

ÁP DỤNG ĐƯỜNG CONG VẬT LIỆU FA-STM PHÂN TÍCH PHI TUYẾN KHUNG BÊ TÔNG CỐT THÉP

APPLICATION IN CURVE OF FA-STM MATERIALS TO ANALYZE NONLINEAR OF REINFORCED CONCRETE FRAME

NGUYỄN TRẦN TRUNG^(*) và NGUYỄN PHÚ CƯỜNG^(**)

TÓM TẮT: Nghiên cứu này phản ánh chính xác tính phi tuyến vật liệu của khung không gian bê tông cốt thép bằng phương pháp phi tuyến tĩnh với quan hệ ứng suất - biến dạng bê tông sử dụng mô hình FA-STM (Mô hình tăng cường giai đoạn mềm hóa với góc xoay không đổi) và thép sử dụng mô hình do Sargin đề xuất. Toàn bộ các dữ liệu phân tích sử dụng phần mềm thương mại ETABS version 16.0.

Từ khóa: khung bê tông cốt thép; tải trọng động đất; mô hình phi tuyến vật liệu; phương pháp phổ phản ứng; phân tích phi tuyến tĩnh.

ABSTRACTS: This study accurately reflects the influence of the nonlinear properties of concrete and steel bar used in space reinforced concrete frames structures subjected seismic loading. Nonlinear materials will be analyzed by Static Pushover Analysis Method (SPAM), the relationship between stress and strain of concrete used FA-STM Model (The fixed-angle softened-truss model) and steel bar used Sargin's proposed model. All the data are calculated from the proposed models, using the commercial ETABS version 16.0 software.

Key words: reinforced concrete frames; earthquake load; nonlinear material models; respond spectrum method; nonlinear static procedure.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

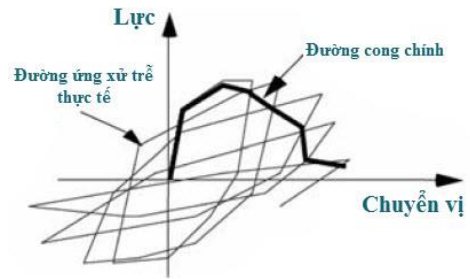
Từ lâu, ứng xử không đàn hồi của hầu hết các kết cấu khi chịu tải trọng động đất đều được tiến hành phân tích phi tuyến dựa trên các bộ dữ liệu đã được chọn lọc chính xác, từ đó có thể cho các ứng xử cụ thể của kết cấu khi bị phân phối bởi chuyển dịch nền do động đất, vấn đề này phụ thuộc vào công cụ phân tích tính toán để giải quyết các bài toán phân tích động phi tuyến,

phương pháp phân tích này thực sự không dễ dàng trong tính toán thực tế. Vì thế, phương pháp được chấp nhận rộng rãi hiện nay trong lĩnh vực kỹ thuật dự đoán địa chấn cho các công trình chịu tải trọng động đất và những thông tin hữu ích của nó mang lại có giá trị tin cậy - phương pháp phân tích phi tuyến tĩnh (Nonlinear Static Procedure-NSP). Mặt khác, phương pháp thực tế sử dụng cho kết quả tốt nhất trong

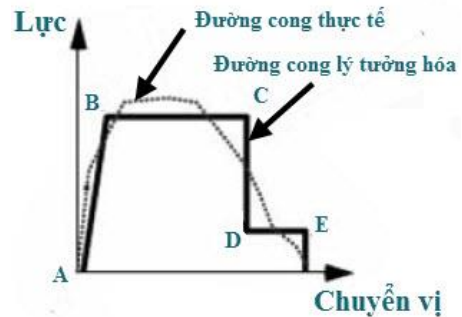
(*) ThS. Trường Đại học Văn Lang, nguyentrantrung@vanlanguni.edu.vn

