

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LỰC DỌC ĐẾN QUÁ TRÌNH CHẢY DÈO VÀ MẶT CHẢY DÈO CỦA THANH THÉP TIẾT DIỆN CHỮ I

ThS. HOÀNG HIẾU NGHĨA  
 Trường đại học Hải Phòng  
 PGS.TS. VŨ QUỐC ANH  
 Trường đại học Kiến trúc Hà Nội

**Tóm tắt:** Khi nghiên cứu sự hình thành khớp dẻo của kết cấu thanh nén uốn, nhóm tác giả mới chỉ nghiên cứu thanh tiết diện chữ nhật khi chịu  $M$  và  $N$  [2]. Với tiết diện thanh bất kỳ cần phải được nghiên cứu cụ thể. Bài báo giới thiệu mô hình và cách xác định đặc trưng dẻo của thanh tiết diện bất kỳ. Đồng thời vẽ đường giới hạn đàn hồi và đường cong dẻo của tiết diện thanh thép chữ I để từ đó có thể xác định được sự hình thành khớp dẻo của tiết diện thanh thép nén uốn chữ I khi có kể đến ảnh hưởng của lực dọc  $N$ . Tác giả đề xuất phương trình đường cong dẻo và so sánh với các đường cong dẻo của các tác giả đã nghiên cứu trước đây.

## 1. Mở đầu

Hiện nay kết cấu thép được ứng dụng nhiều trong kết cấu nhà cao tầng vì tính ưu việt của nó. Với độ dẻo cao của vật liệu thép, kết cấu thép có thể chịu tải trọng động và lặp rất tốt. Trong các tiêu chuẩn tính toán của Việt Nam khi tính toán kết cấu mới chỉ tính ứng với vật liệu làm việc trong giai đoạn đàn hồi, không kể đến sự làm việc của vật liệu ở trạng thái dẻo. Điều đó đã gây ra lãng phí vì chưa tận dụng được hết khả năng làm việc của vật liệu thép. Với kết cấu khung thép, cấu kiện dầm chịu uốn là chủ yếu, cấu kiện cột chịu nén uốn. Các nghiên cứu của nhiều

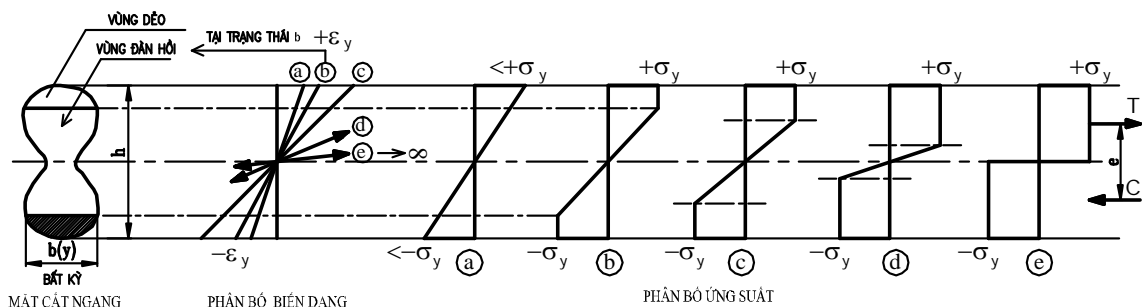
tác giả mới chỉ tập trung nghiên cứu cấu kiện chịu mômen uốn  $M$ , chưa đề cập nhiều đến ảnh hưởng của lực dọc  $N$  tới quá trình làm việc dẻo của thanh nén uốn.

Nhóm tác giả đã nghiên cứu sự hình thành khớp dẻo của thanh tiết diện chữ nhật có kể đến ảnh hưởng của lực dọc  $N$  [2], chưa nghiên cứu sự chảy dẻo của các loại tiết diện khác. Do vậy bài viết này giới thiệu mô hình và cách xác định đặc trưng dẻo của các loại tiết diện bất kỳ, đồng thời xây dựng được đường giới hạn đàn hồi và đường chảy dẻo của tiết diện thép chữ I, từ đó có thể xác định được sự hình thành khớp dẻo của tiết diện thanh thép chữ I nén uốn khi chịu cả mô men  $M$  và lực dọc  $N$ . Nhóm tác giả đề xuất phương trình đường cong dẻo và so sánh với các đường cong dẻo của các tác giả đã nghiên cứu trước đây.

