PHÂN TÍCH BIẾN DẠNG PHI TUYẾN DẦM BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG GIA CƯỜNG CỐT SỢI UHPFRC

Trần Thị Thuý Vân[1], Phạm Ngọc Vương[2], Vũ Thị Bích Quyên[3], Nguyễn Lệ Thuỷ[4]

[1,3,4]Đại học Kiến trúc Hà Nội
[2]Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

Email: [1]vanttt@hau.edu.vn , 0932238019; [2]vuongpn@vimaru.edu.vn;
[3]quyenvtb@hau.edu.vn, 0903421088; [4]thuynl@hau.edu.vn, 0903226382

DOI: https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses2-37

TÓM TẮT: Bê tông siêu tính năng gia cường cốt sợi (UHPFRC) với nhiều đặc trưng vượt trội so với bê tông cốt thép thông thường mở ra tiềm năng lớn trong thiết kế công trình. Tuy nhiên, việc mô tả chính xác ứng xử làm việc của dầm UHPFRC vẫn là thách thức trong phân tích kết cấu. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã áp dụng phương pháp phân tích biến dạng phi tuyến dựa theo tiêu chuẩn NF P18-710 và xây dựng quy trình tính toán trên nền tảng Matlab để áp dụng cho dầm UHPFRC. Các kết quả thu được so sánh với dữ liệu thí nghiệm và phân tích phần tử hữu hạn cho thấy việc áp dụng mô hình biến dạng phi tuyến có khả năng mô tả các đặc trưng cơ học quan trọng như giai đoạn sau nứt, sự suy giảm độ cứng, sự dịch chuyển trục trung hòa và chỉ số dẻo. Đặc biệt, mô hình phân tích biến dạng phi tuyến được thiết lập bằng phần mềm Matlab cho phép khai thác hiệu quả các chỉ số cơ học như độ cứng tiếp tuyến, năng lượng uốn và cường độ kéo… mà vẫn đảm bảo tính đơn giản trong tính toán. Kết quả nghiên cứu chứng minh phương pháp phân tích biến dạng phi tuyến là công cụ hữu hiệu, đơn giản nhưng tin cậy trong nghiên cứu ứng xử dầm UHPFRC, kết nối giữa thí nghiệm và mô hình phân tích số hiện đại.

TỪ KHÓA: UHPFRC; phân tích biến dạng phi tuyến; MATLAB; tiêu chuẩn NF P 18-710; phân tích phần tử hữu hạn; ứng xử phi tuyến.

ABSTRACTS: Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) has many advantages compared to normal reinforced concrete and brings new potential for structural design. However, describing the behavior of UHPFRC beams in a precise way is still a challenge in structural analysis. In this study, the authors applied the nonlinear deformational analysis (NDA) method according to the NF P18-710 standard and developed a calculation procedure in MATLAB for UHPFRC beams. The results were compared with experimental data and finite element analysis. They show that the NDA model can reflect important mechanical features such as the post-cracking stage, stiffness reduction, neutral axis shift, and ductility index. In particular, the MATLAB-based NDA model allows the evaluation of indices such as tangent stiffness, flexural toughness, and tensile strength, while keeping the calculation simple. The study confirms that the nonlinear deformational analysis is an effective and reliable tool for investigating the behavior of UHPFRC beams, linking experiments with FEA.

KEYWORDS: UHPFRC, nonlinear deformational analysis MATLAB, NF P 18-710 standard, finite element analysis, nonlinear response.

1. GIỚI THIỆU

Bê tông siêu tính năng (UHPC) đã và đang thu hút nhiều sự quan tâm trong nghiên cứu và ứng dụng nhờ cường độ nén vượt trội, độ bền và khả năng kháng môi trường khắc nghiệt [1–3]. Vật liệu này cho phép chế tạo các cấu kiện mảnh, nhẹ hơn so với bê tông thường, đồng thời nâng cao hiệu quả khai thác trong những điều kiện bất lợi như cầu nhịp lớn hoặc công trình ven biển. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của UHPC là tính giòn, khả năng biến dạng hạn chế và độ dẻo thấp, dẫn tới nguy cơ phá hoại đột ngột. Để khắc phục điều này, việc bổ sung sợi thép đã được chứng minh là một giải pháp hiệu quả, hình thành vật liệu bê tông siêu tính năng

gia cường cốt sợi (UHPFRC). Nhờ sự hiện diện của sợi, UHPFRC thể hiện khả năng chịu kéo sau nứt, qua đó cải thiện đáng kể tính dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng của cấu kiện [4-6]. Các thí nghiệm uốn bốn điểm, kéo trực tiếp và nén đã chỉ ra rằng UHPFRC không chỉ có cường độ cao mà còn thể hiện đường cong ứng xử kéo với ba giai đoạn đặc trưng: đàn hồi, biến cứng và mềm hóa.

Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã tập trung vào dầm UHPFRC và cho thấy khi hàm lượng sợi tăng lên, dầm duy trì được độ cứng sau nứt, tăng khả năng chịu uốn và cắt [7-10]. Những kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng UHPFRC trong các kết cấu cầu, sàn mỏng, bản mặt cầu hoặc các cấu kiện đặc biệt đòi hỏi khả năng chịu lực và độ bền cao. Song song với thực nghiệm, các phương pháp phân tích số cũng đã được phát triển nhằm mô phỏng ứng xử cơ học của dầm UHPFRC. Trong đó, phân tích mặt cắt phi tuyến dựa trên giả thiết biến dạng phẳng và quan hệ σ–ε vật liệu đã được áp dụng rộng rãi để xây dựng quan hệ momen - góc xoay [11-13]. Cách tiếp cận này đơn giản, dễ triển khai nhưng khó mô phỏng chi tiết quá trình hình thành vết nứt hoặc ứng xử sau tới hạn. Ngược lại, sử dụng phân tích phần tử hữu hạn (FEA) có khả năng mô phỏng toàn bộ cấu kiện, cho phép theo dõi biến dạng cục bộ và sự phát triển hư hỏng trong vật liệu.