(**) TS. Trường Đại học Mở, cuong.pn@ou.edu.vn, Mã số: TCKH12-04-2018

việc đánh giá khả năng tiêu tán năng lượng của các hệ thống kết cấu [2] sử dụng phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian, nhưng việc phân tích này rất phức tạp vì nó phụ thuộc vào nhiều điều kiện nội tại của mỗi quốc gia, cho nên trong các tiêu chuẩn [3] và [4] khuyến khích sử dụng phương pháp NSP, quy trình trong phương pháp này dựa trên việc tăng đều tải trọng đã được xác định trước cho đến khi đạt được chuyển vị mong muốn. Quan trọng nhất trong phương pháp NSP là bước mô hình hóa. Trong mô hình, phải xem xét ứng xử phi tuyến của các cấu kiện hệ thống kết cấu bằng khả năng cường độ và khả năng biến dạng. Lý tưởng hóa khớp dẻo là một phương pháp thường được sử dụng trong các mô hình có khả năng ước tính được biến dạng của kết cấu. Ứng xử dẻo thực sự của một cấu kiện bất kỳ khi chịu tác động tải trọng động đất là ứng xử theo chu kỳ sau mỗi lần tăng tải và dỡ tải, các đặc tính về cường độ và độ cứng đều được thể hiện qua đường cong quan hệ. Do việc phân tích NSP tải được áp dụng không theo chu kỳ và tăng dần theo một hướng nhất định, do đó việc đề xuất một số loại mô hình là cần thiết, giúp đánh giá gần đúng ứng xử thực của một cấu kiện bất kỳ trong hệ thống kết cấu. Cũng nên xem xét những ảnh hưởng do suy giảm cường độ và độ cứng. Để đạt được mục đích này, đường cong chính của ứng xử thực đã được lý tưởng hóa thành đường cong thể hiện trong Hình 1. Các thông số kỹ thuật trong đường cong lý tưởng hóa đã được giải thích trong một số tiêu chuẩn và trước các tiêu chuẩn, cụ thể [4].



Hình 1a. Đường cong chính của ứng xử thực



Hình 1b. Đường cong lý tưởng hóa

Trong nghiên cứu này, tính chất phi tuyến của vật liệu bê tông và cốt thép được sử dụng như đã đề xuất [5]. Phương pháp phân tích NSP, sử dụng phần mềm thương mại ETABS version 16.0. Tải trọng ngang tác dụng chính lên công trình chủ yếu là tải trọng động đất, tính toán theo phương pháp phân tích phổ phản ứng [6]. Các kết quả về chuyển vị, độ lệch tầng, mô men và góc xoay trong cột được so sánh với vật liệu khi còn làm việc trong giai đoạn đàn hồi. Kết quả đó giúp phản ánh chính xác khả năng phân tán năng lượng của kết cấu khung bê tông cốt thép chịu tác động của tải trọng động đất với vật liệu bê tông và cốt thép làm việc ngoài miền đàn hồi.

2. PHƯƠNG PHÁP PHI TUYẾN TĨNH

Phân tích tĩnh phi tuyến dựa trên nguyên tắc ứng xử của kết cấu có thể được mô phỏng như hệ một bậc tự do. Dựa trên lý thuyết này, ứng xử của hệ chỉ liên quan đến dao động đầu tiên và hình dạng của nó

không thay đổi trong quá trình phân tích. Mục đích của phân tích phi tuyến tĩnh là đánh giá và dự đoán ứng xử của hệ thống kết cấu bằng cách ước tính khả năng kháng chấn, chuyển vị của công trình dưới tác động động đất được thiết kế và so sánh các yêu cầu khả năng hiện có được chọn. Phân tích phi tuyến tĩnh là phương pháp ước tính giá trị lực cần thiết và chuyển vị tương ứng của nó, bằng cách phân phối lại nội lực trong các cấu kiện của hệ thống kết cấu so với giới hạn đàn hồi của chúng. Thiết lập đường cong quan hệ giữa lực và chuyển vị là một trong những kết quả quan trọng nhất.

2.1. Vật liệu bê tông và cốt thép sử dụng trong mô hình

Nghiên cứu này, mô hình tăng cường giai đoạn mềm hóa của bê tông với góc xoay không đổi (Fixed-Angle Softened-Truss Model), gọi tắt là FA-STM [7] được đề xuất vì những ưu điểm trong phân tích số, cụ thể: 1) Có xét đến ảnh hưởng mềm hóa trong vùng nén của bê tông; 2) Tăng độ cứng trong vùng kéo của bê tông; 3) Có xét đến quan hệ ứng suất – biến dạng của cốt thép đã được phân tán trong bê tông; 4) Đặc biệt là có kể đến hiệu ứng góc xoay do hiện tượng cắt trong bê tông. Mô hình này đã được tính toán theo công thức được trình bày rõ ràng trong hai vùng của bê tông.

