



XÁC ĐỊNH CHUYỂN VỊ CỦA DẦM THÉP TÍNH ĐỊNH TRONG GIAI ĐOẠN CHẢY DÈO

Vũ Quốc Anh¹, Hoàng Ngọc Phương²

Tóm tắt: Sự làm việc của kết cấu thép xét đến tính dẻo của vật liệu chưa được đề cập nhiều trong tiêu chuẩn Việt Nam [2], đặc biệt là vấn đề tính chuyển vị của dầm thép khi vật liệu làm việc ngoài giai đoạn đàn hồi. Do đó, việc nghiên cứu tìm hiểu các khái niệm và công thức tính toán là vấn đề cần thiết, bài báo nghiên cứu cách xác định chuyển vị của dầm thép tính định khi vật liệu thép làm việc ngoài giai đoạn đàn hồi.

Từ khóa: Chuyển vị; tính định; chảy dẻo; ngoài đàn hồi.

Summary: The behavior of steel structure considering ductility of the material has not much mentioned in Vietnam standards [2], especially the issue of deflection of steel beam while steel material behave inelastic. So the study of the concept and related formulas is necessary, the paper is studied about deflection of determinate beam while steel material behave inelastic.

Keywords: Deflection; determinate; yield; inelastic.

Nhận ngày 10/12/2015, chỉnh sửa ngày 24/12/2015, chấp nhận đăng 15/3/2016



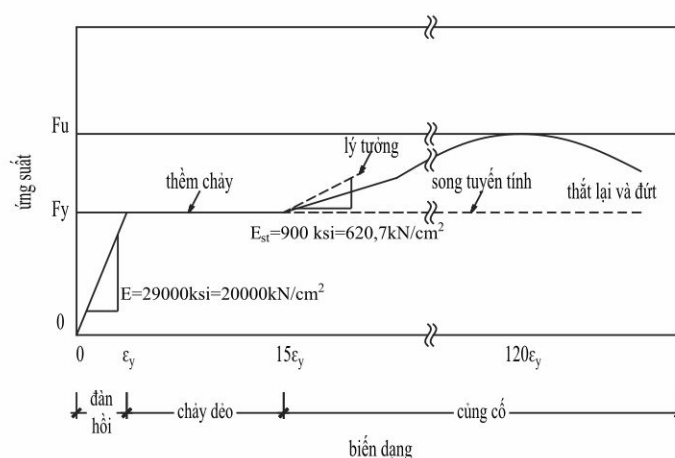
1. Phần mở đầu

Sự làm việc của dầm thép ngoài giai đoạn đàn hồi chưa được đề cập nhiều trong tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép TCVN 5575-2012. Trong tiêu chuẩn mới chỉ tính toán về độ bền mà chưa đề cập đến việc tính chuyển vị của dầm thép. Bên cạnh đó, kết cấu thép trong xây dựng thường có biến dạng lớn ngoài miền đàn hồi cho nên việc tính chuyển vị của dầm thép ngoài miền đàn hồi là cần thiết. Vì vậy, bài báo trình bày cách xác định chuyển vị của dạng kết cấu đơn giản nhất là dầm thép tính định tương ứng với các giai đoạn làm việc của vật liệu bằng phương pháp dầm giả tạo. Trong các tài liệu tính toán hiện có thì việc dùng phương pháp dầm giả tạo để tính chuyển vị của dầm xét đến sự làm việc dẻo mới chỉ áp dụng cho dầm conson chịu lực tập trung [3], vì vậy trong bài báo tác giả trình bày việc áp dụng phương pháp này đối với dầm đơn giản chịu tải trọng phân bố đều.



2. Lý tưởng hóa quan hệ momen - độ cong ($M-\phi$)

Trong Hình 1 mô tả lý tưởng sự làm việc cho vật liệu thép A36, có ba giai đoạn rõ ràng đó là: đàn hồi, dẻo và cứng cổ. Biến dạng tương ứng khi ứng suất đạt đến ứng suất chảy F_y gọi là biến dạng khi chảy ϵ_y , độ dốc của đường thẳng này là mô đun đàn hồi E . Ứng suất dư được bỏ qua trong quá trình lý tưởng hóa này.



