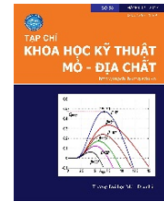




Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn/>



Phân tích kết cấu tấm, vỏ thép có xét đến ảnh hưởng phi tuyến của vật liệu

Nguyễn Văn Mạnh^{1,*}, Ngô Xuân Hùng¹

¹ Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:
 Nhận bài 26/09/2016
 Chấp nhận 19/01/2016
 Đăng online 28/02/2017

Từ khóa:

Kết cấu thép
 Tuyến tính
 Phi tuyến
 Đàn hồi
 Dẻo

TÓM TẮT

Khi kết cấu chịu lực, đầu tiên sẽ xuất hiện biến dạng đàn hồi, sau khi vượt quá giới hạn đàn hồi kết cấu sẽ chuyển sang giai đoạn biến dạng dẻo. Bài báo trình bày phương pháp tính toán kết cấu thép theo trạng thái giới hạn dẻo. Kết quả tính toán ví dụ cho bài toán tấm thép chịu tải trọng phân bố đều cho thấy: cận dưới của trạng thái giới hạn theo điều kiện dẻo có thể được xác định theo giá trị giá trị nội lực xuất hiện trên tấm. Khi tăng tải tác dụng thì đến một thời điểm sẽ xuất hiện biến dạng dẻo đầu tiên ở mép trên và mép dưới tại một hoặc một số điểm của tấm, tiếp tục tăng tải thì biến dạng dẻo tiếp tục phát triển vào phía trong của tiết diện và cho đến khi vật liệu bị chảy dẻo hoàn toàn. Khi đó tải trọng tương ứng sẽ là cận dưới của trạng thái giới hạn - hay chính là tải trọng tối đa mà vật liệu có thể chịu được khi tính toán theo điều kiện chảy dẻo.

© 2017 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Hiện nay ở nước ta việc thiết kế kết cấu công trình nói chung và kết cấu thép nói riêng thường dựa trên phương pháp phân tích đàn hồi tuyến tính. Đây là phương pháp đơn giản dựa trên quan hệ ứng suất - chuyển vị là quan hệ tuyến tính. Tuy nhiên, đối với vật liệu thép là loại vật liệu có khả năng cho biến dạng dẻo lớn nên khi thiết kế theo phương pháp đàn hồi tuyến tính sẽ không khai thác hết khả năng làm việc của vật liệu. Khi kết cấu chịu lực, đầu tiên sẽ xuất hiện biến dạng đàn hồi tuyến tính, sau khi vượt quá giới hạn đàn hồi kết cấu sẽ chuyển sang giai đoạn biến dạng dẻo phi

tuyến. Vì vậy, cần tiến hành tính toán kết cấu thép theo phương pháp dẻo phi tuyến để tận dụng hết khả năng làm việc của vật liệu.

Nhiều tác giả trong và ngoài nước đã đề cập đến vấn đề tính toán phi tuyến cho các loại vật liệu khác nhau. (Lê Đình Quốc và nnk, 2014) đã tiến hành phân tích ổn định của hệ dàn không gian chuyển vị lớn có xét đến tính chất phi tuyến hình học dựa trên công thức Lagrange nhưng các thanh dàn được giả thiết là dàn hồi tuyến tính. (Lê Việt Dũng, 2015) đã nghiên cứu tác động của tải trọng lặp đến khả năng chịu cắt của cột bê tông cốt thép theo TCVN 9386-2012 có xét đến mô hình làm việc phi tuyến của vật liệu. (Vũ Công Hoàng và Nguyễn Tương Lai, 2015) đã nghiên cứu tương tác động lực học của tấm dầm có kể đến ảnh hưởng của biến dạng màng trên nền phi tuyến bằng phương

