

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC DÂN LẬP HẢI PHÒNG**

TRỊNH TIẾN DŨNG

**TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH VĨNH MỘT PHẦN TIẾT DIỆN THANH THÀNH
MÓNG THEO TIÊU CHUẨN EUROCODE 3**

Chuyên ngành: **Kỹ thuật Xây dựng Công trình Dân dụng và Công nghiệp**

Mã số: **60.58.02.08**

LUẬN VĂN THẠC SỸ KỸ THUẬT

**GIÁO VIÊN HƯỚNG DẪN:
TS. ĐỖ TRỌNG QUANG**

Hải phòng, 2015

LỜI MỞ ĐẦU

Từ nhiều năm trở lại đây kết cấu thép thanh thành mỏng là loại kết cấu bắt đầu được áp dụng nhiều ở nước ta. Đó là các giải pháp kỹ thuật mới trong lĩnh vực vật liệu và công nghệ, ban đầu sử dụng trong lĩnh vực cơ khí, hàng không, ô tô, nay mang lại áp dụng vào kết cấu xây dựng có thể tạo nên loại liên kết mới trọng lượng giảm nhẹ. Kết cấu thanh thành mỏng chính là một hướng phát triển của kết cấu thép của nước ta trong những năm tiếp theo.

Hiện tại trên thế giới đã có nhiều quốc gia và vùng lãnh thổ đưa ra các tiêu chuẩn, quy phạm thiết kế kết cấu thanh thành mỏng như Úc, Hoa Kỳ, Anh, Trung Quốc, Châu Âu ... Tại Việt Nam hiện nay vẫn chưa có tiêu chuẩn, quy phạm thiết kế loại kết cấu đặc biệt này. Đồng thời việc tính toán thiết kế kết cấu thanh thành mỏng còn xa lạ với kỹ sư Việt Nam.

Với đề tài: ***“Tính toán ổn định vênh một phần tiết diện thanh thành mỏng theo tiêu chuẩn Eurocode 3”*** luận văn là những nghiên cứu bước đầu của em về loại kết cấu này. Đó là kết quả của quá trình và nghiên cứu trong khóa đào tạo Thạc sỹ tại Trường Đại học Dân lập Hải Phòng với sự hướng dẫn tận tình của các giáo viên trong và ngoài trường và các bạn đồng nghiệp.

Em xin lời cảm ơn đến Thầy giáo TS. Đỗ Trọng Quang cùng các thầy cô đã góp những ý kiến quý báu trong thời gian em thực hiện luận văn.

Do thời gian thực hiện còn có hạn và những hạn chế của bản thân, chắc chắn luận văn còn nhiều sai sót. Rất mong nhận được sự đóng góp ý kiến của các thầy cô và các bạn đồng nghiệp.

Hải phòng, ngày 20 tháng 02 năm 2016

Học viên

Trịnh Tiến Dũng

MỤC LỤC	
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TRONG LUẬN VĂN	4
DANH MỤC CÁC BẢNG, HÌNH VẼ ĐỒ THỊ	6
CHƯƠNG I: TỔNG QUAN VỀ THANH THÀNH MỎNG	8
1.1 Mở đầu	8
1.2 Khái niệm về thanh thành mỏng.....	8
1.3 Các vấn đề liên quan về thanh thành mỏng.....	12
1.3.1 Vật liệu.....	12
1.3.2 Vấn đề phòng gỉ.....	15
1.3.3 Công nghệ chế tạo thanh thành mỏng.....	18
1.3.4 Các dạng cấu kiện tạo hình nguội.....	21
1.3.5 Một số đặc điểm đặc biệt của thanh thành mỏng.....	23
1.3.6 Ưu, khuyết điểm của kết cấu thanh thành mỏng.....	24
1.3.7 Phạm vi ứng dụng của kết cấu thanh thành mỏng.....	25
1.4 Ứng dụng kết cấu thanh thành mỏng và các quy phạm thiết kế trên thế giới	26
1.5 Ứng dụng kết cấu thanh thành mỏng và các quy phạm thiết kế ở Việt Nam	27
1.6 Một số hình ảnh về việc ứng dụng kết cấu thanh thành mỏng	28
1.7 Mục tiêu phạm vi nghiên cứu của đề tài.....	31
1.7.1 Mục tiêu nghiên cứu của đề tài.....	31
1.7.2 Phạm vi nghiên cứu của đề tài.....	31
CHƯƠNG 2: CÁC DẠNG ỔN ĐỊNH CỦA THANH THÀNH MỎNG TIẾT DIỆN CHỮ C THEO LÝ THUYẾT...	32
2.1 Đại cương.....	32
2.1.1 Các dạng mất ổn định của thanh thành mỏng.....	32
2.1.2 Một số định nghĩa khi tính toán cấu kiện thanh thành mỏng.....	33
2.2 Ổn định cục bộ.....	35
2.2.1 Lý thuyết chung.....	35
2.2.2 Đối với thanh thành mỏng tiết diện chữ C chịu nén đúng tâm.....	37
2.2.3 Ví dụ tính toán.....	38
2.3 Ổn định tổng thể.....	39
2.3.1 Lý thuyết chung.....	39
2.3.2 Áp dụng đối với thanh thành mỏng tiết diện chữ C	41
2.3.3 Ví dụ tính toán.....	42
2.4 Mất ổn định vênh của một phần tiết diện.....	45
2.4.1 Hiện tượng mất ổn định vênh một phần tiết diện.....	45

2.4.2	Phương pháp của Châu âu (Eurocode 3).....	48
2.4.3	Phương pháp của Hancock.....	49
2.4.4	Ví dụ tính toán.....	56
2.4.5	Phương pháp dải hữu hạn – Phần mềm CUFSM.....	59
	CHƯƠNG 3: TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH CỦA THANH THÀNH MỎNG TIẾT	65
	DIỆN CHỮ C THEO TIÊU CHUẨN CHÂU ÂU EUROCODE3 ...	
3.1	Đại cương.....	65
3.1.1	Mất ổn định cục bộ, bề rộng hiệu quả.....	65
3.1.2	Mất ổn định venh một phần tiết diện.....	69
3.1.3	Mất ổn định tổng thể.....	73
3.2	Ví dụ tính toán.....	75
	KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	89

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TRONG LUẬN VĂN

b, h, L :	Kích thước hình học của cấu kiện.
b_{eff} :	Bề rộng hiệu quả.
D :	Độ cứng trụ.
E :	Mô đun đàn hồi của vật liệu.
f :	Ứng suất.
$f_{c,r}$:	Ứng suất tới hạn quy đổi.
f_{r} :	Ứng suất tới hạn.
$f_{cr,f}$:	Ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ bản cánh.
$f_{cr,s}$:	Ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ sườn biên.
$f_{cr,w}$:	Ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ bản bụng.
f_y :	Giới hạn chảy của vật liệu.
I :	Mô men quán tính.
i :	Bán kính quán tính.
I_o :	Mômen quán tính cực quanh tâm xoắn.
I_ω :	Hằng số vênh của tiết diện.
J :	Mô men quán tính xoắn.
K, K_x, K_ϕ :	Độ cứng của gối đàn hồi.
k_σ	Hệ số oằn của tấm.
N_{cr} :	Lực tới hạn.
N_{cr}^F :	Lực tới hạn trường hợp uốn dọc trục.
N_{cr}^{FT} :	Lực tới hạn trường hợp xoắn, uốn xoắn.
N_x :	Lực tới hạn Euler gây oằn uốn dọc đối với trục x.
N_y :	Lực tới hạn Euler gây oằn uốn dọc đối với trục y.
N_z :	Lực tới hạn Euler gây oằn xoắn đối với trục z.
ox, oy, oz :	Các trục tọa độ.
Q :	Lực cắt.
t :	Bề dày của cấu kiện.
t_{eff} :	Bề dày hiệu quả của tấm.

u, v :	Chuyển vị của tiết diện đối với trục x và y .
w :	Độ võng của tấm.
α :	Hệ số không hoàn thiện.
χ :	Hệ số giảm yếu do mất ổn định.
ϕ :	Góc xoay của tiết diện quanh tâm xoắn.
γ_{M0} :	Hệ số an toàn (khi tính mất ổn định cục bộ và mất ổn định vênh một phần tiết diện).
γ_{M1} :	Hệ số an toàn (khi tính mất ổn định tổng thể).
$\bar{\lambda}$:	Độ mảnh tỷ đối của thanh.
λ (chương 2):	Chiều dài nửa bước sóng.
μ :	Hệ số Poisson.
$\bar{\lambda}_p$:	Độ mảnh của tấm.
λ (Chương 3):	Độ mảnh của thanh.
ψ :	Hệ số tỷ số ứng suất.

DANH MỤC CÁC BẢNG, HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

	Trang
Bảng 1-1: Phân loại thanh theo tiêu chuẩn Eurcode 3	10
Bảng 1-2: Phân loại thanh theo tiêu chuẩn Eurcode 3.	11
Bảng 1-3: Thép dùng làm kết cấu tạo hình nguội theo Tiêu chuẩn	12
Bảng 1-4: Thép dùng làm kết cấu tạo hình nguội thông dụng theo tiêu chuẩn châu Âu	14
Bảng 2-1: Kết quả phân tích theo phần mềm CUFSM với số dải chia khác nhau.	61
Bảng 2-2: Kết quả phân tích theo phần mềm CUFSM với số dải chia khác nhau	63
Bảng 2-3: Bảng so sánh ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện theo phương pháp Hancock và phương pháp Châu Âu so với phương pháp dải hữu hạn.	64
Bảng3-1a: Xác định bề rộng hiệu quả theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3.	67
Bảng3-1b: Xác định bề rộng hiệu quả theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3	68
Hình 1-1: Kích thước của thanh thành mỏng.	8
Hình 1-2: Biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng của các loại thanh theo cách phân loại của tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode	9
Hình 1-3: Máy gấp mép.	19
Hình 1-4: Máy ép khuôn.	19
Hình 1-5a: Máy cán trực lăn.	20
Hình 1-5b: Máy cán trực lăn.	20
Hình 1-5c: Sơ đồ làm việc máy cán trực lăn.	21
Hình 1-6: Các loại tiết diện thanh thành mỏng thông dụng.	22
Hình 1-7: Các loại tấm mỏng uốn nguội thường dùng làm sàn, mái và tường.	22
Hình 1-8: Biểu đồ kéo của thép trước giai đoạn củng cố và sau khi uốn nguội.	23
Hình 1-9: Sự phân bố ứng suất dư trong thép tiết diện chữ U và chữ C	24
Hình 1-10: Nhà dân dụng.	28
Hình 1-11: Nhà dân dụng.	29
Hình 1-12: Lớp học vùng sâu, vùng xa.	29
Hình 1-13: Nhà nhiều tầng	30
Hình 1-14: Nhà công nghiệp	30
Hình 2-1: Các dạng mất ổn định của thanh thành mỏng tiết diện chữ C	32
Hình 2-2: Phân tích các dạng mất ổn định thanh thành mỏng chữ C chịu nén đúng tâm bằng phương pháp dải hữu hạn.	33
Hình 2-3a: Phần tử phẳng, góc uốn, bề dày và bề rộng phẳng.	34
Hình 2-3b: Tiết diện hiệu quả, phần cánh, tiết diện hiệu quả của phần biên.	35
Hình 2-4: Mất ổn định của tấm chịu nén.	36

Hình 2-5:	Sự phân bố lại ứng suất sau tới hạn.	37
Hình 2-6:	Mất ổn định cục bộ của thanh thành mỏng tiết diện chữ C.	38
Hình 2-7:	Chuyển vị do mất ổn định tổng thể.	41
Hình 2-7a:	Tiết diện thanh thành mỏng bị mất ổn định vênh một phần...	45
Hình 2-8a:	Thí nghiệm mất ổn định vênh một phần tiết diện.	46
Hình 2-8b:	Thí nghiệm mất ổn định vênh một phần tiết diện.	46
Hình 2-8c:	Thí nghiệm mất ổn định vênh một phần tiết diện.	47
Hình 2-8d:	Thí nghiệm mất ổn định vênh một phần tiết diện.	47
Hình 2-9:	Mô hình tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện theo tiêu chuẩn Eurocode 3.	48
Hình 2-10:	Đặc trưng hình học của tiết diện hiệu quả của phần biên.	49
Hình 2-11:	Mô hình tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện theo phương pháp của Hancock.	50
Hình 2-11a:	Mô hình xác định k_ϕ	52
Hình 2-11b:	Mô hình xác định k_ϕ có kể đến ảnh hưởng của ứng suất nén trên bản bụng.	54
Hình 2-12:	Các kích thước chính của thanh.	56
Hình 2-13:	Tiết diện hiệu quả của phần biên	59
Hình 2-14:	Cách chia thanh thành mỏng tiết diện chữ C theo phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp dải hữu hạn.	60
Hình 2-15:	Kết quả phân tích với số dải chia là 8.	61
Hình 2-16:	Biểu đồ giá trị ứng suất tới hạn theo hai phương pháp.	61
Hình 2-17:	Kích thước chính của tiết diện.	62
Hình 2-18:	<i>Kết quả phân tích với số dải chia là 8.</i>	63
Hình 2-19:	<i>Biểu đồ và giá trị ứng suất tới hạn theo hai phương pháp.</i>	63
Hình 3-1:	Tiết diện hiệu quả theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3.	65
Hình 3-2:	Đặc trưng hình học của tiết diện hiệu quả của phần biên.	69
Hình 3-3a:	Sơ đồ tính của phần cánh.	70
Hình 3-3b:	Tiết diện hiệu quả của phần cánh.	70
Hình 3-3c:	Mô hình xác định độ cứng lò xo và ứng suất tới hạn $f_{ct,s}$	71
Hình 3-3d:	Biểu đồ ứng suất tới hạn quy đổi.	71
Hình 3-3e:	Biểu đồ ứng suất tới hạn quy đổi (vòng lặp thứ n).	72
Hình 3-3f:	Tiết diện hiệu quả của phần cánh xác định ở vòng lặp cuối.	72
Hình 3-3g:	Tiết diện hiệu quả của thanh.	
Hình 3-4:	Sơ đồ khối tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện.	72

CHƯƠNG I: TỔNG QUAN VỀ THANH THÀNH MỎNG.

1.1. MỞ ĐẦU.

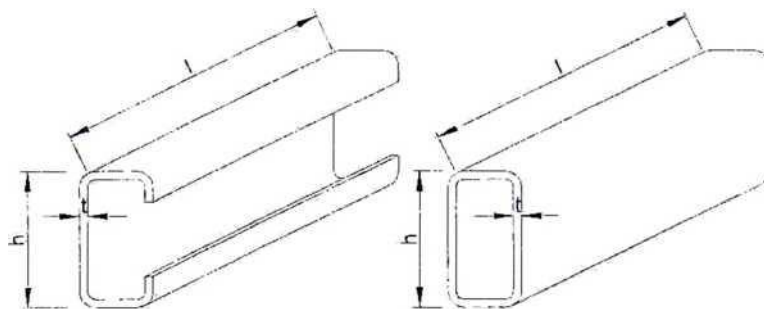
Kết cấu thanh thành mỏng khác biệt so với kết cấu thông dụng ở những điểm sau:

- Sử dụng các loại thanh thép tạo hình nguội từ các tấm thép rất mỏng (từ 0,3 đến 4 mm).
- Sử dụng các loại tiết diện không có trong kết cấu thông thường như chữ Z, tiết diện chữ C, tiết diện kín (tiết diện vuông, tiết diện tròn,...);
- Sử dụng các liên kết không dùng trong kết cấu thường.

Việc sử dụng thanh thành mỏng tạo ra một cách tiếp cận khác của kết cấu thép trong mọi giai đoạn xây dựng: Thiết kế, chế tạo, lắp dựng. Chương I được trình bày chủ yếu dựa trên tài liệu của Giáo sư Đoàn Đình Kiến [7] và một số tài liệu liên quan. Nội dung của chương này chủ yếu đề cập đến những vấn đề cơ bản liên quan đến kết cấu thanh thành mỏng như vật liệu, chế tạo, lắp dựng, ưu, nhược điểm, phạm vi áp dụng, tình hình sử dụng, tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thanh thành mỏng ở trên Thế giới và ở Việt Nam, từ đó đề ra mục tiêu, phạm vi nghiên cứu của đề tài.

1.2. KHÁI NIỆM VỀ THANH THÀNH MỎNG.

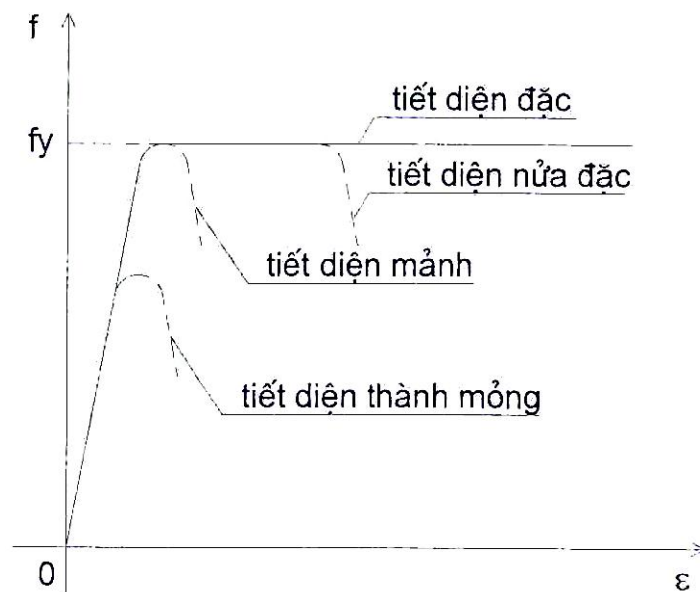
Theo Vlasov [17], thanh thành mỏng là thanh thẳng với kích thước theo ba chiều có bậc khác nhau. Nếu gọi l là chiều dài thanh, h là kích thước theo một cạnh nào đó của tiết diện, t là bề dày của thành (Hình 1-1) thì thanh được xem là thanh thành mỏng khi có các tỉ số như sau: $t/h \leq 0,1$; $h/l \leq 0,1$. Tiết diện của thanh thành mỏng có thể hở hoặc kín.



Hình 1-1. Kích thước của thanh thành mỏng

Khái niệm thanh thành mỏng của Vlasov dựa trên việc phân tích ứng suất trong thanh có kể đến xoắn kiểm chế hay không kể đến xoắn kiểm chế. Tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 [8] cũng đưa ra khái niệm thanh thành mỏng thông

qua việc phân loại tiết diện thanh. Việc phân loại đó dựa trên cơ sở độ ổn định cục bộ, hình dạng tiết diện thanh, trạng thái chịu lực của thanh và tỉ số giữa các kích thước của tiết diện. Theo đó, người ta chia thành 4 loại tiết diện thanh: tiết diện đặc, tiết diện nửa đặc, tiết diện mảnh và tiết diện rất mảnh (tiết diện thanh mỏng).



Hình 1-2. Biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng của các loại thanh theo cách phân loại của tiêu chuẩn châu Âu Eurocode 3.

- Thanh có tiết diện đặc: là thanh có khả năng hình thành khớp dẻo, trong đó khớp dẻo có thể quay tự do.
- Thanh có tiết diện nửa đặc: là thanh có khả năng hình thành khớp dẻo, nhưng góc quay của khớp dẻo bị giới hạn do bị phá hoại vì sự mất ổn định cục bộ.
- Thanh có tiết diện mảnh: là thanh ngay khi vật liệu bắt đầu bị chảy dẻo thanh bị phá hoại do sự mất ổn định cục bộ.
- Thanh có tiết diện rất mảnh (thanh thanh mỏng): là thanh bị phá hoại do sự mất ổn định cục bộ khi vật liệu đang làm việc trong giai đoạn đàn hồi.

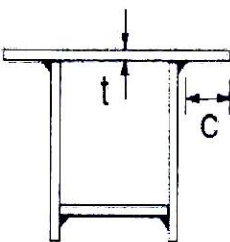
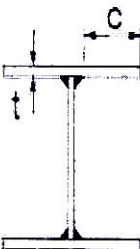
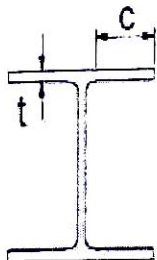
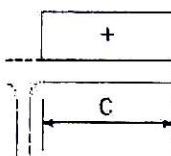
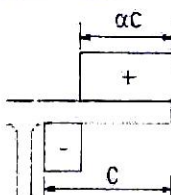
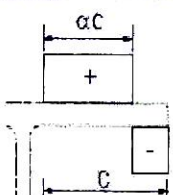
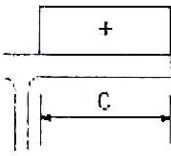
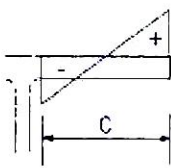
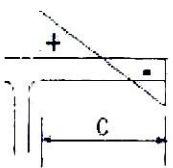
Bảng sau trích ra từ Bảng 5-2 tiêu chuẩn Eurocode 3 [8] giới thiệu một số loại thanh thông dụng theo tiêu chuẩn Eurocode 3. Ở đây, những thanh không thuộc 3 loại (Thanh đặc; Thanh nửa đặc; Thanh mảnh) trong bảng là thanh thanh mỏng (thanh rất mảnh).

Loại thanh	Cấu kiện chịu uốn		Cấu kiện chịu nén	Cấu kiện vừa chịu uốn vừa chịu nén		
Biểu đồ ứng suất (Qui ước ứng suất nén là dương)						
Thanh đặc	$c/t \leq 72\varepsilon$		$c/t \leq 33\varepsilon$	$\alpha > 0.5: c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\alpha \leq 0.5: c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$		
Thanh nửa đặc	$c/t \leq 83\varepsilon$		$c/t \leq 38\varepsilon$	$\alpha > 0.5: c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\alpha \leq 0.5: c/t \leq \frac{41.5\varepsilon}{\alpha}$		
Biểu đồ ứng suất (Qui ước ứng suất nén là dương)						
Thanh mảnh	$c/t \leq 124\varepsilon$		$c/t \leq 42\varepsilon$	$\psi > -1: c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0.67 + 0.33\psi}$ $\psi \leq -1: c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$		
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71

f_y : Giới hạn chảy của vật liệu thanh (N/mm^2)

235: Giới hạn chảy của thép S235 (N/mm^2)

Bảng 1-1: Phân loại thanh theo tiêu chuẩn Eurocode 3 [8]

						
		Cấu kiện chịu nén		Cấu kiện vừa chịu uốn vừa chịu nén		
Biểu đồ ứng suất (Qui ước ứng suất nén là dương)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	$c/t \leq 10\varepsilon$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
Biểu đồ ứng suất (Qui ước ứng suất nén là dương)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$		$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ k_σ : Hệ số uốn dọc tương ứng với tỷ lệ ứng suất Ψ			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

f_y : Giới hạn chảy của vật liệu thanh (N/mm^2)

235: Giới hạn chảy của thép S235 (N/mm^2)

Bảng 1-2: Phân loại thanh theo tiêu chuẩn Eurcode 3 [8]

1.3. CÁC VẤN ĐỀ LIÊN QUAN ĐẾN KẾT CẤU THANH THÀNH MỎNG.

1.3.1. Vật liệu

a. Thép

Thép dùng để chế tạo tiết diện uốn nguội có thể là loại thép cacbon thấp thông thường tương đương với CT3 (Nga), CT38, CT42 (Việt Nam) có giới hạn chảy 2200 đến 2600daN/cm². Cũng có thể dùng thép hợp kim thấp tương đương với 09Mn2, 14Mn, giới hạn chảy 3400 tới 3900daN/cm². Các thép này có độ dẫn dài cao 22 - 26% có thể chịu được thử nghiệm uốn gấp nguội. Tuy nhiên, thép dạng cuộn (coil) để chế tạo kết cấu thành mỏng thì Việt Nam mới sản xuất được một số cấu kiện như (thép hình chữ C, I, mái tôn mạ màu) Thông dụng nhất là thép cacbon ASTM A 570 cấp 50 hoặc thép hợp kim thấp A607 hay A792, đều có giới hạn chảy 345N/mm².

Tên tiêu chuẩn	Cấp thép	Giới hạn chảy (fy) (N/mm ²)	Giới hạn bền (Fu) (N/mm ²)
AS1163	C250	250	320
	C350	350	430
	C450	450	500
AS1397	G250	250	320
	G300	300	340
	G350	350	430
	G450	450	480
	G500	500	520
	G550	550	550
AS/NZS 3678	200 (t < 8mm)	200	300
	250(t < 8mm)	250	410
	300(t < 8mm)	300	430
	350(t < 8mm)	350	450
	400(t < 8mm)	400	480

Bảng 1-3: Thép dùng làm kết cấu tạo hình nguội theo Tiêu chuẩn Úc (Trích từ bản 1-5 tiêu chuẩn AS4600:1996 [3])

Ba loại thép của bảng G450, G500 và G550 (con số chỉ giới hạn chảy của thép N/mm²) là loại đặc biệt có cường độ cao. G450 dùng cho cấu kiện có bề dày $\geq 1,5\text{mm}$, G500 dùng cho cấu kiện có bề dày $\leq 1,0\text{mm}$ nhưng $< 1,5$ min còn G550 dùng cho cấu kiện có bề dày $\leq 1,0\text{mm}$. Dùng thép có cường độ cao không phải lúc nào cũng tiết kiệm được phép vì kích thước cấu kiện thành mỏng thường bị giới hạn bởi điều kiện ổn định, không tận dụng được cường độ cao.

Theo AS 4600:1996 thép có các số liệu khác như sau:

Môđun đàn hồi: $E = 2,00 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$.

Môđun đàn hồi trượt $G = 8000 \text{ kN/cm}^2$.

Tiêu chuẩn Châu Âu Euro Code 3 cũng quy định các loại thép dùng để chế tạo thanh thành mỏng về cơ bản, các loại thép này tương đương với các loại thép trong tiêu chuẩn của Úc AS 4600:1996. Bảng sau liệt kê một số loại thép thông dụng theo tiêu chuẩn Châu Âu, được trích ra từ bảng 1.3 Tiêu chuẩn Eurocode 3 [9].

Tên tiêu chuẩn	Cấp thép	Giới hạn chảy (fy) MPa	Giới hạn bền (fu) MPa
EN 10025	S235	235	360
	S275	275	430
	S355	355	510
EN 10113: Part 2	S275 N	275	370
	S355 N	355	470
	S420 N	420	520
	S460N	460	550
	S275 NL	275	370
	S355 NL	355	470
	S420 NL	420	520
	S460 NL	460	550
EN 10113: Part 3	S275 M	275	360
	S355 M	355	450
	S420 M	420	500
	S460M	460	530
	S275 ML	275	360
	S355 ML	355	450
	S420ML	420	500

Tên tiêu chuẩn	Cấp thép	Giới hạn chảy (fy) MPa	Giới hạn bền (fu) MPa
	S460 ML	460	530
ISO 4997	CR 220	220	300
	CR250	250	330
	CR320	320	400
EN 10147	S220GD+Z	220	300
	S250GD+Z	250	330
	S280GD+Z	280	360
	S320GD+Z	320	390
	S350GD+Z	350	420
EN 10149: Part 2	S315MC	315	390
	S355 MC	355	430
	S420 MC	420	480
	S460 MC	460	520
	S500 MC	500	550
	S550 MC	550	600
	S600 MC	600	650
	S650 MC	650	700
	S700 MC	700	750
EN 10149: Part 3	S260 NC	260	370
	S315NC	315	430
	S355 NC	355	470
	S420 NC	420	530
EN 10268	H240LA	240	340
	H280LA	280	370
	H320LA	320	400
	H360LA	360	430
	H400LA	400	460
EN 10214	S220GD+ZA	220	300
	S250GD+ZA	250	330
	S280GD+ZA	280	360
	S320GD+ZA	320	390
	S350GD+ZA	350	420

Bảng 1-4: Thép dùng làm kết cấu tạo hình nguội thông dụng theo tiêu chuẩn Châu Âu [9].

b. Tiết diện tạo từ thép tấm mỏng

Thép được cán nóng thành tấm rất mỏng dạng cuộn là phôi để tạo hình ra cấu kiện thành mỏng. Bằng các cách gia công nguội, có thể tạo từ tấm thép

mỏng ra tiết diện hình bất kì. Nhiều trường hợp hình thức và kích thước tiết diện thép hình uốn nguội được chọn riêng lẻ cho phù hợp với nhiệm vụ của từng công trình. Khi tự chọn và thiết kế hình thức tiết diện cần xét các điều sau:

- Khả năng chế tạo được thép hình bằng thiết bị hiện có của nhà sản xuất;
- Điều kiện sử dụng công trình;
- Khả năng chế tạo kết cấu bằng thiết bị hiện có của nhà sản xuất;
- Sự chịu lực của các thanh thép hình và liên kết của chúng.

Đặc trưng và công suất của các máy gia công sẽ quyết định bề rộng và bề dày của tấm thép phôi, chiều dài tối đa của sản phẩm, bán kính uốn, bề dài tối thiểu của đoạn thẳng của tiết diện.

Đối với tiết diện kín thì phải có điều chỉnh tùy theo đường nối và công nghệ chế tạo. Khi thiết kế hình dạng tiết diện cán nguội, cần lưu ý các yêu cầu sau:

- Góc uốn vuông phải có bán kính $r = 1,2$ đến $1,5$ lần bề dày bản thép.
- Chú ý vấn đề an toàn phòng gỉ.
 - + Về hình dạng, nên dùng tiết diện hở, vì dễ tiếp cận vào phía trong để lau chùi, sơn. Tránh tạo hình máng, dễ tích bụi ẩm. Nếu bắt buộc làm thì cần tạo độ dốc hoặc có lỗ thoát.
 - + Về bề dày tối thiểu để phòng gỉ tham khảo các trị số sau: 1,5mm đối với kết cấu có mái che kín, 3mm đối với kết cấu lộ thiên, 3,5mm đối với kết cấu trong môi trường ăn mòn.
- Về mặt chịu lực:
 - + Thanh chịu nén nên dùng tiết diện hình hộp, tiết diện có mép cứng, vì mép cứng làm tăng ổn định cục bộ, làm tăng độ cứng của tiết diện;
 - + Thanh chịu kéo: làm tiết diện gọn hơn, dùng thanh dày hơn.
 - + Hạn chế hàn trực tiếp thành mỏng với thành dày của cấu kiện cán khác.

