

# PHÂN TÍCH ỨNG SUẤT TRÊN BÀN THÉP CÓ LIÊN KẾT BẰNG BU LÔNG QUA MÔ PHỎNG 3D

## STRESS ANALYSIS ON STEEL PLATE CONNECTED BY BOLT THROUGH 3D MODEL

NGUYỄN PHAN ANH

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: phananh.ctt@vamaru.edu.vn

### Tóm tắt

Bài báo phân tích một số kết quả nghiên cứu và tiêu chuẩn thiết kế đã được thực hiện trong và ngoài nước về tính toán ứng suất trong liên kết bản thép bằng bu lông. Một ví dụ mô phỏng 3D cho liên kết bản thép bằng bu lông dựa trên phần mềm Abaqus sẽ được sử dụng để phân tích và xác định các giá trị ứng suất có trong bản thép. Những giá trị này sẽ được so sánh với các kết quả tính theo phương pháp giải tích. Kết quả so sánh đảm bảo độ tin cậy để làm cơ sở cho phân tích so sánh các giá trị nội lực khác có trong liên kết dưới tác dụng của tải trọng ngoài.

**Từ khóa:** Liên kết bu lông, Abaqus, ứng suất, kết cấu thép, phân tích nội lực.

### Abstract

The article analyzes a number of research results and design standards that have been carried out domestically and internationally on stress calculation in steel plate connections using bolts. A 3D simulation example for steel plate connection using bolts based on Abaqus software will be used to analyze and determine the stress values in the steel plate. These values will be compared with the results calculated using analytical methods. The comparison results ensure reliability as a basis for comparative analysis of other internal force values in the connection under the effect of external load.

**Keywords:** Bolt connection, Abaqus, stress, steel structure, internal force analysis.

## 1. Giới thiệu

Liên kết bu lông là một trong hai phương pháp liên kết chính hiện nay cùng với liên kết hàn. Liên kết bu lông rất thuận tiện khi tháo lắp nên được dùng nhiều trong các công trình xây dựng và nhà xưởng, các công trình bê tông cốt thép, nhà thép tiền chế, các hạng mục thi công xây lắp trong ngành xây dựng, liên kết các chi

tiết trên cao. Ngoài ra do chịu được tải trọng động nên liên kết bu lông còn được sử dụng để chế tạo dầm cầu trục hạng nặng, cầu đường bộ, cầu đường sắt.

Hiện nay, ở nước ta, việc tính toán kết cấu thép sử dụng mối ghép bu lông có thể thực hiện theo: TCVN 5575:2023 [1] hoặc AISC-89 [2]; BS 5950 [3]; EN 1993 Eurocode 3 [4]; AS 4100-1998 của Úc [5],...



Hình 1. Liên kết bu lông trong kết cấu cầu thép

Nhìn chung trong các tiêu chuẩn này, việc tính toán liên kết bu lông cho kết cấu thép chỉ đề cập tới việc thiết kế bu lông theo các điều kiện chịu ép mặt, chịu kéo và chịu cắt; thiết kế bản thép dựa theo điều kiện giảm yếu về mặt tiết diện. Các tiêu chuẩn này mặc dù cũng đã đưa ra được sự phân bố ứng suất trong các bản thép, trong bu lông hay đai ốc nhưng việc có thể tiên lượng chính xác những vị trí, những vùng trọng yếu trong liên kết dễ bị phá hoại sớm khi chịu tác dụng của ngoại lực, thậm chí yếu tố ma sát trong liên kết ảnh hưởng như thế nào đến sự phân bố ứng suất này đều chưa được đề cập đến hoặc mới chỉ dừng ở mức khái niệm.

Do vậy, xây dựng một mô hình 3D mô phỏng chính xác liên kết bu lông để cho phép mô tả trực quan giá trị và sự phân bố nội lực trong các thành phần liên như: Bu lông, đai ốc, khu vực tiết diện giảm yếu của bản thép là rất cần thiết.