Đặc biệt trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng vật liệu theo Tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN) áp dụng cho mô hình FA-STM như sau:

2.1.1. Vùng nén của bê tông

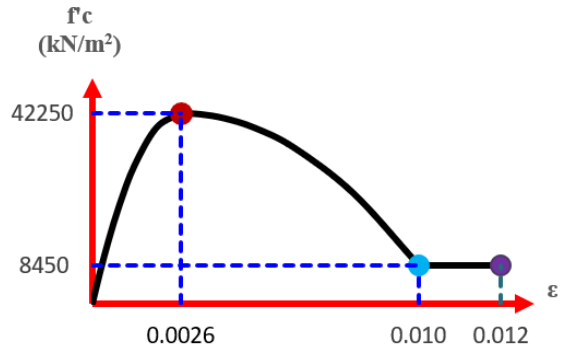
Đường cong quan hệ ứng suất biến dạng trong vùng nén bê tông [8], [9] được tính toán từ công thức (2.1) và (2.2), với

các thông số sử dụng bê tông B30 được thể hiện trong Hình 2..

$$\sigma_2 = \zeta f'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\zeta \varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\zeta \varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_2 / \zeta \varepsilon_0 \leq 1 \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \zeta f'_c \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_2 / \zeta \varepsilon_0 - 1}{4 / \zeta - 1} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_2 / \zeta \varepsilon_0 > 1 \quad (2)$$

Trong đó: f'_c là cường độ nén đặc trưng của bê tông đã được quy đổi phù hợp với TCVN [1]; ε_0 biến dạng tương ứng với cường độ nén lớn nhất, $\varepsilon_0 = 0.002$; ζ hệ số mềm hóa; hệ số 4 trong công thức (2.2) thay thế cho hệ số 2 trong mô hình FA-STM trước đây trong các nghiên cứu [8], [10], [11].



Hình 2. Quan hệ $\sigma - \varepsilon$ vùng nén của bê tông trong mô hình FA-STM với đặc trưng cơ lý của bê tông B30 của TCVN

Hệ số mềm hóa ζ được xác định theo công thức (2.3), (2.4)

$$\zeta = \frac{5.8}{\sqrt{f'_c}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{400\varepsilon_1}{\eta'}}} \leq 0.9 \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{\rho_y f_{yy} - \sigma_y}{\rho_x f_{xy} - \sigma_x} \quad (2.4)$$

Trong đó: f'_c được tính toán với thứ nguyên (MPa); còn ρ_x, ρ_y hệ số cốt thép theo phương x, y; f_{xx}, f_{xy} ứng suất chảy dẻo của cốt thép theo phương x, y. Ký hiệu

η' trong công thức (2.3) được thể hiện thông qua hệ số η trong công thức (2.4) và được giới hạn trong khoảng $(0.2 \div 1)$, giá trị ứng suất tối thiểu trong đường cong quan hệ của nhánh giảm dần công thức (2.2) sẽ bằng $0.2\zeta f'_c$.

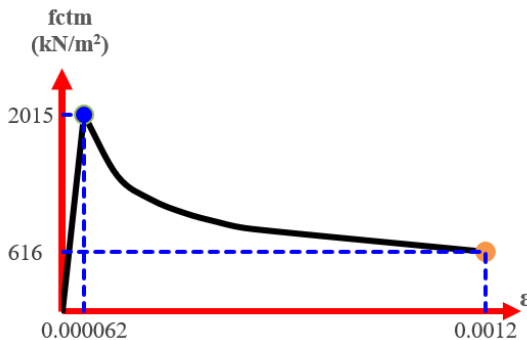
2.1.2. Vùng kéo của bê tông

Đường cong quan hệ $\sigma - \varepsilon$ trong phần kéo của bê tông [8] đến [12] được thể hiện trong Hình 3 với đặc trưng cơ lý của bê tông có cấp độ bền B30 theo TCVN, với nhánh tăng và nhánh giảm được tính toán từ công thức (2.5), (2.6).

$$\sigma_1 = E_c \varepsilon_1 \quad \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr} \quad (2.5)$$

$$\sigma_1 = f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_1} \right)^{0.4} \quad \varepsilon_1 > \varepsilon_{cr} \quad (2.6)$$

Với E_c mô đun đàn hồi của bê tông, f_{cr} ứng suất nứt của bê tông và ε_{cr} biến dạng tương ứng với ứng suất f_{cr} .