Trong hướng này, Solhmirzaei và Kodur (2017) [14] đã phát triển mô hình số sử dụng mô hình dẻo hư hại của bê tông (CDP) trong Abaqus để phân tích bốn dầm UHPFRC (UB3-UB6). Kết quả cho thấy mô hình FEA dự đoán tốt quan hệ tải - độ võng và sự phát triển vết nứt, với sai lệch nhỏ so với thí nghiệm. Tuy nhiên, FEA đòi hỏi các thông số vật liệu chi tiết, chi phí tính toán lớn, chưa thật sự thuận tiện và phù hợp cho các phân tích cơ học thuần tuý, thiết kế nhanh hoặc các nghiên cứu thông thường.

Để khắc phục hạn chế của các phương pháp số truyền thống, tiêu chuẩn NF P 18-710 (2016) [15] của Pháp đã đưa ra cơ sở thiết kế đầy đủ và hệ thống cho kết cấu UHPFRC, bổ sung trực tiếp vào Eurocode 2. Tiêu chuẩn này quy định quan hệ ứng suất–biến dạng (σ–ε) cho cả nén và kéo với ba giai đoạn đặc trưng, đồng thời hướng dẫn cách quy đổi từ đường cong σ–ω trong thí nghiệm dầm có rãnh chữ V (notch beam) sang σ–ε phục vụ tính toán. Trên cơ sở đó, có thể triển khai phân tích biến dạng phi tuyến (Nonlinear Deformation Analysis – NDA), vốn thực chất là phân tích mặt cắt phi tuyến dựa trên giả thiết biến dạng phẳng và cân bằng nội lực trên mặt cắt. NDA cho phép xây dựng quan hệ mômen-góc xoay của dầm và quan hệ tải - độ võng, nhờ đó tái hiện được các đặc trưng phi tuyến quan trọng của UHPFRC. Mặc dù vậy, quan hệ σ-ε trong [15] vẫn mang tính lý tưởng hóa, do đó chưa phản ánh trọn vẹn ứng xử phức tạp của UHPFRC, đặc biệt ở vùng kéo mềm hóa. Các tham số vật liệu cũng cần được hiệu chỉnh từ thí nghiệm để đảm bảo độ tin cậy khi áp dụng cho từng loại UHPFRC cụ thể.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả phát triển quy trình phân tích NDA dựa theo [15] và thực hiện trên phần mềm Matlab, áp dụng cho dầm UHPFRC trong nghiên cứu của Sholhmirzaei [14], một cấu kiện đã được kiểm chứng bằng thí nghiệm và FEA [14]. Phương pháp được sử dụng để xây dựng quan hệ mômen-góc xoay, từ đó suy ra quan hệ tải-độ võng và phân tích các chỉ số cơ học quan trọng như độ cứng tiếp tuyến, sự suy giảm độ cứng, dịch chuyển trục trung hòa, chỉ số dẻo và năng lượng uốn. Mục tiêu của nghiên cứu chứng minh rằng NDA, dù đơn giản hơn nhiều so với FEA, vẫn có khả năng tái hiện đầy đủ các đặc trưng cơ học chính của dầm UHPFRC. Qua đó, phương pháp này cung cấp một công cụ phân tích gọn nhẹ và tin cậy, có tiềm năng ứng dụng trong nghiên cứu cũng như trong phân tích tính toán các công trình thực tế.

2. PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH BIẾN DẠNG PHI TUYẾN

2.1. Mô hình vật liệu và cơ sở lý thuyết theo [15]

Theo tiêu chuẩn [15], việc phân tích biến dạng phi tuyến dầm UHPFRC yêu cầu xác định quan hệ ứng suất–biến dạng trong nén và kéo.

Bê tông chịu nén: Quan hệ ứng suất–biến dạng nén được [15] mô tả theo công thức (1).

Trong đó f_{cm} là cường độ nén trung bình, $\varepsilon_{c1,f}$ là biến dạng ứng với ứng suất nén cực đại, còn η, φ là các tham số vật liệu do [15] quy định. Biến dạng $\varepsilon_{c1,f}$ được xác định theo công thức (2).

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot \frac{\eta \dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,f}}}{\eta - 1 + \left(\dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,f}}\right)^{\varphi \cdot \eta}} \qquad (1)$$

$$\varepsilon_{c1,f} = \left(1 + 4\frac{f_{ctm}}{K_{global} \cdot f_{cm}}\right)\left(1 + 0.16\frac{k_0}{f_{cm}^2 + 800}\right)\frac{f_{cm}^{2/3}}{k_0} \qquad (2)$$

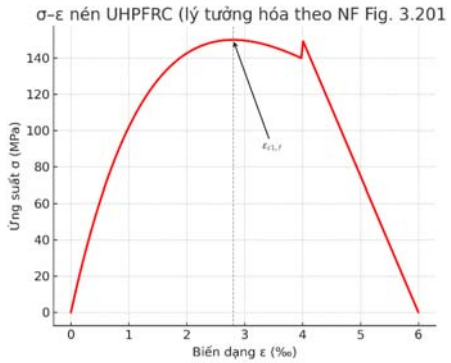
Quan hệ này được minh họa trong Hình 3.201 của [15], với đặc trưng là nhánh cong tăng dần phi tuyến và giai đoạn mềm hóa sau tới hạn. Đối với bê tông chịu kéo: khác với bê tông thông thường, UHPFRC có khả năng duy trì ứng suất kéo sau khi

nứt. Tiêu chuẩn [15] quy định ứng xử kéo bằng các biểu đồ đặc trưng, thay vì công thức khép kín. Hai trường hợp được xem xét:

