *Engineering Structures*, 43:69–77.