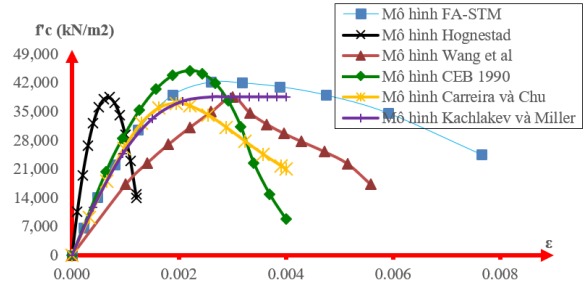
Hình 3. Quan hệ $\sigma - \varepsilon$ vùng kéo của bê tông trong FA-STM với đặc trưng cơ lý của bê tông B30 theo TCVN

2.1.3. Bê tông trong vùng cắt

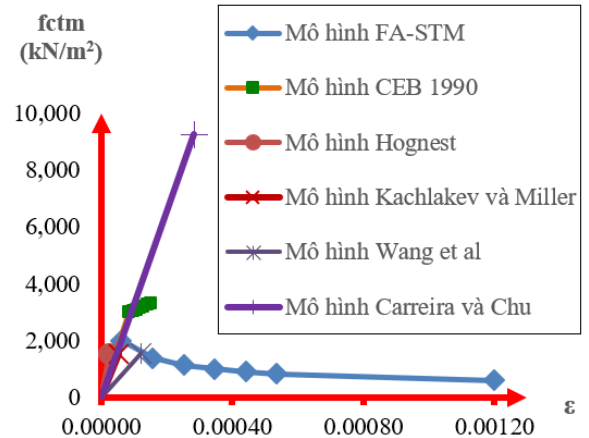
Quan hệ $\sigma - \varepsilon$ của bê tông trong vùng chịu cắt đã được [13] xét thêm góc xoay do lực cắt gây ra và giá trị mô đun cắt được xác định theo công thức (2.7).

$$G_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \quad (2.7)$$

Để thể hiện ưu điểm của mô hình này, tác giả tiến hành so sánh với các mô hình bê tông [14] trong vùng nén và vùng kéo được thể hiện như Hình 4, Hình 5.



Hình 4. Quan hệ $\sigma - \varepsilon$ của mô hình FA-STM so với các mô hình [14] trong vùng nén được thiết lập với các thông số đặc trưng của bê tông cấp độ bền B30 theo TCVN



Hình 5. Quan hệ $\sigma - \varepsilon$ của mô hình FA-STM so với các mô hình trong vùng kéo [7] và [15] được thiết lập với các thông số đặc trưng của bê tông cấp độ bền B30 theo TCVN

2.1.4. Mô hình cốt thép

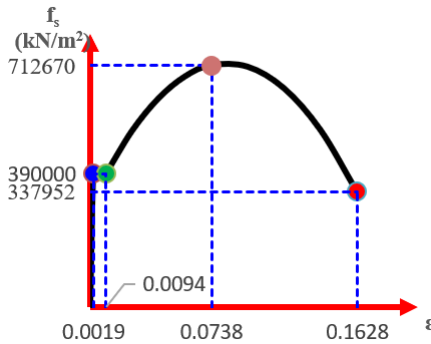
Tài liệu [16] đã đề xuất mô hình đường cong 3 giai đoạn: giai đoạn đàn hồi, giai đoạn chảy dẻo và giai đoạn tăng bền đến khi phá hoại. Giai đoạn cuối được biểu diễn dạng đường cong parabol. Hình 5, dạng đường cong này thể hiện ứng xử thật của cốt thép và được tính toán từ các công thức (2.8) đến (2.10):