*Tác giả liên hệ

E-mail: nguyenvanmanh@humg.edu.vn

pháp phần tử hữu hạn. (Lê Khả Hòa, 2014) đã tiến hành phân tích ổn định phi tuyến tính cho kết cấu vỏ. (Ngô Hữu Cường và nnk, 2012) tiến hành phân tích cấu kiện ống thép nhồi bê tông có kể đến tác động phi tuyến hình học và vật liệu. Tính chất phi tuyến được thiết lập bằng việc áp dụng nguyên lý thế năng toàn phần. (Lê Lương Bảo Nghi và Bùi Công Thành, 2009) trình bày phương pháp phân tích phi tuyến dầm liên hợp thép - bê tông có xét đến ứng xử phi tuyến của vật liệu và liên kết chống cắt. (Lê Đình Quốc và nnk, 2015) đã tiến hành phân tích chuyển vị lớn của kết cấu dàn không gian ngoài miền đàn hồi sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình dàn được xây dựng có xét đến tính chất phi tuyến hình học. (Ngô Hữu Cường, 2013) trình bày một phần tử lai (phần tử dầm-cột) phi tuyến để mô phỏng khung thép phẳng chịu tải trọng tĩnh. (Phạm Văn Đạt, 2013) trình bày phương pháp phân tích phi tuyến hình học dàn phẳng dựa trên nguyên lý cực trị Gauss. (Đình Lê Khánh Quốc và Nguyễn Văn Yên, 2012) đã tiến hành phân tích ứng xử phi tuyến của khung phẳng bê tông cốt thép có tường xây chèn.

(Garcilazo, 2015) đã phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ đến kết cấu khung phẳng theo mô hình phi tuyến hình học và phi tuyến vật liệu. Tác giả đã chỉ ra rằng khi tính toán mô phỏng ứng xử phi tuyến của vật liệu, có thể dự báo chính xác ứng xử của khung phẳng đàn hồi ngay cả khi xảy ra biến dạng lớn.

(Coarita và Flores, 2015) đã đề xuất một thuật toán để mô phỏng sự tương tác giữa dây cáp và kết cấu giàn (chiều cao 80m), trong đó chủ yếu tập trung nghiên cứu ứng xử phi tuyến hình học của dây cáp dưới tác dụng của tải trọng tĩnh. (Moita và nnk, 2015) đã phân tích phi tuyến hình học cho kết cấu dạng tấm, vỏ nhiều lớp bằng thực nghiệm và lý thuyết. Kết quả cho thấy có sự trùng hợp giữa lý thuyết và thực nghiệm. (Nogueira và nnk, 2013) đã phân tích ứng xử phi tuyến hình học và phi tuyến vật liệu của kết cấu dầm bê tông cốt thép có chú ý đến ảnh hưởng của độ bền cốt dưới tác dụng của tải trọng tĩnh. Ứng xử phi tuyến của cốt thép và bê tông được mô phỏng tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Ứng xử phi tuyến hình học cũng được chú ý đến trong nghiên cứu này. Kết quả cho thấy sự phù hợp của mô hình được xây dựng với kết quả thực nghiệm.

Qua các kết quả nghiên cứu của các tác giả ở trên cho thấy, vấn đề tính toán phi tuyến cho vật

liệu và rất phức tạp và có nhiều cách tiếp cận bài toán khác nhau. Bài báo trình bày phương pháp tính toán cận dưới trạng thái giới hạn theo điều kiện phi tuyến cho kết cấu tấm, vỏ thép.

2. Cách xác định cận dưới của trạng thái giới hạn cho bài toán tấm, vỏ thép

Giả sử trong một hệ kết cấu chịu tác động của các ngoại lực Q_1, Q_2, \dots, Q_n , tương ứng với các ngoại lực này sẽ gây ra biến dạng q_1, q_2, \dots, q_n . Hệ kết cấu đang xét ở trạng thái cân bằng giới hạn khi hệ cùng đồng thời thỏa mãn điều kiện cân bằng và điều kiện dẻo (Lê Ngọc Thạch, 2015):