## 2. Nghiên cứu quá trình chảy dẻo của thanh khi chịu mômen uốn $M$

### 2.1 Khảo sát quá trình chảy dẻo và xuất hiện khớp dẻo của tiết diện bất kỳ [4], [5]

Xét tiết diện thanh có tiết diện bất kỳ đối xứng và thực hiện khảo sát sự phân bố ứng suất, biến dạng của tiết diện thanh khi chịu mômen uốn  $M$  (hình 1).



Hình 1. Sự phân bố ứng suất và chảy dẻo của thanh với tiết diện bất kỳ chịu mô men uốn

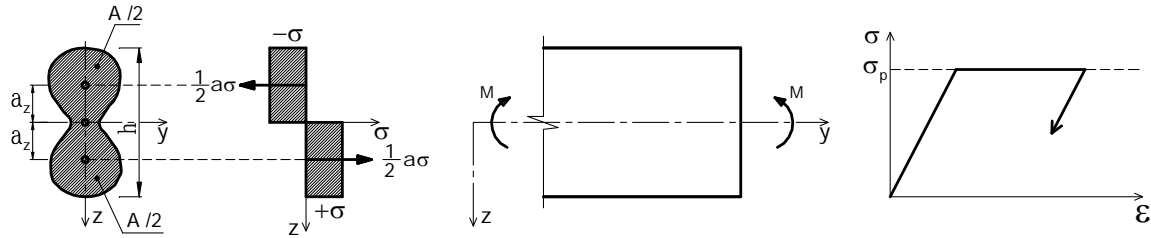
Tại giai đoạn 1 (hình 1a), ứng suất trên tiết diện ở cả hai thứ nén và kéo đều nhỏ hơn ứng suất chảy dẻo  $\sigma_y$  và độ dốc của đồ thị mômen uốn – độ cong bằng  $EI$ . Giai đoạn 2 là giai đoạn ứng suất tại thứ biên

của tiết diện đạt tới ứng suất chảy dẻo  $\sigma_y$  (hình 1b), mômen tương ứng gọi là mômen dẻo ban đầu  $M_e$  (mômen giới hạn đàn hồi). Tiếp tục tăng mômen, ứng suất chảy sẽ phát triển lan rộng trên một phần diện

tích tiết diện, tương ứng với giai đoạn 3, 4 (hình 1c và hình 1d). Tại giai đoạn 5, toàn bộ tiết diện bị chảy dẻo, tiết diện không chịu thêm mômen nữa, xuất hiện khớp dẻo. Khớp được hình thành gọi là khớp dẻo và mômen tương ứng gọi là mômen dẻo toàn phần (hay mômen dẻo của tiết diện) ký hiệu là  $M_p$ .

**2.2 Xác định mômen bền dẻo  $M_p$  khi tiết diện chảy dẻo hoàn toàn**

Xét phần tử thanh với vật liệu đàn dẻo lý tưởng chịu mômen uốn  $M$  (hình 2) với mặt cắt tiết diện của thanh có hình dạng bất kỳ đối xứng.



**Hình 2.** Phần tử thanh với tiết diện bất kỳ đối xứng chịu mômen uốn thuần túy  $M$

Mômen bền dẻo của tiết diện  $M_p$  được xác định như sau:

$$M_p = \int_A z \sigma_p dA = \sigma_p \int_{z>0} z dA + (-\sigma_p) \int_{z<0} z dA \quad (1)$$

Với  $S = \int_{z>0} z dA$  (với  $S$  - mômen tĩnh của  $1/2$  tiết diện với trục trọng tâm).

$$\Rightarrow M_p = 2S \cdot \sigma_p \quad (2)$$

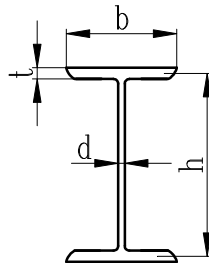
$S$  được tính:  $S = a_z \left( \frac{1}{2} A \right)$  (với  $A$  là diện tích của toàn bộ tiết diện ngang).