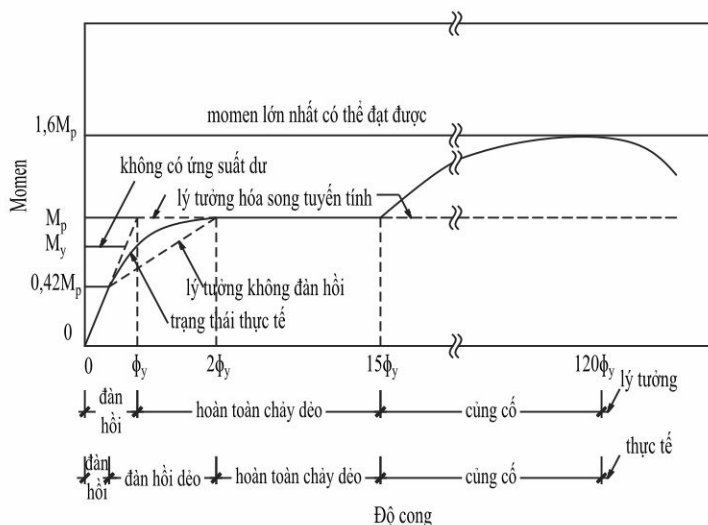
Hình 1. Quan hệ ứng suất - biến dạng $f - e$ của thép theo mô hình đàn dẻo lý tưởng [3]

¹PGS. TS, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội. E-mail: anhquocvu@gmail.com.

²ThS, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội.

Tương tự có thể phát triển để mô tả quá trình lý tưởng hóa trạng thái chịu uốn của dầm, giả thiết quan hệ lý tưởng $M-\phi$ có hình dạng như trong Hình 2. Lý tưởng hóa quan hệ $M-\phi$ bằng cách xác định vùng chảy dẻo hay trạng thái độ bền giới hạn của tiết diện M_p , sau đó kéo dài đường đàn hồi cho cắt vùng chảy dẻo như trên Hình 2. Lý tưởng hóa quan hệ song tuyến tính giữa M, ϕ là thuận tiện nhất khi sử dụng trong thiết kế.

Trạng thái cực hạn về biến dạng của tiết diện ứng với giới hạn về độ bền (được thể hiện bằng M_p) là biến dạng hoặc độ cong tương ứng với ϵ_{sh} .



Hình 2. Lý tưởng hóa quan hệ $M - \phi$ [3]



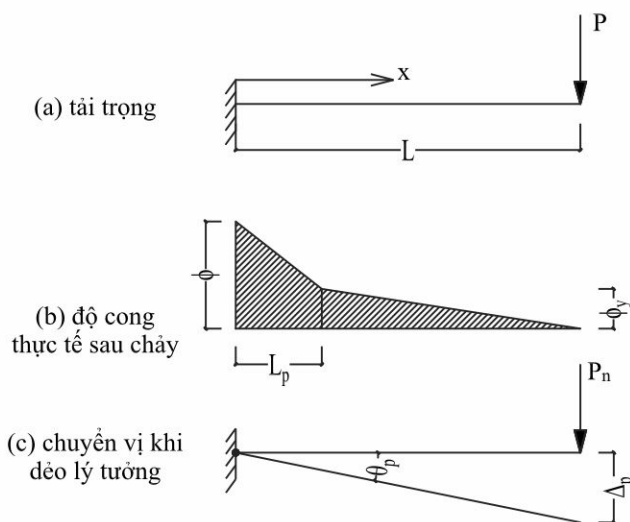
3. Khả năng chịu uốn của dầm tĩnh định

Xét một dầm conson chịu tải trọng tập trung ở đầu dầm như Hình 3a. Momen lớn nhất trên dầm khi bỏ qua trọng lượng bản thân dầm là: $M = P \cdot L$

Khi tải trọng P tăng lên, thì momen của tiết diện cũng tăng lên cho tới khi momen lớn nhất có thể đạt được và hình thành khớp dẻo ở ngàm. Momen lớn nhất đạt được và không đổi gọi là momen dẻo của tiết diện M_p . Khi đó quan hệ $M-\phi$ tại ngàm thể hiện bằng đoạn nằm ngang như trong Hình 2. Khi sự quay tự do xảy ra thì một cơ cấu dẻo được hình thành, hệ không có khả năng chịu thêm tải trọng. Trên thực tế thì khớp dẻo xuất hiện thành vùng và có chiều dài L_p . Biến dạng sau khi chảy dẻo và chuyển vị là những vấn đề cần quan tâm, khi đó việc lý tưởng hóa độ cong đem lại sự thuận tiện cho tính toán.