Điều kiện cân bằng:

$$\Phi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = 0 \quad (1)$$

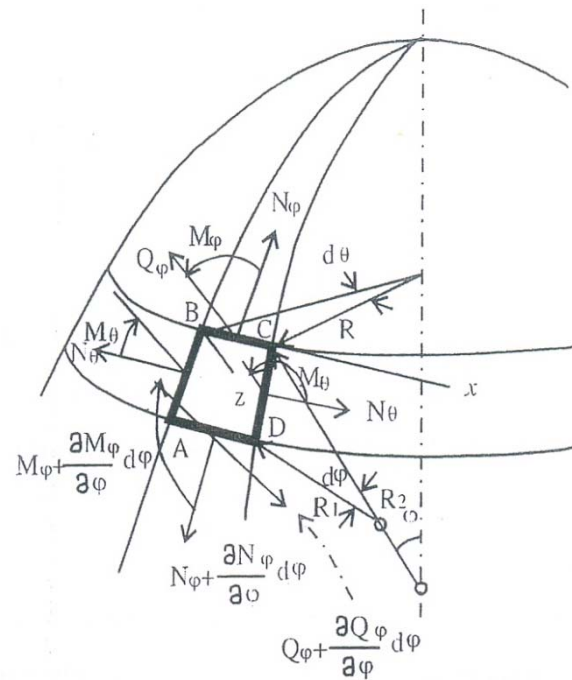
Điều kiện dẻo:

$$f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = C \quad (2)$$

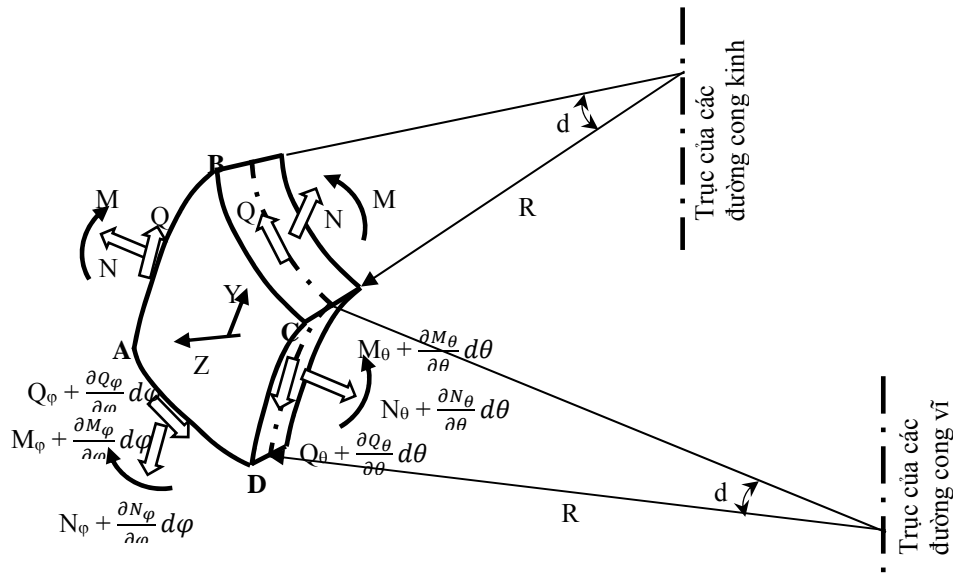
Trong đó: C là hằng số thực nghiệm (ví dụ giới hạn chảy của thép σ_{ch}); Φ_i và f_i là các hàm số.

Để minh họa cho ý tưởng nêu trên, xét bài toán vỏ tròn xoay có chiều dày h không đổi chịu tải trọng đối xứng trục như trên Hình 1.