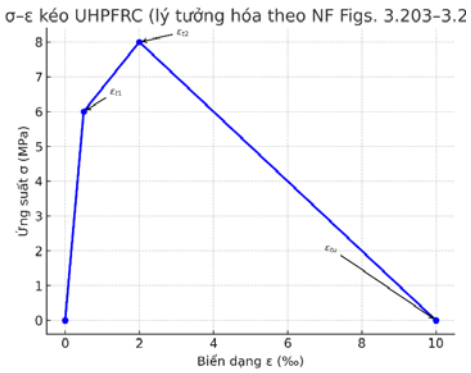
+ Có cực đại cục bộ (Hình 3.203) [15]: ứng suất kéo cực đại $f_{ct,el}$ đạt được trước khi giảm về ứng suất dư f_{ctf};

+ Không có cực đại cục bộ (Hình 3.204) [15]: ứng suất dư f_{ctf} được định nghĩa tại độ mở vết nứt w = 0.3 mm.

Các biểu đồ này phản ánh rõ ba giai đoạn đặc trưng của bê tông UHPFRC trong kéo: đàn hồi, biến cứng và mềm hóa. Các tham số đầu vào được xác định thông qua thí nghiệm kéo trực tiếp hoặc thí nghiệm dầm có rãnh chữ V. Trong [15], quan hệ ứng suất–biến dạng của UHPFRC ở trạng thái nén và kéo được mô tả chi tiết bằng các công thức và biểu đồ đặc trưng (Hình 3.201; Hình 3.203-3.204). Tuy nhiên, để thuận tiện cho việc triển khai phân tích biến dạng phi tuyến bằng MATLAB, các quan hệ này được lý tưởng hóa thành các mô hình đơn giản hơn: đường cong nén có cực hạn và mềm hóa, và đường cong kéo gồm ba giai đoạn (đàn hồi - biến cứng - mềm hóa). Cách lý tưởng hóa này vừa đảm bảo giữ được bản chất cơ học theo [15], vừa giúp việc tính toán trở nên ổn định và hiệu quả.



Hình 1: Quan hệ σ-ε nén UHPFRC (lý tưởng hóa để phân tích, tham chiếu [15])



Hình 2: Quan hệ σ-ε kéo UHPFRC (lý tưởng hóa để phân tích tham chiếu [15])

Lưu ý: Các quan hệ σ–ε trong Hình 1, Hình 2 là dạng lý tưởng hoá từ các Hình 3.201, 3.203 và 3.204 của [15] để triển khai phân tích tính toán sử dụng Matlab. Đường cong gốc của [15] xuất phát từ thí nghiệm và phản ánh đầy đủ ứng xử thực tế của UHPFRC.

Phân tích biến dạng phi tuyến được thực hiện với giả thiết tiết diện phẳng, mô hình vật liệu UHPFRC tuân theo biểu đồ nén, kéo của [15], cốt thép giả thiết đàn hồi - dẻo lý tưởng. Bài toán được giải theo hướng "ngược": chọn một giá trị độ cong φ, gán cho mặt cắt phân bố biến dạng tuyến tính $\varepsilon(z) = \varphi.(z-x)$,

trong đó $\varphi = 1/\rho$ (ρ - bán kính cong của tiết diện). Với quy ước z tăng xuống, uốn kéo ở đáy thì $\varphi > 0$,

x - chiều cao vùng nén (tính từ mép chịu nén tới trục trung hoà). Từ tập hợp các đường thẳng $\varepsilon = f(z)$, đường "thực" được lựa chọn là đường thoả mãn phương trình cân bằng lực trên tiết diện, khi đó x được xác định duy nhất cho φ.

Với x đã biết ứng suất theo từng thớ của tiết diện được suy ra. Từ đó tính được nội lực N, M ứng với giá trị φ. Khi φ tăng dần đến giá trị cực hạn, thu được chuỗi (φ_i - M_i), dùng để dựng các biểu đồ quan hệ: momen – độ cong M - φ, độ cứng (M/φ) và độ cứng tiếp tuyến dM/dφ. Các tham số này được tích hợp dọc theo chiều dài nhịp để tái hiện quan hệ tải– độ võng giữa nhịp $P - \delta_m$ và phản ánh sự phân bố độ cứng tiết diện theo chiều dài dầm khi tải tăng dần, để đối chiếu với kết quả thu được từ thí nghiệm và FEA.

Tương tự, các đại lượng σ_s, ε_s của cốt thép, tỉ số trục trung hoà y_{NA}/h và các mốc sự kiện vật liệu (nứt UHPFRC: đàn hồi → biến cứng → mềm hoá; chảy dẻo thép) được khảo sát.

2.2. Quy trình phân tích biến dạng phi tuyến cho dầm UHPFRC bằng MATLAB

Dựa vào cơ sở lý thuyết đã phân tích ở mục trên, quy trình NDA được thực hiện gồm các bước như sau:

Nhập các thông số đầu vào:

- Các thông số về kích thước tiết diện b, h.

- Thông số cốt thép: diện tích và vị trí cốt thép chịu kéo, chịu nén.

- Thông số vật liệu:

+ Bê tông UHPFRC: quan hệ $\sigma_c - \varepsilon_c$ cho vùng bê tông chịu nén (Biểu thức 3.201 [15]) và quan hệ $\sigma_t - \varepsilon_t$ cho vùng bê tông chịu kéo (Hình 3.203-

3.204 [15]) với các biến dạng đặc trưng $\varepsilon_{c1,f}$, ε_{ct1}, ε_{ct2}, ε_{tu}

+ Cốt thép: Mô hình đàn hồi – dẻo lý tưởng (đàn hồi tuyến tính) với E_s, cường độ chảy f_y. Mô hình phân bố biến dạng và ứng suất thể hiện như Hình 3.