1.3.2. Vấn đề phòng gỉ

Phòng gỉ cho kết cấu thép thành mỏng là cực kỳ quan trọng. Kết cấu thành mỏng không được bảo vệ tốt sẽ phá hủy nhanh chóng trong thời gian ngắn.

a. Hiện tượng gỉ

Sự gỉ của kết cấu kim loại chủ yếu là hiện tượng ăn mòn điện hoá. Trên bề mặt kim loại có những phần tử vi mô hoạt động như những điện cực. Tiếp xúc với chất điện giải là dung dịch nước của hơi nước không khí có chứa các hợp chất, khí cacbonic. Dòng điện xuất hiện, cực dương bị tan trong chất điện phân. Thế hiệu giữa các cực càng lớn, dòng điện càng mạnh và sự ăn mòn càng nhanh.

Hiện tượng ăn mòn điện hoá xảy ra khi:

- Tiếp xúc giữa hai kim loại: Ví dụ mạ thép bằng kẽm hoặc bằng nhôm, khi có hư hại chỗ mạ, để lộ thép ra. Nếu mạ kẽm, sắt có điện tích âm lớn hơn kẽm, sẽ trở thành anốt và bị hoà tan. Sự ăn mòn rất nhanh vì điện tích anốt (sắt để lộ) rất nhỏ so với điện tích catốt (lớp mạ kẽm). Nếu mạ nhôm, vì nhôm có điện tích âm lớn hơn sắt sẽ trở thành anốt bị hoà tan và sẽ bị phủ lên thép một lớp bảo vệ. Trường hợp này gọi là lớp bảo vệ anốt. Nói chung khi thép tiếp xúc với kim loại có điện tích âm lớn hơn như kẽm, nhôm, mangan thì thép được bảo vệ chống gỉ:

- Tiếp xúc kim loại với chất phi kim: Các tạp chất oxyt, sulfat tan trong kim loại có điện tích khác với sắt tạo nên điện cực cùng với kim loại cơ bản.

- Sự phủ một lớp oxyt trên kim loại: Thép được gia công cơ khí hay nhiệt luyện thì trên mặt có một lớp oxyt phủ mỏng, thép không gia công cũng được phủ bởi một lớp gỉ là oxyt, cũng sẽ bảo vệ cho thép không bị gỉ tiếp nữa. Nhưng nếu lớp gỉ này bị hư hại và oxyt có điện thế lớn hơn thép trở thành anốt và bị ăn mòn.

- Bề mặt kim loại không nhẵn như nhau; Thép có bề mặt sần sùi thì điện thế thấp hơn bề mặt nhẵn, từ đó tạo nên các điện cực trên bề mặt kém nhẵn.

- Thép ở trạng thái ứng suất: Chỗ bị biến dạng có điện thế thấp. Giữa kết cấu bị biến dạng và kết cấu không bị biến dạng tạo nên một cặp pin. Tuy nhiên sự ăn mòn ở đây là nhỏ không đáng ngại.

- Và nhiều nguyên nhân khác nữa...

Tốc độ ăn mòn xác định bằng bề sâu ăn mòn của thép mm/năm hoặc trọng lượng thép mất đi trên một đơn vị diện tích $g/m^2/năm$. Tốc độ này thay đổi phụ thuộc trước hết vào môi trường, ví dụ để tham khảo: Vùng nông thôn 0,004mm/năm, thành phố 0,03 - 0,006 mm/năm, vùng biển 0,006 - 0,16mm/năm,

nhà máy hoá chất 1 mm/năm.

Tốc độ ăn mòn phụ thuộc vào hình dạng của tiết diện và vị trí không gian:

- Lớn nhất ở mặt nằm ngang, nhỏ nhất ở mặt trần.
- Mặt đứng ở mức trung bình, tuy nhiên ở phía dưới gần cánh ngang thì nhanh hơn.
- Mặt trong của tiết diện kín là ít ăn mòn, mặt trong của tiết diện nửa kín bị ăn mòn nhanh;
- Ở các tiết diện ghép hai thép góc hoặc hai chữ C, tại khe hở sẽ tích tụ bụi, hơi ẩm và khó sơn bảo vệ thì tốc độ ăn mòn rất nhanh.

Lưu ý rằng tốc độ ăn mòn của thành mỏng không khác với thành dày, nhưng nguy hiểm hơn. Cần hạn chế việc sử dụng thanh thành mỏng trong điều kiện ngoài trời hoặc trong môi trường xâm thực.

b. Các biện pháp phòng gỉ

Biện pháp cấu tạo khi thiết kế

Sử dụng các kết quả nghiên cứu trên các loại cấu tạo, rút được các kinh nghiệm sau đây để tăng độ chống mòn:

- Chọn dùng loại tiết diện chống ăn mòn cao: Cao nhất là tiết diện ống tới 2 lần so với tiết diện thép góc. Dầm tiết diện hộp chống ăn mòn tốt hơn dầm I.
- Tiết diện bụng đặc chống ăn mòn tốt hơn tiết diện rỗng.
- Áp dụng nguyên tắc tập trung vật liệu: tăng bước kết cấu lên để làm tiết diện cấu kiện lớn hơn, thành dày hơn. Đưa đến khả năng chống ăn mòn tốt hơn, giảm lượng sơn bảo vệ.
- Chọn dùng loại vật liệu chống gỉ cao, ví dụ thép hợp kim thấp.
- Tìm các giải pháp cấu tạo để cấu kiện không tích bụi, tích ẩm, ví dụ đặt nghiêng dốc, tạo các lỗ thoát nước.
- Chú ý tránh để kết cấu thép thành móng tiếp xúc với vật liệu xây dựng có chứa thạch cao, clorua raagiê, xỉ than ...vì sẽ bị ăn mòn nhanh.

Dùng lớp bảo vệ:

- Sơn: Lớp bảo vệ rẻ nhất để áp dụng. Kỹ thuật dùng sơn cho kết cấu thành mỏng không khác gì so với kết cấu thép thường gồm các việc:

+ Làm sạch về mặt kết cấu cho hết uế gỉ, oxit, dầu mỡ bằng bàn chải sắt, búa hơi, phun cát, ngọn lửa hàn.

+ Sơn lót bằng hỗn hợp minium 60% và oxyt sắt 40% việc quan trọng nhất để chống gỉ

+ Sơn mặt bảo vệ cho sơn lót và tạo màu.

Đối với cấu kiện mà không thể sơn lại được sau khi lắp thì phải dùng phương pháp bảo vệ cao sơn: Sơn lót hai lần và sơn mặt hai lần.

- Các kết cấu thành mỏng hiện đại phần lớn là dùng biện pháp mạ. Phương pháp mạ phổ thông là mạ kẽm nhúng nóng hoặc phun lớp kẽm phủ. Việc mạ kẽm có thể thực hiện ngay từ cuộn thép tấm mỏng hoặc thực hiện ngay sau khi kết cấu đã hoàn thành (khó đối với cấu kiện kích thước lớn). Việc phun thực hiện lên kết cấu đã lắp xong, hình dạng kết cấu đã lắp xong, hình dạng kết cấu có thể tùy ý. Bên ngoài lớp mạ và lớp phun thường có thêm lớp sơn bảo vệ lớp phủ nữa.

Hiện nay, hầu hết các tấm mái, tấm tường, xà gỗ, dầm tường, dàn khung của các nhà thép thành mỏng tạo hình nguội xây dựng ở nước ta đều dùng thép mạ Zinalume. Zinalume là lớp mạ hợp kim nhôm kẽm (55% nhôm, 43,5% kẽm và 1,5 % silic) được thực hiện bằng phương pháp nhúng nóng liên tục có tuổi thọ gấp 4 lần lớp mạ kẽm thông thường. Vật liệu thép Zinalume là thép gốc như A792 theo ASTM hoặc G300, G550 theo AS1397 của Úc được mạ Zinalume.

1.3.3. Công nghệ chế tạo thanh thành mỏng

Dùng phương pháp gia công nguội, có thể làm được cấu kiện thành mỏng mà không thể dùng phương pháp cán nóng, cấu kiện này có bề mặt nhẵn, có thể quét ngay sơn bảo vệ lên, cường độ thép được tăng lên. Các phương pháp: gấp bằng máy ép, dập khuôn bằng máy ép và cán liên tục.

a. Máy gấp mép: Thân máy gồm hai thớt, thớt dưới gắn thước tạo hình bên dưới, thước trên cố định gắn thước tạo hình bên trên và kẹp chặt bản thép. Thớt dưới đi lên, gấp mép và tạo góc bản thép. Thay đổi thước tạo hình thì tạo được các hình dạng khác nhau. Phải nhiều động tác mới tạo được hình hoàn chỉnh.

Cách chế tạo này có nhược điểm sau:

- Năng suất thấp, nhiều thao tác.
- Độ chính xác kém.
- Chỉ gấp được bản thép dày không quá 3mm, chiều dài không quá 6m.

Tuy nhiên ưu điểm của phương pháp là giá thiết bị rẻ, dễ trang bị. Có thể đạt được nhiều hình dạng bằng việc thay đổi dễ dàng thước tạo hình. Công nghệ này thích hợp với việc sản xuất theo quy mô nhỏ, sản xuất nhiều loại hình khác nhau.



Hình 1 - 3. Máy gấp mép

b. Máy ép khuôn: Máy dùng cho dây chuyền sản xuất hàng loạt nhỏ máy gồm có thân máy, bàn máy, dầm ép. Khuôn cuối tạo hình đặt trên bàn máy. Dầm ép ở bên trên đi xuống, có gắn chày tạo hình. Lực ép từ 40 đến 150 tấn, ép trên toàn bộ chiều dài thanh.



Hình 1-4. Máy ép khuôn

Phương pháp này có thể tạo thanh dài tới 6m rộng 250mm - 500mm; dày tới 16mm, bằng cách di chuyển dải thép theo chiều dài tới 12m tất nhiên với các sai lệch về kích thước tiết diện, về độ phẳng của mặt. Để tạo được một tiết diện cũng phải nhiều nguyên công: Mỗi lần ép chỉ được tạo một góc. Do đó năng suất thấp khó cơ giới toàn bộ.

Ưu điểm của phương pháp: Thay thế các khuôn tạo hình giá rẻ, có thể tạo được nhiều hình dạng, có lợi khi sản xuất hàng loạt nhỏ, đặc biệt hay được dùng để chế tạo các cấu kiện không điển hình.

c. Máy cán trục lăn:

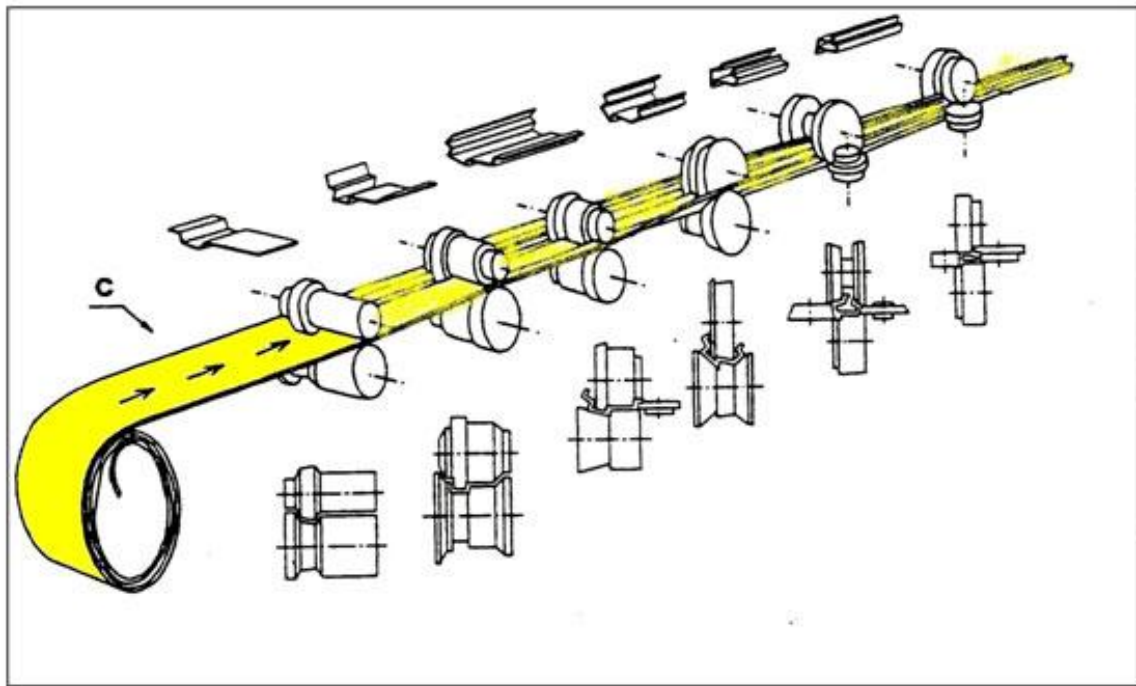
Đây là loại máy năng suất cao, dùng ở các nhà máy luyện kim, nhà máy sản xuất hàng loạt lớn. Máy gồm một dãy các trục cán, có hình dạng khác nhau. Dải thép đi qua các trục cán dần dần được thay đổi hình dạng. Có thể cán được thép dày 0,3 đến 18mm, rộng 20mm đến 200mm. Tốc độ cán 10 đến 30m/phút.



Hình 1-5a. Máy cán trục lăn



Hình 1-5b. Máy cán trục lăn



Hình 1-5c. Sơ đồ làm việc máy cán trục lăn

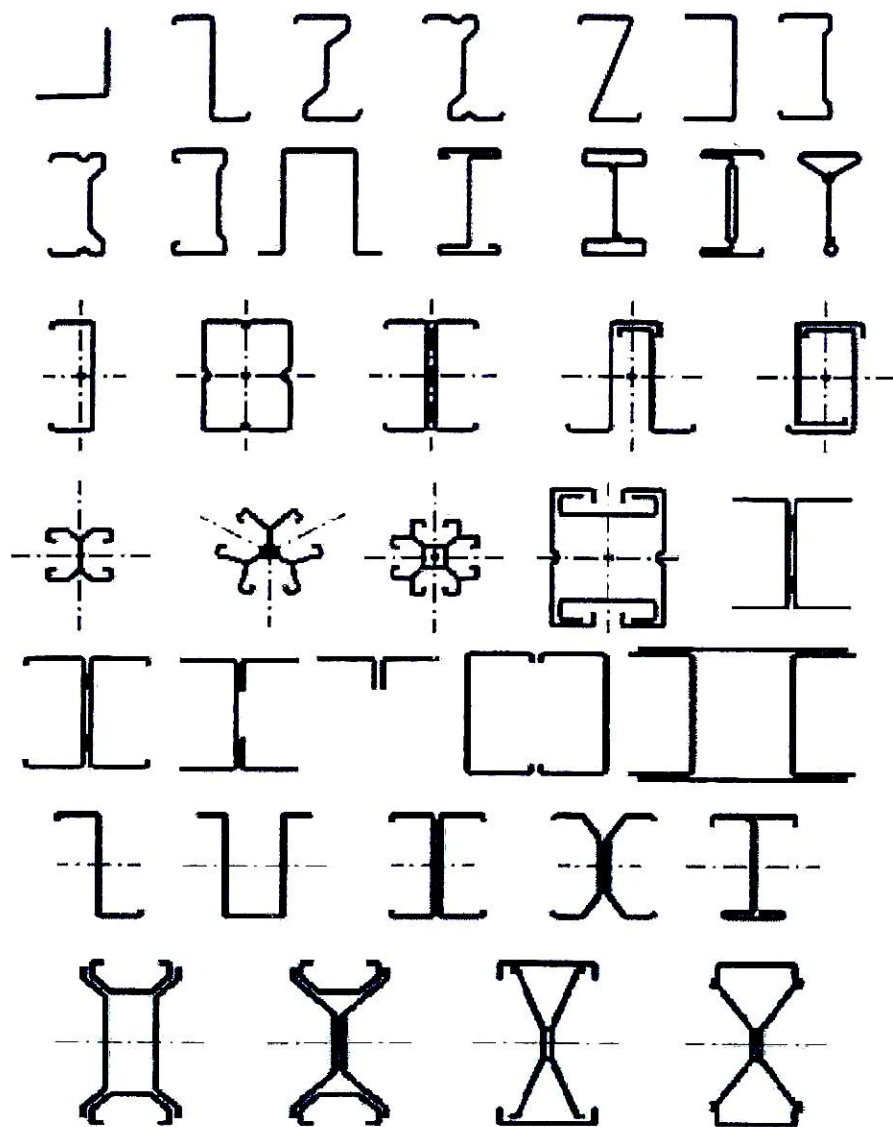
Loại máy có năng suất cao, sử dụng ít nhân công mỗi năm có thể sản xuất hàng triệu mét cấu kiện. Tuy nhiên mỗi bộ trục cán chỉ dùng một loại tiết diện muốn đổi tiết diện thì phải thay đổi trục cán, thực tế là thay cả một dây chuyền mới, do đó giá thành cao. Hiện nay ở Việt Nam bên cạnh các máy cán lớn của Công ty nước ngoài nhiều công ty nhỏ trong nước cũng đã có nhiều máy cán, sản xuất hàng loạt tiết diện thành mỏng, ống có mối hàn để sử dụng trong xây dựng. Các máy cán hiện đại được điều khiển theo chương trình, thao tác trên các dữ liệu truyền từ máy tính đến nên đảm bảo chính xác và năng suất cao.

1.3.4. Các dạng cấu kiện tạo hình nguội

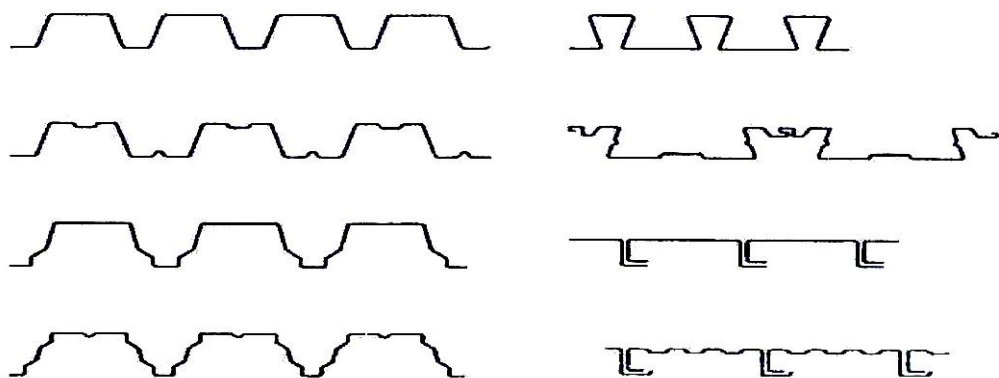
Các dạng tiết diện thành mỏng hết sức phong phú, đa dạng:

Bằng các cách tạo hình nguội, có thể tạo từ tấm thép mỏng tiết diện hình bất kỳ. Tiết diện được chia ra loại hở như chữ C, chữ Z, chữ L, chữ U và loại kín như ống hộp. Hàn các tiết diện đơn với nhau có thể tạo nên tiết diện phức hợp. Bề dày của tiết diện là không đổi, trừ một số chỗ có thể là bề dày gấp đôi do gấp bản thép lại. Cấu kiện dạng thanh dùng làm kết cấu chịu lực chính như cột, khung hoặc cấu kiện phụ như xà gồ, dầm tường. Các thanh riêng lẻ có thể ghép với nhau tạo nên kết cấu rỗng như dàn. Cấu kiện dạng tấm dùng để làm tấm sàn,

panen mái hay panen tường. Kích thức các tiết diện uốn nguội được tiêu chuẩn hoá tại một số nước sử dụng loại kết cấu này.



Hình 1-6. Các loại tiết diện thanh thành mỏng thông dụng [9]

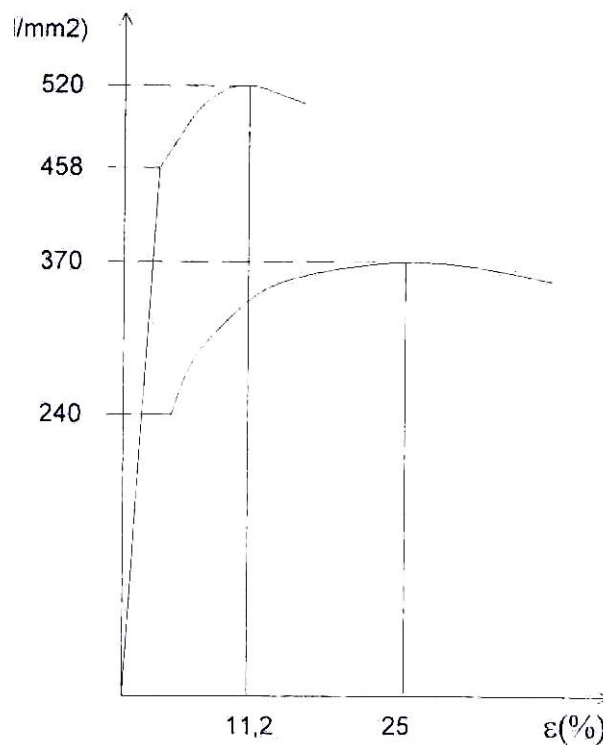


Hình 1-7. Các loại tấm mỏng uốn nguội thường dùng làm sàn, mái và tường [9]

1.3.5. Một số đặc điểm đặc biệt của thanh thành mỏng.

a. Sự cứng nguội:

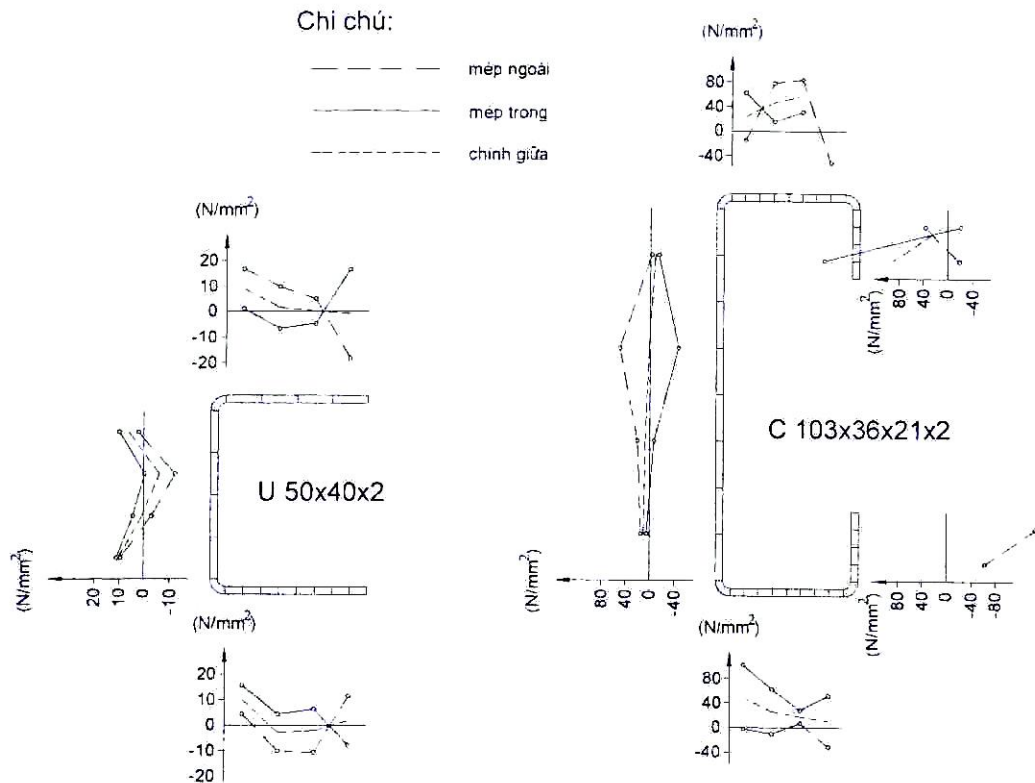
Khi bị gia công nguội, thép có hiện tượng cứng nguội, tăng giới hạn chảy, tăng giới hạn bền, giảm độ dẫn. Sự tăng cường độ này diễn ra không đều trên tiết diện, tùy thuộc vào dụng cụ uốn nguội. Xét ví dụ đơn giản của việc kéo nguội thép một lần quá giai đoạn chảy sang giai đoạn củng cố. Lúc này cấu trúc tinh thể biến đổi, thép trở thành một loại thép khác, cứng hơn. Khi uốn nguội, thép bị làm cứng nguội nhiều lần và ứng suất bền đều tăng cao. Ví dụ với thép CT3 qua uốn nguội ứng suất chảy tăng tới 80% , ứng suất bền tăng tới 35%.



Hình 1-8. Biểu đồ kéo của thép trước giai đoạn củng cố và sau khi uốn nguội [7].

a. Ứng suất dư:

Khi bị gia công nguội, thép bị biến dạng. Chính sự biến dạng đó làm cho trong thép tồn tại ứng suất, gọi là ứng suất dư. Ứng suất dư luôn tự cân bằng trên toàn tiết diện. Hình vẽ dưới đây thể hiện sự phân bố ứng suất dư trong thanh thành mỏng tiết diện chữ U và chữ C [20].



Hình 1-9. Sự phân bố ứng suất dư trong thép tiết diện chữ U và chữ C [20]

1.3.6. Ưu, khuyết điểm của kết cấu thanh thành mỏng

a. Ưu điểm

- Giảm lượng thép từ 25-50%: về lý thuyết có thể giảm nhiều hơn nữa nhưng sẽ kèm theo khó khăn tồn kém về chế tạo và không còn kinh tế nữa.
- Lắp dựng nhanh, ví dụ giảm thời gian chế tạo và lắp ráp tới 30% đối với mái nhà: đối với cấu kiện có các thanh và nút thống nhất hoá như dàn mái không gian thì thời gian còn giảm nhiều nữa.
- Hình dạng tiết diện được chọn lựa đa dạng theo yêu cầu.
- Đặc trưng chịu lực của tiết diện là có lợi, do sự phân bố vật liệu hợp lý, nhất là khi dùng tiết diện kín.
- Dùng tiết diện kín tạo vẻ đẹp kết cấu, bớt che lấp diện tích kính lấy ánh sáng.

b. Khuyết điểm:

- Giá thành thép uốn nguội cao hơn thép cán nóng;
- Chi phí phòng gỉ cao hơn, vì bề mặt của tiết diện thép lớn hơn, cần nhiều diện tích phủ bảo vệ.

- Việc vận chuyển, bốc xếp dựng lắp tuy nhanh chóng nhưng đòi hỏi những biện pháp và phương tiện riêng vì cấu kiện dễ bị hư hại;
- Việc thiết kế khó khăn hơn vì sự làm việc phức tạp của cấu kiện. Tiết diện cấu kiện được chọn lựa tự do nên không có bảng tính toán sẵn.

1.3.7. Phạm vi ứng dụng của kết cấu thanh thành mỏng.

Phạm vi ứng dụng có lợi của kết cấu thanh thành mỏng phụ thuộc vào các điều kiện cấu tạo (chế tạo, phỏng gi, vv..), điều kiện chịu lực (tải trọng, tính năng vật liệu...), các chỉ tiêu kinh tế, điều kiện sử dụng và yêu cầu thẩm mỹ.

Phân biệt hai phạm vi sử dụng chính của thanh thành mỏng:

- *Nhóm 1 các bộ phận kết cấu chịu lực.*
- *Nhóm 2 các chi tiết và bộ phận kiến trúc.*

Nhóm 1: Gồm các kết cấu chịu lực làm hoàn toàn bằng thanh mỏng, hoặc thanh thành mỏng kết hợp với vật liệu khác như thép cán nóng, bê tông, gỗ. Kết cấu thanh thành mỏng được áp dụng trong các loại dàn mái nhà, các cấu kiện thứ yếu làm kết cấu bao che như xà gồ, dầm tường, xà gồ rồng nhịp tới 12m, khung nhà dân dụng và công nghệ, dàn mái không gian, vỏ mỏng.

Nhóm 2: Gồm các bộ phận và chi tiết khuôn cửa, cánh cửa các loại, cổng, các cấu kiện của tường bao che, vách ngăn di động, cầu thang, cửa trời, và các kết cấu tương tự. Các cấu kiện nhóm này được áp dụng trong các loại nhà dân dụng, nhà kho, nhà xưởng, chuồng trại, nhà triển lãm, các công trình tháo lắp, vv....

Sử dụng thanh thành mỏng đương nhiên giảm nhẹ trọng lượng kết cấu, tiết kiệm vật liệu nhưng không hẳn có nghĩa là kinh tế hơn. Không thể lấy tiêu chí tiết kiệm vật liệu làm tiêu chí duy nhất. Tiết diện thanh thép uốn nguội đắt hơn thép cán nhiều (có thể tới 30%) vì phải dùng thép tấm mỏng cán nóng và gia công uốn nguội. Để sử dụng hợp lý thép uốn nguội, cần xét các yếu tố sau:

1. Việc sản xuất các thanh thành mỏng được thực hiện với số lượng lớn, được dùng lắp lại cho nhiều kết cấu. Dùng loại tiết diện được sản xuất với số lượng lớn rẻ hơn nhiều so với loại tiết diện được đặt làm riêng lẻ số lượng ít.
2. Giảm trọng lượng kết cấu thường làm tăng giá thành chế tạo. Giảm giá

thành chế tạo bằng cách dùng dây chuyền và thiết bị hiện đại, cơ giới hoá cao.