Xét cân bằng của một phần tử được tách ra khỏi vỏ bởi hai mặt phẳng kinh tuyến và hai mặt phẳng vĩ tuyến gần sát nhau ABCD (Hình 2), chúng ta nhận được 3 phương trình cân bằng sau (Lê Ngọc Thạch, 2015):



Hình 1. Sơ đồ tính vỏ tròn xoay (Lê Ngọc Thạch, 2015)



Hình 2. Các thành phần nội lực trong phân tử vỏ tròn xoay

$$\begin{cases} \frac{d}{d\varphi}(N_\varphi R) - N_\theta R_1 \cos\varphi - RQ_\varphi + R_1 RY = 0 \\ RN_\varphi + N_\theta R_1 \sin\varphi + \frac{d}{d\varphi}(Q_\varphi R) + R_1 RZ = 0 \\ \frac{d}{d\varphi}(M_\varphi R) - M_\theta R_1 \cos\varphi - Q_\varphi R_1 R = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: Y, Z - cường độ của tải trọng ngoài tác dụng trong mặt phẳng kính tuyến song song với các trục tọa độ Y và Z; R, R₁ - tương ứng là các bán kính cong của các đường cong kính tuyến và vĩ tuyến; M_φ, M_θ, N_φ, N_θ, Q_φ, Q_θ, - lần lượt là mô men, lực dọc và lực cắt theo các trục φ và θ như trên Hình 2.

Từ điều kiện dẻo Mises chúng ta có (Lê Ngọc Thạch, 2015):

$$\frac{1}{h^2}(N_\varphi^2 - N_\varphi N_\theta + N_\theta^2) + \frac{12}{h^4}(M_\varphi^2 - M_\varphi M_\theta + M_\theta^2) = \sigma_{ch}^2 \quad (4)$$

Trong đó: σ_{ch} - là giới hạn chảy của vật liệu.

Khi các thành phần nội lực trong vỏ nêu trên thỏa mãn điều kiện (4) thì xuất hiện một miền dọc theo đường vĩ tuyến mà ở đó vật liệu bị chảy dẻo hoàn toàn. Điều kiện (4) cho phép chúng ta dùng để xác định cận dưới của trạng thái giới hạn. Thực tế thì lúc này kết cấu hầu như hết khả năng chịu lực. Do đó, với kết cấu phức tạp dạng tấm, vỏ thì việc xác định được cận dưới của trạng thái giới hạn cũng có nghĩa là xác định được tải trọng ứng với trường hợp kết cấu hoàn toàn hết khả năng chịu lực. Bài toán xác định trạng thái giới hạn của kết cấu tấm, vỏ là bài toán phức tạp. Bài toán này không có thuật toán chung mà phải tùy từng kết cấu cụ thể. Để giải các bài toán tấm vỏ, thông

thường cần đặt thêm hàm phụ f(w) - với w phụ thuộc vào điều kiện biên - biểu thị sự quan hệ giữa các thành phần nội lực với nhau. Khi đó sử dụng các phương trình cân bằng và điều kiện biên về nội lực có thể xác định được các hàm phụ được chọn. Các hàm số phụ này phải được chọn sao cho điều kiện dẻo được thỏa mãn.

3. Ví dụ tính toán

Giả thiết có một tấm thép hình chữ nhật có chiều rộng a = 1,5m, chiều dài b = 3m, chiều dày h = 0,02m chịu uốn bởi tải trọng phân bố đều q = 10 kN/m². Liên kết các cạnh của tấm như trên hình 3. Vật liệu thép có mô đun đàn hồi E = 2.10⁸ kN/m², hệ số poát-xông ν = 0,3, giới hạn chảy của thép σ_{ch} = 3.10⁵ kN/m².

Để tính toán kết cấu thép thỏa mãn điều kiện phi tuyến Mises theo nội lực, chúng ta sử dụng công cụ trợ giúp là phần mềm SAP2000 để tính toán. Sơ đồ chia lưới và đánh số nút của bài toán được thể hiện trên Hình 2. Phần tử lưới hình vuông với kích thước cạnh là 0,25m. Tổng số nút trên mô hình tính là 91 nút.