- Xác định biến dạng theo từng thớ tiết diện:

$$\varepsilon(z) = \varphi.(z-x) \quad (3)$$

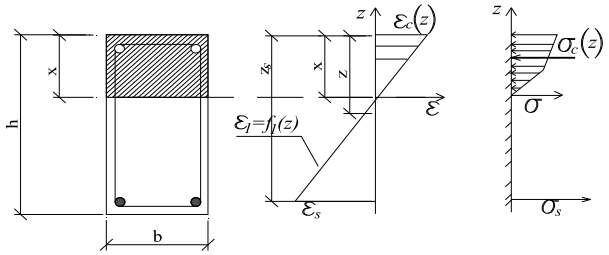
Trong đó, $\varphi = 1/\rho$ (ρ - bán kính cong của tiết diện). Quy ước z tăng xuống, uốn kéo ở đáy thì $\varphi > 0$,

x - chiều cao vùng nén.

+ Tại mép vùng kéo z = h: $\varepsilon_t = \varphi.(h - x)$

+ Tại vị trí cốt thép $z = z_s$: $\varepsilon_s = \varphi.(z_s - x)$,

+ Từ biên vùng nén có thể suy ra: $\varphi = \varepsilon_c/x$



Hình 3: Sơ đồ phân bố biến dạng và ứng suất trong phân tích NDA

- Xác định hợp lực trong tiết diện

+ Bê tông vùng nén:

$$F_c(\varepsilon_c, x) = \int_0^x \sigma_c(\varepsilon_c(z)) \cdot b \cdot dz \quad (4)$$

+ Cốt thép:

$$F_s(\varepsilon_s, x) = \sum_j \sigma_s(\varepsilon_{s,j}) \cdot A_{s,j} \quad (5)$$

Trong đó, biến dạng:

$$\varepsilon_c(z) = \varepsilon_{c,max}\left(1 - \frac{z}{x}\right), \qquad \varepsilon_{s,j} = \varepsilon_{c,max}\left(\frac{h_{0,j} - x}{x}\right) \quad (6)$$

- Xác định chiều cao vùng nén bằng phương trình:

$$\int_0^x \sigma_c(\varepsilon_c(z)) \cdot b \cdot dz + \sum_j \sigma_s(\varepsilon_{s,j}) \cdot A_{s,j} = 0 \quad (7)$$

- Xác định mômen uốn và thiết lập quan hệ (M-φ)

$$M = \int_0^x \sigma_c(\varepsilon_c(z)) \cdot b \cdot z \cdot dz + \sum_j \sigma_s(\varepsilon_{s,j}) \cdot A_{s,j} \cdot z_s = 0 \quad (8)$$

Thay đổi φ, lặp lại các bước trên, thu được đường cong quan hệ mô men- độ cong M-φ.

- Tích hợp quan hệ tải – độ võng $P-\delta_m$.

Từ quan hệ M–φ, sử dụng phương pháp tích phân độ cong theo chiều dài dầm, thu được quan hệ tải–độ võng để so sánh với kết quả thí nghiệm và FEA.

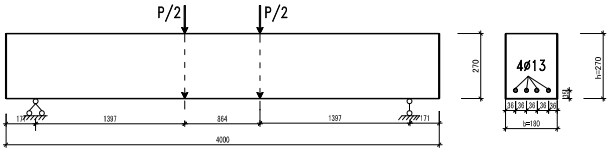
3. VÍ DỤ TÍNH TOÁN

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Ví dụ số được thực hiện cho dầm UHPFRC (UB5) trong nghiên cứu [14] đã có tham chiếu thí nghiệm và kết quả FEA như thể hiện trong Hình 4. Để đánh giá ứng xử của bê tông UHPFRC và khả năng chịu kéo sau nứt, xét đồng thời hai trường hợp:

- Có kéo: bê tông UHPFRC giữ ứng suất kéo dư theo biểu đồ ba giai đoạn (đàn hồi - biến cứng - mềm hoá) của [15].

- Không kéo: quy ước "bê tông không chịu kéo" ở vùng kéo, còn lại giữ nguyên các tham số khác.



Hình 4. Sơ đồ dầm nghiên cứu UHPFRC UB5 [14]

Các thông số vật liệu và hình học của dầm UHPFRC đang xét: Tiết diện dầm b = 180 mm, h = 270 mm, chiều dài L = 4000 m. Vật liệu UHPFRC E_c = 43970 MPa, cường độ nén f_{cm} = 193 MPa, cường độ kéo f_t = 7.11 MPa, biến dạng nứt đầu tiên $\varepsilon_{cr} = 1.6 \times 10^{-4}$, biến dạng kéo cực hạn ε_{ut} = 0.0181. Thép E_s = 207GPa, cường độ chảy f_y = 435 MPa, cường độ kéo tới hạn f_u = 700 MPa; ε_y = 0.0021, không kể tới cốt thép nằm trong vùng nén và không kể tới cốt đai trong tính toán.