3. Kết cấu nhẹ được lắp ráp nhanh và dễ dàng. Các cấu kiện điển hình có thể được vận chuyển và lưu kho ở dạng rất gọn, tiện cho bốc xếp và dựng lắp.

Các hãng sản xuất thanh thành mỏng hiện nay đều cố gắng tiêu chuẩn hoá và điển hình hoá cao độ các loại tiết diện. Một tiết diện thanh mỏng có thể được áp dụng cho nhiều loại nhà có công dụng khác nhau và sơ đồ kết cấu khác nhau. Tất nhiên là tiêu chuẩn hoá cao sẽ dẫn đến làm tăng lượng thép, vì có những trường hợp vật liệu chưa làm việc hết khả năng, nhưng không có nghĩa là bất lợi về kinh tế. Việc tiêu chuẩn hoá các cấu kiện nhẹ sẽ cho phép: giảm sự đa dạng của tiết diện, nên tăng số lượng sản xuất hàng loạt nghiên cứu những nút liên kết thống nhất, giảm công chế tạo và dựng, lắp.

1.4. ỨNG DỤNG KẾT CẤU THANH THÀNH MỎNG VÀ CÁC QUY PHẠM THIẾT KẾ TRÊN THẾ GIỚI.

Việc áp dụng các cấu kiện thanh mỏng tạo hình nguội vào kết cấu nhà đã được bắt đầu từ những năm 1940. Năm 1946 lần đầu tiên đã xuất bản "Quy định kỹ thuật về thiết kế cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội" của Viện Sắt và Thép Hoa Kỳ (AISI). Cấu kiện thanh mỏng có thể dùng làm khung và sàn của nhà xưởng, nhà nhiều tầng, tới 6 tầng. Đối với nhà cao tầng, cấu kiện thanh mỏng được dùng kết hợp với cấu kiện cán nóng. Khung chính chịu lực là cấu kiện cán nóng, dầm sàn và mặt sàn là cấu kiện thanh mỏng. Mặt sàn mái có thể được uốn cong tạo nên mái vòm.

Một lĩnh vực rất được phát triển của kết cấu thanh mỏng là lĩnh vực làm nhà ở gia đình thấp tầng đang được xây dựng hàng loạt tại nhiều nước trên thế giới, làm toàn hoàn bằng cấu kiện thanh mỏng: Cột, khung, dầm, sàn kết hợp với vật liệu bao che bằng gỗ, gạch, kính.

Văn bản kỹ thuật quy định cách thiết kế kết cấu thanh mỏng được thiết lập ở nhiều nước, mang những tên khác nhau như Standard - Tiêu chuẩn (Anh, Úc) Specification - Quy định kỹ thuật (Mĩ) Code - Quy phạm (Châu Âu, Trung Quốc).

1. Mĩ: Như trên đã nói Mĩ là nước đầu tiên trên thế giới có tiêu chuẩn quy phạm năm 1946 mang tên "Specification for the design of cold formed Steel structural member - Quy định kỹ thuật về thiết kế cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội" của Viện sắt và Thép Hoa Kỳ (AISI) sử dụng phương pháp ứng suất cho phép. Từ đó đến nay liên tục được bổ sung và chỉnh sửa, đã tái bản lần lượt

năm 1956, 1960, 1962, 1968, 1980, 1986 đều vẫn dùng phương pháp ứng suất cho phép. Ấn bản năm 1996 đã có thêm phương pháp hệ số tải trọng và cường độ, dùng song song bên cạnh phương pháp của việc thay đổi liên tục quy phạm của Mỹ chứng tỏ luôn có những nghiên cứu mới để bổ sung, cập nhật đồng thời cũng cho thấy là nhiều vấn đề chưa được giải quyết ổn định, chưa có kết luận dứt khoát.

2. Trung Quốc: Quy phạm mới nhất của Trung Quốc mang tên "GB 50018-2002 Quy phạm kỹ thuật để thiết kế kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội" ban hành năm 2002 thay thế cho quy phạm cũ năm 1987. Quy phạm này phản ánh các nghiên cứu độc đáo của Trung quốc, không phụ thuộc vào bất cứ quy phạm của nước ngoài nào.

3. Úc: Quy phạm hiện hành của Úc là AS/NZS 4600:1996 "Cold - Formed Steel structures - kết cấu thép tạo hình nguội" là quy phạm chung của hai nước Úc và New Zeland, thay thế cho quy phạm cũ AS 1538 - 1988. Quy phạm này kế thừa các nghiên cứu của quy phạm cũ, đồng thời dựa nhiều vào quy phạm Mỹ AISI 1996.

4. Châu Âu: Bộ tiêu chuẩn về kết cấu thép của Anh mang tên BS 5900 "Structural use of Steelwork in Building - kết cấu thép trong nhà" có phần 5, năm 1991 mang tên "Code of practice for the design of cold formed sections - Quy phạm thiết kế thành tạo hình nguội" là quy phạm hiện hành ở Anh, sử dụng phương pháp trạng thái tới hạn. Theo chương trình chung của các nước Châu Âu, trong thời gian tới, tiêu chuẩn BS sẽ hòa nhập với Quy phạm châu Âu Eurocode. Trong bộ Quy phạm châu Âu về kết cấu thép Eurocode 3 có chương 1 -3 là thiết kế cấu kiện thành mỏng mang tên "EN 1993 - 1 -3 Design of Steel Structures: Cold - formed thin gauge members and sheeting" (thiết kế kết cấu thép: cấu kiện và tấm thành mỏng tạo hình nguội). Trong chương 3 của luận văn sẽ nghiên cứu sâu hơn về bộ Quy phạm này.

1.5. ỨNG DỤNG KẾT CẤU THANH THÀNH MỎNG VÀ CÁC QUY PHẠM THIẾT KẾ Ở VIỆT NAM.

Tại Việt Nam, những công trình dùng kết cấu thành mỏng đầu tiên được xây dựng từ những năm 1970 do nước ngoài chế tạo. Có thể kể ra: Các nhà xưởng của Nhà máy tơ Thái Bình (Nhật Bản), nhà kho của nhà máy sợi Hà Nội (CHLB Đức) một số loại khung kho TiệpTuy nhiên, những cấu kiện thành mỏng do Việt Nam chế tạo chỉ xuất hiện từ khoảng thập niên 90 của thế kỷ trước, chủ yếu là các xà gồ, dầm tường, các loại tấm mái, do các Công ty Việt Nam và nước ngoài như Thường Phú, Austnam, Zamil Steel Vietnam. Việc triển khai kết cấu thành mỏng tạo hình nguội bắt đầu được đẩy mạnh khi một số Công

ty nước ngoài như Bluescope Lysaght nghiên cứu làm các kết cấu khung cho nhà công nghiệp, trường học, nhà ở cho vùng sâu, vùng xa. Đặc biệt một loại kết cấu thành mỏng mới được nghiên cứu và áp dụng là loại dàn mang tên Smartruss của Công ty Bluescope Lysaght dùng rộng rãi làm mái nhà với hình dạng phức tạp. Dàn gồm các thanh thành mỏng hình C, hình L, được chế tạo tự động bằng chương trình điều khiển máy cán và cắt. Kết cấu hệ mái nhíp tới 20m cho một trung tâm hội nghị lớn tại Hà Nội là kết cấu thành mỏng tạo thành hình nguội Smartruss lớn nhất ở Việt Nam hiện nay.

Hiện tại Việt Nam chưa có tiêu chuẩn thiết kế riêng cho kết cấu thanh thành mỏng. Việc sử dụng tiêu chuẩn Việt Nam đối với thép cán nóng TCVN 338-2005 là hoàn toàn không phù hợp.

1.6. MỘT SỐ HÌNH ẢNH VỀ VIỆC ỨNG DỤNG KẾT CẤU THANH THÀNH MỎNG.



Hình 1-10. Nhà dân dụng



Hình 1-11. Nhà dân dụng



Hình 1-12. Lớp học vùng sâu, vùng xa



Hình 1-13. Nhà nhiều tầng



Hình 1-14. Nhà công nghiệp

1.7. MỤC TIÊU, PHẠM VI NGHIÊN CỨU CỦA ĐỀ TÀI

1.7.1. Mục tiêu nghiên cứu của đề tài:

- Nghiên cứu lý thuyết tính toán ổn định của thanh thành mỏng (tính toán theo giải tích), đi sâu nghiên cứu mất ổn định vênh một phần tiết diện chữ C.
- Tính toán ổn định thanh thành mỏng theo Tiêu chuẩn Eurocode 3 (tính toán theo bề rộng hiệu quả của tiết diện chữ C).

1.7.2. Phạm vi nghiên cứu của đề tài:

- Nghiên cứu ổn định của thanh thành mỏng tiết diện chữ C chịu nén đúng tâm.

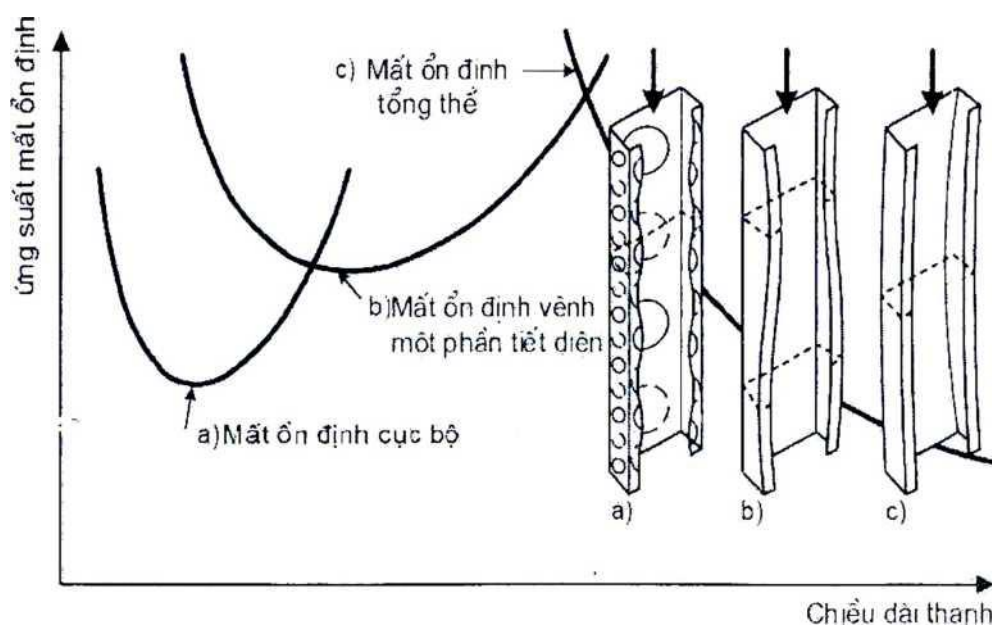
CHƯƠNG 2: CÁC DẠNG ỔN ĐỊNH CỦA THANH THÀNH MỎNG TIẾT DIỆN CHỮ C THEO LÝ THUYẾT

2.1. ĐẠI CƯƠNG:

2.1.1. Các dạng mất ổn định của thanh thành mỏng.

Cấu kiện thành mỏng chịu nén (cột) có các loại tiết diện: đơn hở (thép góc, chữ C, chữ Z), tổ hợp (chữ I do hai chữ C ghép lại), tiết diện chữ môn, tiết diện kín (ống, hộp). Đối với cấu kiện thép thành mỏng, điều quan trọng là phải tính toán kiểm tra ổn định. Trong đó, các dạng ổn định cần kiểm tra bao gồm:

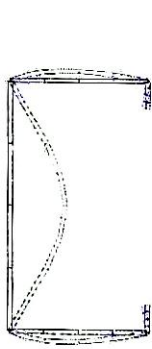
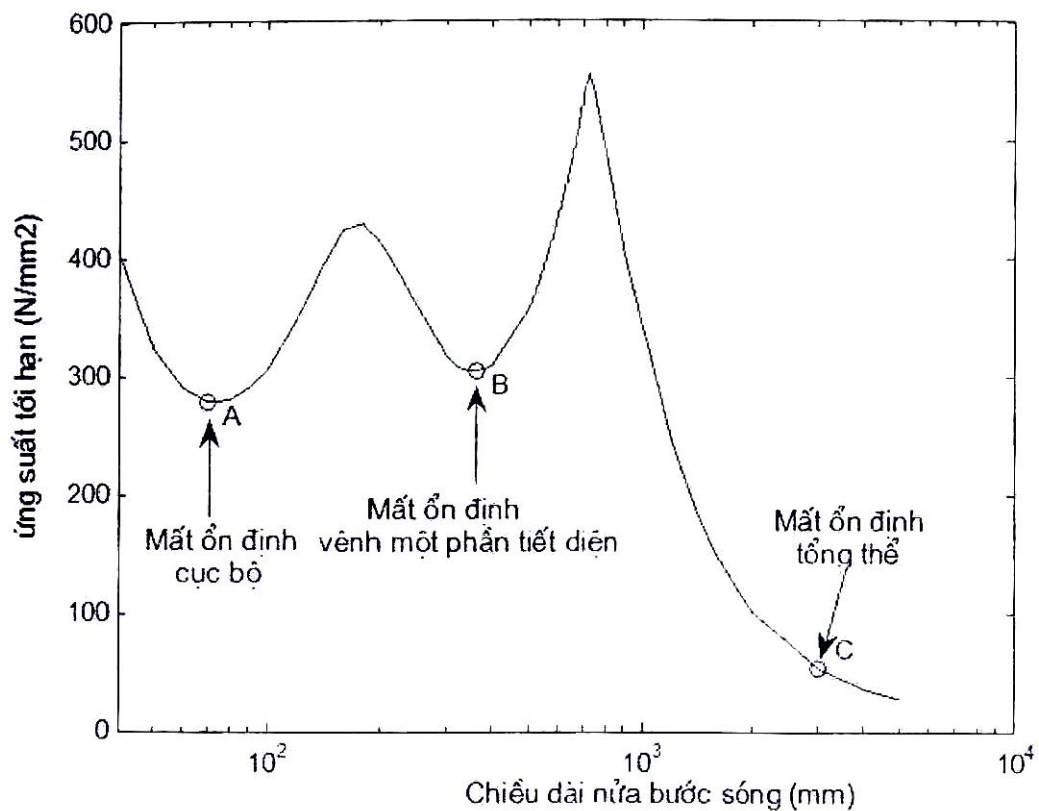
- Mất ổn định cục bộ;
- Mất ổn định vênh một phần tiết diện;
- Mất ổn định tổng thể;



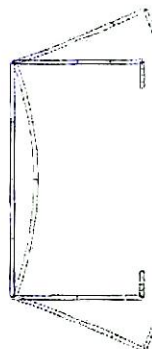
Hình 2-1. Các dạng mất ổn định của thanh thành mỏng tiết diện chữ C [9].

Trong 3 dạng mất ổn định trên, ổn định tổng thể và ổn định cục bộ đã có công thức giải tích để tính toán mất ổn định. Cụ thể, ổn định tổng thể dựa vào Lý thuyết ổn định xoắn-uốn của Vlasov và Timoshenko [18] và ổn định cục bộ dựa vào lý thuyết tấm [18]. Lời giải các bài toán này đã tương đối hoàn chỉnh, do đó trong chương này luận văn không đi sâu vào cách giải bài toán mà sẽ lấy kết quả cuối cùng sẵn có. Riêng đối với mất ổn định vênh một phần tiết diện, đây là một vấn đề tương đối mới ở Việt Nam nên luận văn sẽ nghiên cứu sâu

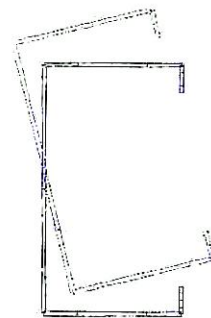
phần mất ổn định vênh một phần tiết diện, dựa trên kết quả nghiên cứu của liên minh Châu Âu và của hai nhà khoa học người Úc là Hancock và Lau [15].



Mất ổn định cục bộ



B: Mất ổn định vênh một phần tiết diện



C: Mất ổn định tổng thể

Hình 2-2. Phân tích các dạng mất ổn định thanh thành mỏng chữ C chịu nén đúng tâm bằng phương pháp dải hữu hạn [20].

Hình 2-1 và 2-2 thể hiện 3 dạng mất ổn định của thanh thành mỏng tiết diện chữ C chịu nén đúng tâm. Cụ thể:

- Mất ổn định cục bộ: là hiện tượng xảy ra khi trục thanh vẫn thẳng nhưng các phần tử của thanh (bản bụng, bản cánh, sườn biên) bị vênh ra ngoài mặt phẳng của chúng tạo thành sóng. Chiều dài nửa bước sóng của dạng mất ổn

định cục bộ nhỏ nhất và có giá trị xấp xỉ bề rộng tấm.

- Mất ổn định tổng thể: là hiện tượng xảy ra khi tiết diện thanh vẫn giữ nguyên hình dạng nhưng trục thanh không còn thẳng do bị uốn hoặc xoắn hoặc uốn-xoắn đồng thời tạo thành sóng. Chiều dài nửa bước sóng của dạng mất ổn định tổng thể có bước sóng lớn nhất và có giá trị xấp xỉ chiều dài thanh.

- Mất ổn định vênh một phần tiết diện: là hiện tượng xảy ra khi bản cánh và sườn biên bị vênh và cùng bị xoay quanh cạnh liên kết giữa bản cánh và bản bụng tạo thành sóng, còn bản bụng bị chuyển vị vuông góc với bề mặt của nó do cạnh liên kết bản bụng - bản cánh bị xoay. Dạng mất ổn định này có chiều dài nửa bước sóng trung gian, nằm trong khoảng hai giá trị nửa bước sóng của hai dạng mất ổn định trên.

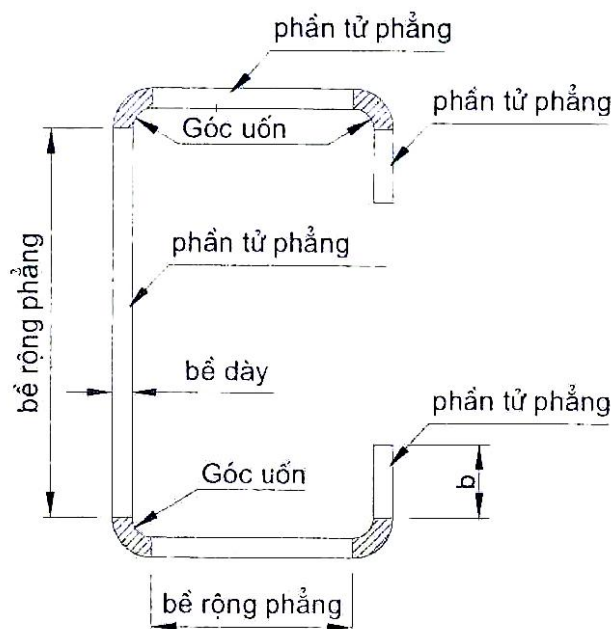
2.1.2. Một số định nghĩa khi tính toán cấu kiện thành mỏng.

a. *Phần tử*: Là một bộ phận của tiết diện hoặc cấu kiện như bụng, cánh, mép, góc...

b. *Phần tử phẳng*: Là một phần tử nằm trong mặt phẳng, không có uốn, không có mép. Ví dụ: Phần bụng nằm giữa 2 góc tiếp giáp với bản cánh (hình 2-3a).

c. *Góc uốn*: Là phần tử có hình cung tròn, tỷ lệ bán kính trong trên bề dày không lớn hơn 8. Ví dụ: Phần tử nằm giữa bản bụng và bản (hình 2-3a).

d. *Sườn biên*: Là phần tử được tạo hình tại mép của phần tử phẳng (hình 2-3a).



Hình 2-3a. Phần tử phẳng, góc uốn, bề dày và bề rộng phẳng.

e. *Bề rộng phẳng b*: Là bề rộng của phần phẳng của phần tử, không gồm các đoạn cong (hình 2-3a).

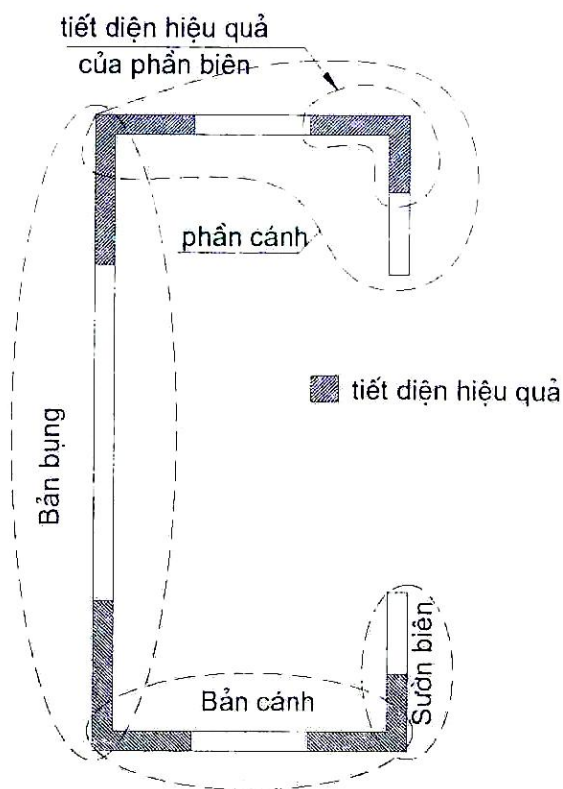
f. *Bề dày*: Là bề dày của tấm kim loại gốc, không kể lớp phủ bảo vệ. Khi cán nguội, bề dày thực tế có giảm đi 1- 2% nhưng sẽ bỏ qua không xét trong tính toán (hình 2-3a).

g. *Bề rộng hiệu quả*: Khi tỉ số bề rộng phẳng và bề dày b/t của phần tử chịu nén quá lớn, một bộ phận bản bị mất ổn định. Bản phẳng khi đó được tính chuyển về bản có bề rộng b_e gọi là bề rộng hiệu quả. Bề rộng này coi như không bị mất ổn định, có thể chịu được ứng suất nén đạt giới hạn chảy.

h. *Tiết diện hiệu quả*: Là một phần tiết diện coi như không bị mất ổn định và có thể chịu được ứng suất nén đạt tới giới hạn chảy, trong khi phần tiết diện còn lại đã bị mất ổn định (hình 2-3b).

i. *Phần cánh*: Là phần tiết diện bao gồm bản cánh và sườn biên (hình 2-3b).

k. *Tiết diện hiệu quả của phần biên*: Là một phần tiết diện bao gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh kề sườn biên (hình 2-3b).



Hình 2-3b. Tiết diện hiệu quả, phần cánh, tiết diện hiệu quả của phần biên.

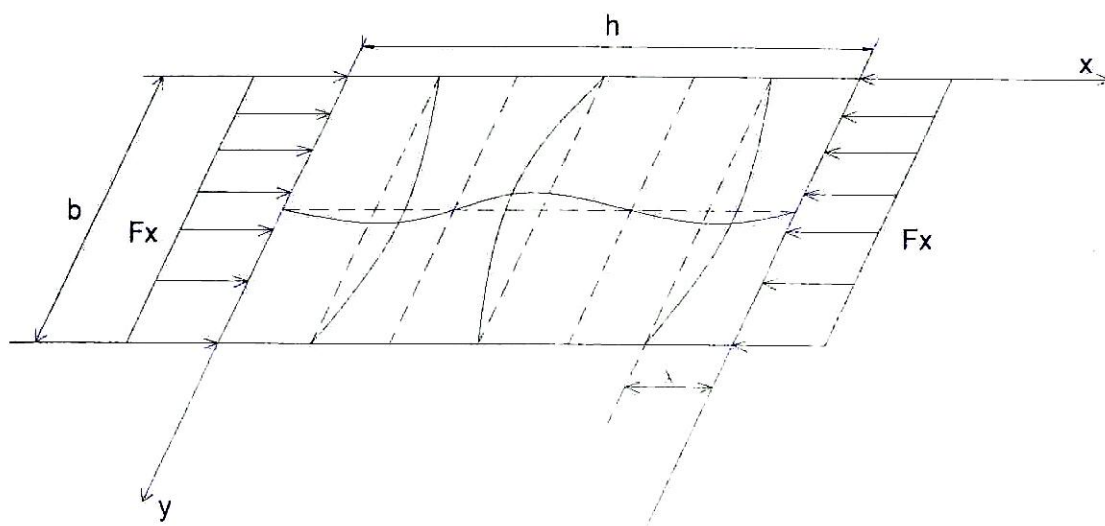
2.2. ỔN ĐỊNH CỤC BỘ

2.2.1. Lý thuyết chung

a. Ổn định cục bộ

Các phần tử của cấu kiện thành mỏng đều là các tấm mỏng, khi chịu nén thường có thể bị mất ổn định cục bộ tức là bị vênh sóng ra ngoài mặt phẳng của tấm.

Giả sử xét một tấm chữ nhật cạnh là $h \times b$ chịu ứng suất nén đều. Bài toán đã được nghiên cứu bởi các tác giả Timoshenko, Gere [18] và nhiều tác giả khác dựa trên lý thuyết tấm.



Hình 2-4. Mất ổn định của tấm chịu nén

Giả sử không có lực thể tích thì phương trình vi phân của tấm bị uốn lượn là:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left(F_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2-1)$$

Trong đó:

D: Độ cứng trụ phụ thuộc vào vật liệu và bề dày tấm.

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2-2)$$

E: môđun đàn hồi của thép;

μ : hệ số Poisson;

t: bề dày tấm;

w: Là độ võng của tấm, với trường hợp cạnh tấm tựa đơn có thể biểu diễn

mặt võng của tấm lúc mất ổn định bởi chuỗi lượng giác kép:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{h} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2-3)$$

Sau khi thay vào phương trình vi phân ở trên, tìm được giá trị của lực nén tới hạn được xác định bởi công thức sau [18].

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 D}{b^2} \quad (2-4a)$$

Ứng suất tới hạn là:

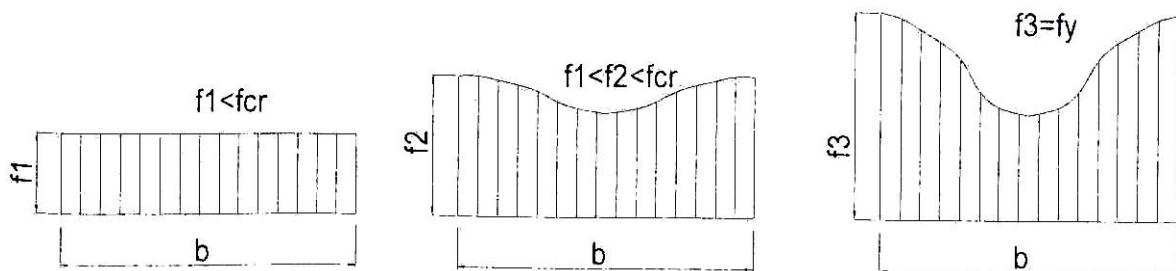
$$f_{cr} = \frac{F_{cr}}{t} = \frac{k\pi^2 D}{t.b^2} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (2-5)$$

Trong đó: k = hệ số phụ thuộc điều kiện gối tựa của tấm, trạng thái ứng suất và tỷ số h/b. Với tấm đủ dài, chịu nén đều, tựa khớp 4 cạnh thì k=4. Với tấm đủ dài, chịu nén đều, tựa khớp 3 cạnh, cạnh còn lại tự do thì k = 0,43

b. Bề rộng hiệu quả

Sau khi ứng suất đạt giá trị tới hạn, tấm bị oằn nhưng không bị phá hủy, vẫn còn khả năng chịu thêm lực. Tải trọng đặt thêm vào sẽ gây ra sự phân bố lại ứng suất và cấu kiện vẫn chịu được tải trọng. Hiện tượng này gọi là sự làm việc sau tới hạn và được áp dụng nhiều cho cấu kiện thành mỏng.

Sự phân bố lại ứng suất phụ thuộc vào sơ đồ tăng cứng của phần tử cấu kiện. Giả sử xét phần tử được tăng cứng hai đầu tấm, chịu ứng suất nén phân bố đều. Sau khi ứng suất nén đạt giá trị tới hạn f_{cr} , tấm bị oằn, phần ứng suất ở dải giữa sẽ chuyển sang hai cạnh và có giá trị lớn hơn f_{cr} . Sự tăng ứng suất tại hai biên sẽ tiếp tục cho đến khi đạt đến giá trị ứng suất chảy f_y và tấm bị phá hủy.