Điều kiện dẻo Mises viết theo nội lực cho bài toán tấm có dạng (Lê Ngọc Thạch, 2015):

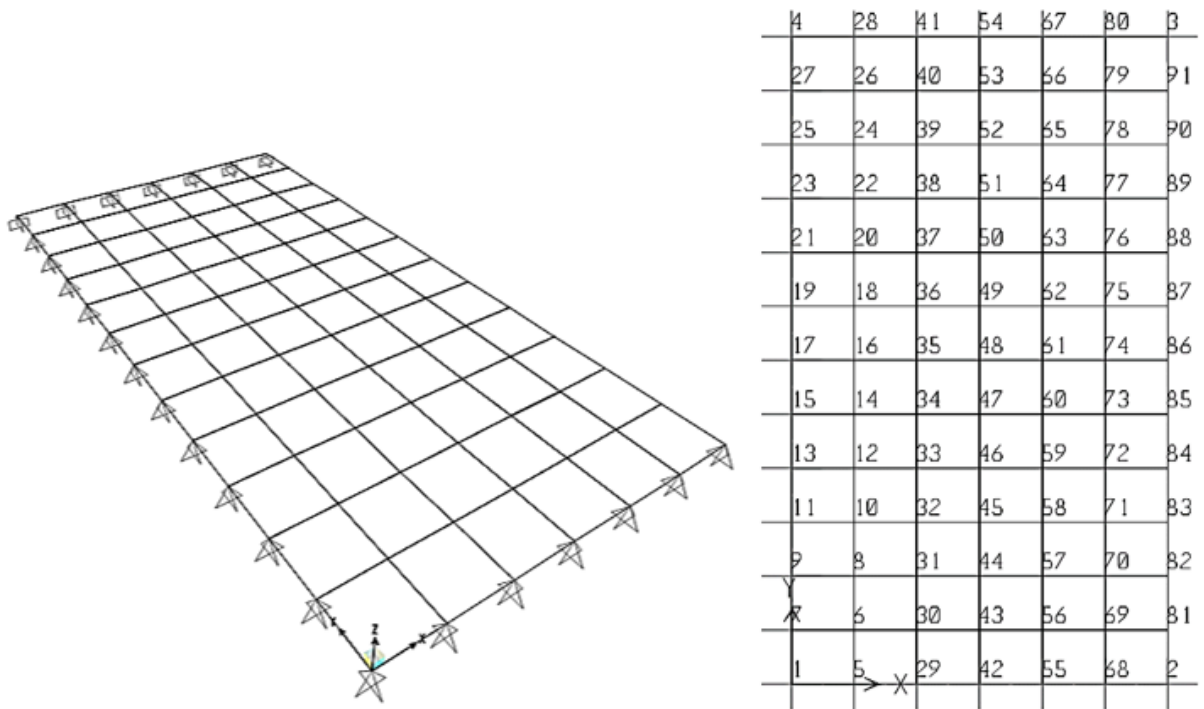
$$M_x^2 + M_y^2 - M_x M_y + 3M_{xy}^2 = M_{ch}^2 \quad (5)$$