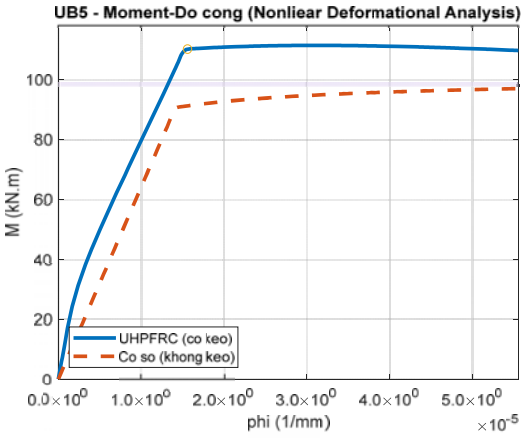
3.2. Kết quả tính toán và thảo luận

3.2.1. Quan hệ mômen - độ cong M - φ và dạng chuẩn hoá

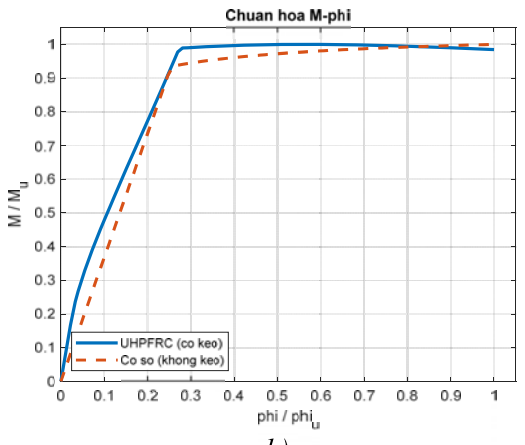
Kết quả M – φ cho thấy đường cong của trường hợp "có kéo" vượt qua mômen cực hạn một cách rõ rệt so với "không kéo" (Hình 5a). Từ các biểu đồ thấy rằng, giá trị đỉnh đạt khoảng $M_u \approx 111.6$ kNm cho "có kéo" so với $M_u \approx 98.0$ kNm cho "không kéo", tăng ~13.9%. Sau khi đạt tới giá trị đỉnh, đường "có kéo" duy trì nằm ngang trong khoảng dải rộng, hiện tượng biến cứng do kéo, thể hiện khả năng của UHPFRC vẫn chịu kéo sau khi xuất hiện nứt.

Ở dạng chuẩn hoá M/M_u theo φ/φ_u (Hình 5b), hai đường cong hầu như trùng nhau từ vùng dẻo (khoảng $\varphi/\varphi_u \geq 0.6$), cho thấy UHPFRC chủ yếu tăng khả năng chịu uốn M_u, còn hình dạng vùng dẻo (độ dốc sau đỉnh) hầu như không đổi. Điều này rất có lợi trong tính toán thiết kế: khi xét "có kéo", tăng được khả năng chịu uốn nhưng vẫn giữ được dạng ứng xử quen thuộc của dầm bê tông cốt thép (BTCT), vì vậy ta vẫn giữ cách đánh giá dẻo như với dầm BTCT thường.

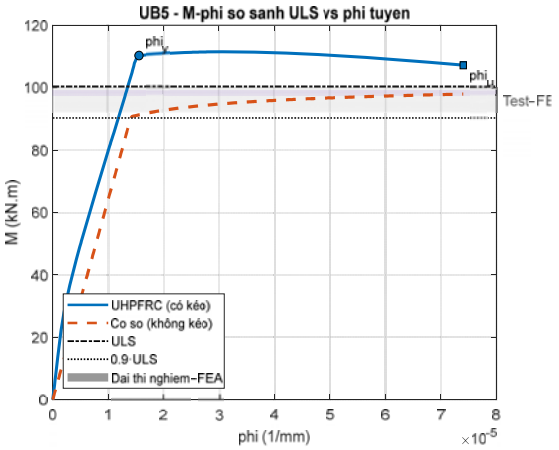
Tương tự, thực hiện so sánh trên đồ thị M–φ có chèn mức thiết kế trạng thái tới hạn (ULS, 0.9·ULS) và "vùng chuẩn" Thí nghiệm–FEA (Hình 5c) để củng cố nhận định trên. Đường "có kéo" nằm trên ULS, đồng thời tiệm cận dải kết quả thu được từ Thí nghiệm-FEA, cho thấy mô hình vật liệu UHPFRC theo [15] và quy trình NDA là nhất quán. Trong Hình 5c, "dải Thí nghiệm–FEA" được hiểu là vùng bao giữa mô men cực hạn thu được từ thí nghiệm và từ FEA cho dầm UB5 theo [14]. Dải này không ngụ ý kết quả Thí nghiệm = FEA; ngược lại, độ rộng dải thể hiện mức chênh giữa hai kết quả. Dải được trải theo trục độ cong để tiện đối chiếu vị trí tương đối của đường M–φ thu được từ NDA.



a)



b)

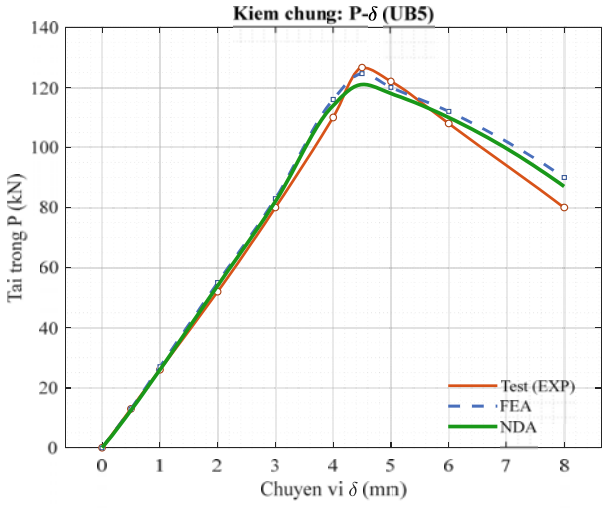


c)

Hình 5: Kết quả NDA trong trường hợp "có kéo" và "không kéo": (a) M– φ tuyệt đối; (b) Đường chuẩn hoá M/M_u theo φ/φ_u ; (c) So sánh các mức thiết kế ULS, 0.9·ULS và dải tham chiếu Thí nghiệm–FEA