Hình 2-5. Sự phân bố lại ứng suất sau tới hạn

Tấm bị oằn có thể chuyển đổi thành một tấm có bề rộng nhỏ hơn là b_e sao

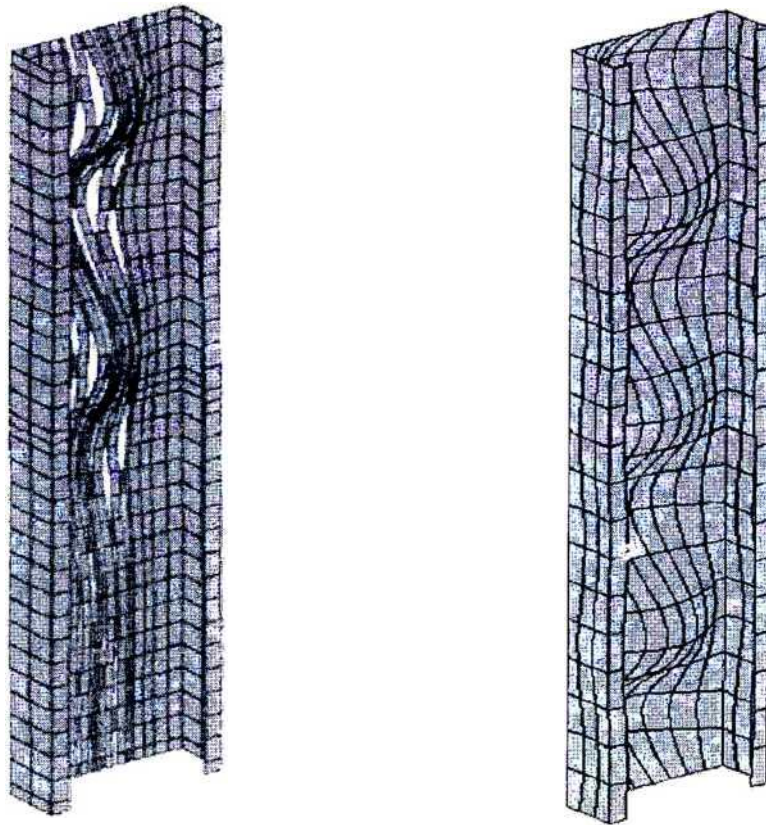
cho ứng suất tới hạn của tấm là bằng f_y . Việc tính toán mất ổn định cục bộ sẽ trở thành tính toán bề rộng hiệu quả của tấm.

$$f_y = \frac{k\pi^2 D}{b_e^2} \Rightarrow \frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_y}} \Rightarrow b_e = b \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_y}} \quad (2-6)$$

Phương trình này do Von Karman đề xuất được dùng để tính bề rộng hiệu quả của các phần tử thành mỏng.

2.2.2. Đối với thanh thành mỏng tiết diện chữ C chịu nén đúng tâm

Với thanh thành mỏng tiết diện chữ C, khi kiểm tra ổn định cục bộ cần kiểm tra ổn định cục bộ của bản cánh, bản bụng và sườn biên.



Hình 2 - 6: Mất ổn định cục bộ của thanh thành mỏng tiết diện chữ C
(có đục lỗ và không đục lỗ) [13]

a. Ổn định của bản bụng và bản cánh.

Bản bụng và bản cánh của thanh thành mỏng tiết diện chữ C chịu nén đúng tâm là tấm được tăng cứng. Do đó, bản bụng và bản cánh xem là tấm 4 cạnh tựa khớp và chịu ứng suất nén đều. Việc tính toán ứng suất tới hạn và bề

rộng hiệu quả giống như ở trên.

Cụ thể ứng suất tới hạn tính theo công thức của (2-5) Timoshenko:

$$f_{cr} = \frac{F_{cr}}{t} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (2-7)$$

trong đó:

E = môđun đàn hồi của thép;

μ = hệ số Poisson;

t = bề dày tấm;

k = hệ số tùy thuộc điều kiện gối tựa của tấm và trạng thái ứng suất. Ở đây, Bản bụng và bản cánh là tấm 4 cạnh tựa khớp và chịu ứng suất nén đều, do đó lấy với $k = 4$.

b. Ổn định của sườn biên.

Sườn biên làm việc như một tấm dài tựa 3 cạnh còn một cạnh dài tự do, ứng suất tới hạn vẫn được tính theo công thức (2-5) của Timoshenko nhưng hệ số k là 0,43.

2.2.3. Ví dụ tính toán:

Xác định ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ của thanh thành mỏng tiết diện chữ C có kích thước như hình vẽ.

Thép có:

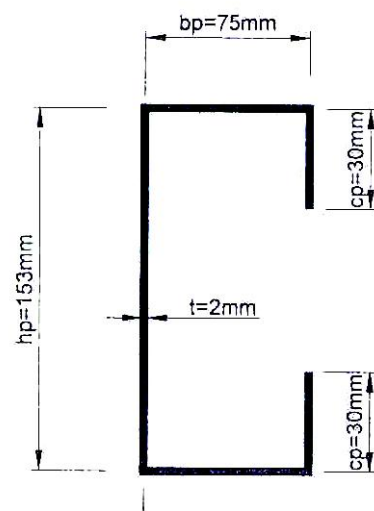
- Giới hạn chảy: $f_y = 360 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

- Mô đun đàn hồi: $E = 2,1 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

- Hệ số Poisson $\mu = 0,3$;

- Mô đun đàn hồi trượt: $G = 0,81 \times 10^5$

$\text{(N/mm}^2\text{)}$



Bài giải

a. Ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ bản bụng:

$$f_{cr,w} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} = \frac{4\pi^2 2,1 \times 10^5}{12(1-0,3^2)(153/2)^2} = 129,596 \text{ N/mm}^2$$

b. Ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ bản cánh:

$$f_{cr,f} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} = \frac{4\pi^2 2,1 \times 10^5}{12(1-0,3^2)(75/2)^2} = 539,328 N/mm^2$$

c. Ứng suất tới hạn gây mất ổn định cục bộ sườn biên:

$$f_{cr,s} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} = \frac{0,43 \times \pi^2 \times 2,1 \times 10^5}{12(1-0,3^2)(30/2)^2} = 362,3613675 N/mm^2$$

Kết luận: Ứng suất tới hạn tính theo mất ổn định cục bộ là:

$$f_{cr} = \min(f_{cr,w}; f_{cr,f}; f_{cr,s}) = 129,596 N/mm^2$$

2.3. ỔN ĐỊNH TỔNG THỂ:

2.3.1. Lý thuyết chung

Nói chung một cột có thể có ba dạng mất ổn định:

- *Mất ổn định do uốn dọc*: cấu kiện uốn quanh một trục.

- *Mất ổn định do xoắn*: tiết diện xoay quanh tâm xoắn, không kèm theo uốn. Dạng này rất ít xảy ra, chỉ gặp ở cấu kiện ngắn với tiết diện có độ cứng xoắn nhỏ (tiết diện chữ I, chữ thập, chữ C).

- *Mất ổn định do uốn xoắn*: cấu kiện uốn dọc theo hai phương đồng thời bị xoắn. Dạng sau hay xuất hiện ở các tiết diện đối xứng như thép máng, thép góc, tiết diện chữ T hay chữ I có cánh không đều nhau. Tiết diện không đối xứng luôn luôn uốn theo dạng uốn xoắn.

Xét trường hợp tổng quát là mất ổn định do uốn - xoắn: cột bị uốn theo hai phương và chịu xoắn đối với trục dọc, tiết diện cột có chuyển vị U và V đối với trục X và V và quay góc ϕ quanh tâm xoắn C. Bài toán đã được nghiên cứu bởi các tác giả Timoshenko, Vlasov [18] và nhiều tác giả khác.

Phương trình cân bằng của cấu kiện ở trạng thái chuyển vị [18]:

$$EI_x \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} + N \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - N \cdot x_0 \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0; \quad (2-8a)$$

$$EI_y \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - N \cdot y_0 \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0; \quad (2-8b)$$

$$EI_w \frac{\partial^4 \Phi}{\partial z^4} + (N i_0^2 - GJ) \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - N \cdot y_0 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - N \cdot x_0 \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0; \quad (2-8c)$$

Trong đó:

- J = mômen quán tính xoắn của tiết diện, đối với cấu kiện thành mỏng có

thể tính bằng: $J = \frac{\Sigma bt^3}{3}$ (2-9)

- I_w là hằng số vênh của tiết diện được tính theo công thức chung là:

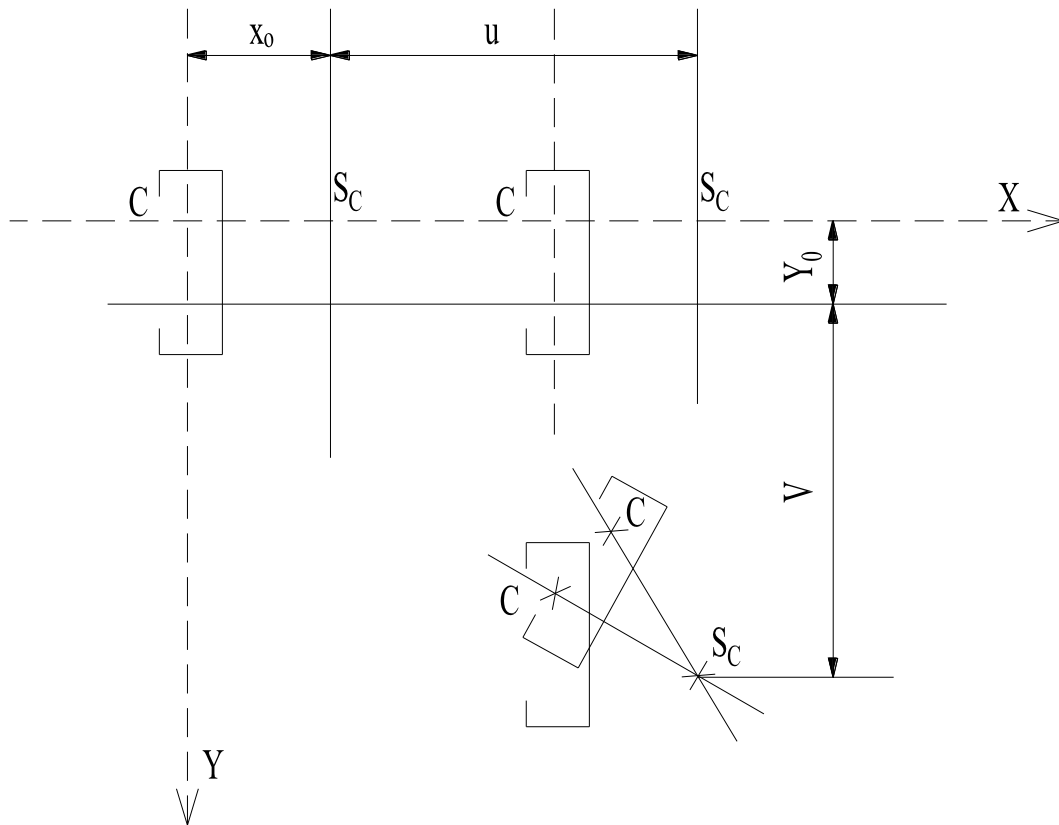
$$I_w = \int \omega_0^2 t ds \quad (2-10a)$$

- Với ω_0 là tọa độ quạt của các điểm của tiết diện đối với tâm uốn.

- i_0 là bán kính quán tính cực của tiết diện đối với tâm uốn:

$$i_0 = \sqrt{i_x^2 + i_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (2-10b)$$

+ Với i_x, i_y lần lượt là bán kính quán tính của tiết diện đối với trục x và y;
 x_0 và y_0 là tọa độ của tâm uốn.



Hình 2-7. Chuyển vị do mất ổn định tổng thể

(C: Trọng tâm, S_C : Tâm uốn)

Đạo hàm được lấy đối với trục dọc z của cầu kiện.

Các điều kiện biên, giả sử khi hai đầu là khớp:

Tại $z = 0$ và $z = L$: $u = v = \theta = 0$

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{d^2 v}{dz^2} = \frac{d^2 \Phi}{dz^2} = 0 \quad (\text{vì là liên kết khớp đối với cả uốn và xoắn}).$$

Nghiệm của hệ phương trình có thể viết dưới dạng:

$$u = A \sin(n\pi z/L); v = B \sin(n\pi z/L); \theta = C (n\pi z/L)$$

Trong đó:

- A,B,C: Các hệ số không đổi. Để có lực tới hạn nhỏ nhất lấy $n=1$.
- L: Chiều dài hình học của cột.

Thay vào hệ phương trình và các điều kiện biên, ta được hệ 3 phương trình tuyến tính với ẩn là A, B, C. Điều kiện mất ổn định là A, B, C phải khác không tức là định thức của hệ phương trình tuyến tính phải bằng 0. Khai triển định thức và cho triệt tiêu, ta được phương trình đặc trưng để tìm lực tới hạn.

Phương trình đặc trưng có dạng:

$$r_{01}^2(N_{cr} - N_{cr,x})(N_{cr} - N_{cr,y})(N_{cr} - N_{cr,T}) - N_{cr}^2 y_0^2 (N_{cr} - N_{cr,x}) - N_{cr}^2 x_0^2 (N_{cr} - N_{cr,y}) = 0 \quad (2-11)$$

Trong đó:

$N_{cr,x}$ = lực tới hạn Euler gây uốn dọc đối với trục x:

$$N_{cr,x} = \frac{\pi^2 EI_x}{l_x^2} \quad (2-11a)$$

$N_{cr,y}$ = lực tới hạn Euler gây uốn dọc đối với trục y:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{l_y^2} \quad (2-11b)$$

$N_{cr,T}$ = lực tới hạn Euler gây oằn xoắn đối với trục z:

$$N_{cr,T} = \left[\frac{\pi^2 EI_w}{l_z^2} + GJ \right] \frac{1}{i_0^2} \quad (2-11c)$$

l_x, l_y , và l_z là chiều dài tính toán đối với các trục x,y và khi xoắn.

Phương trình đặc trưng có 3 nghiệm N_{cr} , lực tới hạn là lực nhỏ nhất trong ba nghiệm đó.

2.3.2. Áp dụng đối với thanh thành mỏng tiết diện chữ C

Đối với thanh tiết diện chữ C: Tiết diện có một trục đối xứng, một toạ độ của tâm uốn $y_0 = 0$.

Phương trình đặc trưng trở thành:

$$(N_{cr} - N_{cr,y})[r_{01}^2(N_{cr} - N_{cr,x})(N_{cr} - N_{cr,T}) - (N_{cr} x_0^2)] = 0 \quad (2-12)$$

$$\text{Một nghiệm của phương trình: } N_{cr1} = \frac{\pi^2 EI_y}{l_{ey}^2} \quad (2-12a)$$

Hai nghiệm còn lại là nghiệm của phương trình

$$\left[r_{01}^2 (N_{cr} - N_{cr,x})(N_{cr} - N_{cr,T}) - (N_{cr} x_0^2) \right] = 0$$

Đặt: $\beta = 1 - \left(\frac{x_0}{r_{01}} \right)^2$, giải phương trình ta được:

$$N_{cr2} = \frac{1}{2\beta} \left[(N_{cr,x} + N_{cr,T}) + \sqrt{(N_{cr,x} + N_{cr,T})^2 - 4\beta N_{cr,x} N_{cr,T}} \right] \quad (2-12b)$$

$$N_{cr3} = \frac{1}{2\beta} \left[(N_{cr,x} + N_{cr,T}) - \sqrt{(N_{cr,x} + N_{cr,T})^2 - 4\beta N_{cr,x} N_{cr,T}} \right] \quad (2-12c)$$

N_{cr3} nhỏ hơn nên sẽ được lấy là lực tới hạn uốn xoắn. Nó luôn luôn nhỏ hơn $N_{cr,x}$ và $N_{cr,z}$ nhưng so với $N_{cr,y}$ thì có thể lớn hơn hoặc nhỏ hơn, tùy theo chiều dài cầu kiện.

Có thể tìm được chiều dài l_{cr} để phân ranh giới giữa oằn uốn dọc (N_y) và oằn uốn xoắn (N_{cr3}). Tìm l_{cr} bằng cách cho $N_{cr3} = N_{cr,y}$. Nếu chiều dài cầu kiện 1 lớn hơn l_{cr} , cầu kiện sẽ oằn do uốn dọc. Nếu $1 < l_{cr}$, cầu kiện sẽ oằn do uốn xoắn.

2.3.3. Ví dụ tính toán

Xác định lực tới hạn gây mất ổn định tổng thể của thanh thành mỏng tiết diện chữ C có kích thước như hình vẽ.

Thép có:

- Giới hạn chảy: $f_y = 360 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
- Mô đun đàn hồi: $E = 2,1 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
- Hệ số Poisson $\mu = 0,3$;
- Mô đun đàn hồi trượt: $G = 0,81 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$.

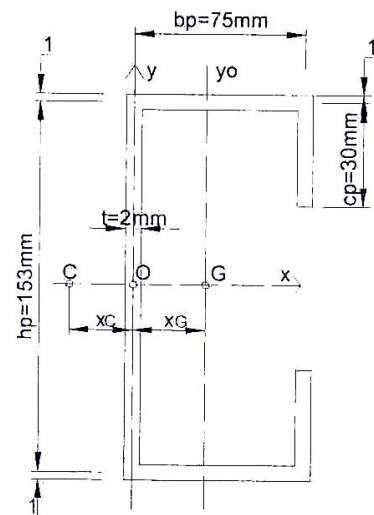
- Chiều dài tính toán: $l_{ex} = l_{ey} = l_{ez} = 2279 \text{ mm}$

Bài giải

a. Tính toán đặc trưng hình học:

Diện tích tiết diện:

$$\begin{aligned} A_G &= t \cdot (h_p + 2(b_p + c_p)) = 2 \cdot (153 + 2(75 + 30)) \\ &= 726 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$



Trọng tâm tiết diện: $x_G = 27,68\text{mm}$

Tọa độ tâm xoắn: $x_C = 41,3\text{mm}$

Các mômen quán tính:

$$I_x = 2722448\text{mm}^4;$$

$$I_y = 648808\text{mm}^4;$$

$$I_T = 950\text{mm}^4$$

Hằng số vênh của tiết diện:

$$I_w = \frac{b_p^2 t}{6} (4c_p^3 + 6h_p c_p^2 + 36h_p^2 c_p + h_p^2 b_p) = 4,0963 \cdot 10^9 \text{mm}^6$$

Bán kính quán tính:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = \sqrt{\frac{2722448}{726}} = 61,24\text{mm};$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = \sqrt{\frac{648808}{726}} = 29,89\text{mm};$$

$$i_0^2 = i_x^2 + i_y^2 + x_0^2 = i_x^2 + i_y^2 (x_C + x_G)^2$$

$$= 61,24^2 + 29,89^2 + (41,3 + 27,68)^2 = 9402\text{mm}^2$$

b. Lực tới hạn đàn hồi với trường hợp mất ổn định do uốn dọc đối với trục y:

$$N_{cr,y} = \frac{\Pi^2 \cdot EI_y}{l_y^2} = \frac{\Pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 648808}{2279^2} = 258646,22\text{N}$$

c. Lực tới hạn đàn hồi với trường hợp mất ổn định do uốn - xoắn:

$$N_{cr,FT} = \frac{1}{2\beta} \left[(N_{cr,x} + N_{cr,T}) - \sqrt{(N_{cr,x} + N_{cr,T})^2 - 4\beta N_{cr,x} N_{cr,T}} \right]$$

Trong đó:

$$\beta = 1 - \frac{x_0^2}{i_0^2} = 1 - \frac{(x_C + x_G)^2}{i_0^2} = 1 - \frac{(43,1 + 27,68)^2}{9402} = 0,494$$

$$N_{cr,x} = \frac{\Pi^2 \cdot EI_x}{l_x^2} = \frac{\Pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 2722448}{2279^2} = 1085299,32\text{N}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_T + \frac{\Pi^2 EI_w}{l_T^2} \right) = \frac{1}{9402} \left(0,81 \cdot 10^5 \cdot 950 + \frac{\Pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 4,0963 \cdot 10^9}{2279^2} \right)$$

$$= 181869,08\text{N}$$

Thay vào, lực tới hạn đàn hồi với trường hợp mất ổn định do uốn - xoắn:

$$N_{cr,FT} = \frac{1}{2.0,494} \left[(1085299,32 + 181869,08) - \sqrt{(1085299,32 + 181869,08)^2 - 4.0,494.1085299,32.181869,08} \right]$$

$$= 333169,85N$$

Lực tới hạn gây mất ổn định tổng thể là:

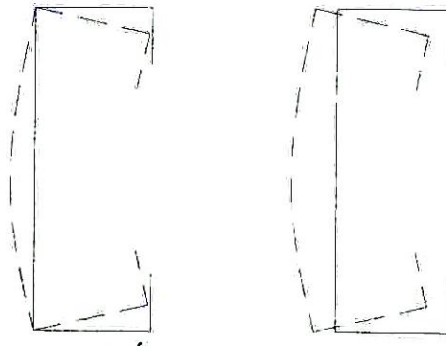
$$N_{cr} = \min(N_{cr,y}; N_{cr,FT}) = 258646,22N$$

Như vậy, ở đây thanh bị mất ổn định do uốn dọc đối với trục y

2.4. MẤT ỔN ĐỊNH VÊNH MỘT PHẦN TIẾT DIỆN

2.4.1. Hiện tượng mất ổn định vênh một phần tiết diện

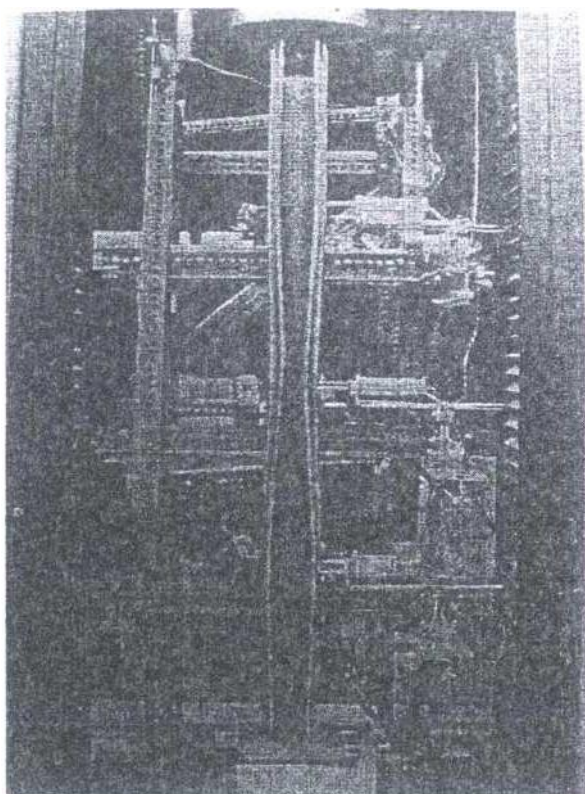
Hiện tượng mất ổn định vênh một phần tiết diện thường xảy ra với thanh thành mỏng tiết diện hở đối xứng đơn chịu nén đứng tâm. Chẳng hạn với thanh tiết diện chữ C, khi hiện tượng này xảy ra, phần bản cánh và sườn biên bị vênh và cùng bị xoay quanh góc liên kết giữa bản cánh và bản bụng.



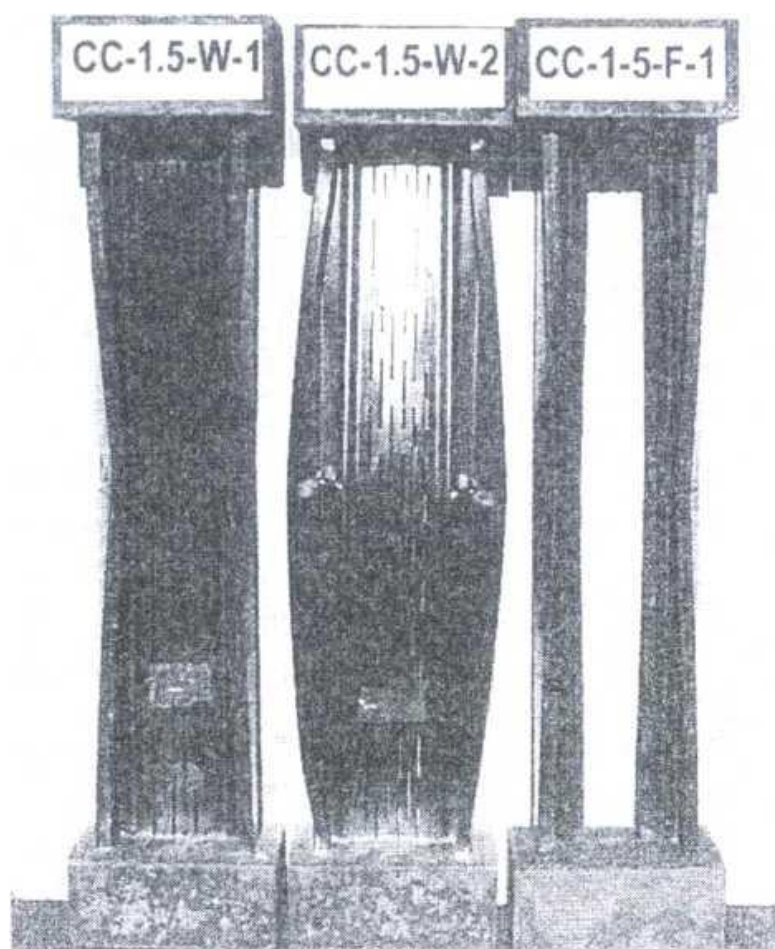
Hình 2-7a. Tiết diện thanh thành mỏng bị mất ổn định vênh một phần tiết diện

Việc nghiên cứu về mất ổn định vênh một phần tiết diện đã được nghiên cứu bởi các nhà khoa học Lau và Hancock (1987) hay Schafer và Pekoz (1999), và nhiều nhà khoa học khác. Hiện nay trên thế giới có một số phương pháp tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện, trong luận văn này sẽ trình bày hai phương pháp thông dụng hiện nay và đã được đưa vào tiêu chuẩn của một số nước. Đó là phương pháp của Châu Âu và phương pháp của Hancock.

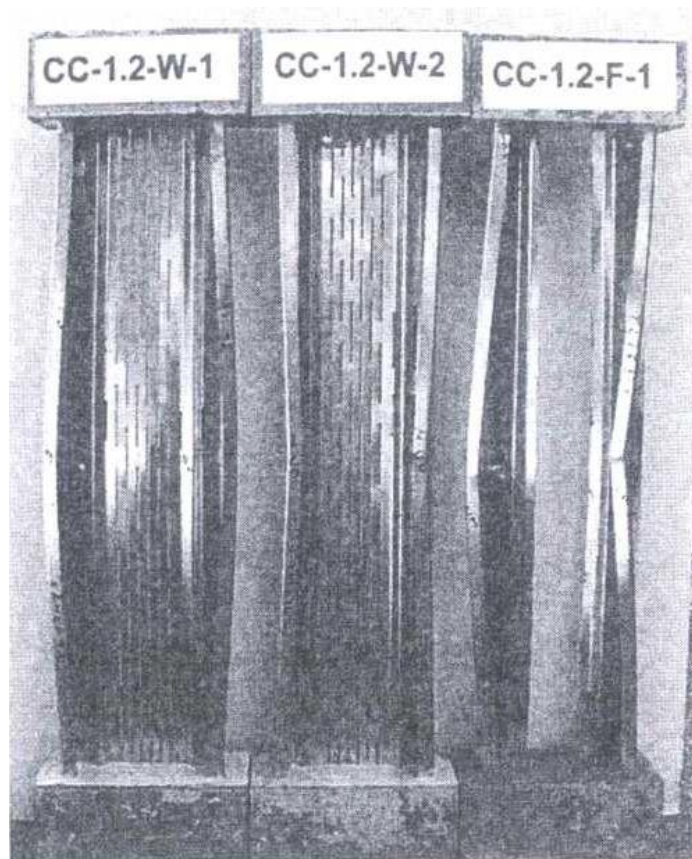
Sau đây là một số hình ảnh về mất ổn định vênh một phần tiết diện của thanh thành mỏng tiết diện chữ C:



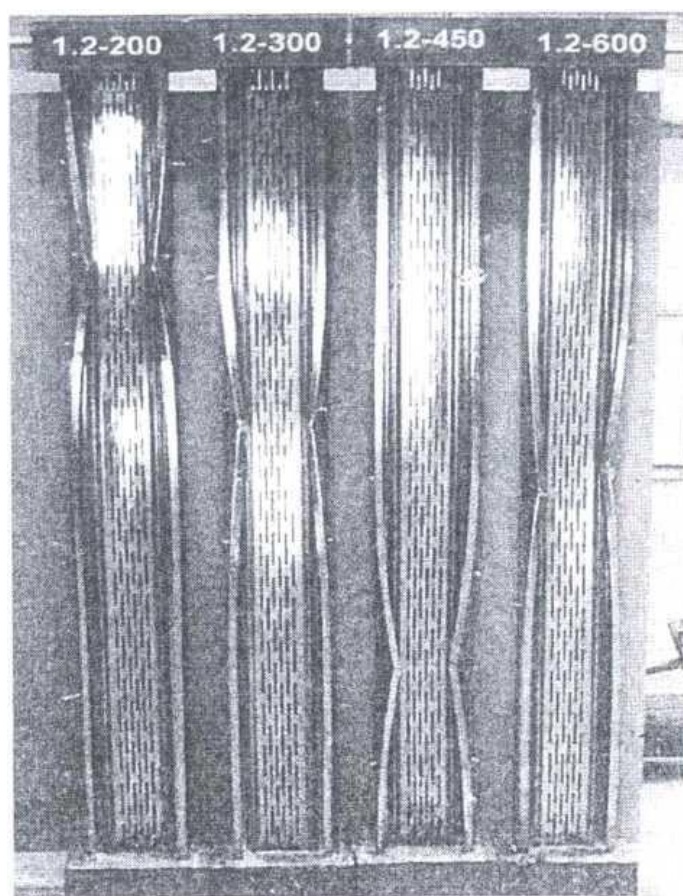
Hình 2-8a. Thí nghiệm mất ổn định vênh một phần tiết diện [13]



Hình 2-8b. Thí nghiệm mất ổn định vênh một phần tiết diện [13]



Hình 2-8c. Thí nghiệm mất ổn định vênh một phần tiết diện [13]



Hình 2-8d. Thí nghiệm mất ổn định vênh một phần tiết diện [13]

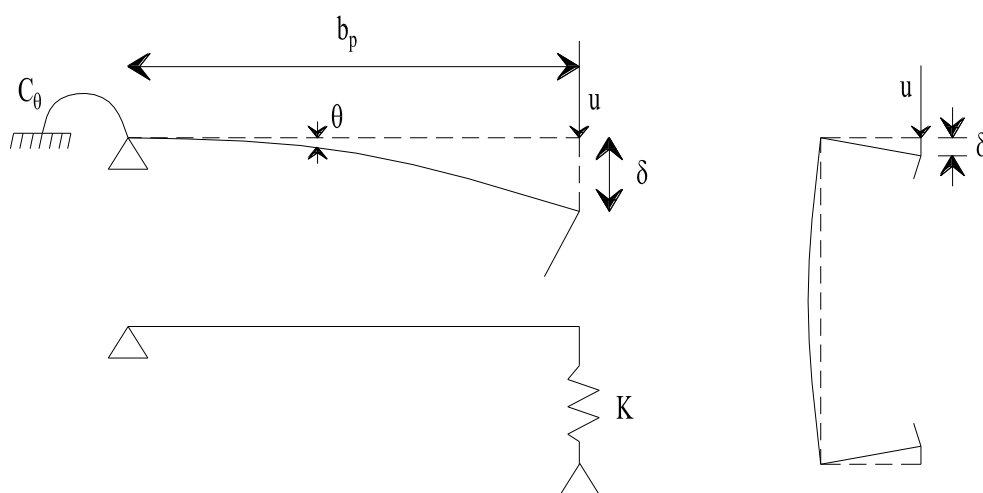
2.4.2. Tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 [9]

Tiêu chuẩn châu Âu Eurocode 3 tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện dựa trên quan điểm rằng phần biên làm việc như một cấu kiện chịu nén tựa trên những gối đàn hồi liên tục. Có thể xác định độ cứng k của gối đàn hồi bằng cách đặt một lực phân bố đơn vị u trên một đơn vị chiều dài lên trọng tâm của của phần biên, sau đó xác định độ võng δ của phần biên (hình 2-9). Khi đó, độ cứng của gối đàn hồi được xác định theo công thức:

$$K = \frac{u}{\delta} \quad (2-13a)$$

Cụ thể, theo công thức của tiêu chuẩn Châu Âu:

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\mu^2)} \cdot \frac{1}{1,5b_p^2h_p + b_p^3} \quad (2-13b)$$



Hình 2-9. Mô hình tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện theo tiêu chuẩn Eurocode 3

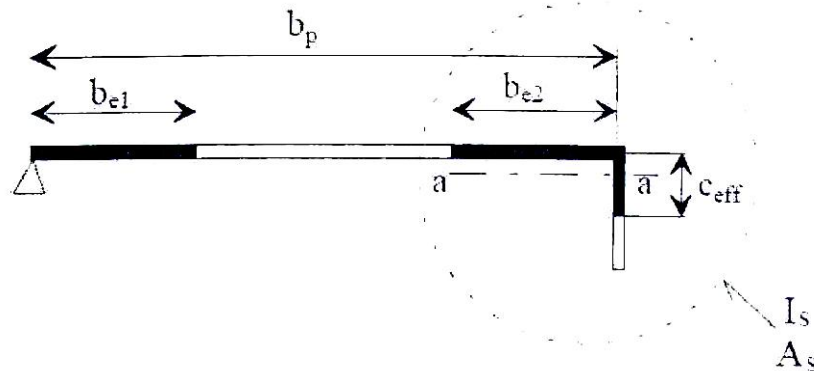
Với quan điểm trên, ứng suất tới hạn làm mất ổn định vênh một phần tiết diện được xác định dựa trên công thức của Timôshenko và Gere (1961) [18]:

$$f_{cr} = \frac{\Pi^2 EI_s}{A_s \lambda^2} + \frac{K \lambda^2}{A_s \Pi^2} \quad (2-14)$$

Trong đó:

- A_s và I_s là diện tích tiết diện hiệu quả và mômen quán tính tiết diện hiệu quả của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và của phần bản cánh kể sườn biên) xác định theo công thức của Eurocode 3 [9].