$a_z$  - khoảng cách từ trọng tâm của phần tiết diện ngang đến trục trọng tâm tiết diện  $y$ .

a. Khảo sát với tiết diện thanh là hình chữ I

$$W_p = 2 \left[ \left( \frac{h}{2} \right) b t + \left( \frac{h-t}{4} \right) \left( \frac{h-t}{2} \cdot d \right) \right] = b \cdot h \cdot t + \frac{1}{4} d (h-t)^2 \quad (3)$$

Với  $W_p$  là mômen kháng uốn dẻo của tiết diện.



b. Đặc trưng mặt cắt dẻo đối với thanh có hình dạng tiết diện khác nhau [6]

Thực hiện tính toán với nhiều loại tiết diện ta có mômen kháng uốn dẻo của tiết diện  $W_p$  và mômen kháng uốn đàn hồi  $W_e$  được lập như bảng 1.

**Bảng 1.** Mômen kháng uốn đàn hồi và dẻo của các tiết diện khác nhau

Mặt cắt tiết diện	Chữ nhật	Hình tròn	Hình vành khăn	Chữ I	Chữ T
$W_e$	$\frac{1}{6} b \cdot h^2$	$\frac{\pi}{32} D^3$	$\frac{\pi}{32} D^3 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2t}{D} \right)^4 \right]$	$b \cdot h \cdot t + \frac{1}{6} d \cdot h^2$	$\frac{5}{18} t \cdot a^2$
$W_p$	$\frac{1}{4} b \cdot h^2$	$\frac{1}{6} D^3$	$\frac{1}{6} D^3 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2t}{D} \right)^3 \right]$	$b \cdot h \cdot t + \frac{1}{4} d \cdot (h-t)^2$	$\frac{1}{2} t \cdot a^2$

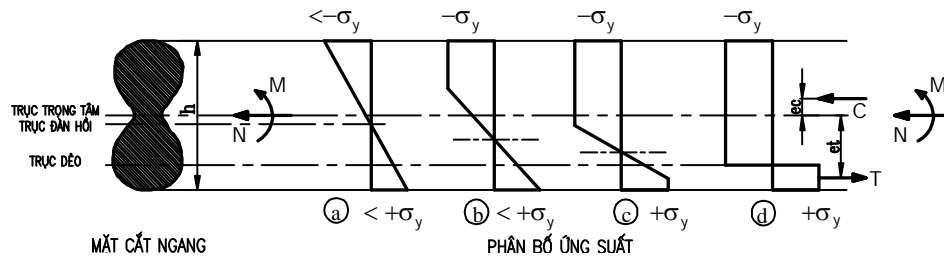
**3. Nghiên cứu quá trình chảy dẻo của thanh nén uốn có xét đến ảnh hưởng của lực dọc**

**3.1 Quá trình chảy dẻo của tiết diện thanh tiết diện bất kỳ [4], [5], [6]**

Ở phần trên ta đã nghiên cứu tiết diện thanh chỉ chịu mômen uốn  $M$  không kể đến ảnh hưởng của lực dọc  $N$  trên mặt cắt tiết diện thanh. Tuy nhiên cần thiết

phải khảo sát ảnh hưởng của lực dọc  $N$  tới mômen bền dẻo  $M_p$ . Trên hình 3 thể hiện sự thay đổi ứng suất khi kể đến ảnh hưởng của lực dọc.

Khảo sát tiết diện bất kỳ của phần tử thanh với vật liệu biến dạng từ đàn hồi đến dẻo chịu tác dụng đồng thời của mômen uốn  $M$  và lực dọc  $N$  (hình 3).