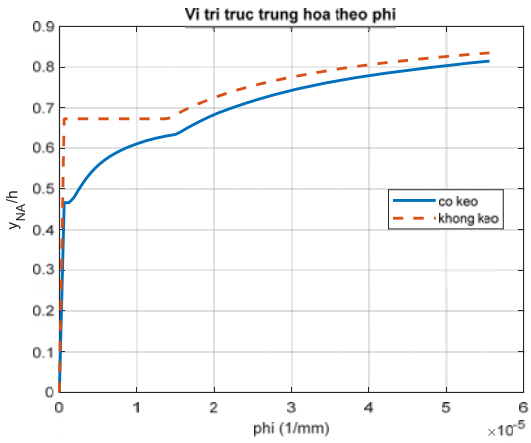
Kết quả so sánh quan hệ tải – độ võng P–δ của dầm UB5 được thể hiện trên Hình 6. Có thể thấy rằng đường cong thu được từ NDA tương đối trùng khớp với dữ liệu thí nghiệm trong toàn bộ giai đoạn làm việc. Trong vùng đàn hồi, ba đường gần như trùng nhau, phản ánh độ cứng ban đầu được mô phỏng chính xác. Sau khi xuất hiện nứt và chuyển sang giai đoạn phi tuyến, mô hình NDA vẫn duy trì xu hướng biến dạng tương tự thí nghiệm và FEA, với sai khác lớn nhất, nhỏ hơn 5%.

Ở vùng cực đại, tải trọng tới hạn của NDA đạt khoảng 124 kN, gần với giá trị thí nghiệm (126 kN) và cao hơn FEA (≈120 kN). Kết quả này khẳng định quy trình NDA được xây dựng có khả năng tái hiện chính xác quan hệ P–δ thực nghiệm, đồng thời đảm bảo tính nhất quán với mô hình FEA.



Hình 6: So sánh quan hệ P–δ giữa Thí nghiệm, FEA và phân tích phi tuyến biến dạng NDA

3.2.2. Sự di chuyển trục trung hoà



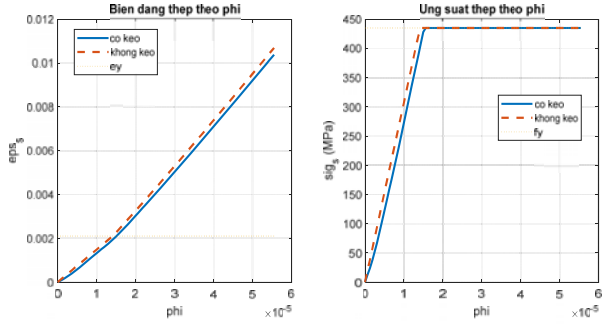
Hình 7: Tỷ số (y_{NA}/h- φ) theo φ trong trường hợp "có kéo" và "không kéo"

Sau khi đã kiểm chứng độ chính xác của quy trình NDA qua quan hệ tải - độ võng, phần này tiếp tục phân tích sự dịch chuyển của trục trung hoà trong quá trình làm việc của dầm.

Đồ thị y_{NA}/h- φ (Hình 7) cho thấy trong trường hợp "có kéo" trục trung hoà tụt nhanh xuống thấp ngay sau nứt do UHPFRC còn có ứng suất kéo dư ở vùng kéo (biến cứng do kéo). Khi độ cong tăng lên, phần kéo này dần mềm hoá y_{NA}/h nhích lên trở lại. Ngược lại, trường hợp "không kéo" ngay sau nứt chỉ còn thép chịu kéo, muốn cân bằng phải tăng vùng nén, khiến trục trung hoà ổn định sớm ở vị trí cao.

Về cơ học, biến cứng do kéo của UHPFRC giúp giảm lệch tâm nội lực trong giai đoạn sau nứt, đồng thời cho thấy vùng nén chưa chiếm ưu thế hoàn toàn trong việc chịu lực do vùng kéo tham gia chịu tải. Đây là nguyên nhân trực tiếp của vùng nằm ngang M–φ "đầy" hơn (gần như phẳng sau đỉnh).

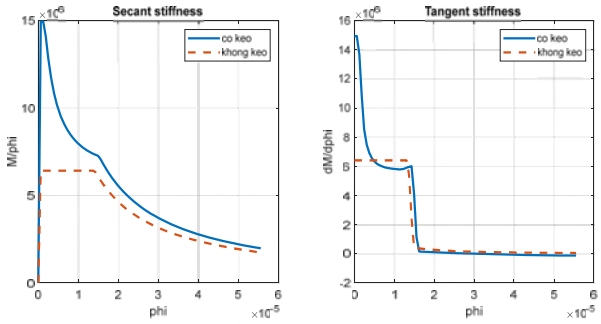
3.2.3. Ứng xử cốt thép ε_s–φ và σ_s–φ



Hình 8: Minh hoạ ứng xử của cốt thép ε_s–φ và σ_s–φ

Hai đồ thị biến dạng thép–độ cong (ε_s–φ) và ứng suất thép - độ cong (σ_s–φ) trong Hình 8 cho thấy: Ứng suất thép chạm $f_y \approx 430 – 435$ MPa khá sớm ở cả hai trường hợp. Trường hợp "không kéo" đạt chảy sớm hơn một chút; tại cùng một giá trị φ trước khi chảy, "có kéo" cho ε_s nhỏ hơn, minh chứng cho khả năng cùng tham gia chịu kéo của UHPFRC và cốt thép. Sau khi chảy, ứng suất thép nằm ngang theo mô hình dẻo lý tưởng, còn biến dạng tiếp tục tăng.