- $\lambda = \frac{L}{m}$: là chiều dài nửa bước sóng.
- m: Số lượng nửa bước sóng.



Hình 2-10. Đặc trưng hình học của tiết diện hiệu quả của phần biên (A_s, I_s)

Giá trị tới hạn của λ được xác định bằng cách tìm giá trị nhỏ nhất của f_{cr} trong phương trình trên.

$$\text{Giá trị tới hạn của } \lambda \text{ là: } \lambda_{cr} = \sqrt[4]{\frac{EI_s}{K}} \quad (2-14a)$$

$$\text{Giá trị ứng suất tới hạn là: } f_{cr} = \frac{\sqrt[2]{KEI_s}}{A_s} \quad (2-14b)$$

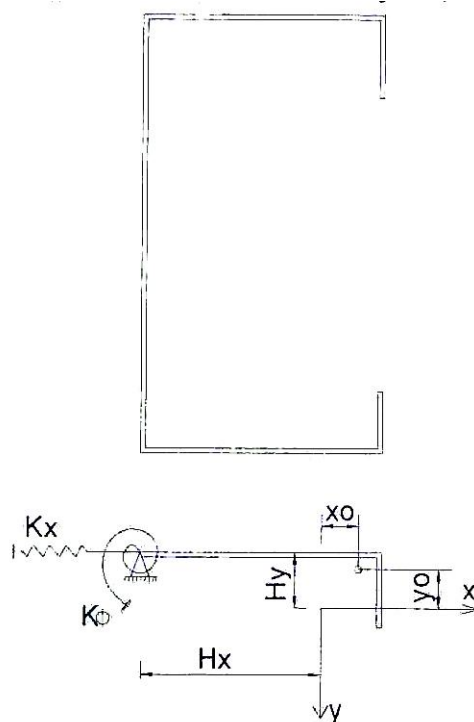
2.4.3. Phương pháp của Hancock

Hancock là nhà khoa học người Úc, ông có rất nhiều công trình khoa học nghiên cứu về thanh thành mỏng, và có nhiều đóng góp to lớn cho việc phát triển và hoàn thiện Tiêu chuẩn Úc AS 4600 [3]. Một trong những kết quả nghiên cứu của ông đã được đưa vào Tiêu chuẩn AS 4600 đó là tính toán ổn định vênh một phần tiết diện của thanh thành mỏng. Trong phần này luận văn trình bày phương pháp nghiên cứu của ông, dựa trên tài liệu của Lau và Hancock [15].

Phương pháp mà Hancock sử dụng để nghiên cứu đó là phương pháp dải hữu hạn và mô hình xấp xỉ sử dụng mô hình mất ổn định xoắn-uốn theo lý thuyết thanh thành mỏng của Timoshenko (1959) và Vlasov (1961). Mô hình xấp xỉ này cho rằng phần cánh giữ nguyên hình dạng; và xoay quanh góc liên kết giữa bản cánh và bản bụng, còn bản bụng bị chuyển vị vuông góc với bề mặt của nó do cạnh liên kết bản bụng - bản cánh bị xoay có xét đến ảnh hưởng của

lực nén trên bản bụng (hình 2-7). Với mô hình trên, phần cánh liên kết với bản bụng như một gối tựa đàn hồi liên tục. Việc đơn giản hóa công thức trong mô hình xấp xỉ cho phép người thiết kế dễ dàng sử dụng chúng cho việc tính toán. Việc kiểm tra sự đúng đắn của mô hình xấp xỉ và việc đơn giản hóa công thức của mô hình này được thực hiện bởi những so sánh kết quả của công thức giải tích đã được đơn giản hóa và phân tích theo phương pháp dải hữu hạn.

Xét một thanh thành mỏng tiết diện chữ C như hình vẽ: Chọn các trục tọa độ ox , oy sao cho trục ox song song với bản cánh, và gốc đặt tại trọng tâm của phân cánh. Tọa độ tâm cắt và các gối tựa liên tục đàn hồi ký hiệu theo thứ tự là x_0 , y_0 và h_x , h_y . Ký hiệu u , v là các thành phần chuyển vị của tâm xoắn theo các phương ox , oy , và Φ là góc xoay của tiết diện so với tâm xoắn. Độ cứng ngang và độ cứng các gối tựa đàn hồi được ký hiệu là k_x , k_Φ .



Hình 2-11. Mô hình tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện theo phương pháp của Hancock [15]

Dựa vào phương trình cân bằng các lực đối với phương x và phương y và phương trình cân bằng mômen quanh tâm xoắn, tải trọng dọc trục gây mất ổn định P có thể được xác định đồng thời theo 3 phương trình sau:

$$EI_y \frac{d^4 u}{dz^4} + EI_{xy} \frac{d^4 v}{dz^4} + N \left(\frac{d^2 u}{dz^2} + y_0 \frac{d^2 \Phi}{dz^2} \right) + k_x (u + (y_0 - h_y) \Phi) = 0 \quad (2-15a)$$

$$EI_x \frac{d^4 v}{dz^4} + EI_{xy} \frac{d^4 u}{dz^4} + N \left(\frac{d^2 v}{dz^2} - x_0 \frac{d^2 \Phi}{dz^2} \right) + Q_y = 0 \quad (2-15b)$$

$$EI_\omega \frac{d^4 \Phi}{dz^4} - \left(GJ - \frac{I_0}{A} N \right) \frac{d^2 \Phi}{dz^2} - P \left(x_0 \frac{d^2 v}{dz^2} - y_0 \frac{d^2 u}{dz^2} \right) + k_x [u + (y_0 - h_y) \Phi] (y_0 - h_y) - Q_y (x_0 - h_x) + k_\Phi \Phi = 0 \quad (2-15c)$$

Trong đó:

- I_0 : là mômen quán tính cực quanh tâm xoắn.

$$I_0 = I_x + I_y + (x_0^2 + y_0^2) \cdot A$$

- Q_y : là lực cắt theo phương y.

- J : mômen quán tính xoắn của tiết diện, đối với cấu kiện thành mỏng có thể tính bằng:

$$J = \frac{\sum b t^3}{3}$$

- I_ω : là hằng số vênh của tiết diện được tính theo công thức chung là:

$$I_\omega = \int \omega_0^2 t ds$$

- ω_0 : là tọa độ quạt của các điểm của tiết diện đối với cực.

Trong phương trình (2-15a) và (2-15b) hai số hạng đầu được xác định từ sự uốn cong của tiết diện quanh trục y và x. Số hạng thứ 3 thể hiện cường độ của lực ngang phát sinh dưới tác dụng của lực nén ban đầu N gây ra. Số hạng cuối thể hiện cường độ của phản lực ngang phân bố dọc theo các gối tựa đàn hồi.

Các điều kiện biên, giả sử khi hai đầu là khớp:

Tại $z = 0$ và $z = L$: $u = v = \theta = 0$

$u'' = v'' = \theta'' = 0$ (vì mômen bằng không).

Nghiệm của hệ phương trình có thể viết dưới dạng:

$$\Phi = A_1 \sin \frac{\Pi z}{\lambda}; \quad (2-16a)$$

$$u = A_2 \sin \frac{\Pi z}{\lambda}; \quad (2-16b)$$

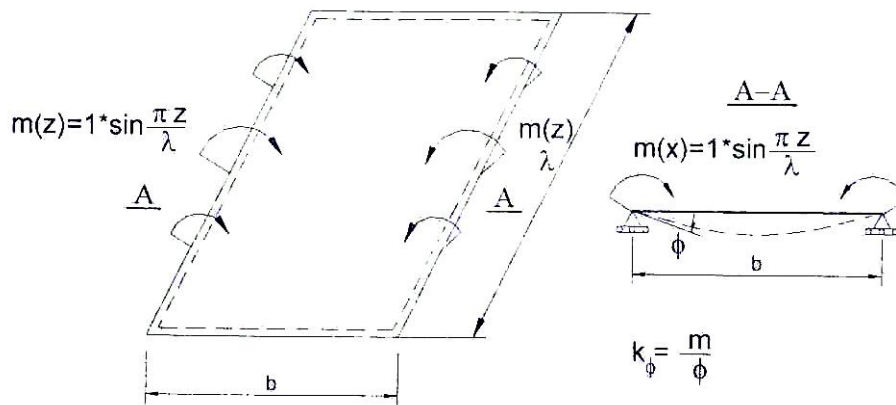
$$v = (x_0 - h_x) \sin \frac{\Pi z}{\lambda}; \quad (2-16c)$$

Thay (2-16) vào hệ phương trình (2-15) và các điều kiện biên, ta được hệ 3 phương trình tuyến tính với ẩn là A_1, A_2 . Điều kiện mất ổn định là A_1, A_2 phải khác không tức là định thức của hệ phương trình tuyến tính phải bằng 0. Khai triển định thức và cho triệt tiêu, ta được phương trình đặc trưng để tìm lực tới hạn như sau.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\Pi^2}{\lambda^2} EI_{xy}(x_0 - h_x) + \frac{\Pi^2}{\lambda^2} k_x(y_0 - h_y) - Ny_0 \right]^2 \\ & - \left(\frac{\Pi^2}{\lambda^2} EI_x + \frac{\Pi^2}{\lambda^2} k_x - N \right) \left\{ \frac{\Pi^2}{\lambda^2} [EI_\omega + EI_x(x_0 - h_x)^2] \right. \\ & \left. + GJ - \left(\frac{I_0}{A} - x_0^2 + h_x^2 \right) N + \frac{\lambda^2}{\Pi^2} [k_x(y_0 - h_y)^2 + k_\phi] \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2-17)$$

- Xác định độ cứng gối tựa đàn hồi

+ *Gối tựa đàn hồi xoay (k_Φ)*: Độ cứng gối tựa đàn hồi xoay k_Φ dọc theo biên của đối tượng tấm hình chữ nhật với ứng suất nén và mômen phân bố dọc theo các biên, ban đầu được thành lập bởi Lubdquist, Towell và Xchuette (1943) và tiếp tục phát triển nghiên cứu bởi Lau và Hancock (1986) đã đưa ra phương trình (2-18).



Hình 2-11a. Mô hình xác định k_Φ

Tấm được cho là liên kết khớp dọc theo tất cả các biên, tuy nhiên trong thực tế liên kết cánh và bụng có thể bị uốn ngang. Giá trị của k_Φ tiệm cận với hằng số $2D/b$.

$$k_\Phi = \frac{D(\alpha^2 + \beta^2)}{b} \left(\alpha \tan \frac{\alpha}{2} + \beta \tan \frac{\beta}{2} \right) - 1 \quad (2-18a)$$

Trong đó:

$$\alpha = \Pi \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \sqrt{\left(\frac{b}{\lambda} + \sqrt{K}\right)} \quad (2-18b)$$

$$\beta = \Pi \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \sqrt{\left(-\frac{b}{\lambda} + \sqrt{K}\right)} \quad (2-18c)$$

$$K = \frac{b^2 t}{\Pi^2 D} \sigma \quad (2-18d)$$

+ *Liên kết ngang (k_x)*: Qua các nghiên cứu của Hancock sử dụng phương pháp dải hữu hạn, ông thu được kết quả là giá trị chiều dài nửa bước sóng tới hạn λ_{th} khi $k_x = \infty$ và khi $k_x = 0$ giống nhau. Có nghĩa là ảnh hưởng của hệ số k_x đến chiều dài nửa bước sóng tới hạn λ_{th} là không đáng kể.

- Khi $k_x = \infty$ tức là gối đàn hồi ngăn cản hoàn toàn chuyển vị ngang của bản cánh, do đó:

$$u = -(y_0 - h_y)\Phi = -(y_0 - h_y)A_1 \sin \frac{\Pi z}{\lambda} \quad (2-19)$$

Thay (2-16a), (2-16b), (1-19) vào các phương trình cân bằng (2-15), ta xác định được tải trọng tới hạn làm mất ổn định vĩnh một phần tiết diện là:

$$N_{cr} = \left[\frac{\pi^2 EI_{wc}}{\lambda^2} + GJ + \frac{\lambda^2 k_\Phi}{\Pi^2} \right] \frac{1}{\frac{I_x + I_y}{A} + h_x^2 + h_y^2} \quad (2-20a)$$

Trong đó:

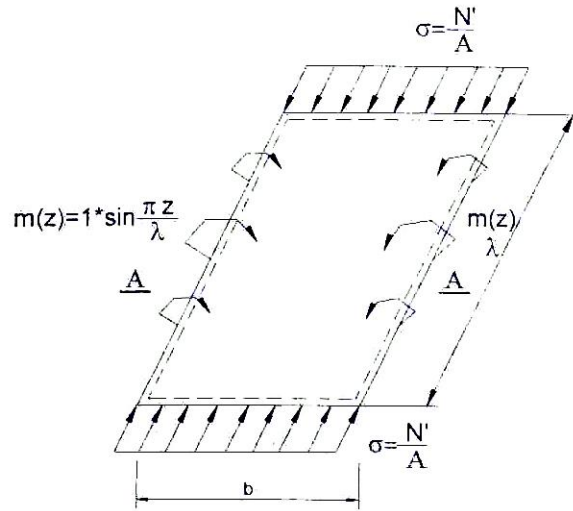
$$I_{wc} = I_\omega + I_x (x_0 - h_x)^2 + I_y (y_0 - h_y)^2 + 2I_{xy}(x_0 - h_x)(y_0 - h_y) \quad (2-20b)$$

Bằng cách tìm giá trị nhỏ nhất của N_{cr} ta xác định được λ tới hạn:

$$k_\Phi = \frac{2D}{b_w} \quad (2-21)$$

$$\lambda_{th} = \pi \left[\frac{EI_{wc}}{k_\Phi} \right]^{0,25} = \pi \left[\frac{EI_{wc} b_w}{2D} \right]^{0,25} \quad (2-22)$$

+ *Liên kết xoay (k_Φ)*: sử dụng các phương trình (2-18) để xác định k_Φ và sử dụng cho phương trình (2-17) là không thực tế vì nó đã bao gồm lực nén tác dụng. Bleich (1952) đã xác định được hệ số của liên kết xoay giữa hai tấm đặt cạnh nhau trong tiết diện chữ C, I, Z trong trường hợp mất ổn định một phần tiết diện bằng việc sử dụng phương trình (2-21) có tính đến hệ số giảm yếu để tính lực nén lên bản bụng.



Hình 2-11b. Mô hình xác định ko có kể đến ảnh hưởng của ứng suất nén trên bản bụng.

Hệ số giảm yếu được đưa ra dựa vào tỷ số giữa ứng suất nén và ứng suất gây mất ổn định. Với cách làm như vậy, k_ϕ xác định theo công thức sau:

$$k_\phi = \frac{2D}{b_w} \left(1 - \frac{N'}{f_w}\right) \quad (2-23a)$$

Trong đó f_w : ứng suất mất ổn định cục bộ của bản bụng (Timoshenko và Gere 1959) [18].

$$f_w = \frac{\Pi^2 D}{tb_w} \left(\frac{b_w}{\lambda} + \frac{\lambda}{b_w}\right)^2 \quad (2-23b)$$

$\frac{N'}{A}$: ứng suất nén xác định từ phương trình (2-17), với $k_x = 0$ và $k_\phi = 0$.

Ta thấy: $k_\phi = 0$ khi bản bụng và bản cánh mất ổn định tại cùng một ứng suất ($N'/A = f_x$), và $k_\phi = 2D/b_w$ khi ứng suất mất ổn định của bản bụng lớn hơn rất nhiều so với ứng suất của bản cánh ($N'/A \ll f_w$). Chiều dài nửa bước sóng mất ổn định λ sử dụng trong việc tính f_w và N' nhận được từ phương trình (2-22), (2-23a) và được điều chỉnh trong phương trình dưới đây:

$$k_\phi \frac{2D}{b_w + 0,06\lambda} \left(1 - \frac{N'}{f_w}\right) \quad (2-23c)$$

Với kết quả đã điều chỉnh này sẽ phù hợp với kết quả phân tích dải hữu hạn, trong đó đã tính đến sự ảnh hưởng của lực cắt và biến dạng bản cánh.

Công thức thiết kế: Lực tới hạn thiết kế được tính toán với trường hợp nguy hiểm nhất ứng với $k_x=0$. Thay thế $k_x=0$ trong phương trình (2-17) và giá trị λ và k_ϕ trong phương trình (2-22) và (2-23c), với $\nu = 0.3$, tải trọng gây mất ổn định vênh một phần tiết diện có thể xác định theo các công thức sau:

Lực tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện:

$$N_{cr} = \frac{E}{2} ((\alpha_1 + \alpha_2) \pm \sqrt{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4\alpha_3}) \quad (2-24a)$$

Trong đó:

$$\alpha_1 = \frac{\eta}{\beta_1} (\beta_2 + 0,039J\lambda^2) + \frac{k_\phi}{\beta_1\eta E} \quad (2-25b)$$

$$\alpha_2 = \eta(I_y - 2y_0 \frac{\beta_3}{\beta_1}) \quad (2-25c)$$

$$\alpha_3 = \eta(\alpha_1 I_y - \frac{\eta}{\beta_1} \beta_1^2) \quad (2-25d)$$

$$\beta_1 = h_x^2 + \frac{(I_x + I_y)}{A} \quad (2-25e)$$

$$\beta_2 = I_w + I_x(x_0 - h_x)^2 \quad (2-25f)$$

$$\beta_3 = I_{xy}(x_0 - h_x) \quad (2-25g)$$

$$\beta_4 = \beta_2 + (y_0 - h_y)(I_y(y_0 - h_y) - 2\beta_3) \quad (2-25h)$$

$$\lambda = 4,8 \left(\frac{\beta_4 \beta_w}{t^3} \right)^{0,25} \quad (2-25i)$$

$$\eta = \left(\frac{\Pi}{\lambda} \right)^2 \quad (2-25j)$$

$$k_\phi = \frac{Et^3}{5,46(b_w + 0,06\lambda)} \left(1 - \frac{1,11P'}{EA t^2} \left(\frac{b_w^2 \lambda}{b_w^2 + \lambda^2} \right)^2 \right) \quad (2-25k)$$

Với tiết diện chữ C sườn biên đơn ta có:

$$I_w = 0; y_0 = h_y = -\bar{y}; h_x = -\bar{x}; x_0 - h_x = b_f$$

Ta có:

$$N_{cr} = \frac{E}{2} ((\alpha_1 + \alpha_2) \pm \sqrt{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4\alpha_3}) \quad (2-25l)$$

Trong đó:

$$\alpha_1 = \frac{\eta}{\beta_1} (I_x b_f^2 + 0,039.J\lambda^2) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} \quad (2-25m)$$

$$\alpha_2 = \eta(I_y + 2y \frac{-b_f I_{xy}}{\beta_1}) \quad (2-25n)$$

$$\alpha_3 = \eta(\alpha_1 I_y - \frac{\eta}{\beta_1} I_{xy}^2 b_f^2) \quad (2-25o)$$

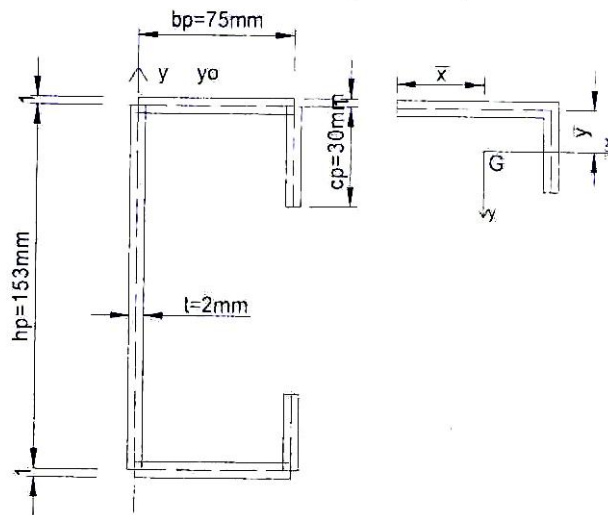
$$\beta_1 = \frac{-2}{x} + \frac{(I_x + I_y)}{A} \quad (2-25p)$$

$$\lambda = 4,8 \left(\frac{I_x \beta_f^2 \beta_w}{t^3} \right)^{0,25} \quad (2-25q)$$

2.4.4. Ví dụ tính toán:

Xác định ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện của thanh thành mỏng tiết diện chữ C có kích thước như hình vẽ theo phương pháp của Hancock và phương pháp Châu Âu. Thép có:

- Giới hạn chảy: $f_y = 360 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
- Hệ số Poisson: $\mu = 0,3$;
- Mô đun đàn hồi: $E = 2,1 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
- Mô đun đàn hồi trượt: $G = 0,81 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$



Hình 2-12. Các kích thước chính của thanh.

a. Tính toán theo phương pháp của Hancock

Các đặc trưng hình học của phần cánh (gồm bản cánh và sườn biên):

$$E = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$A = (75+30) \times 1,5 = 210\text{mm}^2$$

$$\bar{y} = \frac{30.15}{75+30} = 4,29\text{mm}; \bar{x} = \frac{75.75/2 + 30.75}{75+30} = 48,21\text{mm}$$

$$J = \sum \frac{bt^3}{3} = \frac{(75+30)2^3}{3} = 280\text{mm}^4$$

$$I_x = \frac{75 \times 2^3}{12} + \frac{2 \times 30^3}{12} + 50 \times 2 \times 4,29^2 + 30 \times 15 \times (15 - 4,29)^2 = 14192,86\text{mm}^2$$

$$I_y = \frac{75^3 \times 2}{12} + \frac{30 \times 2^3}{12} + 30 \times 2 \times (75 - 48,21)^2 + 75 \times 2 \times (48,21 - 75/2)^2 = 130600,36\text{mm}^4$$

$$I_{xy} = 75 \times 30 \times (75/2 - 48,21) \times (-4,29) + 30 \times 15 \times (75 - 48,2) = 24107,14\text{mm}^4$$

Do đó:

$$\beta_1 = \bar{x}^2 + \frac{(I_x + I_y)}{A} = 3014,108\text{mm}^2$$

$$\lambda = 4,89 \left(\frac{1410 \times 75^2 \times 153}{2^3} \right)^{0,25} = 948,83\text{mm}$$

$$\eta = \left(\frac{\Pi}{948,83} \right)^2 = 1,095 \times 10^{-5} \text{mm}^{-2}$$

Lực gây mất ổn định bản cánh N' ứng với $K_x = 0$ và $k_\phi = 0$ được xác định theo các đại lượng:

$$\alpha_1 = \frac{\eta}{\beta_1} (I_x b_f^2 + 0,039 J \lambda^2) = 0,326\text{mm}^2$$

$$\alpha_2 = \eta (I_y + 2\bar{y} \frac{b_f \cdot I_{xy}}{\beta_1}) = 1,487\text{mm}^2$$

$$\alpha_3 = \eta (\alpha_1 I_y - \frac{\eta}{\beta_1} I_{xy}^2 b_f^2) = 0,336\text{mm}^2$$

$\Rightarrow$

$$N' = \frac{2,1 \cdot 10^5}{2} \left[(0,326 + 1,487) - \sqrt{(0,326 + 1,487)^2 - 4 \cdot 0,336} \right] = 44,01 \cdot 10^3 \text{N}$$

Cuối cùng, lực gây mất ổn định vênh một phần tiết diện N_{cr} xác định theo các đại lượng sau:

$$k_\phi = \frac{Et^3}{5,46(b_w + 0,06\lambda)} \left[1 - \frac{1,11P'}{EA t^2} \left(\frac{b_w^2 \lambda}{b_w^2 + \lambda^2} \right) \right] = 1230,99 \text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{mm}$$

$$\alpha_1 = \frac{\eta}{\beta_1} (I_x b_f^2 + 0,039 J \lambda^2) + \frac{k_\Phi}{\beta_1 \eta E} = 0,326 + \frac{1230,99}{3014,108.1,095.10^{-5}.2,1.10^5} = 0,503 mm^2$$

$$\alpha_3 = \eta (\alpha_1 I_y - \frac{\eta}{\beta_1} I_{xy}^2 b_f^2) = 0,590 mm^2$$

Lực tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện là:

$$N_{cr} = \frac{2,1 \times 10^5}{2} ((0,053 + 1,487) \pm \sqrt{(0,503 + 1,487)^2 - 4 \times 0,59}) = 76,13 \times 10^3 N$$

Do đó, ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện là:

$$f_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{76,13 \times 10^3}{210} = 362,5 N / mm^2$$

b. Tính toán theo tiêu chuẩn Châu Âu

Xác định tiết diện hiệu quả của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh liền kề sườn biên):

- Bề rộng hiệu quả của bản cánh:

Ứng suất gây mất ổn định cục bộ của bản cánh xác định theo công thức (2-6):

Theo kết quả tính toán ở ví dụ 2.2.3 ta có:

$$f_{cr,w} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} = \frac{4\pi^2 2,1 \times 10^5}{12(1-0,3)^2 (75/2)^2} = 539,328 N / mm^2$$

$$f_{cr,w} = 539,328 N / mm^2 > f_y = 360 N / mm^2$$

Do đó, bề rộng hiệu quả của bản cánh: $b_e = b_p = 75 mm$

- Bề rộng hiệu quả của sườn biên:

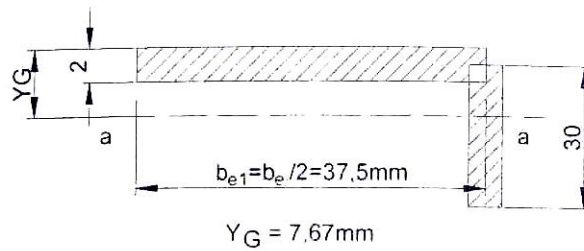
Theo kết quả tính toán ở ví dụ 2.2.3 ta có:

Ứng suất gây mất ổn định cục bộ sườn biên:

$$f_{cr,s} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} = \frac{0,43 \times \pi^2 \times 2,1 \times 10^5}{12(1-0,3^2)(30/2)^2} = 362,361 N / mm^2$$

$$f_{cr,s} = 362,361 N / mm^2 < f_y = 360 N / mm^2$$

Do đó, bề rộng hiệu quả của sườn biên: $c_e - c_p = 30 mm$



Hình 2-13- Tiết diện hiệu quả của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh liền kề sườn biên).