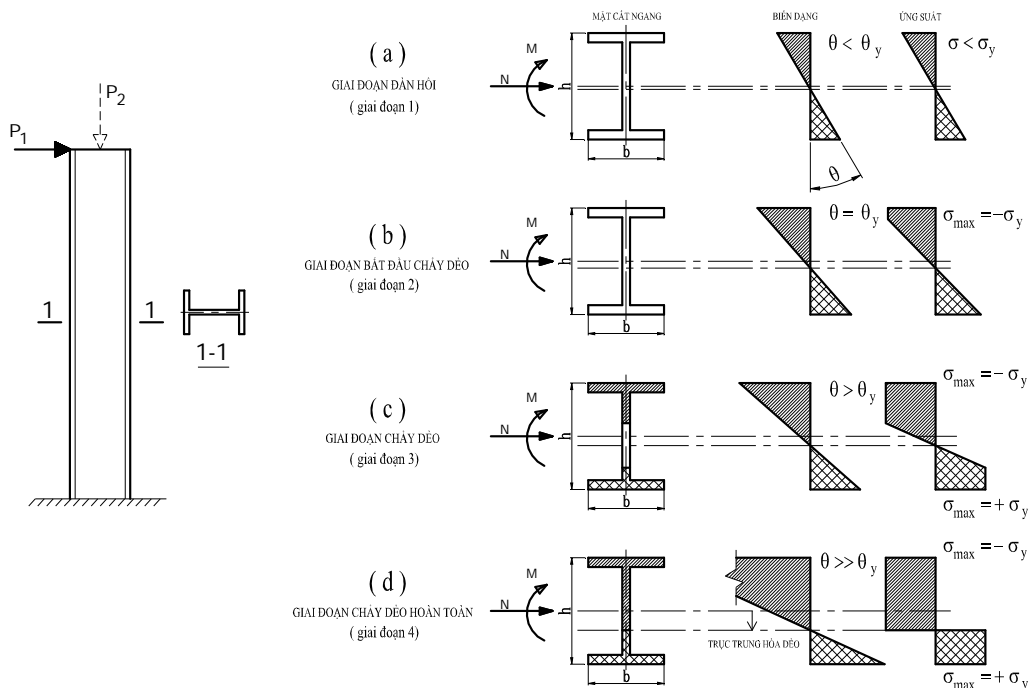


**Hình 3.** Sự phân bố ứng suất và hình thành khớp dẻo của thanh với tiết diện bất kỳ chịu mômen uốn  $M$  và lực dọc  $N$

Trên hình 3 thể hiện biểu đồ ứng suất pháp  $\sigma$  trên tiết diện thanh trong các giai đoạn phát triển biến dạng khác nhau: hình 3a: Biểu đồ ứng suất do  $M$  và  $N$  gây ra ở trạng thái đàn hồi; hình 3b: Chảy dẻo trong vùng nén ( $\sigma_{max} = -\sigma_y$ ); hình 3c: chảy dẻo trong vùng nén và vùng kéo; hình 3d: Chảy dẻo hoàn toàn (trạng thái giới hạn dẻo), xuất hiện hay hình thành khớp dẻo hoàn toàn.

**3.2 Quá trình chảy dẻo của tiết diện thanh thép chữ I chịu nén uốn**

Khảo sát quá trình chảy dẻo của tiết diện cột thép chữ I có một đầu ngàm một đầu tự do chịu lực ngang  $P_1$  và lực thẳng đứng  $P_2$  (hình 4).



**Hình 4.** Quá trình chảy dẻo của tiết diện cột thép chữ I

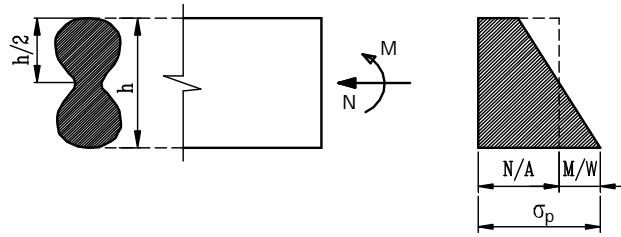
**3.3 Ảnh hưởng của lực dọc tới mômen bền dẻo của tiết diện  $M_p$  [5], [8]**

Ta nghiên cứu ảnh hưởng của lực dọc  $N$  tới mômen bền dẻo của tiết diện  $M_p$  với tiết diện bất kỳ.

**a. Khảo sát tiết diện bất kỳ có hình dạng đối xứng**

- Xét ở trạng thái đàn hồi:

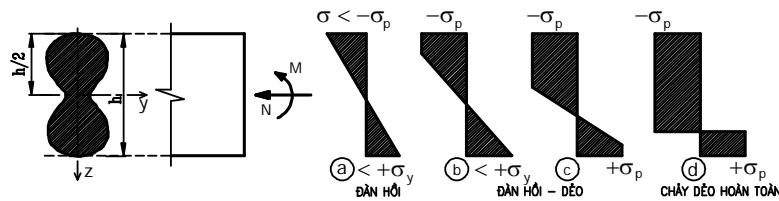
Cũng tương tự như cách xây dựng với tiết diện thanh hình chữ nhật, với tiết diện thanh có hình dạng bất kỳ đối xứng (hình 5).