Trong đó: $M_{ch} = \frac{h^2}{4} \sigma_{ch}$

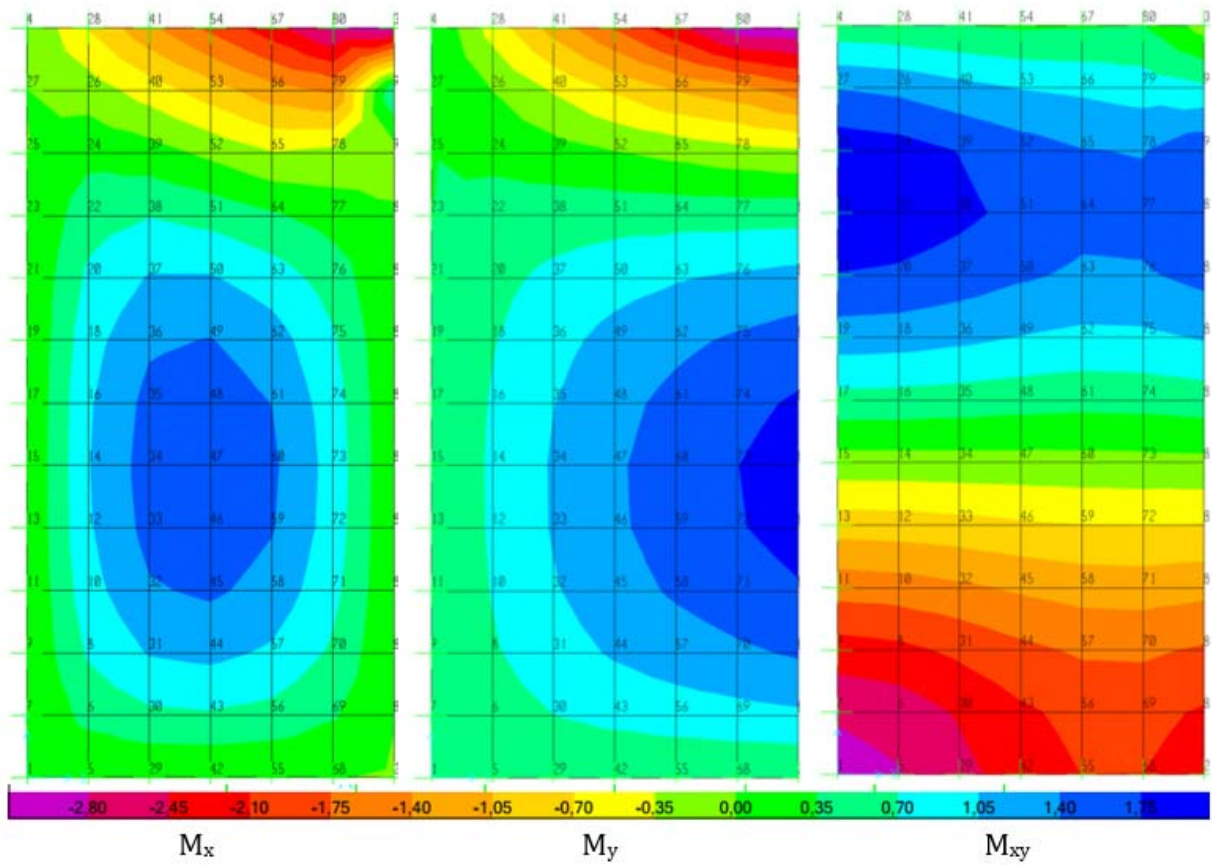
Đặt:

$$VT = M_x^2 + M_y^2 - M_x M_y + 3M_{xy}^2 \quad (6)$$

$$VP = M_{ch}^2 = \left(\frac{h^2}{4} \sigma_{ch}\right)^2 \quad (7)$$



Hình 3. Sơ đồ bài toán và đánh số nút phần tử



Hình 4. Biểu đồ các thành phần mô men trong tấm (kN.m)

Khi đó VT chính là mô men sinh ra trong vật liệu khi chịu tải trọng, còn VP là giới hạn khả năng chịu được mô men của vật liệu theo điều kiện dẻo. Vì vậy khi thỏa mãn phương trình (5) có nghĩa là nội lực sinh ra do tải trọng đạt tới giá trị giới hạn của vật liệu - vật liệu mất khả năng chịu tải trọng - có nghĩa là VT/VP = 1, khi đó vật liệu sẽ đạt đến cận dưới của trạng thái giới hạn dẻo.

Sử dụng chương trình SAP2000 để tính toán mô men cho tấm chịu tải trọng phân bố q với các điều kiện về vật liệu như trình bày ở phần trên. Sau khi tính toán, kết quả các biểu đồ mô men M_x , M_y , M_{xy} trong trường hợp tải trọng phân bố ban đầu $q = 10 \text{ kN/m}^2$ như trên Hình 4

Kết quả tính toán cho thấy giá trị mô men lớn nhất trong các trường hợp như sau:

$M_{x\text{-max}} = -2,9568 \text{ kN.m}$ tại nút số 3 ở góc trên cùng bên phải của tấm.