- A_r , I_r : là diện tích và mômen quán tính quanh trục a-a của tiết diện hiệu quả của phần biên.

$$A_r = (b_{eff} + c_{eff}) \cdot t = (37.5 + 30) \times 2 = 135 \text{ mm}^2; Z_G = 7.67 \text{ mm}$$

$$I_r^{(a)} = \frac{37.5 \cdot 2^3}{12} + 37.5 \cdot 2 \cdot (7.67 - 1)^2 + \frac{2 \cdot 30^3}{12} + 30 \cdot 2 \cdot \left(\frac{1 + 30}{2} - 7.67 \right)^2$$

$$= 11540 \text{ mm}^4$$

Sườn biên được giả thiết như dầm tựa trên nên đàn hồi liên tục, được đặc trưng bởi độ cứng của lò xo K.

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\mu^2)} \cdot \frac{1}{1.5b_p^2h_p + b_p^3} = \frac{2.1 \cdot 10^5 \cdot 2^3}{4(1-0.3^2)} \cdot \frac{1}{1.5 \cdot 75^2 \cdot 153 + 75^3} = 0.271$$

Ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện:

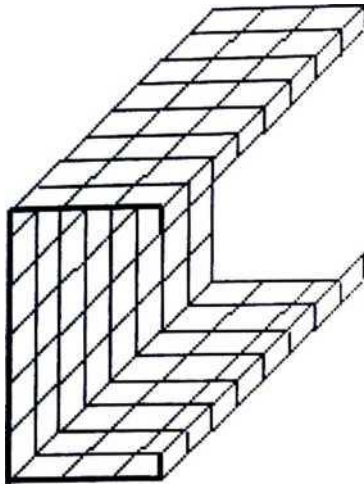
$$f_{cr} = \frac{2 \cdot \sqrt{KEI_r}}{A_r} = \frac{2 \cdot \sqrt{0.271 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 11540}}{135} = 378,580 \text{ N/mm}^2$$

Nhận xét: Qua ví dụ trên ta nhận thấy, ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện tính toán theo phương pháp của Hancock và theo phương pháp Châu Âu có sự chênh lệch nhau. Để khẳng định phương pháp nào chính xác hơn thì cần một kết quả tính toán độc lập theo phương pháp khác làm chuẩn. Luận văn xin đề xuất lấy kết quả tính toán theo phương pháp số làm chuẩn, cụ thể là phương pháp dải hữu hạn.

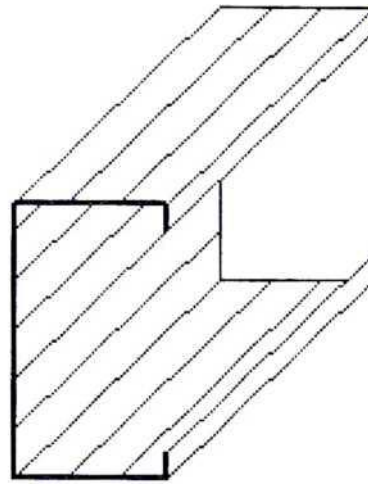
2.4.5. Phương pháp dải hữu hạn - Phần mềm CUFSM.

Phương pháp dải hữu hạn là một trường hợp đặc biệt của phương pháp số. Với phương pháp dải hữu hạn, kết cấu được chia thành, những dải (strip) mà các dải đó liên kết liên tục với nhau theo một cạnh chung, khác với phương pháp phần tử hữu hạn chỉ liên kết với nhau tại nút. Do đặc tính của phương pháp, các

kết cấu thường có dạng hình học không, thay đổi dọc theo một hoặc hai trục tọa độ để kích thước mặt cắt ngang của các dải không thay đổi từ đầu đến cuối. Vì vậy các kết thanh thành mỏng rất dễ dàng chia thành các dải để nghiên cứu. Hình vẽ sau đây sẽ minh họa cách chia phần tử theo phương pháp dải hữu hạn.



Phương pháp phần tử hữu hạn



Phương pháp dải hữu hạn

Hình 2-14. Cách chia thanh thành mỏng tiết diện chữ C theo phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp dải hữu hạn

Phương pháp này được thực hiện bằng máy tính điện tử. Luận văn xin giới thiệu phần mềm CUFSM (Elastic buckling analysis of thin-walled members using the classical finite strip method - Phân tích ổn định đàn hồi thanh thành mỏng sử dụng phương pháp dải hữu hạn). Đây là phần mềm của trường Đại học Johns Hopkins (Hoa Kỳ), do nhóm nghiên cứu của Giáo sư Ben-Schafer thực hiện thành công năm 1998. Phần mềm này đã được dùng để nghiên cứu, giảng dạy tại rất nhiều trường đại học trên thế giới.

Để chứng minh cho sự hội tụ của phương pháp dải hữu hạn, luận văn xin đưa ra các kết quả phân tích bằng phần mềm CUFSM với số cách chia dải khác nhau, đồng thời so sánh các kết quả đó với kết quả tính toán bằng công thức giải tích đã được công nhận (cụ thể là công thức của Timoshenko về ổn định của tấm mỏng và công thức của Euler về ổn định của thanh).

a. Xét tấm mỏng tựa khớp 4 cạnh có bề rộng $b = 150\text{mm}$, bề dày $t=2\text{mm}$.

- Kết quả tính toán theo công thức giải tích của Timoshenko:

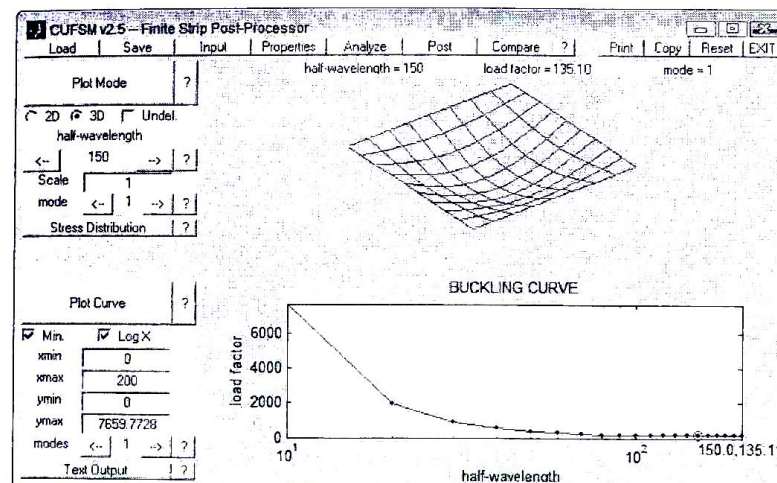
Ứng suất tới hạn gây mất ổn định tấm là:

$$f_{cr,w} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} = \frac{4 \times \pi^2 \times 2,1 \times 10^5}{12(1-0,3^2)(150/2)^2} = 134,82 \text{ N/mm}^2$$

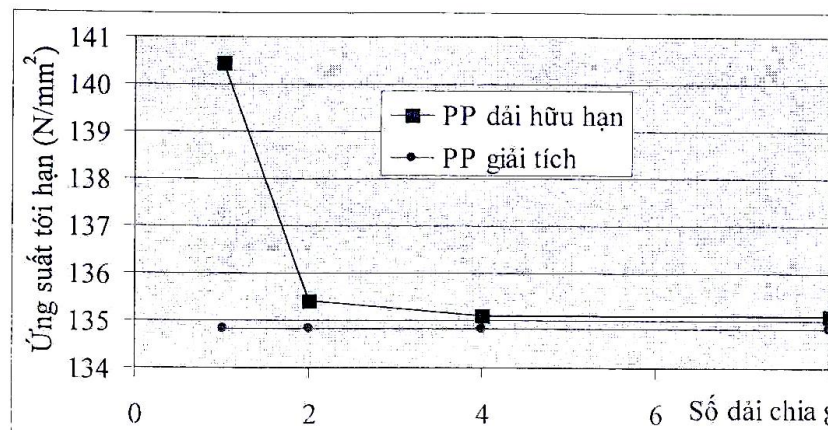
- Kết quả phân tích theo phương pháp dải hữu hạn bằng phần mềm CUFSM như sau:

TT	Số dải	Ứng suất tới hạn $f_{cr,1}$ (N/mm ²)
1	1	140,46
2	2	135,40
3	4	135,12
4	8	135,10

Bảng 2-1. Kết quả phân tích theo phần mềm CUFSM với số dải chia khác nhau



Hình 2-15. Kết quả phân tích với số dải chia là 8



Hình 2-16. Biểu đồ giá trị ứng suất tới hạn theo hai phương pháp

Nhận xét: Với các kết quả trên cho thấy, khi số dải chia là 4 thì ứng suất tới hạn bắt đầu hội tụ về giá trị ứng suất tới hạn tính theo công thức giải tích của Timoshenko.

b. Xét thanh thành mỏng có chiều dài là $l = l_x = l_y = 10\text{m}$, có kích thước tiết diện như hình vẽ.

- Kết quả tính toán theo công thức giải tích của Euler:

Tính toán đặc trưng hình học:

Diện tích tiết diện:

$$A_G = t.(h_p + 2(b_p + c_p))$$

$$= 2.(150 + 2(75 + 30)) = 720\text{mm}^2$$

Trọng tâm tiết diện:

$$X_G = 27,68/77\text{mm}$$

Các mômen quán tính:

$$I_x = 2691100\text{mm}^4$$

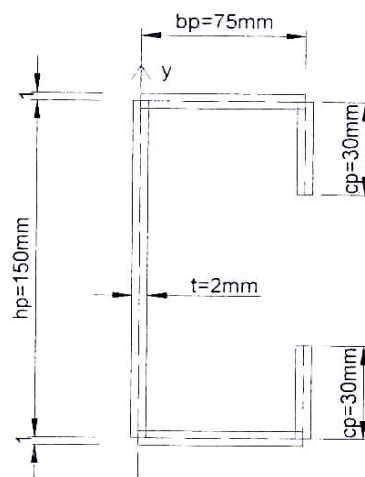
$$I_y = 668108\text{mm}^4$$

Lực tới hạn đàn hồi Euler gây mất ổn định do uốn dọc đối với trục y:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{l_y^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 668108}{10000^2} = 13833,28\text{N}$$

Ứng suất tới hạn:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr,y}}{A} = \frac{13833,28}{720} = 19,21\text{N/mm}^2$$

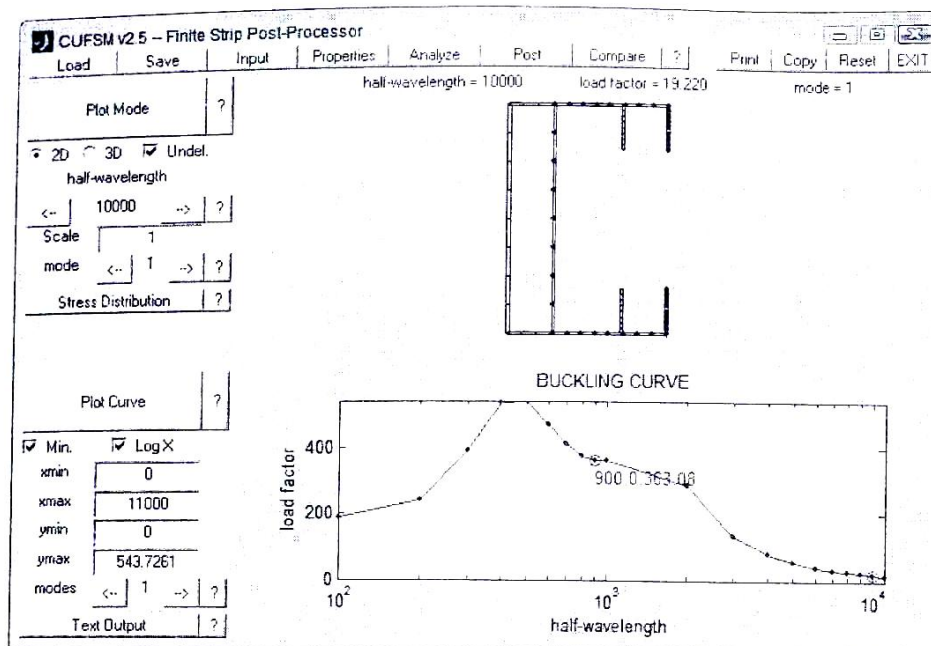


Hình 2-17. Kích thước chính của tiết diện

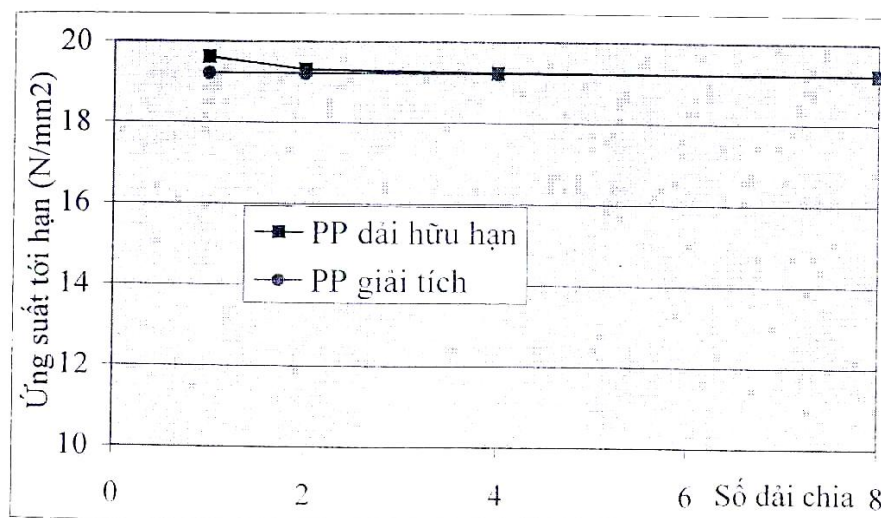
- Kết quả phân tích theo phương pháp dải hữu hạn bằng phần mềm CUFSM như sau:

TT	Số dải	Ứng suất tới hạn $f_{cr,1}$ (N/mm ²)
1	1	19,61
2	2	19,31
3	4	19,23
4	8	19,22

Bảng 2-2. Kết quả phân tích theo phần mềm CUFSM với số dải chia khác nhau



Hình 2-18. Kết quả phân tích với số dải chia là 8



Hình 2-19. Biểu đồ và giá trị ứng suất tới hạn theo hai phương pháp.

Nhận xét: Cũng giống như trường hợp trên, trong trường hợp này khi số dải chia là 4 thì ứng suất tới hạn bắt đầu hội tụ về giá trị ứng suất tới hạn tính theo công thức giải tích của Euler.

Như vậy, phương pháp giải hữu hạn (thực hiện bằng máy tính điện tử), với số cách chia giải đủ lớn (lớn hơn 4 dải) thì kết quả phân tích sẽ hội tụ về các kết quả giải tích đã được công nhận.

Sau đây là một vài so sánh ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện theo phương pháp của Hancock và theo phương pháp Châu Âu so với phương pháp chuẩn là phương pháp dải hữu hạn.

h (mm)	100	100	150	150	150	2 00	200
b (mm)	50	50	50	50	75	75	75
c (mm)	15	20	20	20	30	30	30
t (mm)	1	1	1	1.5	2	2	2,5
$f_{cr,1}$ (N/mm ²)	230,6	265,7	157,8	247,2	362,1	261,2	335,1
$f_{cr,2}$ (N/mm ²)	233,3	265,02	187,3	295,3	366,08	295,3	380,67
Sai số (%) giữa $f_{cr,1}$ và $f_{cr,2}$	1,157308	0,2566	15,75	16,289	1,0872	11,548	11,971
$f_{cr,3}$ (N/mm ²)	264,75	265,64	226,54	388,2	381,4	341,14	407,48
Sai số (%) giữa $f_{cr,1}$ và $f_{cr,3}$	14,63781	0,0226	36,7	47,748	5,2721	27,071	19,014

Bảng 2-3. Bảng so sánh ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện theo phương pháp Hancock và phương pháp Châu Âu so với phương pháp dải hữu hạn

Trong đó:

$f_{cr,1}$ (N/mm²): ứng suất tới hạn vênh một phần tiết diện tính theo phương pháp dải hữu hạn.

$f_{cr,2}$ (N/mm²): ứng suất tới hạn vênh một phần tiết diện tính theo phương pháp của Hancock.

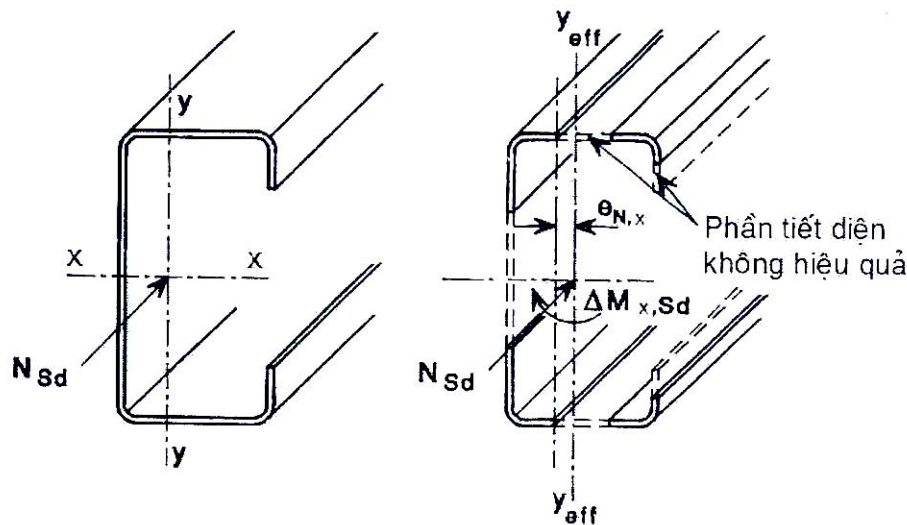
$f_{cr,3}$ (N/mm²): ứng suất tới hạn vênh một phần tiết diện tính theo phương pháp Châu Âu.

Qua các kết quả trên ta thấy rằng, nếu lấy kết quả tính toán ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện theo phương pháp dải hữu hạn làm chuẩn thì kết quả tính toán theo phương pháp Hancock chính xác hơn so với phương pháp Châu Âu.

CHƯƠNG 3: TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH CỦA THANH THÀNH MỎNG CHỮ C THEO TIÊU CHUẨN CHÂU ÂU EUROCODE 3

3.1. ĐẠI CƯƠNG:

Chương 2 đã trình bày lý thuyết tính toán các dạng mất ổn định của thanh thành mỏng. Đó là các dạng: Mất ổn định cục bộ, mất ổn định vênh một phần tiết diện và mất ổn định tổng thể. Tuy nhiên, cấu kiện thanh mỏng thực tế khi làm việc sẽ có sự tương tác giữa các dạng mất ổn định đó làm giảm khả năng chịu lực của thanh. Hiện tại, trên thế giới các tiêu chuẩn thiết kế thanh thành mỏng (tiêu chuẩn Úc, Mỹ, Châu Âu...) xét đến sự tương tác đó bằng cách sử dụng tiết diện hiệu quả (bỏ đi một phần tiết diện thanh mỏng không hiệu quả do bị mất ổn định) để thiết kế. Đối với trường hợp thanh chịu nén đúng tâm, khi tính toán lại theo tiết diện hiệu quả thanh sẽ không còn chịu nén đúng tâm nữa, do trọng tâm tiết diện hiệu quả và trọng tâm tiết diện nguyên không trùng nhau.



Hình 3-1. Tiết diện hiệu quả theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 [9]

3.1.1. Mất ổn định cục bộ, bề rộng hiệu quả

Như đã trình bày ở chương 2, đối với cấu kiện thanh mỏng việc tính toán mất ổn định cục bộ chính là tính toán bề rộng hiệu quả của tấm, và được xác định theo công thức của Von Karman đề xuất:

$$f_y = \frac{k\pi^2 D}{b_e^2} \Rightarrow \frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{f_{er}}{f_y}} \Rightarrow b_e = b \sqrt{\frac{f_{er}}{f_y}} \quad (3-1)$$

Tuy nhiên, cấu kiện thanh mỏng thực tế có nhiều khiếm khuyết về kích

thước, về chế tạo và còn ứng suất dư sau khi chế tạo. Do đó phương trình trên cần phải điều chỉnh lại để xét các yếu tố nêu trên. Tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 điều chỉnh lại công thức tính bề rộng hiệu quả dưới dạng:

$$b_e = \rho \cdot b \quad (3-2)$$

Trong đó: b là bề rộng phẳng, ρ là hệ số bề rộng hiệu quả tính bằng:

$$\text{- Nếu } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \text{ thì } \rho = 1 \text{ ([9], 5.4a)} \quad (3-3)$$

$$\text{- Nếu } \bar{\lambda}_p > 0,673 \text{ thì } \rho = \frac{(1 - 0,055(3 + \psi) / \bar{\lambda}_p)}{\bar{\lambda}_p} \text{ và } \rho < 1 \text{ ([9], 5.4b)} \quad (3-4)$$

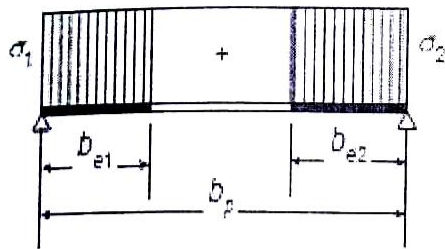
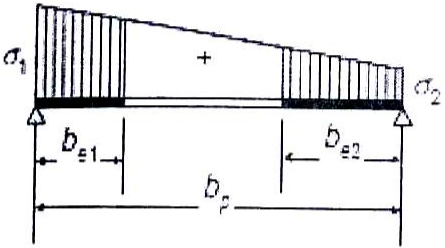
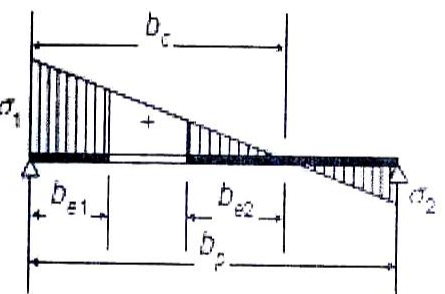
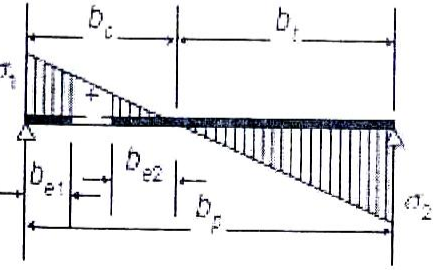
Trong đó: ψ là hệ số tỷ số ứng suất, phụ vào dạng phân bố ứng suất trên tiết diện phụ thuộc.

$\bar{\lambda}_p$ là độ mảnh của tấm được tính bằng:

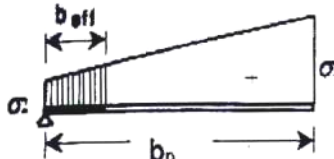
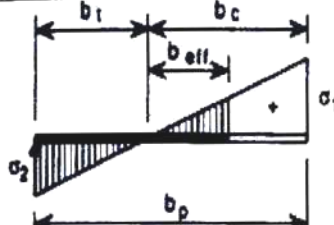
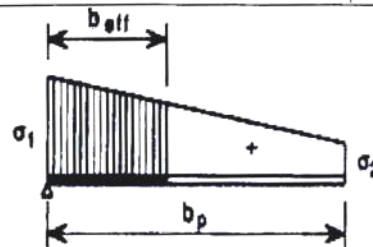
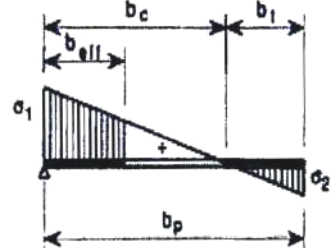
$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr}}} = \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{12(1 - \nu^2) f_y}{\pi^2 E k_\sigma}} = 1,052 \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{12(1 - \nu^2) f_y}{E k_\sigma}} = \frac{b_p / t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \text{ ([9], 5.5)} \quad (3-5)$$

ε là hệ số có được xác định theo công thức: $\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$ (trong đó: đơn vị của f_y là N/mm^2)

k_σ là hệ số oằn của tấm phụ thuộc điều kiện biên và trạng thái ứng suất của tấm, được xác định theo các bảng sau ([9], Table 5.3 và Table 5.4):

Phân bố ứng suất (Ứng suất nén là dương)				Bề rộng hiệu quả b_{eff}		
				$\psi = +1:$ $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$0 \leq \psi < +1:$ $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = \frac{2 b_{eff}}{5 - \psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$-1 \leq \psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
				$\psi < -1:$ $b_{eff} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	-1	$-1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
k_{σ}	4,0	$\frac{8,2}{1,05 + \psi}$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	13,9	$5,98(1 - \psi)^2$

Bảng 3-1 a: Xác định bề rộng hiệu quả theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3

Phân bố ứng suất (ứng suất nén là dương)		Bề rộng hiệu quả b_{eff}			
		$0 \leq \psi < -1:$ $b_{eff} = \rho b_p$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	0	-1	$-1 \geq \psi \geq -1$	
$\bar{k}_\sigma$	0.43	0.57	0.85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$0 \leq \psi < -1:$ $b_{eff} = \rho b_p$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	$+1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
$\bar{k}_\sigma$	0,43	$\frac{0,578}{\psi + 0,34}$	1.70	$1.70 - 5\psi - 17,1\psi^2$	23,8

Bảng 3-1b: Xác định bề rộng hiệu quả theo tiêu chuẩn Châu Âu Eumcode 3

3.1.2. Mất ổn định vênh một phần tiết diện.

Về cơ bản việc tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện theo tiêu chuẩn Eurocode 3 hoàn toàn giống với phương pháp tính toán theo phương pháp Châu Âu đã trình bày ở chương 2.

Cụ thể ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện là:

$$f_{cr} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} ([9], 5.15) \quad (3-6)$$

Trong đó:

- K là độ cứng của lò xo, được tính toán theo phương pháp đã trình bày ở chương 2. Tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 đưa ra công thức tính toán độ cứng lò xo K như sau:

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\mu^2)} \cdot \frac{1}{1,5b_1^2h_w + b_1^3} ([9], 5.10b) \quad (3-7)$$

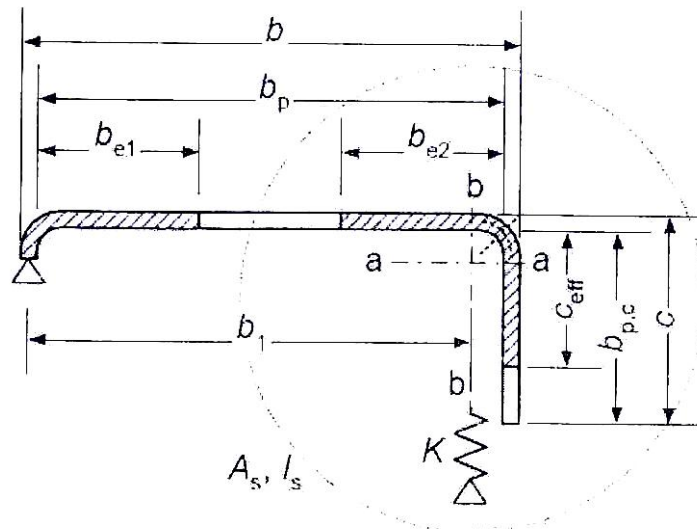
Trong đó:

+ b_1 : là khoảng cách từ bản bụng tới tâm góc uốn của sườn biên.

+ h_w : là bề rộng bản bụng.

+ t : là bề dày thanh thành mỏng.

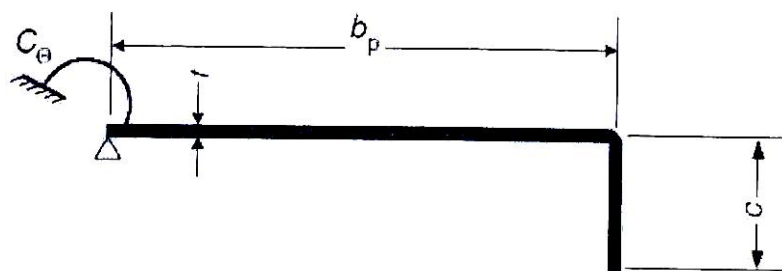
- A_s , I_s : là diện tích và mômen quán tính quanh trục a-a của tiết diện hiệu quả của phần biên thể hiện ở hình vẽ trên.



Hình 3-2. Đặc trưng hình học của tiết diện hiệu quả của phần biên

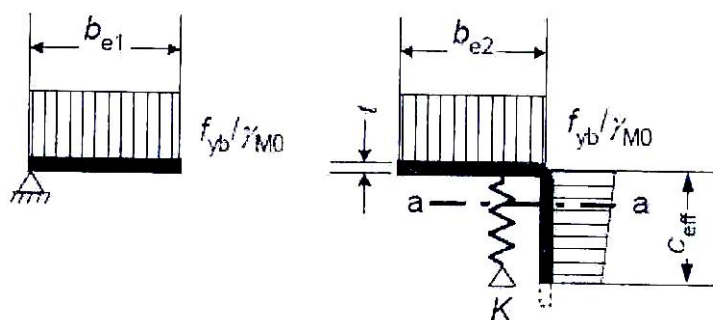
Việc tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện và mất ổn định cục bộ (tính toán tiết diện hiệu quả) theo Tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 được thực hiện qua quá trình lặp (trong quá trình tính toán, tiêu chuẩn Châu Âu đưa vào một số hệ số an toàn), gồm các bước cơ bản như sau ([9], 5.5.3.2.2)

Bước 1: Giả thiết sơ đồ tính của tiết diện phần cánh (gồm bản cánh và sườn biên) như hình vẽ:



Hình 3-3a. Sơ đồ tính của phần cánh

Bước 2: Xác định tiết diện hiệu quả của phần cánh ứng với ứng suất tới hạn $f_{com} = f_y / \gamma_{M0}$ và giả thiết sườn biên được liên kết cứng $K = \infty$ (ở đây: γ_{M0} là hệ số an toàn khi tính mất ổn định cục bộ và mất ổn định vênh một phần tiết diện)



Hình 3-3b. Tiết diện hiệu quả của phần cánh

Bề rộng hiệu quả của bản cánh b_{e1} , b_{e2} được xác định theo các công thức trong phần 3.1.1.