Độ cong sau khi chảy dẻo là tuyến tính trong Hình 3b.

Độ cong ở đây được xem là tỷ lệ tương ứng với momen, nó phải tăng lên một cách tuyến tính từ vị trí ngàm (có momen xác định từ điều kiện cân bằng $M=PL$) đến vị trí $x = L_p$ (ứng với việc lý tưởng hóa giới hạn đàn hồi). Việc lý tưởng hóa độ cong tuyến tính tuy là không chính xác nhưng có thể chấp nhận được vì thiên về an toàn. Chuyển vị khi chảy dẻo là Δ_p , góc xoay tương ứng tại khớp dẻo là θ_p .



Hình 3. Ứng xử sau chảy dẻo của dầm conson

4. Chuyển vị của dầm tĩnh định

4.1 Chuyển vị của dầm trong giai đoạn đàn hồi

Chuyển vị tại đầu tự do của dầm conson trong giai đoạn đàn hồi trong Hình 3 là: $\Delta = PL^3/3EI$.

Chuyển vị này có thể xác định bằng nhiều cách, nhưng cách đơn giản nhất để mở rộng và dự đoán trạng thái sau khi chảy là phương pháp dầm giả tạo, phương pháp này không cần quan tâm đến quan hệ ứng suất - biến dạng mà chỉ cần quan tâm đến độ cong hoặc độ cong gần đúng để tính chuyển vị.

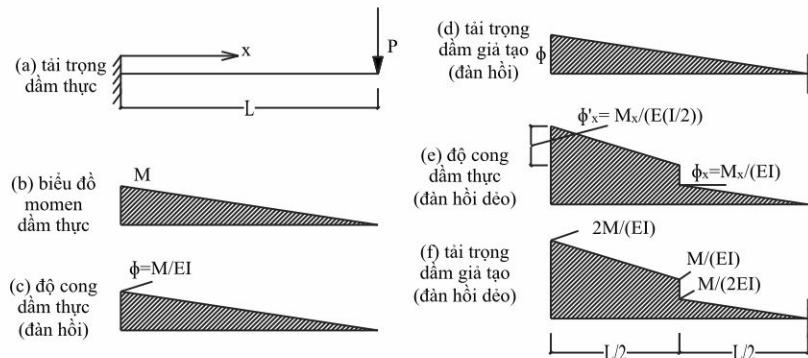
Mối quan hệ giữa tải trọng, lực cắt, momen, độ dốc và chuyển vị là [1]:

$$y = \text{chuyển vị, độ dốc hay góc xoay } \theta = \frac{dy}{dx} \quad (1), \text{ độ cong } \phi = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2), \text{ lực cắt } V = \frac{dM}{dx} = EI \frac{d^3y}{dx^3} \quad (3),$$

$$\text{momen } M = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (4), \text{ tải trọng } q = \frac{dV}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} = EI \frac{d^4y}{dx^4} \quad (5), y(x) = M_{gt(x)} \quad (6), \frac{dy}{dx} = \theta = \frac{dM_{gt}}{dx} = V_{gt} \quad (7)$$

Để minh hoạ xét ví dụ sau.