$M_{y\text{-max}} = 4,4073 \text{ kN.m}$ tại nút số 85 ở khoảng giữa mép ngoài bên phải tấm.

$M_{xy\text{-max}} = -2,5359 \text{ kN.m}$ tại nút số 1 ở góc dưới bên trái tấm.

Bảng 1 thống kê các giá trị mô men tương ứng tại vị trí có mô men M_x , M_y và M_{xy} lớn nhất và kết quả tính giá trị VT theo (6).

Kết quả từ bảng 2 cho thấy: với tải trọng tác dụng phân bố đều $q = 339,94 \text{ kN/m}^2$ thì tỉ số: $VT/VP \approx 1$, đây chính là cận dưới của trạng thái giới hạn dẻo của bài toán tấm vỏ theo nội lực. Như vậy, với các thông số của vật liệu và kích thước tấm như trình bày ở trên thì tải trọng tối đa mà tấm

thép có thể chịu được theo trạng thái giới hạn dẻo là $333,94 \text{ kN/m}^2$.

4. Kết luận

Bài báo trình bày phương pháp xác định cận dưới trạng thái giới hạn cho bài toán tấm, vỏ theo điều kiện dẻo Mises. Khi tính toán xác định cận dưới của trạng thái giới hạn cho bài toán tấm, vỏ theo điều kiện dẻo cho thấy: khi tăng tải tác dụng thì đến một thời điểm sẽ xuất hiện biến dạng dẻo đầu tiên ở mép trên và mép dưới tại một hoặc một số điểm của tấm, tiếp tục tăng tải thì biến dạng dẻo tiếp tục phát triển vào phía trong của tiết diện và cho đến khi vật liệu bị chảy dẻo hoàn toàn tại điểm đó. Khi đó tải trọng tương ứng sẽ là cận dưới của trạng thái giới hạn - hay chính là tải trọng tối đa mà vật liệu có thể chịu được khi tính toán theo điều kiện chảy dẻo. Với các thông số của vật liệu và kích thước tấm thép như trong ví dụ tính toán ở trên thì tải trọng tối đa mà tấm thép có thể chịu được theo trạng thái giới hạn dẻo là $333,94 \text{ kN/m}^2$.

Tài liệu tham khảo

Coarita E. and Flores L., 2015. Nonlinear analysis of structures cable - truss. *International Journal of Engineering and Technology* 7 - 3, 160-169.

Đình Lê Khánh Quốc và Nguyễn Văn Yên, 2012. Phân tích ứng xử phi tuyến của khung phẳng

Bảng 1. Vị trí các nút có mô men M_x , M_y và M_{xy} lớn nhất

Mô men	Vị trí lớn nhất	Giá trị (kN.m)			VT
		M_x	M_y	M_{xy}	
M_x	Nút 3	-2,9568	-9,8561	-0,1298	76,793
M_y	Nút 85	0,0027	4,4073	0,0593	19,423
M_{xy}	Nút 1	0,0193	0,0269	-2,5359	19,293

Bảng 2. Kết quả mômen tấm tại vị trí nút 3 trong các trường hợp tải khác nhau

STT	q	M_x	M_y	M_{xy}	σ_{ch}	VT	VP	VT/VP
	kN/m^2	kN.m	kN.m	kN.m	kN/m^2			
1	10,00	-2,957	-9,856	-0,130	350000	76,793	1225	0,0627
2	20,00	-5,914	-19,712	-0,260	350000	307,170	1225	0,2508
3	30,00	-8,871	-29,568	-0,389	350000	691,134	1225	0,5642
4	39,90	-11,798	-39,326	-0,518	350000	1222,548	1225	0,9980
5	39,94	-11,810	-39,365	-0,518	350000	1224,999	1225	1,0000
6	39,97	-11,818	-39,395	-0,519	350000	1226,841	1225	1,0015
7	40,00	-11,827	-39,424	-0,519	350000	1228,679	1225	1,0030