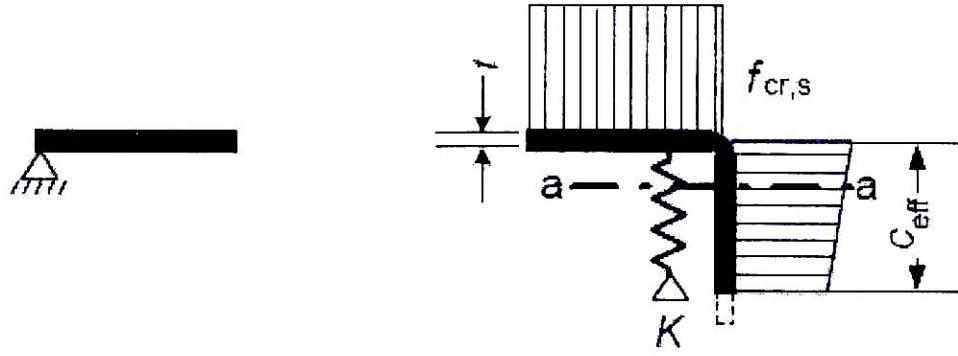
Bề rộng hiệu quả của sườn biên c_{eff} được xác định theo công thức (3-2), trong đó, hệ số oằn của sườn biên (k_0) phụ thuộc vào tỷ số giữa bề rộng của sườn biên (c_p) và bề rộng của bản cánh (b_p) ([9], 5.13b; [9], 5.13c).

Cụ thể:

- Nếu $c_p / b_p \leq 0,35$ thì: $k_0 = 0.5$ (3-8a)

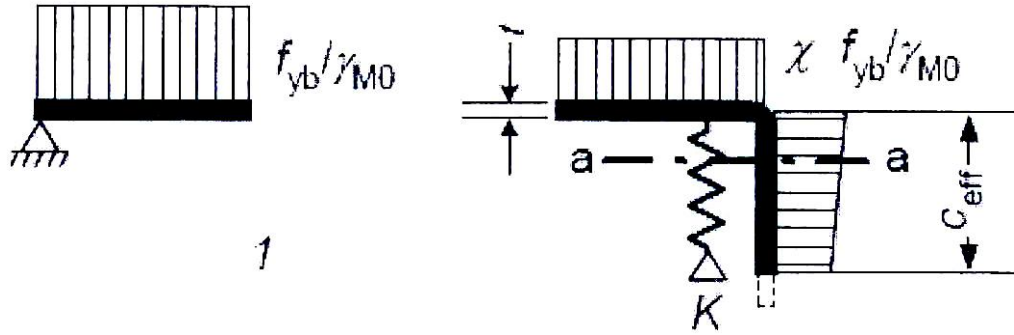
- Nếu $0,35 < c_p / b_p \leq 0,6$ thì: $k_0 = 0.5 + 0.83 \sqrt{(c_p / b_p - 0.35)^2}$ (3-8b)

Bước 3: Dựa trên tiết diện hiệu quả xác định ở bước 2, tính toán độ cứng lò xo K và ứng suất tới hạn $f_{cr,s}$ gây mất ổn định vênh một phần tiết diện (xác định theo các công thức (3-6) và (3-7)).



Hình 3-3c. Mô hình xác định độ cứng lò xo và ứng suất tới hạn $f_{cr,s}$

Bước 4: Xác định ứng suất tới hạn quy đổi $f_{c,r} = \chi \cdot f_y / \gamma_{M0}$ dựa vào hệ số giảm yếu χ do mất ổn định vênh một phần tiết diện.



Hình 3-3d. Biểu đồ ứng suất tới hạn quy đổi (1).

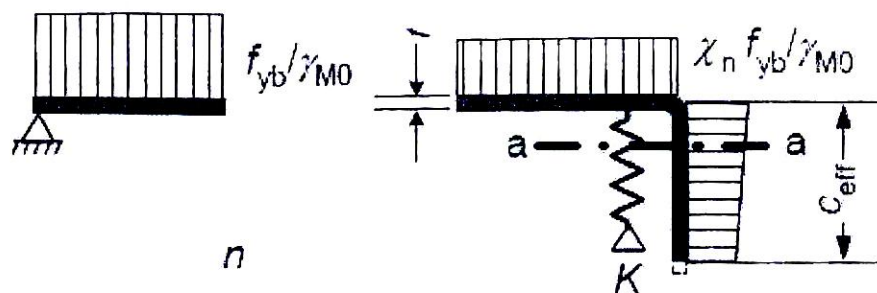
Hệ số giảm yếu χ do mất ổn định vênh một phần tiết diện phụ thuộc vào độ mảnh của sườn biên $\bar{\lambda}_r$. Cụ thể:

$$\text{Nếu } \bar{\lambda}_r \leq 0,65 \text{ thì: } \chi = 1,00 \quad (3-9a)$$

$$\text{Nếu } 0,65 \leq \bar{\lambda}_r \leq 1,38 \text{ thì: } \chi = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_r \quad (3-9b)$$

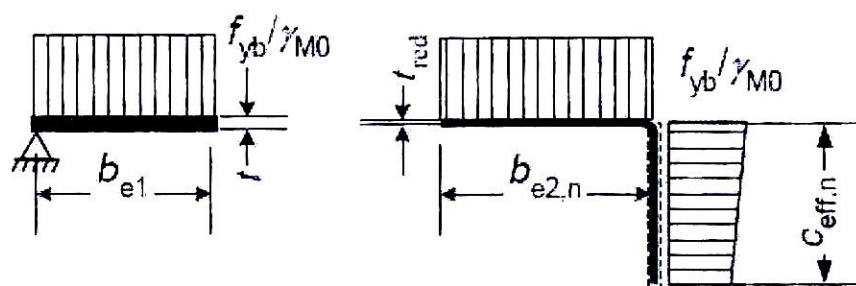
$$\text{Nếu } 1,38 \leq \bar{\lambda}_r \text{ thì: } \chi = 0,66 / \bar{\lambda}_r \quad (3-9c)$$

Bước 5 (vòng lặp): Sử dụng $f_{c,r}$ đã xác định ở bước 4, thực hiện lại các bước 2, 3, 4 ở trên (trong đó thay f_{com} ở bước 2 bằng giá trị $f_{c,r}$ bước 4) cho đến khi $\chi_n \approx \chi_{n-1}$ nhưng $\chi_n < \chi_{n-1}$



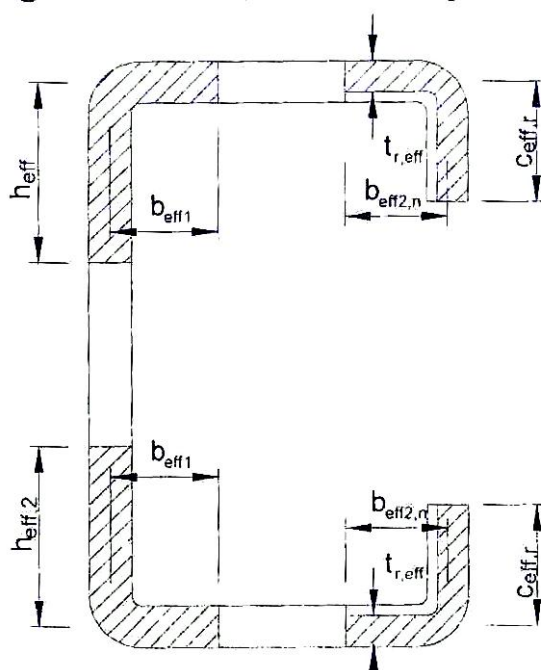
Hình 3-3e. Biểu đồ ứng suất tới hạn quy đổi (vòng lặp thứ n)

Bước 6: Tính toán lại tiết diện hiệu quả với các bề rộng hiệu quả đã xác định ở vòng lặp thứ n ($b_{eff,n}$; $c_{eff,n}$) và bề dày hiệu quả: $t_{eff} = \chi^{(n)}.t$



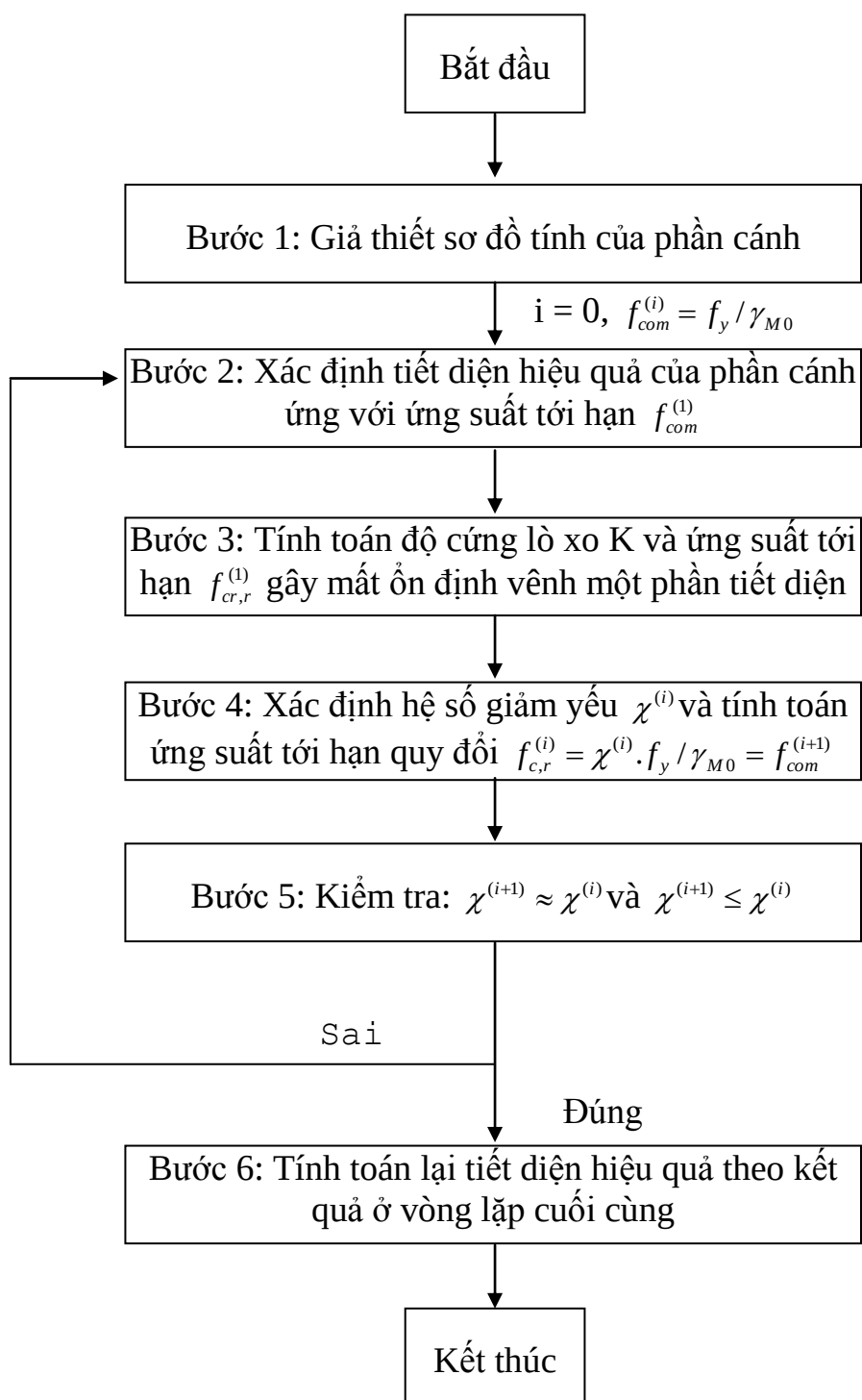
Hình 3-3f. Tiết diện hiệu quả của phần cánh xác định ở vòng lặp cuối.

Như vậy, ở đây ta thấy rằng bề dày hiệu quả đã được xét đến, đó chính là do kể đến ảnh hưởng của mất ổn định vênh một phần tiết diện.



Hình 3-3g. Tiết diện hiệu quả của thanh

Quá trình tính toán trên được thể hiện qua sơ đồ khối sau:



Hình 3-4. Sơ đồ khối tính toán mất ổn định vênh một phần tiết diện

3.3.1 Mất ổn định tổng thể.

Theo tiêu chuẩn Eurode 3, tính toán cấu kiện thanh thành mỏng chịu nén về oằn xoắn và oằn uốn theo các công thức sau [9]:

Lực nén thiết kế:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot N_{c,Rd} \cdot \gamma_{M0}}{\gamma_{M1}} \quad ([9], 6.29) \quad (3.10)$$

Trong đó:

γ_{M1} : Hệ số an toàn (do mất ổn định tổng thể)

γ_{M0} : Hệ số (do mất ổn định cục bộ và mất ổn định vĩnh một phần tiết diện.

$N_{c,Rd}$: Là khả năng chịu lực nén danh nghĩa của cấu kiện, được tính bằng công thức:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot F_y}{\gamma_{M0}} \quad ([9], 6.2) \quad (3.11)$$

A_{eff} : Diện tích tiết diện hiệu quả xác định qua quá trình lặp

χ : Hệ số giảm yếu do mất ổn định được tính theo công thức:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \text{ và } \chi < 1 \quad ([9], 6.30) \quad (3.12)$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \chi < 1 \quad ([9], 6.31) \quad (3 - 13)$$

α : hệ số không hoàn thiện (kể đến độ cong ban đầu của thanh, ứng suất dư) phụ thuộc hình dáng tiết diện. Với tiết diện chữ C thì $\alpha = 0,34$.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad ([9], 6.31a) \quad (3 - 14)$$

N_{cr} : là lực tới hạn đàn hồi được tính với trường hợp do uốn dọc trục (N_{cr}^F) và với trường hợp do xoắn, uốn xoắn (N_{cr}^{FT})

Lực tới hạn đàn hồi do uốn dọc trục:

$$(N_{cr}^{FT}) = \frac{\pi^2 EI_y}{l_{cy}^2} \quad (3 - 15)$$

Lực tới hạn đàn hồi do xoắn và uốn xoắn: $(N_{cr}^{FT}) = \min (N_{cr}^T), (N_{cr})$

Trong đó; (N_{cr}^T) , (N_{cr}^{F+T}) được tính toán theo công thức lý thuyết chương 2 về ổn định tổng thể:

$$(N_{cr}^T) = \left[\frac{\pi^2 EI_w}{l_T^2} + GJ_x \right] \frac{1}{l_0^2} ([9], 6.33a) \quad (3 - 16)$$

$$N_{cr}^{F-T} = \frac{N_{cr,x}}{2\beta} \left[\left(1 + \frac{N_{cr,\tau}}{N_{cp,x}} \right) - \sqrt{(N_{cp,x} + N_{cr,\tau})^2 - 4\beta N_{cr,\tau} N_{cr,x}} \right] \quad ([9], 6.35) \quad (3 - 17)$$

$$\text{Với } \beta = 1 - \left(\frac{x_0}{i_0} \right)^2 \quad (3 - 18)$$

3.2 VÍ DỤ TÍNH TOÁN.

Tính toán ứng suất tới hạn gây mất ổn định vĩnh một phần tiết diện, tiết diện hiệu quả và lực nén thiết kế theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 của thanh thành mỏng tiết diện chữ C chịu nén đúng tâm có kích thước tiết diện như hình vẽ Chiều dài thanh: L= 2279 mm

Thép có:

Giới hạn chảy: $f_y = 360 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

Mô đun đàn hồi: $E = 2,1 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

Mô đun đàn hồi trượt: $G = 0,81 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

Lời giải:

1. Xác định các đặc trưng hình học của tiết diện:

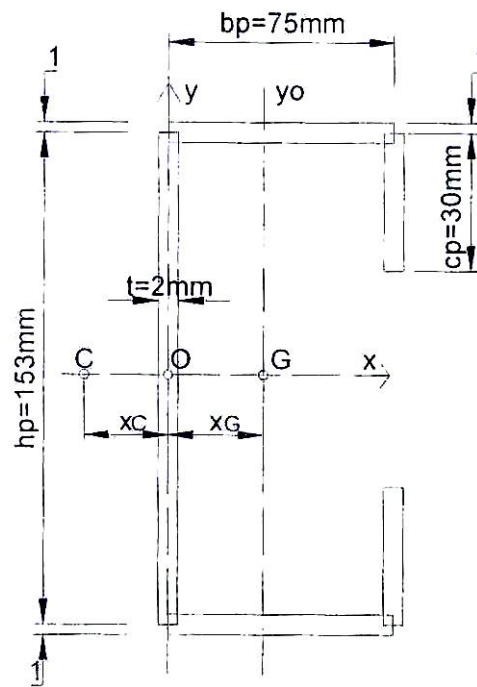
Ta có

$$r < 5.r \quad (r = 2\text{mm}, 5.t = 10\text{mm})$$

$$r < 0,1 b_p \quad (r = 2\text{mm}, 0,1b_p = 7,5\text{mm})$$

Do đó theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 có thể bỏ qua ảnh hưởng của góc uốn ([9], 5.1.4).

Như vậy, có thể giả thiết cấu kiện được tạo thành từ các tấm bẻ góc nhọn với nhau ($r = 0$) và bề rộng tấm được tính là khoảng cách của các điểm giữa của góc.



Diện tích tiết diện:

$$A_G = t \cdot (h_p + 2(b_p + c_p)) = 2 \cdot (153 + 2(75 + 30)) = 726 \text{ mm}^2$$

Trọng tâm tiết diện: $x_G = 27,68 \text{ mm}^2$

Tọa độ tâm xoắn: $X_C = 41,3 \text{ mm}^2$

Các mômen quán tính:

$$I_x = 2722448 \text{ mm}^4; I_y = 648808 \text{ mm}^4; I_T = 950 \text{ mm}^4$$

Hằng số vênh của tiết diện:

$$I_w = \frac{b_p^2 \cdot t}{6} (4c_p^3 + 6h_p c_p^2 + 36h_p^2 c_p + h_p^2 b_p) = 4,0963 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

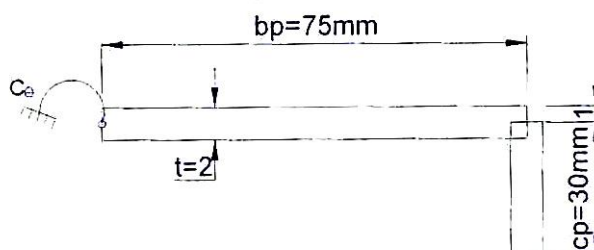
Bán kính quán tính:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = \sqrt{\frac{2722448}{726}} = 61,24 \text{ mm}; i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = \sqrt{\frac{648808}{726}} = 29,89 \text{ mm}$$

2. Xác định tiết diện hiệu quả và ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện.

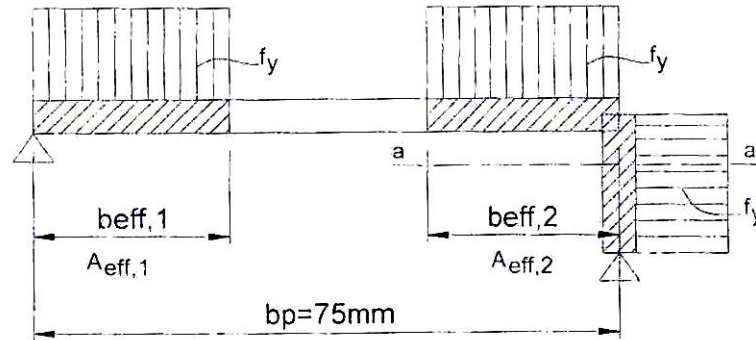
a) Tiết diện hiệu quả của bản cánh, sườn biên và ứng suất tới hạn gây mất ổn định vênh một phần tiết diện bằng phương pháp lặp như đã trình bày ở trên.

Bước 1: Giả thiết sơ đồ tính của phần cánh như sau:



Bước 2: Xác định tiết diện hiệu quả của phần cánh ứng với ứng suất tới hạn

hạn $f_{com} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = f_y$ với giả thiết sườn biên được liên kết cứng $K = \infty$



- Bề rộng hiệu quả của bản cánh:

Hệ số độ mảnh của tấm tại ứng suất f_y

$$\bar{\lambda}_p = 1.052 \cdot \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E \cdot k_\infty}} = 1.052 \cdot \frac{75}{2} \cdot \sqrt{\frac{360}{2.1 \cdot 10^5 \cdot 4}} = 0.817 \quad ([9], 5.5)$$

Ta có:

$$\bar{\lambda} = 0.817 > 0.673 \text{ do đó } ([9]) 5.4b)$$

$$= \frac{(1 - 0.055(3 + \psi) / \bar{\lambda}_p)}{\bar{\lambda}_p} = 0.894$$

Bề rộng hiệu quả của bản cánh: $b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0.894 \times 75 = 67mm$

$$\Rightarrow b_{eff,1} = b_{eff,2} = b_{eff} / 2 = 67 / 2 = 33.5mm$$

Bề rộng hiệu quả của sườn biên:

Hệ số oằn của sườn biên được xác định theo [9]; 5.13

$$\text{Ta có: } \frac{c_p}{b_p} = \frac{30}{75} = 0.4$$

$$\Rightarrow 0.35 < \frac{c_p}{b_p} < 0.6$$

$$k_0 = 0.5 + 0.833 \sqrt{\left(\frac{c_p}{b_p} - 0.35 \right)^2} = 0.5 + 0.833 \sqrt{(0.4 - 0.35)^2} = 0.613$$

Do đó, hệ số độ mảnh của sườn biên:

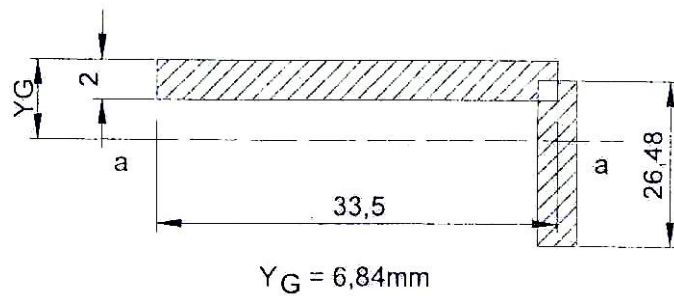
$$\bar{\lambda}_p = 1.052 \cdot \frac{c_p}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E \cdot k_0}} = 0.834 > 0.673 \quad ([9], 5.5)$$

$$\Rightarrow = \left(1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}_p} \right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0.22}{0.834} \right) \cdot \frac{1}{0.834} = 0.883 \quad ([9], 5.4b)$$

Bề rộng hiệu quả của sườn biên:

$$c_{eff} = \rho \cdot c_p = 0.883 \times 30 = 26.48mm$$

Tiết diện hiệu quả của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh liền kề sườn biên) thể hiện ở hình vẽ.



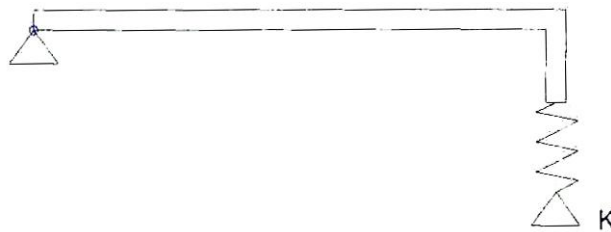
- A_r, I_r : là diện tích và mômen quán tính quanh trục a - a của tiết diện hiệu quả của phần biên.

$$A_r(b_{eff} + c_{eff})t = (33,5 + 26,48).2 = 120\text{mm}^2$$

$$Y_G = 6,84\text{mm}$$

$$I_r^{(a)} = \frac{33,5.2^3}{12} + 33,5.2.(6,84 - 1)^2 + \frac{2.26,48^3}{12} + 26,48.2\left(\frac{1 + 26,48}{2} - 6,84\right)^2 = 8302\text{mm}^4$$

Bước 3: Dựa trên tiết diện hiệu quả xác định ở bước 2, tính toán độ cứng lò xo K và ứng suất tới hạn $f_{cr,r}$ gây mất ổn định vĩnh một phần tiết diện.



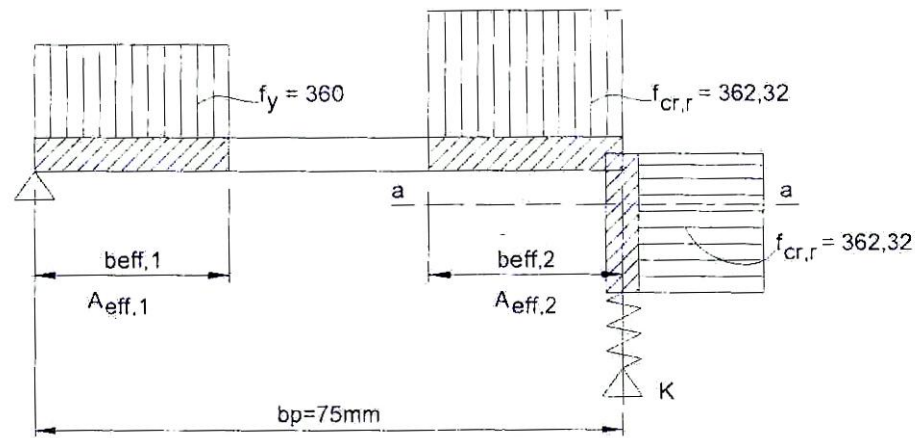
Sườn biên được giả thiết như dầm tựa trên nền đàn hồi liên tục, được đặc trưng bởi độ cứng của lò xo K

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\mu^2)} \cdot \frac{1}{1,5b_p^2h_p + b_p^3} = \frac{2,1.10^5.2^3}{4(1-0,3^2)} \cdot \frac{1}{1,5.75^2.153 + 75^3} = 0,271$$

Ứng suất tới hạn của phần biên gây mất ổn định vĩnh một phần tiết diện;

$$f_{cr,r} = \frac{2\sqrt{KEI_r}}{A_r} = \frac{2\sqrt{0,271.2.1.10^5.8302}}{120} = 362,32 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Biểu đồ ứng suất thể hiện trên hình vẽ sau:



Bước 4: Xác định ứng suất tới hạn quy đổi

$f_{c,r} = \chi \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$ dựa vào hệ số giảm yếu γ do mất ổn định vênh một phần tiết diện.