Hình 5. Xét tiết diện hình dạng bất kỳ chịu M và N

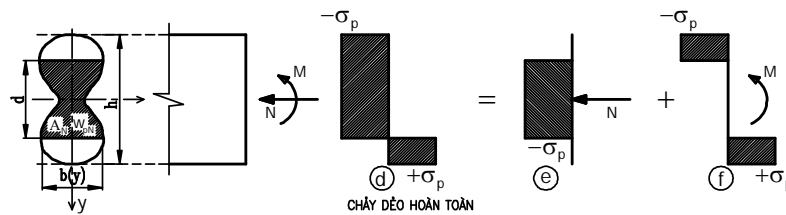
Ta xây dựng được mối quan hệ: 
$$\frac{N}{N_p} + \frac{M}{M_e} = 1 \tag{4}$$

- Xét quá trình chảy dẻo từ trạng thái giới hạn đàn hồi đến trạng thái chảy dẻo hoàn toàn (hình 6).



Hình 6. Trạng thái đàn hồi, đàn dẻo và chảy dẻo hoàn toàn

- Thành lập mối quan hệ giữa M và N khi tiết diện ở trạng thái chảy dẻo hoàn toàn (hình 7).



Hình 7. Mô hình chia ảnh hưởng độc lập của M và N

Khi tiết diện ở trạng thái chảy dẻo hoàn toàn, ta chia biểu đồ ứng suất trên hình 7 ra làm 2 phần (d) = (e) + (f). Phần (e) là ứng suất trong vùng lõi của tiết diện (chiều cao = d) được gây ra bởi chỉ lực dọc trục N; Phần ứng suất còn lại (f) của mặt cắt tiết diện được gây ra bởi chỉ mômen M.

Từ hình 7 tính được:

$$N = 2\sigma_p \int_0^{d/2} b(y)dy = \sigma_p A_N \tag{5}$$

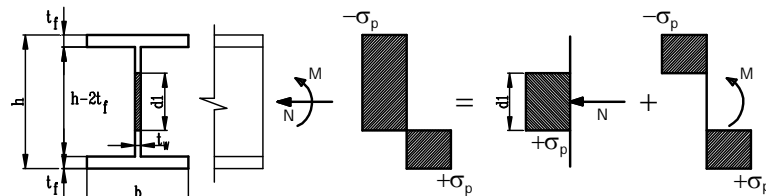
$$M = 2\sigma_p \int_{d/2}^{h/2} y.b(y)dy = \sigma_p (W_p - W_{pN}) \tag{6}$$

Từ (5) và (6) ta xây dựng được mối quan hệ:

$$\frac{N}{N_p} = \frac{A_N}{A} \quad \frac{M}{M_p} = 1 - \frac{W_{pN}}{W_p} \tag{7}$$

b. Khảo sát tiết diện chữ I đối xứng

- Trường hợp 1: Khi nội lực  $N < \sigma_p t_w (h - 2t_f)$  (hình 8).



Hình 8. Mô hình chia ảnh hưởng độc lập của M và N khi  $N < \sigma_p t_w (h - 2t_f)$

Khi đó ta có  $N = \sigma_p t_w d_1$  và  $N_p = \sigma_p A \rightarrow \frac{N}{N_p} = \frac{t_w d_1}{A}$  (8)

$$M = W_p \cdot \sigma_p - W_{d1} \cdot \sigma_p = \left( W_p - \frac{t_w d_1^2}{4} \right) \sigma_p \tag{9}$$

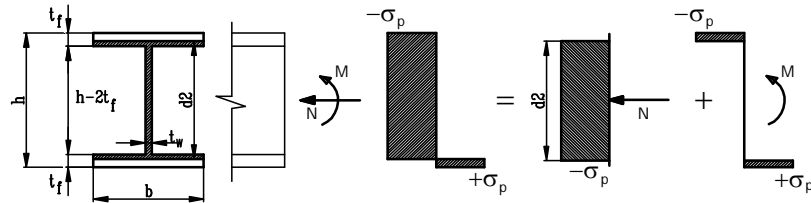
Từ (7)  $\rightarrow \frac{M}{M_p} = \frac{W_p \cdot \sigma_p - W_{d1} \cdot \sigma_p}{W_p \cdot \sigma_p} = 1 - \frac{W_{d1}}{W_p} = 1 - \frac{t_w d_1^2}{4W_p}$  (10)