3.2.4. Suy giảm độ cứng hiệu dụng và độ cứng tiếp tuyến



Hình 9. Đồ thị minh hoạ sự suy giảm độ cứng hiệu dụng và độ cứng tiếp tuyến

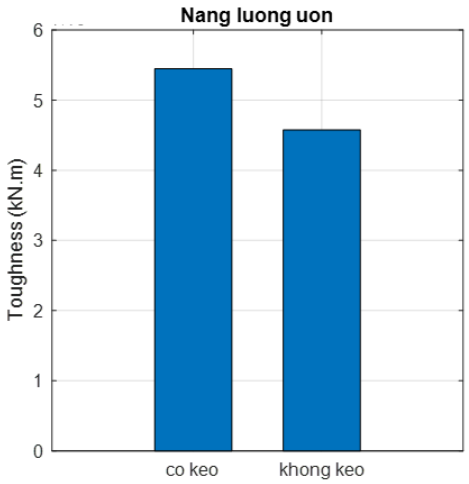
Hai đại lượng độ cứng hiệu dụng M/φ (secant stiffness) và độ cứng tiếp tuyến dM/dφ (Hình 9) thể hiện hai bậc suy giảm điển hình:

- Bậc 1: sau nứt: do hình thành vết nứt và sự chuyển lực sang cốt thép;

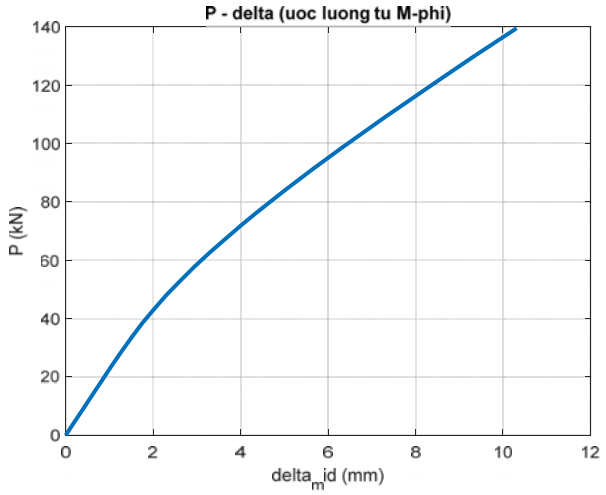
- Bậc 2: khi thép chảy: do chuyển trạng thái chịu lực sang dẻo.

Giữa hai bậc suy giảm này, trường hợp "có kéo" duy trì độ cứng lớn hơn đáng kể so với "không kéo", là lý do chính khiến đường nằm ngang M/φ cao hơn. Kết quả này phản ánh trực tiếp vai trò của UHPFRC chịu kéo sau nứt.

3.2.5. Năng lượng uốn và quan hệ tải-độ võng



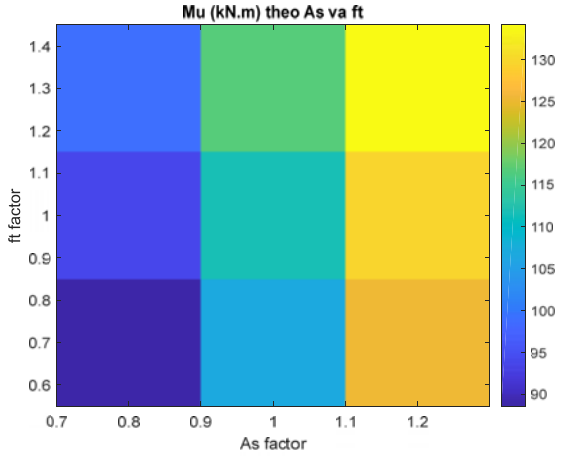
a)



Hình 10. Kết quả phân tích NDA: a) Năng lượng uốn; b) Quan hệ tải – độ võng

Quan sát Hình 10a thấy rằng trường hợp "có kéo" năng lượng uốn tăng khoảng 15-20% so với trường hợp "không kéo". Đây là minh chứng định lượng cho khả năng hấp thu năng lượng vượt trội của UHPFRC khi giữ được ứng suất kéo dư sau nứt. Hình 10b thể hiện quan hệ tải – độ võng được suy ra từ đường cong M-φ, cho thấy rằng quy luật biến cứng mượt, với tải trọng ≈135 – 140kN tại δ≈10 – 11 mm cho trường hợp "có kéo", phù hợp với đường nằm ngang của đồ thị M- φ và xu hướng trong dải tham chiếu Thí nghiệm/FEA. Điều này càng chứng tỏ về khả năng của NDA khi mô tả ứng xử của dầm tương đối chính xác và thời lượng tính toán giảm đi rất nhiều so với FEA.

3.2.6. Khảo sát một số tham số ảnh hưởng



Hình 11. Biểu đồ nhiệt trong khảo sát tham số

Hình 11 trình bày bản đồ nhiệt (Heatmap) của mômen tới hạn M_u theo tỉ lệ cốt thép A_s (A_s-factor) và cường độ kéo của UHPFRC f_t (f_t-factor). Màu sáng hơn →M_u lớn hơn. Từ hình vẽ cho thấy M_u tăng đơn điệu khi tăng mỗi tham số và độ nhạy theo A_s rõ rệt hơn so với f_t: $A_s \approx 0.7$-1.2 làm M_u tăng 30-40 kNm, trong khi tăng f_t từ ≈ 0.6-1.4 chỉ làm M_u tăng ~ 10–20 kNm.

Hình 11 cho thấy ô sáng nhất nằm ở góc A_s và f_t cùng cao (1.2; 1.4), tức là khi tăng cả 2 tham số sẽ đem lại mức cải thiện lớn nhất. Tuy nhiên, trong trường hợp xét ngưỡng thiết kế M_u ≥100 kNm, vùng thoả mãn nằm chủ yếu ở nửa phải của bản đồ, nếu bị ràng buộc A_s, có thể bù bằng việc chọn f_t cao hơn, nhưng tăng A_s vẫn là phương án hiệu quả hơn.