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad ; 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (2.8)$$

$$f_s = f_y \quad ; \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \quad (2.9)$$

$$f_s = f_y + E_{sh}(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) \left[1 - \frac{E_{sh}(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})}{4f_{su} - f_y} \right]; \quad \varepsilon_s > \varepsilon_{sh} \quad (2.10)$$

Trong đó, f_s và ε_s là các giá trị ứng suất biến dạng trong thép, các ký hiệu y là chảy dẻo, sh biến dạng tăng bền và u ứng suất cực đại hay tới hạn. Các thông số trong mô hình $E_s, E_{sh}, \varepsilon_{sh}, f_y, f_{su}$ được xác định từ đặc trưng cơ lý của thép và trong nghiên cứu này dùng nhóm thép AIII theo TCVN.



Hình 6. Quan hệ $\sigma - \varepsilon$ theo mô hình của [16] với đặc trưng cơ lý của nhóm thép AIII theo TCVN

2.2. Mô hình ứng xử trễ

Mô hình trễ được sử dụng để thể hiện ứng xử phi tuyến của các cấu kiện trong hệ thống kết cấu với 3 mô hình tham số liên quan đến suy giảm độ cứng, cường độ và hiện tượng thắt lại [17]. Đường cong quan hệ lực chuyển vị được hiển thị như một đường cong gấp khúc 3 đoạn Hình 7. Trên đường cong thể hiện đầy đủ điểm nút, điểm chảy dẻo và điểm tới hạn. Các thông số α , β và γ được sử dụng với ý nghĩa tương ứng độ cứng, cường độ và hiện tượng thắt lại. Khái niệm và ảnh hưởng của các thông số trên được thể hiện như Hình 8.

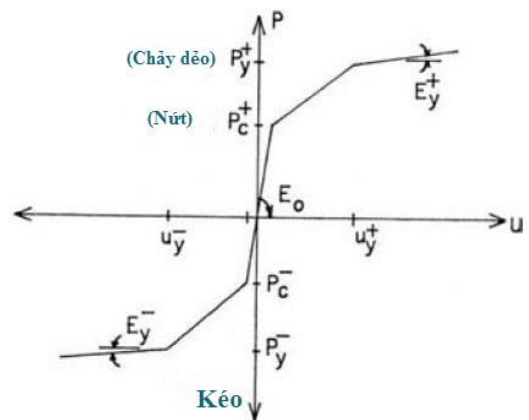
Suy giảm độ cứng được đại diện bởi α , hệ số này được thiết lập bằng cách kéo dài các điểm giao giữa đường dỡ tải với trục

ngang, xác định mức độ suy giảm độ cứng và việc giảm diện tích giới hạn của các vòng trễ.

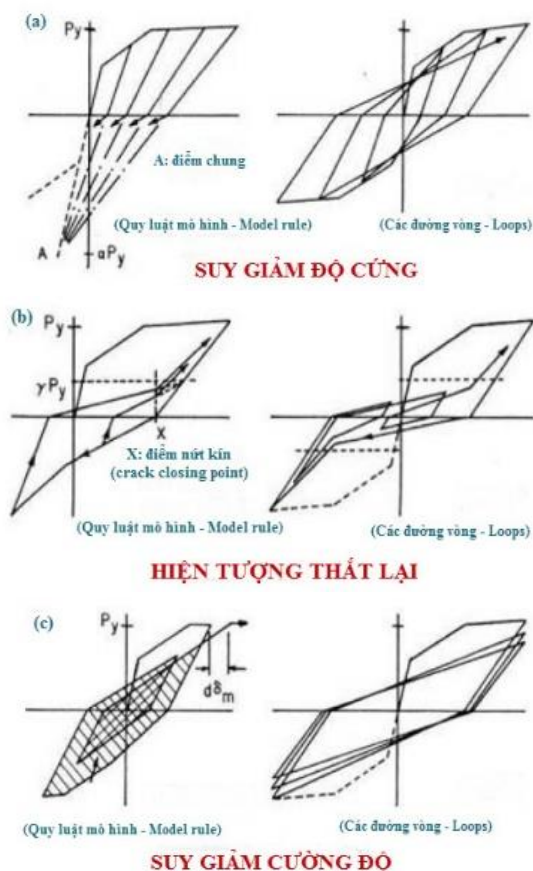
Suy giảm cường độ được đại diện bởi β , là tỷ số giữa ứng xử khi hư hỏng lớn nhất, $d\delta_m / \delta_u$ và năng lượng trễ $dE / \delta_u P_y$, được thể hiện như công thức (2.11).