Ví dụ 1:



Hình 4. Sơ đồ dầm conson

Cho dầm conson chịu tải tập trung P ở đầu dầm như Hình 4a, biểu đồ momen Hình 4b, sơ đồ dầm giả tạo Hình 4d. Khi đó chuyển vị Δ là giá trị momen tại ngàm trong dầm giả tạo (đầu tự do trong dầm thực).

$$\text{Chuyển vị tại đầu tự do trong giai đoạn đàn hồi là: } \Delta = \frac{M}{EI} \left(\frac{L}{2} \right) \frac{2L}{3} = \frac{ML^2}{3EI} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (8)$$

4.2 Chuyển vị của dầm trong giai đoạn sau đàn hồi (đàn dẻo)

Khi dầm làm việc trong giai đoạn đàn dẻo, độ cứng của các đoạn dầm không còn là EI nữa, giả sử độ cứng của dầm trong đoạn $x = 0 \rightarrow L/2$ chỉ bằng EI/2 [3]. Dùng phương pháp dầm giả tạo để xác định chuyển vị sau đàn hồi với điều kiện là sự ước lượng của độ cong dọc theo chiều dài dầm có thể chấp nhận được. Biểu đồ độ cong trong Hình 4e với giả thiết giảm độ cứng. Dầm giả tạo trong Hình 4f được dùng để tính chuyển vị của dầm ở giai đoạn đàn hồi dẻo.

$$2M_x = PL = M$$

$$\Delta = \frac{1}{EI} \left[M \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{5L}{6} \right) + M \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{3}{4} \right) L + \frac{M}{2} \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{L}{3} \right) \right] \rightarrow \Delta = \frac{15 PL^3}{24 EI} \quad (9)$$

Nhận xét: Chuyển vị của dầm ở giai đoạn đàn dẻo (với giả thiết tương ứng) gần gấp đôi so với chuyển vị của dầm tĩnh trong giai đoạn đàn hồi.

4.3 Chuyển vị của dầm trong giai đoạn dẻo

Xét chuyển vị của dầm conson trong Hình 3 từ giai đoạn dẻo, khớp dẻo hình thành tại ngàm. Độ cong sau khi chảy dẻo được thể hiện trong Hình 3b coi là hợp lý. Sự bắt đầu của giai đoạn cứng cổ được xác định bằng biến dạng ở thớ ngoài cùng trên mặt cắt ngang tại ngàm đạt đến $30\varepsilon_y$.

Để làm rõ vấn đề này đi xét ví dụ sau:

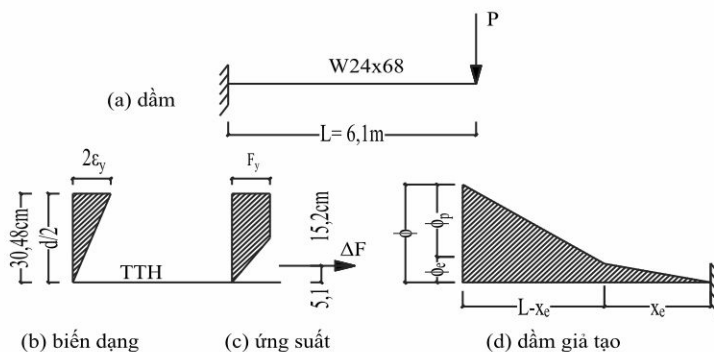
Ví dụ 2: Cho dầm có tiết diện W24x68 (A36, $F_y = 24,84 \text{ kN/cm}^2$) như trong Hình 5, có:

$$S_x = 2523,6 \text{ cm}^3, I_x = 76170,35 \text{ cm}^4, Z_x = 2900,5 \text{ cm}^3, E = 20000 \text{ kN/cm}^2, L = 6,1 \text{ m}.$$

Dự đoán quan hệ lực - chuyển vị ứng với biến dạng ở thớ ngoài cùng tại ngàm là (i) ϵ_y , (ii) $2\epsilon_y$, (iii) $15\epsilon_y$, (iv) $30\epsilon_y$, (v) phát triển quan hệ lý tưởng giữa lực - chuyển vị cho dầm.