Độ mảnh của sườn biên:

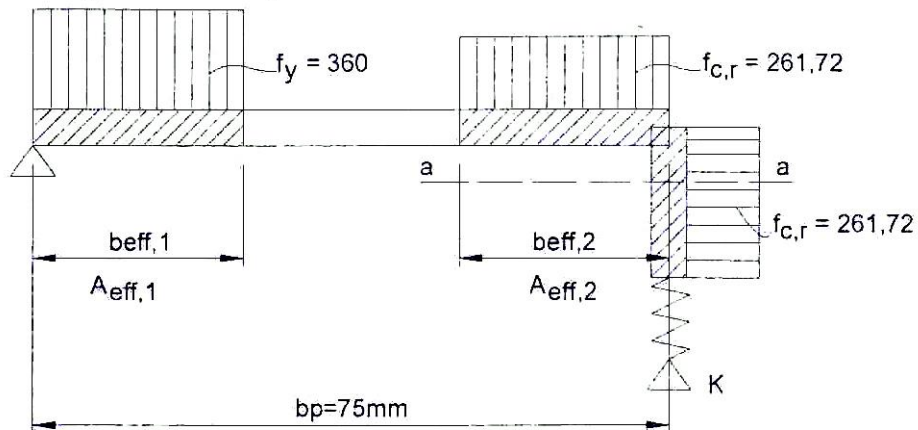
$$\bar{\lambda}_r = \sqrt{\frac{f_y}{f_{c,r}}} = \sqrt{\frac{360}{362,32}} = 0,997 \quad ([9], 5.5)$$

$$0,65 < \bar{\lambda} - 0,997 < 1,38 \text{ do đó: } \chi = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda} = 0,727 \quad ([9], 5.12b)$$

Ứng suất tới hạn quy đổi

$$f_{c,r} = \chi \cdot f_y = 0,727 \cdot 360 = 261,72 \frac{N}{mm^2}$$

Biểu đồ ứng suất thể hiện trên hình vẽ sau:

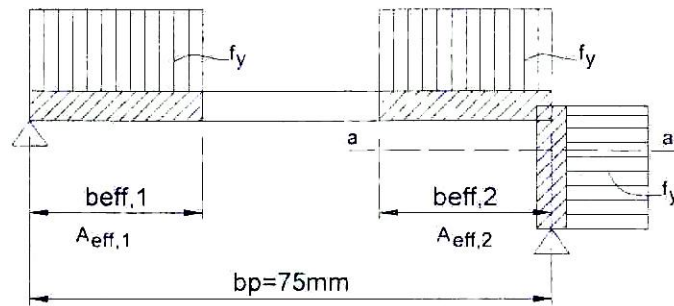


Bước 5: Lặp lại các bước trên cho đến khi $\chi_n \approx \chi_1$ nhưng $\chi_n < \chi_{n-1}$

Vòng lặp 1:

Xác định tiết diện hiệu quả của phần cánh ứng với ứng suất tới hạn

$$f_{com} = f_{c,r} = 261,72 \frac{N}{mm^2}$$



Bề rộng hiệu quả của bản cánh:

Hệ số độ mảnh của tấm tại ứng suất: $f_{com} = f_{c,r} = 261,72 \text{ N/mm}^2$ là:

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_{com}}{Ek_0}} = 1,052 \cdot \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_{c,r}}{Ek_c}} \quad ([9], 5.5)$$

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{75}{2} \sqrt{\frac{261,72}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 4}} = 0,696 > 0,73$$

$$p = \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0,22}{0,696}\right) \cdot \frac{1}{0,696} = 0,983 \quad ([9], 5.4b)$$

Bề rộng hiệu quả của bản cánh: $b_{eff,1} = p \cdot b_p = 0,983 \cdot 75 = 73,71 \text{ mm}$

$$\Rightarrow b_{eff,1} = \frac{73,71}{2} = 36,86 \text{ mm}$$

- Bề rộng hiệu quả của sườn biên:

Hệ số oằn của sườn biên $k_0 = 0,613$ được xác định trong bước 2

Do đó, hệ số độ mảnh của sườn biên:

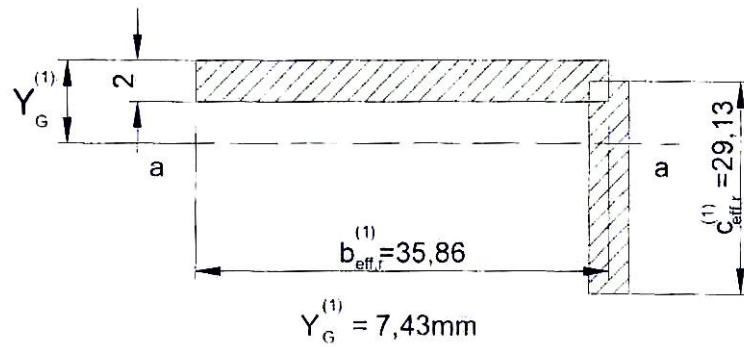
$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{c_p}{t} \sqrt{\frac{f_{com}}{Ek_\sigma}} = 1,052 \cdot \frac{c_p}{t} \sqrt{\frac{f_{c,r}}{Ek_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{30}{2} \sqrt{\frac{261,72}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,613}} = 0,712 > 0,673 \quad ([9], 5.5)$$

$$\Rightarrow p = \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0,22}{0,712}\right) \cdot \frac{1}{0,712} = 0,971 \quad ([9], 5.4b)$$

Bề rộng hiệu quả của sườn biên: $c_{eff}^{(1)} = p \cdot c_p = 0,971 \cdot 30 = 29,13 \text{ mm}$

Tiết diện hiệu quả của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh liền kề sườn biên) thể hiện ở hình vẽ sau:



- $A_r^{(1)}, I_r^{(1)}$: là diện tích và mômen quán tính quanh trục a - a của tiết diện hiệu quả của phần biên.

$$A_r^{(1)} = (b_{eff}^{(1)} + c_{eff}^{(1)})t = (35,86 + 29,13).2 = 132mm^2; Y_G^{(1)} = 7,43mm$$

$$I_r^{(1)} = \frac{36.86.2^3}{12} + 36.86.2.(7.43 - 1)^2 + \frac{2.29.13^3}{12} + 29.13.2.\left(1 + \frac{29.13}{2} - 7.43\right)^2 =$$

$$11048mm^4$$

- Ứng suất tối hạn $f_{cr,r}^{(1)}$ của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh liền kề sườn biên) gây mất ổn định vênh một phần tiết diện, dựa vào hệ số độ cứng lò xo K đã xác định ở bước 3.

$$f_{cr,r}^{(1)} = \frac{\sqrt[3]{KEI_r^{(1)}}}{A_r^{(1)}} = \frac{\sqrt[3]{0.271.21.10^5.11048}}{132} = 379.92N/mm^2$$

- Xác định ứng suất tối hạn quy đổi $f_{c,r}^{(1)} = \chi^{(1)} \cdot f_y / \gamma_{M0}$ dựa vào hệ số giảm yếu $\chi^{(1)}$ do mất ổn định vênh một phần tiết diện.

Độ mảnh của sườn biên:

$$\bar{\lambda}_r = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,r}^{(1)}}} = \sqrt{\frac{360}{379.92}} = 0.973 \quad ([9]. 5,5)$$

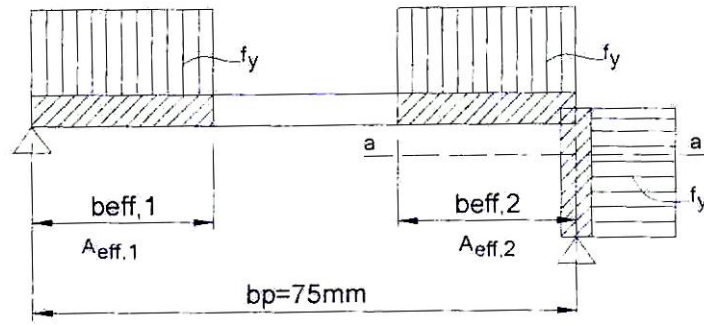
Ta có: $0,65 < \bar{\lambda}_r = 0,973 < 1,38$ do đó

$$\chi^{(1)} = 1,47 - 0,723.\bar{\lambda}_r = 0,744 < 1 \quad ([9]. 5.12b)$$

$$\text{Ứng suất tối hạn quy đổi: } f_{e,r}^{(1)} = \chi^{(1)} \cdot f_y = 0.744.360 = 268.01 \frac{N}{mm^2}$$

Vòng lặp 2: Xác định tiết diện hiệu quả của phần cánh ứng với ứng suất

$$\text{tối hạn } f_{com} = f_{c,y}^{(1)} = 268,01 \frac{N}{mm^2}$$



- Bề rộng hiệu quả của bản cánh:

Hệ số độ mảnh của tấm tại ứng suất $f_{com} = f_{(c,y)}^{(1)} = 268,01 \frac{N}{mm^2}$

$$\bar{\lambda}_p = 1.052 \cdot \frac{b_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{com}}{E k_\sigma}} = 1.052 \cdot \frac{b_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,r}}{E k_\sigma}} = 1.052 \cdot \frac{75}{2} \cdot \sqrt{\frac{268,01}{2.1 \cdot 10^5 \cdot 4}} = 0,705 > 0,673$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}_p}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0.22}{0.705}\right) \cdot \frac{1}{0.705} = 0.976 \quad ([9], 5.4b)$$

Bề rộng hiệu quả của bản cánh:

$$b_{effb_p}^{(2)} = 0.976 \cdot 75 = 73.18mm$$

$$\Rightarrow b_{eff,x} = \frac{b_{eff}}{2} = \frac{73.18}{2} = 36.59mm$$

- Bề rộng hiệu quả của sườn biên

Hệ số oằn của sườn biên $k_\sigma = 0.613$ được xác định trong bước 2

Do đó, hệ số độ mảnh của sườn biên.

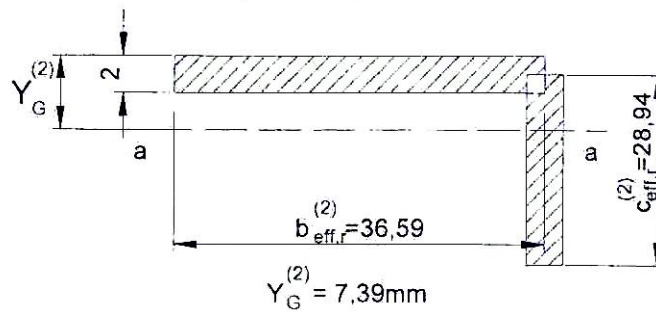
$$\bar{\lambda}_p = 1.052 \cdot \frac{C_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{com}}{E k_\sigma}} = 1.052 \cdot \frac{C_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,r}^{(1)}}{E k_\sigma}} \quad ([9], 5.5)$$

$$\bar{\lambda}_p = 1.052 \cdot \frac{30}{2} \cdot \sqrt{\frac{268,01}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,613}} = 0,720 > 0,673$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}_p}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0.22}{0.720}\right) \cdot \frac{1}{0.720} = 0.965 \quad ([9], 5.4b)$$

Bề rộng hiệu quả của sườn biên: $c_{eff}^{(2)} = \rho \cdot c_p = 0,965 \cdot 30 = 28,94mm$

Tiết diện hiệu quả của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh liền kề sườn biên) thể hiện hình vẽ sau:



- $A_r^{(2)}, I_r^{(2)}$: là diện tích mômen quán tính quanh trục a-a của tiết diện hiệu quả của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh liền kề sườn biên).

$$A_r^{(2)} = (b_{eff}^{(2)} + c_{eff}^{(2)}) \cdot t = (36,59 + 28,94) \cdot 2 = 131,06 \text{ mm}^2; Z_G^{(1)} = 7,39 \text{ mm}$$

$$I_r^{(2)} = \frac{36,59 \cdot 2^3}{12} + 36,59 \cdot 2 \cdot (7,39 - 1)^2 + \frac{2 \cdot 28,94^3}{12} + 28,94 \cdot 2 \cdot \left(1 + \frac{28,94}{2} - 7,39\right)^2 = 10831 \text{ mm}^4$$

- Ứng suất tới hạn $f_{cr,r}^{(2)}$ của phần biên (gồm tiết diện hiệu quả của sườn biên và phần bản cánh liền kề sườn biên) gây mất ổn định vênh một phần tiết diện, dựa vào hệ số độ cứng lò xo K đã xác định ở bước 3.

$$f_{cr,r}^{(2)} = \frac{2\sqrt{K \cdot E \cdot I_r^{(2)}}}{A_r^{(2)}} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,271 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 10813}}{131,06} = 378,87 \text{ N/mm}^2$$

- Xác định ứng suất tới hạn quy đổi $f_{c,r}^{(2)} = \chi^{(2)} \cdot f_y / \gamma_{M0}$ dựa vào hệ số giảm yếu $\chi^{(2)}$ do mất ổn định vênh một phần tiết diện.

Độ mảnh của sườn biên:

$$\bar{\lambda}_r = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,r}^{(2)}}} = \sqrt{\frac{360}{378,87}} = 0,975 \quad ([9], 5.5)$$

Ta có: $0,65 < \bar{\lambda}_r = 0,973 < 1,38$ do đó:

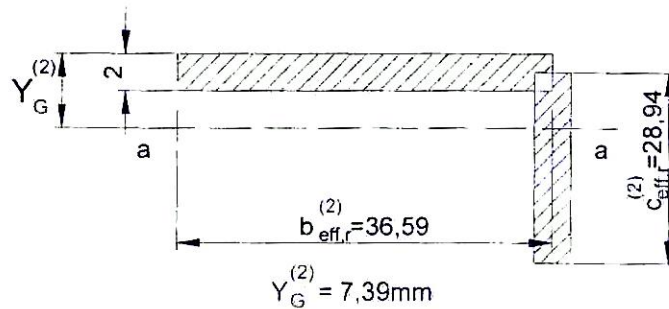
$$\chi^{(2)} = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_r = 0,743 < 1 \quad ([9], 5.12b)$$

Ứng suất tới hạn quy đổi: $f_{c,r}^{(2)} = \chi^{(2)} \cdot f_y = 0,743 \cdot 360 = 267,48 \text{ N/mm}^2$

Nhận xét: $\chi^{(2)} < \chi^{(1)}$ và $\chi^{(2)} \approx \chi^{(1)}$ do đó, quá trình lặp có thể dừng lại ở đây

Bước 6: Tính toán lại tiết diện hiệu quả với các bề rộng hiệu quả đã xác định ở vòng lặp thứ 2 (b_{eff} ; $c_{eff,2}$) và bề dày hiệu quả:

$$t_{eff} = \chi^{(2)} \cdot t = 0,743 \cdot 2 = 1,486 \text{ mm}$$



b. Bề rộng hiệu quả của bản bụng

Bản bụng của thanh thành mỏng tiết diện chữ C là bản được tăng cứng, là bản được tựa khớp 4 cạnh, chịu nén đúng tâm. Do đó, Hệ số oằn của bản bụng $k_\sigma = 4$.

Do đó, hệ số độ mảnh của bản bụng:

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{h_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com}}{Ek_\sigma}} = 1,052 \cdot \frac{h_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{Ek_\sigma}} \quad ([9], 5.5)$$

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{153}{2} \cdot \sqrt{\frac{360}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 4}} = 1,666 > 0,673$$

$$\Rightarrow \rho = \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0,22}{1,666}\right) \cdot \frac{1}{1,666} = 0,521 \quad ([9], 5.4b)$$

$$h_{eff} = \rho \cdot h_p = 0,521 \cdot 153 = 79,71 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow h_{eff,1} = \frac{h_{eff}}{2} = \frac{79,71}{2} = 39,86 \text{ mm}$$

Diện tích tiết diện hiệu quả của thanh:

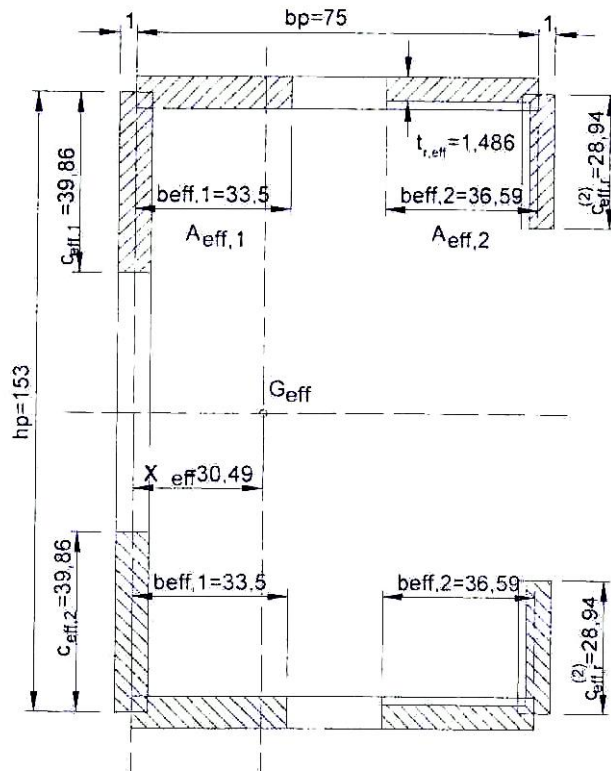
$$A_{eff} = t \cdot h_{eff} + 2 \cdot t_{eff} (b_{eff,1} + b_{eff}^{(2)} + c_{eff}^{(2)}) = 488,2 \text{ mm}^2$$

Trọng tâm tiết diện hiệu quả: $x_G^{eff} = 30,49 \text{ mm}$

Độ lệch tâm của tiết diện hiệu quả:

$$E_G^{eff} = X_G^{eff} - X_G = 30,49 - 27,86 = 2,81 \text{ mm}$$

Do độ lệch tâm là rất nhỏ nên trong tính toán ta có thể bỏ qua và do đó, tiết diện hiệu quả chỉ chịu nén đúng tâm.



3. Xác định lực nén thiết kế theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3

- Lực nén thiết kế được xác định theo công thức:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot N_{c,Rd} \cdot \chi_{M0}}{\gamma_{M1}} \quad ([9], 6.29)$$

Trong đó:

- γ_{M1} : Hệ số an toàn (do mất ổn định tổng thể).

- γ_{M0} : Hệ số an toàn (do mất ổn định cục bộ và mất ổn định vênh một phần tiết diện).

- $N_{c,Rd}$: Là khả năng chịu lực nén danh nghĩa của cấu kiện, được tính bằng

công thức:
$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad ([9], 6.2)$$

- Do đó, Lực nén thiết kế:
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

a. Lực nén thiết kế đối với trường hợp mất ổn định do uốn dọc dưới tác dụng của nén đúng tâm:

$$N_{b,Rd}^F = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

- $\gamma_{M1} = 1,0$: Hệ số an toàn (do mất ổn định tổng thể).

- $A_{\text{eff}} = 488,2 \text{ mm}^2$: Diện tích tiết diện hiệu quả của thanh.

- χ : Hệ số giảm yếu do mất ổn định tổng thể, được tính theo công thức:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

Trong đó: - $\bar{\lambda}$ là độ mảnh tỉ đối: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} \cdot f_y}{N_{\text{cr}}}} = \frac{L_{\text{cr}}}{i} \sqrt{\frac{A_{\text{eff}}}{A_G}}$

- $L_{\text{cr}} = 2279 \text{ mm}$: Chiều dài uốn dọc của thanh đối với trường hợp mất ổn định do uốn dọc;

- i : bán kính quán tính nhỏ nhất

$$i = \min(i_x; i_y) = \min\left(\sqrt{\frac{I_x}{A_G}}; \sqrt{\frac{I_y}{A_G}}\right) = \min\left(\sqrt{\frac{2722448}{729}}; \sqrt{\frac{648808}{726}}\right)$$

$$= \min(61,24; 29,89) = 29,89 \text{ mm};$$

$$\lambda_1 = \Pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 75,88;$$

$$\Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{2279}{29,89} \sqrt{\frac{488,2}{726}} = 0,824;$$

- α : Hệ số không hoàn thiện (kể đến độ cong ban đầu của thanh, ứng suất dư), phụ thuộc hình dáng tiết diện. Với tiết diện chữ C thì $\alpha = 0,34$. Do đó, ta có: $\Phi = 0,5 [1 + 0,34(0,824 - 0,2) + 0,824^2] = 0,964$

- Thay vào: Hệ số giảm yếu do mất ổn định tổng thể:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,964^2 - 0,824^2} = 0,709 < 1$$

- Lực nén thiết kế đối với trường hợp mất ổn định do uốn dọc dưới tác

dụng của nén đúng tâm: $N_{b,Rd}^F = \frac{\chi \cdot A_{\text{eff}} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$

$$N_{b,Rd}^F = \frac{\chi \cdot A_{\text{eff}} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,709 \cdot 488,2 \cdot 360}{1,0} = 124608 \text{ N}$$

b. Lực nén thiết kế đối với trường hợp mất ổn định do xoắn và uốn – xoắn dưới tác dụng của nén đúng tâm:

$$N_{b,Rd}^{FT} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

- Tính toán độ mảnh tỉ đối: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}^{FT}}}$

$N_{cr}^{FT} = \min(N_{cr}^T; N_{cr}^{F+T})$: Lực tới hạn đàn hồi với trường hợp mất ổn định do xoắn (N_{cr}^T) và uốn - xoắn (N_{cr}^{F+T})

$$N_{cr}^T = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_T + \frac{\Pi^2 E I_w}{l_T^2} \right) \quad ([9], 6.33a);$$

Trong đó:

- Mô đun đàn hồi trượt: $G = 0,81 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$;

- Mômen quán tính xoắn: $I_T = 950 \text{ mm}^4$

- Hằng số vênh của tiết diện:

$$I_w = \frac{b_p^2 \cdot t}{6} (4c_p^3 + 6h_p c_p^2 + 36h_p^2 c_p + h_p^2 b_p) = 4,0963 \cdot 10^9 \text{ mm}^6;$$

- $l_T = 0,5L = 0,5 \cdot 2279 = 1139,5 \text{ mm}$: Chiều dài uốn dọc với trường hợp mất ổn định do xoắn và uốn - xoắn.

- i_0 : bán kính quán tính cực của tiết diện đối với tâm uốn

$$i_0^2 = i_x^2 + i_y^2 + x_0^2 = i_x^2 + i_y^2 + (x_C + x_G)^2$$

$$= 61,24^2 + 29,89^2 + (41,3 + 27,68)^2 = 9402 \text{ mm}^2$$

Thay vào:

$$N_{cr}^T = \frac{1}{9402} \left(0,81 \cdot 10^5 \cdot 950 + \frac{\Pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 4,09 \cdot 10^9}{1139,5^2} \right) = 694832,59 \text{ N}$$

Lực tới hạn đàn hồi với trường hợp mất ổn định do uốn - xoắn (N_{cr}^{F+T})

$$N_{cr}^{F+T} = \frac{N_{cr,x}}{2\beta} \left[\left(1 + \frac{N_{cr}^T}{N_{cr,x}} \right) - \sqrt{(N_{cr,x} + N_{cr}^T)^2 - 4\beta N_{cr,x} N_{cr}^T} \right] \quad ([9], 6.35)$$

Trong đó:

- $N_{cr,x}$ là lực tới hạn đàn hồi với trường hợp mất ổn định do uốn dọc đối

với trục x: $N_{cr,x} = \frac{\Pi^2 \cdot EI_x}{l_x^2} = \frac{\Pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 2722448}{2279^2} = 1085299,32 N$

$$\beta = 1 - \frac{x_0^2}{i_0^2} = 1 - \frac{(x_C + x_G)^2}{i_0^2} = 1 - \frac{(43,1 + 27,68)^2}{9402} = 0,494$$

Thay vào:

$$N_{cr}^{F+T} = \frac{1}{2\beta} \left[(N_{cr,x} + N_{cr}^T - \sqrt{(N_{cr,x} + N_{cr}^T)^2 - 4\beta N_{cr,x} N_{cr}^T}) \right] = \frac{1}{2 \cdot 0,494} [694832,59 + 1085299,32 - \sqrt{(1085299,32 + 694832,59)^2 - 4 \cdot 0,494 \cdot 1085299,32 \cdot 694832,59}] = 494602,02 N$$

Ta có: $N_{cr}^{FT} = \min(N_{cr}^T; N_{cr}^{F+T}) = 494602,02 N$

Độ mảnh tĩnh đối: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}^{FT}}} = \sqrt{\frac{488,2 \cdot 360}{494602,02}} = 0,596$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,34(0,596 - 0,2) + 0,596^2 \right] = 0,729 \quad ([9], 6.31)$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,729 + \sqrt{0,729^2 - 0,596^2}} = 0,870 < 1$$

Thay vào, lực nén thiết kế đối với trường hợp mất ổn định do xoắn và uốn - xoắn dưới tác dụng của nén đúng tâm:

$$N_{b,Rd}^{FT} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,870 \cdot 488,2 \cdot 360}{1,0} = 152904,24 N$$

Kết luận: Lực nén thiết kế là:

$$N_{b,Rd} = \min(N_{b,Rd}^F, N_{b,Rd}^{FT}) = 124608 N = 124,608 kN$$

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Với mục tiêu đề ra, luận văn đã tìm hiểu một số lý thuyết tính toán ổn định thanh thành mỏng trong đó đi sâu tìm hiểu ổn định vênh một phần tiết diện, đồng thời luận văn đã nghiên cứu cách tính toán ổn định thanh thành mỏng theo Tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3. Từ các kết quả đã thu được, có thể đưa ra một số kết luận như sau:

1.1. Đối với cấu kiện thanh mỏng chịu nén, điều quan trọng là phải tính toán kiểm tra ổn định. Trong đó, các dạng ổn định cần kiểm tra bao gồm:

- *Mất ổn định cục bộ*: Về bản chất chính là mất ổn định của tấm mỏng chịu nén. Do đó, lý thuyết tính toán mất ổn định cục bộ dựa chủ yếu vào lý thuyết tấm.

- *Mất ổn định tổng thể*: Về bản chất chính là mất ổn định của thanh chịu nén. Đối với thanh thành mỏng chịu nén thì có thể bị mất ổn định tổng thể theo 3 dạng: mất ổn định do uốn dọc, mất ổn định do xoắn và mất ổn định do uốn - xoắn.

- *Mất ổn định vênh một phần tiết diện*: Đây là vấn đề tương đối mới ở Việt Nam. Có thể nói, mất ổn định vênh một phần tiết diện chính là sự kết hợp giữa mất ổn định cục bộ và mất ổn định tổng thể. Cụ thể đối với thanh thành mỏng tiết diện chữ C, khi bị mất ổn định vênh một phần tiết diện thì bản bụng sẽ có xu hướng mất ổn định cục bộ còn phân cánh (gồm bản cánh và sườn biên) sẽ bị mất ổn định tổng thể.

1.2. Với hiện tượng mất ổn định vênh một phần tiết diện, là một vấn đề tương đối mới ở Việt Nam, luận văn đã đi sâu tìm hiểu 2 phương pháp thông dụng đã được đưa vào tiêu chuẩn: Phương pháp của Hancock (tiêu chuẩn Úc AS/NZS 4600:1996) và phương pháp Châu Âu (tiêu chuẩn châu Âu Eurocode 3). Đồng thời, luận văn đã đưa ra những phép so sánh nhất định về kết quả tính toán của hai phương pháp trên so với kết quả phân tích theo phương pháp giải hữu hạn (sử dụng phần mềm CUFSM).

1.3. Cấu kiện thanh mỏng, thực tế khi làm việc sẽ có sự tương tác giữa ba

dạng mất ổn định nói trên làm giảm khả năng chịu lực của thanh. Tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 3 xét đến sự tương tác đó bằng cách sử dụng tiết diện hiệu quả (bỏ đi một phần tiết diện thành mỏng không hiệu quả) để thiết kế. Luận văn đã tìm hiểu được quy trình tính toán tiết diện hiệu quả và ứng suất tới hạn gây mất ổn định vĩnh một phần tiết diện thông qua quá trình lặp theo tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode3.

1.4. Luận văn là tài liệu tham khảo thiết kế kết cấu thanh thành mỏng, là tài liệu tham khảo phục vụ cho các nghiên cứu sâu hơn về kết cấu thanh thành mỏng chịu nén đúng tâm của tiết diện chữ C.

2. Kiến nghị

2.1. Kết quả tính toán mất ổn định vĩnh một phần tiết diện theo hai phương pháp của Hancock và phương pháp Châu Âu có sự sai lệch nhau đáng kể. Để khẳng định kết quả phương pháp nào là chính xác hơn cần nhiều nghiên cứu sâu hơn về vấn đề này. Luận văn xin kiến nghị dùng phương pháp số, cụ thể là phương pháp dải hữu hạn để kiểm nghiệm sự chính xác của mỗi phương pháp.

2.2. Hướng phát triển tiếp của đề tài:

- Nghiên cứu ổn định thanh thành mỏng với các trường hợp chịu lực khác (như chịu nén lệch tâm, chịu uốn...) và tiết diện khác (đi sâu nghiên cứu mất ổn định vĩnh một phần tiết diện đối với các trường hợp đó).

- Nghiên cứu liên kết cấu kiện thành mỏng.

Tài liệu tham khảo:

- [1] *American Iron and Steel Institute. Specifications for the Design of Cold - formed Steel structural Members. 1996.*
- [2] *American Iron and Steel Institute. Distortional Buckling of Cold-Fonned Steel Columns. 2006*
- [3] *Australian/New Zealand Standard. Cold-formed Steel structure.. AS/NZS 4600: 1996.*
- [4] *B.w. Schaíer, Tẻ Peko''z. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stress. Journal of Construcional Steel Research 47. 1998*
- [5] *B.W.Schafer, T. Peko'z. Laterally braced cold-formed Steel ilexural members with edge stiffenedylanges. Journal of structural . 1999.*
- [6] *B.W.Schafer, T. Peko'z. Local and distortional buckling of cold-fonned Steel members with edge stiffened fianges. 1999*
- [7] *Đoàn Định Kiến. Thiết kế kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội. NXB Xây dựng. 2005.*
- [8] *European Standard. Eurocode 3: Design of Steel slructures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2002.*
- [9] *European Standard. Euroeode 3: Design of Steel structures - Part 1-3: General rules Supplementary rules for cold-fonned thin gauge members and sheeting. 2003.*
- [10] *European Standard. Eurocode 3: Design of Steel structures - Part 1-5. Plated structural elements. 2003*
- [11] *Hancock, Greeory. Design of cold-formed Steel structnres (to Australian/New Zealand Standard AS/NZS:4600). Australian institute of Steel Construction. 1998.*
- [12] *Helsinki university of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 15. Seminar on Steel Structnres: design of cold-formed Steel structures. 2000.*

[13] Helsinki university of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 19. *Local and distortional buckling of perforated Steel wall studs*. 2000.

[14] R. L. Brockenbrough, Pittsburgh. *Cold-formed Steel' design*. Pennsylvania. USA.

[15] Sammy C.W.Lau. Gregory J. Hancock, Distortional Buckling formulas for channel Columns. 1987.

[16] Universidade técnica de lisboa, Unstituto superior técnico. *Imensionamento de elementosestruturais de aCo enformados a frio de acordocomo eurocódí 3*. 2008.

[17] Vũ Đình Lai (Chủ biên). *Sức bền vật liệu*. NXB Giao thông vận tải. 2007.

[18] Xtiphen P.Timôsenkoo. Jem M. Gere. *Ổn định, đàn hồi*. NXB Khoa học và Kỹ thuật. 1976.

[19] Lều Thọ Trình (Chủ biên). *Ổn định công trình*. NXB Khoa học và kỹ thuật. 2006.

[20] Bui, H.C. Analyse statique du comportement des structures à parois minces par la méthode des élément finis et des bandes finies de type plaque et coque surbaissée déformables en cisaillement. *Thèse de doctorat, université de Liège*, 2008.

[21] Huỳnh Minh Sơn. Checking Torsional Buckling and Flexural-Torsional Buckling of Cold-Formed Section Column up to Standard AS/NZS 4600(Austrslia).

[22] Phạm Văn Hội, Nguyễn Quang Viên, Phạm Văn Tư, Đoàn Ngọc Tranh, Hoàng Văn Quang: *Kết cấu thép 2- Công trình dân dụng và công nghiệp-nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật- 2003*.

[23] Hancock, Gregory, *Design of cold-formed Steel structures* (to Australian/New Zealand Standard AS/NZS:4600), Australian Institute of Steel Construction 1998.

[24] Huỳnh Minh Sơn, *Tính toán dầm thép cánh rộng HFB theo tiêu chuẩn thiết kế của Úc*, Tạp chí Khoa học Công nghệ ĐHQĐN số 2/6-2004.