$$\beta = \frac{d\delta_m / \delta_u}{dE / (\delta_u P_y)} = \frac{d\delta_m}{dE / P_y} \quad (2.11)$$

Hiện tượng thắt lại (Pinching behavior) được đại diện bởi γ . Theo Hình 8, bằng cách hạ thấp điểm tối đa đến mức P_y , γ được xác định bằng cách hạ đường thẳng vuông góc từ điểm giao của đường dỡ tải với trục hoành, từ đó tiếp tục tăng tải, điểm giao này chính là biến dạng xuất hiện vết nứt. Hiện tượng thắt lại làm giảm độ dốc của vòng trễ, gián tiếp làm tổn hao năng lượng. Bằng cách sử dụng 3 mô hình thông số, mô hình trễ có thể được tái chế như [18] không có thông số cường độ và giảm độ cứng hay mô hình [19] có kể đến các ảnh hưởng do suy giảm độ cứng và giảm cường độ đã được sử dụng trong nghiên cứu này.



Hình 7. Đường cong 3 đoạn thẳng [17]



Hình 8. Ba mô hình thông số trễ [17]

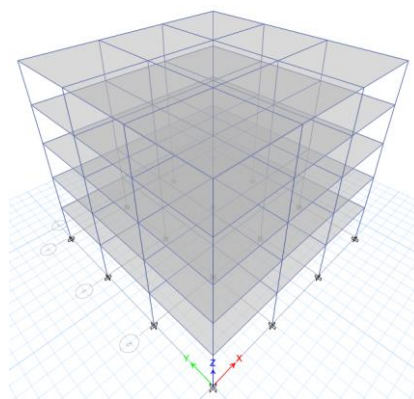
3. NGHIÊN CỨU BẰNG SỐ

3.1. Mô tả công trình nghiên cứu

Khung bê tông cốt thép, tọa lạc tại số 200 Hoàng Kiếm, quận Hai Bà Trưng, thành phố Hà Nội. Quy mô công trình gồm 5 tầng. Mặt bằng tầng điển hình công trình được thể hiện như mô hình 3D của công trình Hình 9.



Hình 9a. Mặt bằng tầng điển hình



Hình 9b. Mô hình 3D công trình

3.2. Vật liệu sử dụng

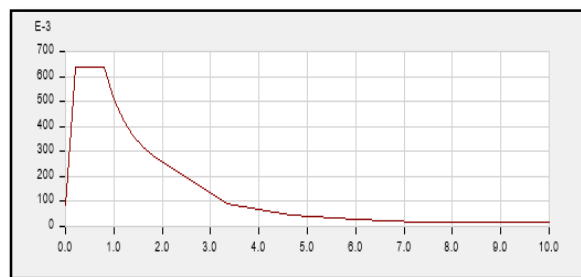
Vật liệu bê tông và cốt thép của toàn bộ công trình cho nghiên cứu này được quy định bê tông cấp độ bền B30, cốt thép sử dụng nhóm AI (thép sàn) và AIII (thép cột, dầm).

3.3. Các thành phần tải trọng tác động lên công trình

Tải trọng tác dụng lên công trình gồm 2 thành phần, tải trọng theo phương đứng và tải trọng theo phương ngang. Tải trọng theo phương đứng bao gồm tĩnh tải và hoạt tải, với trọng lượng bản thân của từng cấu kiện sẽ được khai báo tự động; cụ thể tĩnh tải: $7 \text{ (kN/m}^2\text{)}$, hoạt tải: $4 \text{ (kN/m}^2\text{)}$.

Tải trọng ngang trong nghiên cứu này chỉ phân tích tải trọng do tác động động đất, được tính toán theo chỉ dẫn [20], sử dụng phương pháp phổ để phân tích tải trọng động đất.