(i) $\epsilon_s = \epsilon_y$, $M_y = S_x \cdot F_y = 2523,6.24,84 = 62686,2 \text{ kN.cm}$ bắt đầu chảy

$$P = \frac{62686,2}{610} = 102,76 \text{ kN}, \Delta_e = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{102,76.610^3}{3.20000.76170,35} = 5,1 \text{ cm}$$



Hình 5a,b,c,d. Sơ đồ tính, biểu đồ biến dạng, ứng suất trên mặt cắt ngang, sơ đồ dầm giả tạo của dầm

(ii) $\epsilon_s = 2\epsilon_y$

$M = M_p - \Delta F.10,16$ (cánh tay đòn bằng 10,16cm) như trên Hình 5c

$$M_p = Z_x F_y = 2900,5.24,84 = 72048,42 \text{ kN.cm}$$

$$\Delta F = \frac{F_y}{2} 15,24.1,054 = 200 \text{ kN}; (t_w = 1,054 \text{ cm}) \text{ như trên Hình 5b,c;}$$

$$M = 72048,42 - 200.10,16 = 70016,42 \text{ kN.cm}; P = 70016,42 / 610 = 114,8 \text{ kN};$$

$$X_e = \frac{62686,2}{114,8} = 546 \text{ cm} \text{ (xem Hình 5d)}$$

$$\phi_e = \frac{M_y}{EI} = 4,1.10^{-3} \text{ rad/cm}(\epsilon_y); \phi = 2\phi_e = 8,2.10^{-3} \text{ rad/cm}(2\epsilon_y)$$

Từ sơ đồ dầm giả tạo ta tính được: $\Delta_{2\epsilon_y} = 6,35 \text{ cm}$

(iii) $\epsilon_s = 15\epsilon_y$

$$M = M_p; P = \frac{734,13}{6,1} = 120,35 \text{ kN}; X_e = \frac{638,73}{120,35} = 5,3 \text{ m}$$

$$\phi_e = 4,1.10^{-3} \text{ rad/cm}(\epsilon_y); \phi_p = (15-1)\phi_e = 14\phi_e = 57,4.10^{-3} \text{ rad/cm} \text{ ta có}$$

$$\Delta_{15\epsilon_y} = 19,3 \text{ cm} \text{ (Hình 5d)}$$

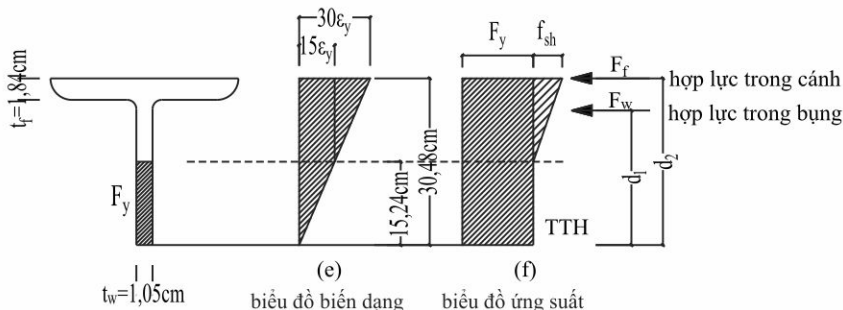
(iv) $\epsilon_s = 30\epsilon_y$ như Hình 5e (bắt đầu giai đoạn cứng cổ)

$$f_{sh} = 15\epsilon_y \cdot E_{sh} = 15.0,00124.620 = 11,51 \text{ kN/cm}^2$$

$$M = M_p + F_f 2d_2 + F_w 2d_1$$

$$A_w = (d - 2t_f)t_w = 60,4 \text{ cm}^2; A_f = (A - A_w) / 2 = 34,65 \text{ cm}^2$$

Hợp lực trong bản cánh và bụng tính được là $F_f = 386,46 \text{ kN}; F_w = 77,11 \text{ kN}$ (Hình 5f)



Hình 5e,f. Biểu đồ ứng suất, biến dạng trên tiết diện của dầm conson

Giá trị momen trên mặt cắt ngang sau khi tính là $M = 998,2 \text{ kN.m}$ suy ra $P = 163,75 \text{ kN}$