Từ công thức (8) và (10) có được công thức mối quan hệ giữa M và N như sau [3]:

$$\left(\frac{M}{M_p}\right) = 1 - \alpha^* \cdot \left(\frac{N}{N_p}\right)^2 \text{ khi } \frac{N}{N_p} < \frac{A_w}{A} \text{ hay } N < \sigma_p t_w (h - 2t_f);$$
 (11)

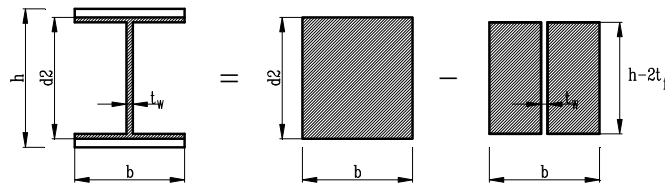
$$\alpha^* = \frac{A^2}{4 \cdot t_w \cdot W_p}$$
 (12)

- Trường hợp 2: Khi nội lực  $\sigma_p t_w (h - 2t_f) < N < \sigma_p A$  hay  $\frac{A_w}{A} \leq \frac{N}{N_p} \leq 1$  (hình 9).



Hình 9. Mô hình chia ảnh hưởng độc lập của M và N khi  $\sigma_p t_w (h - 2t_f) < N < \sigma_p A$

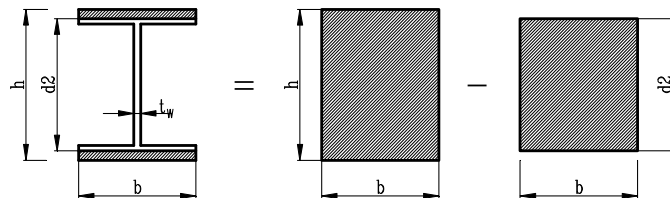
Tính toán N, M gây dẻo cho tiết diện (hình 10).



Hình 10a. Tính toán lực dọc N gây dẻo cho tiết diện

$$N = \sigma_p b d_2 - \sigma_p (b - t_w)(h - 2t_f)$$

$$N_p = \sigma_p A$$



Hình 10b. Tính toán mômen M gây dẻo cho tiết diện

$$M = \sigma_p \frac{1}{4} b h^2 - \sigma_p \frac{1}{4} b d_2^2$$

$$M_p = W_p \cdot \sigma_p$$

$$\rightarrow \frac{N}{N_p} = \frac{b d_2 - (b - t_w)(h - 2t_f)}{A} \text{ và } \frac{M}{M_p} = \frac{b h^2 - b d_2^2}{4W_p}$$
 (13)

Biến đổi biểu thức (13) tác giả đề xuất đường cong dẻo M, N chính xác như sau:

$$\frac{M}{M_p} = \alpha \left(\frac{N}{N_p}\right)^2 + \beta \left(\frac{N}{N_p}\right) + \gamma$$
 (14)

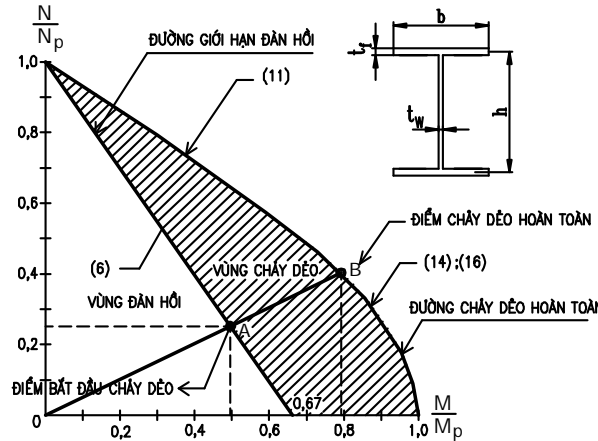
$$\text{Với } \alpha = -\frac{A^2}{4 \cdot b \cdot W_p}; \beta = -\frac{A \cdot (b - t_w)(h - 2t_f)}{2 \cdot W_p \cdot b}; \gamma = \frac{b \cdot h^2}{4 \cdot W_p} - \frac{\beta^2 \cdot W_p \cdot b}{A^2}$$
 (15)

# KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Để thuận tiện trong thực hành thiết kế, tác giả đã khảo sát vẽ đường cong dẻo với các loại thép hình I300, 1400, I500, I600 theo (14) và đề xuất đường cong dẻo gần đúng như sau:

$$\frac{M}{M_p} = 0,07 \left( \frac{N}{N_p} \right)^2 + 1,2 \left( \frac{N}{N_p} \right) + 1,26 \tag{16}$$

Từ các công thức (4), (11) và (14) hoặc (16) ta vẽ đồ thị (hình 11) biểu diễn mối quan hệ M, N của tiết diện ở trạng thái giới hạn đàn hồi và trạng thái dẻo (gọi là đường cong dẻo) (chú ý:  $M_e = 2/3M_p$ ).