Từ các thông số trên, ta thiết lập được phổ thiết kế như Hình 10.

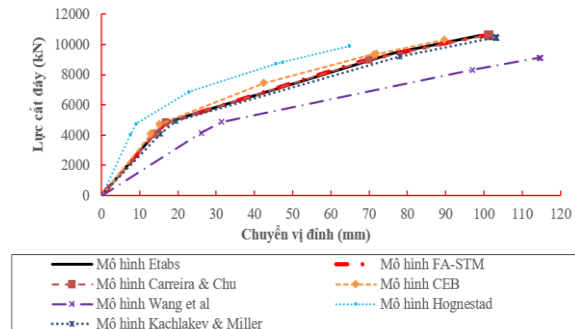


Hình 1. Phổ thiết kế với công trình tại quận Hai Bà Trưng

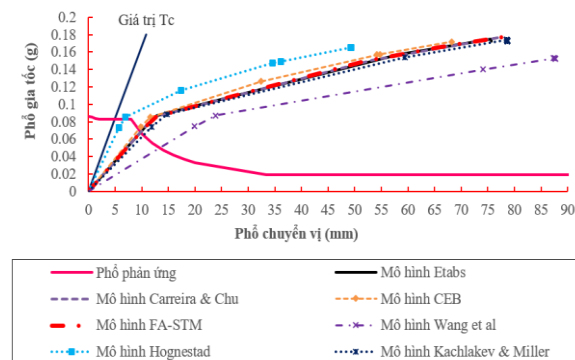
4. THẢO LUẬN

Việc lựa chọn mô hình vật liệu trong phân tích phi tuyến là việc cần thiết, qua các đường cong quan hệ cho chúng ta những nhận định khách quan và vai trò quan trọng của các mô hình đề xuất trong việc hình thành biến dạng dẻo. Cụ thể trong Hình 14, quan hệ giữa mô men và góc xoay khi có biến dạng dẻo hình thành, rõ ràng nếu chỉ sử dụng phân tích phổ sẽ không thể hiện rõ góc xoay, vì lúc này hệ kết cấu vẫn còn làm việc trong miền đàn hồi. Vì thế, đường cong quan hệ vật liệu ảnh hưởng mạnh trong bài toán phân tích phi tuyến của kết cấu nói chung và kết cấu bê tông cốt thép nói riêng.

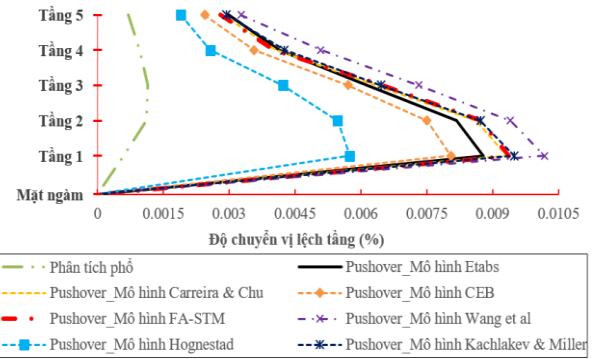
Các kết quả được trình bày thông qua các giá trị chuyển vị đỉnh, độ lệch tầng, quan hệ giữa phổ chuyển vị và gia tốc và mô men - góc xoay trong cột, được thể hiện cụ thể thông qua các hình từ Hình 11 đến Hình 14.



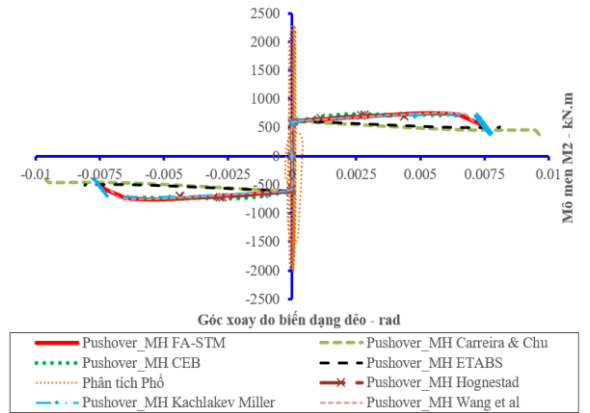
Hình 11. Quan hệ giữa chuyển vị đỉnh và lực cắt đáy của các mô hình vật liệu và FA-STM