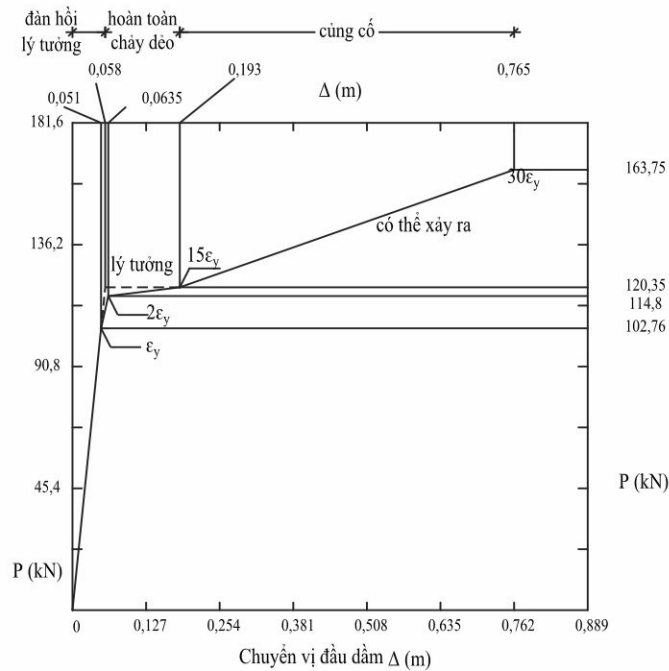
$$X_e = \frac{638,73}{163,75} = 3,9 \text{ m}$$

Tính momen trên sơ đồ dầm giả tạo ta có $\Delta_{30\epsilon_y} = 0,765 \text{ m}$

(v) Phát triển quan hệ lý tưởng giữa lực và chuyển vị cho dầm trong Hình 5a. Vùng chảy dẻo lý tưởng bắt đầu xuất hiện tương ứng với giá trị của Δ_y .

$$M_p = Z_x F_y = 734,13 \text{ kN.m} ; P_y = \frac{734,13}{6,1} = 120,35 \text{ kN} \text{ vùng chảy dẻo}$$

$$\Delta_y = \frac{P_y L^3}{3EI} = \frac{120,35 \cdot 610^3}{3 \cdot 20000 \cdot 76170,35} = 0,058 \text{ m}$$



Hình 5g. Quan hệ lực - chuyển vị tại đầu dầm conson

Quan hệ lý tưởng giữa lực - chuyển vị của dầm trong Hình 5a được thể hiện trong Hình 5g.

Nhận xét: tính chuyển vị trong giai đoạn dẻo (i) ϵ_y , (ii) $2\epsilon_y$, (iii) $15\epsilon_y$ khá phức tạp, nếu áp dụng việc lý tưởng hóa (như đường nét đứt trên biểu đồ) thì sẽ đơn giản hơn trong quá trình tính toán.

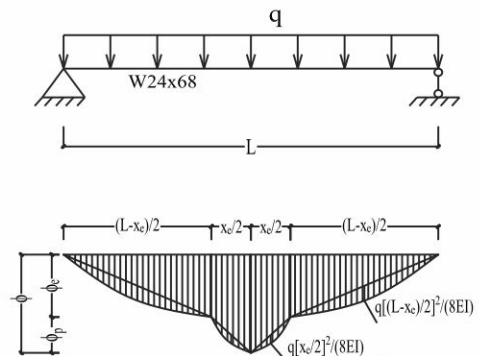
Ví dụ 3: Cho dầm đơn giản có $L = 12,2 \text{ m}$ tiết diện và vật liệu như ví dụ 2, chịu tải phân bố đều, dự đoán quan hệ lực - chuyển vị ứng với biến dạng dạng ở thứ ngoài cùng tại giữa nhịp là (i) ϵ_y , (ii) $2\epsilon_y$, (iii) $15\epsilon_y$, (iv) phát triển quan hệ lý tưởng giữa lực - chuyển vị cho dầm.

$$(i) \epsilon_s = \epsilon_y$$

$$M_y = S \cdot F_y = 626,86 \text{ kN.m}$$

$$\text{Sự chảy đầu tiên } M = \frac{qL^2}{8} \rightarrow q = \frac{8M}{L^2}$$

$$q = \frac{8 \cdot 626,86}{12,2^2} = 33,7 \text{ kN/m} ; \Delta_e = \frac{5qL^4}{384EI} = 6,35 \text{ m}$$