Hình 11. Đường cong dẻo và đường giới hạn đàn hồi của tiết diện thanh thép chữ I

### 3.4 Khảo sát đường cong dẻo của tiết diện thanh thép chữ I

Phương trình mặt chảy dẻo hoàn toàn (đường cong dẻo) của một số tác giả đã nghiên cứu.

Theo Orbison [9]: 
$$\Phi \left( \frac{N}{N_p}, \frac{M}{M_p} \right) = 1.15 \left( \frac{N}{N_p} \right)^2 + \left( \frac{M}{M_p} \right)^2 + 3.67 \left( \frac{N}{N_p} \right)^2 \left( \frac{M}{M_p} \right)^2 = 1 \tag{17}$$

Theo AISC-LRFD [7]: 
$$\begin{cases} \frac{N}{2N_p} + \frac{M}{M_p} = 1 \text{ khi } \frac{N}{N_p} \leq 0,2 \\ \frac{N}{N_p} + \frac{8}{9} \frac{M}{M_p} = 1 \text{ khi } \frac{N}{N_p} \geq 0,2 \end{cases} \tag{18}$$

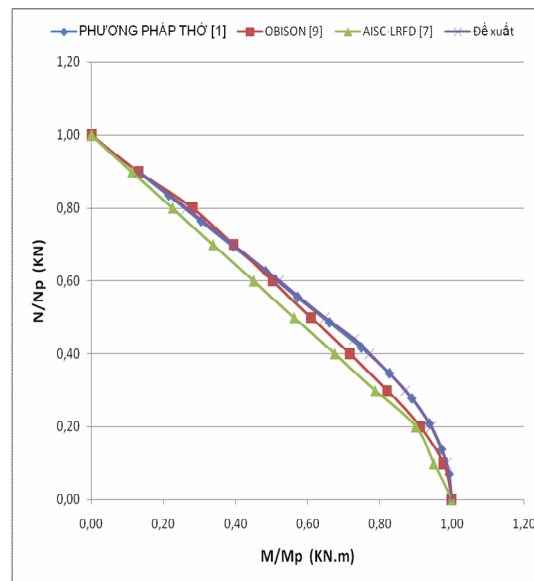
Theo phương pháp thứ [1]: quan hệ  $\frac{N}{N_p}; \frac{M}{M_p}$  được xây dựng bằng phương pháp số.

Dựa vào các phương pháp trên, ta lập được bảng thể hiện số liệu khảo sát ảnh hưởng của lực dọc N tới  $M_p$  như sau:

Bảng 2. Số liệu khảo sát ảnh hưởng của lực dọc N tới  $M_p$  theo các tác giả khác nhau

Phương pháp thứ [1]		OBISON [9]		AISC-LRFD [7]		Đề xuất		So sánh (%)	So sánh (%)	So sánh (%)
N/Np	M/Mp	N/Np	M/Mp	N/Np	M/Mp	N/Np	M/Mp			
	(1)		(2)		(3)		(4)	(4) - (3)	(4) - (2)	(4) - (1)
0,0	1,000	0	1,000	0	1,000	0,0	1,000	0,0	0,0	0,0
0,1	0,986	0,1	0,976	0,1	0,950	0,1	0,986	3,6	0,9	0,0
0,2	0,943	0,2	0,912	0,2	0,900	0,2	0,943	4,6	3,3	0,0
0,3	0,872	0,3	0,821	0,3	0,788	0,3	0,872	9,7	5,8	0,0
0,4	0,772	0,4	0,717	0,4	0,675	0,4	0,772	12,5	7,1	0,0
0,5	0,649	0,5	0,610	0,5	0,563	0,5	0,649	13,3	6,0	0,0
0,6	0,522	0,6	0,502	0,6	0,450	0,6	0,522	13,7	3,7	0,0
0,7	0,393	0,7	0,395	0,7	0,338	0,7	0,393	14,2	-0,4	0,0
0,8	0,264	0,8	0,281	0,8	0,225	0,8	0,264	14,7	-6,5	0,0
0,9	0,133	0,9	0,131	0,9	0,113	0,9	0,133	15,1	0,9	0,0
1,0	0,000	1	0,000	1	0,000	1,0	0,000	Trung bình =	Trung bình =	Trung bình =
								9,2	1,9	0,0

Từ các số liệu ở bảng 2, ta có thể vẽ được đồ thị (đường cong dẻo hay bề mặt chảy dẻo) theo các phương pháp khác nhau như trên hình 12.