Nhận xét: Phân tích biến dạng phi tuyến cho phép mô phỏng đầy đủ ứng xử uốn của dầm UHPFRC theo tiêu chuẩn NF P 18 - 710. Kết quả cho thấy:

Khi xét khả năng chịu kéo sau nứt, mômen cực hạn tăng khoảng 14% (từ 98.0 lên 111.6 kNm), đồng thời đường cong M–φ có vùng phẳng sau đỉnh rộng hơn, thể hiện rõ hiệu ứng tăng cứng do kéo. So sánh với thí nghiệm và FEA, đường cong P–δ thu được từ NDA bám sát kết quả thực nghiệm với sai khác lớn nhất nhỏ hơn 5%, chứng minh độ tin cậy của phương pháp và quy trình tính toán.

Từ đồ thị dịch chuyển trục trung hoà (yNA/h–φ) cho thấy trong trường hợp "có kéo", trục trung hoà hạ thấp nhanh sau nứt rồi dần tăng lên khi vùng kéo mềm hoá, phản ánh sự tham gia chịu tải của vùng kéo UHPFRC. Năng lượng uốn của trường hợp "có kéo" cao hơn 15 – 20%, ứng suất thép đạt ngưỡng chảy $f_y \approx 430 – 435$ MPa sớm hơn.

Khảo sát tham số cho thấy mômen tới hạn M_u tăng đơn điệu theo A_s và f_t, trong đó A_s ảnh hưởng nhiều hơn; tổ hợp $A_s \approx 1.1$–1.2 cùng f_t cao cho hiệu quả tốt nhất.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phát triển và hiện thực hóa quy trình phân tích biến dạng phi tuyến theo tiêu chuẩn NF P 18 - 710 trên nền tảng MATLAB, cho phép mô phỏng chính xác ứng xử uốn của dầm UHPFRC với thời gian tính toán thấp hơn đáng kể so với FEA.

Phương pháp NDA được đánh giá là gọn nhẹ, trực quan và đáng tin cậy, phù hợp cho thiết kế sơ bộ và đánh giá ứng xử kết cấu trước khi thực hiện phân tích hữu hạn hoặc thí nghiệm chi tiết. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ khả năng chịu lực và đặc trưng phi tuyến của dầm UHPFRC, đồng thời khẳng định khả năng dự báo hiệu quả của mô hình đề xuất. Trong tương lai, quy trình có thể được mở

rộng cho bài toán chịu cắt và trạng thái giới hạn sử dụng, nhằm nâng cao tính bao quát và khả năng ứng dụng trong thực tế thiết kế kết cấu hiện đại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] L. Ahmed Sbia, A. Peyvandi, P. Soroushian, J. Lu. A.M. Balachandra (2014), *Enhancement of ultra-high performance concrete material properties with carbon nanofiber*, Adv. Civ. Eng. e854729.

[2] S. -T. Kang, Y. Lee, Y.-D. Park, J.-K. Kim, (2010). *Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber*, Journal of Compos. Structures, 92, 61–71.

[3] J. Huang, Z. He, M. Basit Ehsan Khan, X. Zheng & Zhibin Luo (2021). *Flexural behavior and evaluation of ultra-high-performance fibre reinforced concrete beams cured at room temperature,* Scientific Reports | https://doi.org/10.1038/s41598-021-98502-x.

[4] R. G. El-Helou, and B. A. Graybeal (2022), *Flexural Behavior and Design of Ultrahigh-Performance Concrete Beams.* Journal of Structural Engineering, 148 (4). Doi.Org/10.1061/ (ASCE) St.1943-541x.0003246.

[5] D. Choi, K. Hong, M. Ochirbud, D. Meiramov & P. Sukontaskuul (2023) . *Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) and Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) with Recycled Sand.* International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 17. DOI: 10.1186/s40069-023-00631-[6] W. Kang, K. Mei, Deli Lu, S. Sun (2024). *Study of the flexural behavior of UHPC-HPC composite beams strengthened with BFRP sheet after chloride secondary erosion. Engineering Structures. Vol. 16* https://doi.org/10.1016/ j.engstruct.2024.118536.

[7] D.-Y. Yoo, N. Banthia, Y.-S. Yoon (2016), *Experimental and numerical study on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios*, Can. J. Civ. Eng. Vol.44, 18–28.

[8] I. H. Yang, C. Joh, B.- S. Kim (2010), *Structural behavior of ultra-high-performance concrete beams subjected to bending*, Engineering Structures, Vol. 32, 3478–3487.

[9] Y. L. Voo, W. K. Poon, S. J. Foster (2010), *Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups*, J. Struct. Eng. Vol. 136, 1393–1400.

[10] P. Marchand, F. Toutlemonde, F.Baby (2014), *Shear behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams. I: experimental investigation*, J. Struct. Eng. Vol. 140, 4013111.

[11] G. H. Mahmud, Z. Yang, A. M. Hassan (2013), *Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) beams*, Constr. Build. Mater.Vol. 48, 1027–1034.

[12] T. Tysmans, M. Wozniak, O. Remy, J. Vantomme (2015), *Finite element modelling of the biaxial behavior of high-performance fibre-reinforced cement composites (HPFRCC) using Concrete Damaged Plasticity*, Finite Elem. Anal. Des. Vol. 100, 47–53.

[13] L. Chen, B. A. Graybeal (2011), Modeling structural performance of second-generation ultra-high-performance concrete pi-girders, J. Bridge Eng. Vol. 17, 634–643.

[14] Solhmirzaei R., Kodur V.K.R. (2017). *Modeling the response of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams.* Procedia Engineering, Vol. 210, 211–219.

[15] NF P 18-710 (2016) *National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC).* Association Française de Normalization (AFNOR — French standard institute).