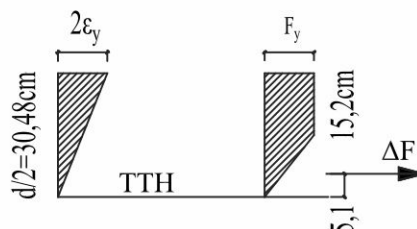
Hình 6a. Sơ đồ dầm đơn giản

$$(ii) \varepsilon_s = 2\varepsilon_y$$

$$M = M_p - \Delta F \cdot 10,16 \text{ (xem Hình 5c);}$$

$$M_p = Z_x F_y = 73413 \text{ KN.cm}$$

$$\Delta F = \frac{F_y}{2} 15,24 \cdot 1,054 = 200 \text{ KN } (t_w = 1,054 \text{ cm})$$



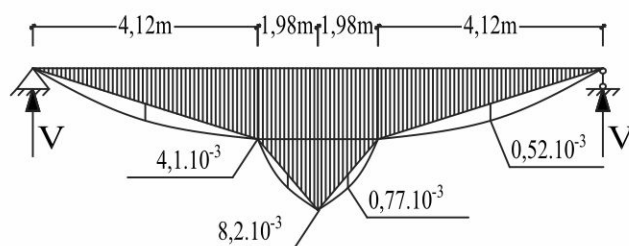
Hình 6b. Biểu đồ ứng suất, biến dạng trên tiết diện dầm

$$M = 73413 - 200 \cdot 10,16 = 71381 \text{ kN.cm} ; \rightarrow q = \frac{8M}{L^2} = \frac{8 \cdot 713,81}{12,2^2} = 38,4 \text{ kN/m}$$

$$\text{Ta có } M_x = \frac{qX(L-X)}{2} \text{ hay } M_y = \frac{qX(L-X)}{2} ; 626,86 = \frac{38,4 \cdot X(12,2-X)}{2} \text{ giải ra ta có}$$

$$X = \frac{L-X_e}{2} = 4,12 \text{ m} \rightarrow X_e = 3,96 \text{ m}$$

$$\phi_e = \frac{M_y}{EI} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ rad/cm} (\varepsilon_y) ; \phi = 2\phi_e = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ rad/cm} (2\varepsilon_y)$$



Hình 6c. Sơ đồ dầm giả tạo với $\varepsilon_s = 2\varepsilon_y$

$$V = \left[\frac{1}{2} \phi_e \cdot \frac{L-X_e}{2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{q[(L-X_e)/2]^2}{8EI} \cdot \frac{L-X_e}{2} + \frac{(\phi_e + \phi) \cdot X_e}{4} + \frac{2}{3} \cdot \frac{q[X_e/2]^2}{8EI} \cdot \frac{X_e}{2} \right]$$

$$\text{Thay số vào ta có } V = 2215,2 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

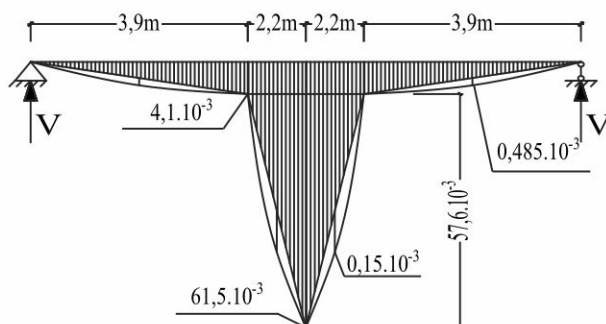
Chuyển vị tại giữa dầm thực là giá trị mômen tại giữa nhịp trong sơ đồ dầm giả tạo trong Hình 6c, sau khi tính toán ta có kết quả là $\Delta_{2\varepsilon_y} = 0,09 \text{ m}$

$$(iii) \varepsilon_s = 15\varepsilon_y$$

$$M = M_p = 734,13 \text{ KN.m} ; M = \frac{qL^2}{8} \rightarrow q = \frac{8M}{L^2} = \frac{8 \cdot 734,13}{12,2^2} = 39,6 \text{ kN/m}$$

$$\text{Ta có } M_x = \frac{qX(L-X)}{2} \text{ hay } M_y = \frac{qX(L-X)}{2} ; 626,86 = \frac{39,6 \cdot X(12,2-X)}{2} \text{ giải ra ta có}$$