Hình 12. Bề mặt chảy dẻo của tiết diện thanh thép chữ I theo nghiên cứu và của một số tác giả khác

Nhận xét: Từ hình 12 và bảng 2 ta thấy: Các mặt chảy dẻo (đường cong dẻo) theo nghiên cứu của các tác giả có sự sai khác không nhiều, đặc biệt là so với phương pháp thớ là phương pháp có độ tin cậy cao. Đường cong dẻo theo OBISON [9], [1] và của tác giả đề xuất có sự sai lệch rất nhỏ (trung bình = 1,9%). Đường cong dẻo theo AISC-LRFD [7] thiên về an toàn khi sử dụng để thiết kế.

#### 4. Nhận xét và kết luận

Bài báo đã phân tích quá trình làm việc của vật liệu thép từ trạng thái đàn hồi sang trạng thái dẻo, xác định được đặc trưng dẻo của mặt cắt tiết diện bất kỳ, đồng thời vẽ được đồ thị biểu diễn giới hạn đàn hồi và đường cong chảy dẻo hoàn toàn của mặt cắt tiết diện thanh thép chữ I. Qua đó có thể xác định được vùng đàn hồi và vùng chảy dẻo, điểm bắt đầu chảy dẻo và điểm chảy dẻo hoàn toàn. Mặt khác ta có thể kiểm tra tiết diện cấu kiện đang làm việc ở trạng thái đàn hồi, chảy dẻo một phần hay chảy dẻo hoàn toàn.

Bài báo đã trình bày cách thiết lập được mối quan hệ giữa mômen M và lực dọc N khi phân tích kết cấu ở trạng thái dẻo, đề xuất được phương trình đường cong dẻo để thuận tiện trong thiết kế thực hành.

Kết quả khảo sát và so sánh đường cong dẻo đã đề xuất với đường cong dẻo của các tác giả đã nghiên cứu trước đây cho thấy độ tin cậy là chấp nhận được.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. HOÀNG HIẾU NGHĨA, NGHIÊM MẠNH HIẾN, VŨ QUỐC ANH, Xây dựng đường cong M- $\theta$  và mặt chảy

hoàn toàn của tiết diện dầm, cột thép chữ I bằng phương pháp thớ, *Tạp chí xây dựng - Bộ Xây dựng, Hà Nội, 8/2014, IS 0866-0762.*

2. HOÀNG HIẾU NGHĨA, NGHIÊM MẠNH HIẾN, VŨ QUỐC ANH, Nghiên cứu sự hình thành khớp dẻo của thanh nén uốn xét đến ảnh hưởng của lực dọc, *Tạp chí xây dựng - Bộ Xây dựng, Hà Nội, 6/2014, Tr. 105-108. IS 0866-0762.*
3. CEN. Eurocode 3, Design of steel structures. *Part 1.1: General structural rules (prEN 1993-1-1), stage 38 draft edition, 2003.*
4. ASCE Manual No. 41, ASCE, New York, Plastic Design in Steel, A Guide and Commentary, 1971.
5. MICHEL BRUNEAU, CHIA-MING UANG and S.E., RAFAEL SABELLI, Ductile Design of Steel Structures, Jul 14, 2011.
6. WILLIAM M. C GUIGE and RONALD D. ZIEMIAN, Matrix Structural Analysis, 2nd Ed. *John Wiley and Sons, Inc, 1998.*
7. WILLIAM T. SEGUI, AISC-LRFD Steel Design, 1994.
8. W.M. VROUWENVELDER The plastic behaviour and the calculation of beams and frames subjected to bending, *Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Technical University Delft, 2003.*
9. S. L. CHAN and P.P.T. CHIU, Non-Linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections, Elsevier, 2000.

Ngày nhận bài sửa: 15/11/2014.