- bê tông cốt thép có tường xây chèn. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ xây dựng* 4, 19-24.
- Garcilazo J.J., 2015. *Nonlinear analysis of plane frames subjected to temperature changes*. Ph.D Dissertation, Department of Engineering Science, Southern Illinois university Carbondale.
- Lê Đình Quốc, Nguyễn Sỹ Lâm, Nguyễn Tấn Tiên, 2014. Phân tích chuyển vị lớn dàn không gian ngoài miền đàn hồi. *Tạp chí Xây dựng* 10, 89-92
- Lê Đình Quốc, Nguyễn Sỹ Lâm, Nguyễn Trọng Phước, 2015. Công thức Lagrange cập nhật trong phân tích ổn định dàn không gian. *Tạp chí Xây dựng* 4, 42-45.
- Lê Khả Hòa, 2014. *Phân tích ổn định phi tuyến tĩnh của vỏ bằng vật liệu có cơ tính biến thiên*. Luận án Tiến sĩ Cơ học, Đại học Khoa học tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.
- Lê Lương Bảo Nghi, Bùi Công Thành, 2009. Phân tích phi tuyến dầm liên hợp có xét đến tương tác bán phần. *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ, Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh* 12-4, 84-93.
- Lê Ngọc Thạch, 2015. *Phân tích kết cấu ngoài giới hạn đàn hồi*. Bài giảng Cao học, Trường Đại học Xây dựng.
- Lê Việt Dũng, 2015. Tác động của tải trọng lặp đến khả năng chịu cắt của cột bê tông cốt thép. *Tạp chí Xây dựng* 4, 61-63.
- Moita, J.S., Araujo, A.L., Franco Correia, V.M., Mota Soares, C.M and Mota Soares, C.A. 2015. Buckling and geometrically nonlinear analysis of sandwich structures. *International Journal of mechanical sciences* 92, 154-161.
- Moita J.S, 2015. Buckling and geometrically nonlinear analysis of sandwich structures. *International Journal of mechanical sciences* 92, 154-161.
- Ngô Hữu Cường, 2013. Phân tích phi tuyến khung thép phẳng bằng phương pháp phần tử lai. *Tạp chí Xây dựng* 6, 50-54.
- Ngô Hữu Cường, Ngô Trường Lâm Vũ, Trần Hữu Huy, Phan Đình Hào, 2012. Phân tích phi tuyến cấu kiện ống thép nhồi bê tông. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng* 8, 1-6.
- Nogueira, C.G., Venturini, W.S., and Coda, H.B., 2013. Material and geometric nonlinear analysis of reinforced concrete frame structures considering the influence of shear strength complementary mechanisms. *Latin American journal of solid and structures* 10, 953-980.
- Phạm Văn Đạt, 2013. Phân tích phi tuyến hình học dầm phẳng dựa trên nguyên lý cực trị Gauss. *Tạp chí Xây dựng* 7, 76-78.
- Vũ Công Hoàng, Nguyễn Tương Lai, 2015. Nghiên cứu tương tác động lực học của tấm dày trên nền phi tuyến chịu tác dụng của tải trọng động. *Tạp chí Xây dựng* 6, 106-110.

ABSTRACT

Analysis of plate and shell structures with nonlinear effects of materials

Manh Van Nguyen¹, Hung Xuan Ngo¹

¹ Faculty of Civil Engineering, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

When structures are stressed at relatively low levels, the applied stress is linearly proportional to the induced strain - elastic deformation. When the applied stress exceeds the elastic region, plastic deformation takes place. In this case, the applied stress is no longer proportional to the strain. This paper presents the nonlinear analysis of steel structures. The results show that the lower bound of the plastic limit state can be determined according to the internal forces. When the loads increases, the plastic deformation will appear on the lower and upper edges at one or several nodes of the steel plate. The plastic deformation is developed in the steel plate until completely perfected. The load at that time is lower bound of the plastic limit state.

Keywords: steel structure, linear, non-linear, elastic, plastic.