$$X = \frac{L-X_e}{2} = 3,9 \text{ m} \rightarrow X_e = 4,4 \text{ m}$$



Hình 6d. Sơ đồ dầm giả tạo với $\varepsilon_s = 15\varepsilon_y$

$$\phi_e = 4,1.10^{-3} \text{ rad/cm} (\epsilon_y); \phi_p = (15-1)\phi_e = 14\phi_e = 57,4.10^{-3} \text{ rad/cm} \text{ ta có}$$

$$\text{Thay số vào ta có } V = 9160,5.10^{-5} \text{ rad}$$

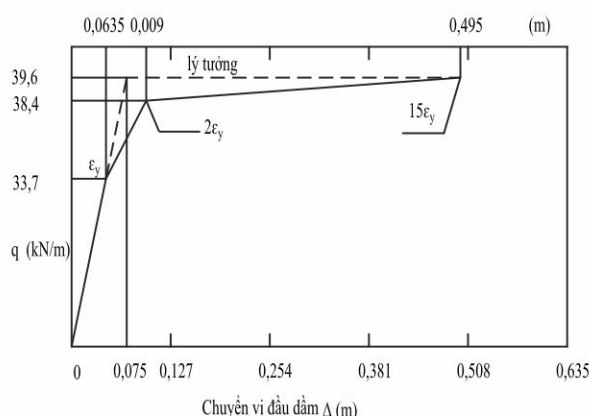
Chuyển vị tại giữa dầm là giá trị momen tại giữa nhịp trong sơ đồ dầm giả tạo trong Hình 6d, sau khi tính toán ta có kết quả là $\Delta_{15\epsilon_y} = 0,495m$

(iv) phát triển quan hệ lý tưởng giữa lực - chuyển vị cho dầm.

Quan hệ lý tưởng giữa lực và chuyển vị cho dầm trong Hình 6e. Vùng chảy dẻo lý tưởng bắt đầu xuất hiện tương ứng với giá trị của Δ_y .

$$M = M_p = 734,13 \text{ KN.m}; M = \frac{qL^2}{8} \rightarrow q = \frac{8M}{L^2} = \frac{8.734,13}{12,2^2} = 39,6 \text{ kN/m}$$

$$\Delta_y = \frac{5qL^4}{384EI} = 0,075m$$



Hình 6e. Quan hệ lực - chuyển vị tại giữa dầm đơn giản



5. Nhận xét

- Việc lý tưởng hóa quan hệ $M - \phi$ cho dầm chịu uốn theo tiêu chuẩn Mỹ AISC-LRFD tạo điều kiện thuận lợi cho người thiết kế, làm đơn giản vấn đề mà vẫn đảm bảo tính chính xác và an toàn.

- Bài báo là bước khởi đầu cho việc nghiên cứu tính toán sự làm việc của các hệ dầm phức tạp hơn như dầm liên tục nhiều nhịp, dầm siêu tĩnh... đặc biệt đối với các công trình chịu tải trọng động đất.

- Bài toán được thực hiện dựa trên các số liệu và qui phạm Mỹ nên lúc tính toán ví dụ các số liệu bị lè khi chuyển đổi sang đơn vị KN,m...



6. Kết luận

Bài báo đã xác định được chuyển vị của dầm tĩnh định trong các giai đoạn làm việc thực tế của dầm: đàn hồi, dẻo, cũng cố với các giả thiết kèm theo bằng phương pháp dầm giả tạo kết hợp với việc lý tưởng hóa quan hệ $M - \phi$ cho dầm chịu uốn theo tiêu chuẩn Mỹ AISC-LRFD. Vấn đề này chưa đề cập đến trong các tài liệu tính toán thiết kế, giáo trình môn kết cấu thép, cũng như trong tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép Việt Nam TCVN 5575-2012.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Văn Liên (2008), *Sức bền vật liệu*, Nhà xuất bản Xây Dựng, Hà Nội.
2. Tiêu chuẩn xây dựng Việt Nam (2012), *TCVN 5575_2012 kết cấu thép tiêu chuẩn thiết kế*, Nhà xuất bản Xây Dựng, Hà Nội.
3. Robert Englekirk (1993), *Steel Structures Controlling Behavior Through Design*.