Hình 12. Các mô hình vật liệu trong quan hệ giữa phổ chuyển vị và phổ gia tốc



Hình 13. Mô hình vật liệu trong việc đánh giá độ lệch tầng



Hình 14. Quan hệ giữa mô men và góc xoay khi hình thành khớp dẻo

5. KẾT LUẬN

Qua các kết quả đã thể hiện, khi phân tích phi tuyến khung bê tông cốt thép, đường cong quan hệ của vật liệu ảnh hưởng nhiều đến kết quả phân tích về mặt nội lực cũng như biến dạng của hệ kết cấu.

Mô hình đề xuất FA-STM cho chúng ta kết quả phân tích trùng khớp nhiều với mô hình mặc định của ETABS.

Từ các kết quả trên, đường cong quan hệ vật liệu giúp cho việc xác định lại hệ số ứng xử trong phân tích công trình chịu tải trọng ngang do tác động của động đất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyen Dai Minh (2014), *Đánh giá cường độ theo cấp độ bền và mác bê tông*, Tạp chí khoa học công nghệ.
- [2] Eshghi S, Zare M, and Mahdavi MR (2002), *Preliminary Report of IIEES Reconnaissance Team*, The Changureh (Avaj) Earthquake of June 22, 2002 (Mw: 6.4), International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.
- [3] ATC (1996), *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Applied Technology Council.
- [4] FEMA-356 (2000), *Commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, report FEMA-356, Washington DC, SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency.
- [5] Kachlakev Damian, et al (2001), *Finite element modeling of concrete structures strengthened with FRP laminates*, 316 Final report, SPR.
- [6] Avramidis Ioannis, et al (2016), *Design of R/C Buildings to EC8-1: A Critical Overview*, in Eurocode-Compliant Seismic Analysis and Design of R/C Buildings, Springer.
- [7] Wang Taijun and Hsu Thomas T. C. (2001), *Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models*, 79 (32), Computers & Structures.
- [8] Hsu Thomas TC (1992), *Unified theory of reinforced concrete*, 5, CRC press.
- [9] Belarbi Abdeldjelil and Hsu Thomas TC (1994), *Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete*, 91 (4), Structural Journal.
- [10] Pang Xiao Bo David and Hsu Thomas TC (1995), *Behavior of reinforced concrete membrane elements in shear*, 92 (6), ACI structural Journal.
- [11] Zhang Li Xin and Hsu Thomas TC (1998), *Behavior and analysis of 100 MPa concrete membrane elements*, 124 (1), Journal of Structural Engineering.
- [12] Hsu Thomas TC and Zhang L-X (1996), *Tension stiffening in reinforced concrete membrane elements*, 93 (1), ACI Structural Journal.
- [13] Zhu Ronnie RH, Hsu Thomas TC, and Lee Jung Yoon (2001), *Rational shear modulus for smeared-crack analysis of reinforced concrete*, 98 (4), Structural Journal.
- [14] Wee TH, Chin MS, and Mansur MA (1996), *Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression*, 8 (2), Journal of Materials in Civil Engineering.
- [15] Internationaldu Comite Euro (1993), *CEB-FIP model code 1990: design code*, 214 No. 213.
- [16] Sargin Muharrem (1971), *Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete sections*, 4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo Waterloo, ON, Canada.
- [17] Priestley MJN and Park R (1987), *Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading*, 84 (1), Structural Journal.
- [18] Clough W Ray, Benuska KL, and Wilson EL (1965), *Inelastic earthquake response of tall buildings*, in *Proceedings of Third World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand.
- [19] Takeda Toshikazu, Sozen Mete Avni, and Nielsen N Norby (1970), *Reinforced concrete response to simulated earthquakes*, 96 (12), Journal of the Structural Division.
- [20] Pinto Paolo Emilio (2005), *The Eurocode 8-Part 3: the new European Code for the seismic assessment of existing structures*, 6 (5), Asian J. Civil Eng (Building and Housing).

Ngày nhận bài: 10-7-2018. Ngày biên tập xong: 18-10-2018. Duyệt đăng: 28-11-2018