## 2. Một số nghiên cứu khoa học đã được thực hiện

### 2.1. Quốc tế

Cho đến nay đã có rất nhiều nghiên cứu được thực hiện để khám phá sự làm việc của liên kết bu lông chủ yếu sử dụng phương pháp thực nghiệm kết hợp phân tích lý thuyết. Ví dụ như:

- Lehnhoff [6] đã xây dựng một mô hình phân tử hữu hạn đối xứng trục của các mối nối bu lông để nghiên cứu sự ảnh hưởng của cả độ lớn cũng như vị trí của tải trọng ngoài lên ứng suất trên bề mặt của các thành phần liên kết. Nghiên cứu kết luận rằng: có sự thay đổi về giá trị của ứng suất trên bề mặt của thành phần liên kết khi có sự thay đổi về độ lớn và vị trí của tải trọng ngoài;

- Khái niệm mô đun môi đã được sử dụng để phân tích tiên đoán tuổi thọ môi của liên kết bu lông sử dụng thép không gỉ SUS304 [7]. Mục tiêu của nghiên cứu này là các đặc trưng về ứng xử do môi của các đai ốc, chỉ rõ sự giãn ra của ứng suất tập trung và ảnh hưởng của lực kẹp lên cường độ môi. Đây là một nghiên cứu thực nghiệm sử dụng các mẫu bản thép được liên kết với nhau thông qua các bu lông. Bởi sự giãn ra của ứng suất tập trung do các bu lông, sự kéo dài tuổi thọ môi đã được khám phá. Lực kẹp ảnh hưởng phi tuyến đến độ chênh lệch của sự phân bố ứng suất;

- Trong nghiên cứu [8], Cope đã đưa ra biện pháp đánh giá những hệ số mật độ ứng suất cho vết nứt xảy ra trong các bu lông. Mật độ ứng suất này sẽ phụ thuộc vào hình dạng, kích thước hình học, tải trọng truyền lên bu lông và bề mặt tương tác của bu lông. Mô hình phân tử hữu hạn đã được sử dụng để mô phỏng dạng liên kết này. Ứng suất và mật độ ứng suất trong những bản thép tại vị trí vết nứt đã được cố định với những trường hợp tải trọng ngoài khác nhau. Mật độ ứng suất cũng sẽ chỉ phụ thuộc vào đường kính chứ không phụ thuộc vào vật liệu chế tạo bu lông.

### 2.2. Trong nước

Về xác định diện tích tiết diện giảm yếu do lỗ:

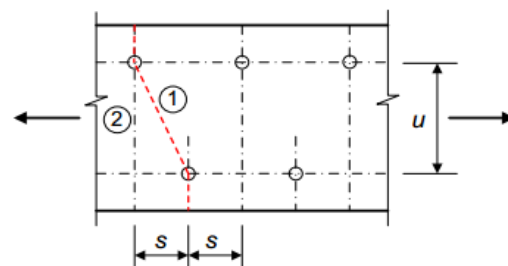
Khi tính toán cấu kiện về cường độ, cần xác định diện tích tiết diện thực là diện tích tiết diện đã trừ đi các giảm yếu do lỗ liên kết. Nếu các lỗ đặt trên một đường thẳng thì diện tích lỗ giảm yếu bằng tổng tiết diện ngang của các lỗ trong một tiết diện ngang của cấu kiện vuông góc với phương lực. Điều đặc biệt là khi các lỗ nằm so le theo đường chữ chi, khi đó giảm yếu do các lỗ nằm trên đường chữ chi phải được tính

bằng: Tổng diện tích các lỗ nằm trên đường chữ chi đi suốt qua tiết diện cấu kiện nhưng được giảm đi một lượng  $(s^2/4u)t$  cho mỗi đường chéo giữa hai lỗ. Lượng  $(s^2/4u)t$  xét đến sự khác nhau của diện tích theo đường chéo và diện tích đường vuông góc của tiết diện làm việc, là do kết quả thực nghiệm của Hoa Kỳ được đề xuất từ năm 1922 và đã được chấp nhận bởi hầu hết các nước phương Tây. TCVN 5575:2023 [1] không dùng công thức này, mà cứ tính tổng diện tích tiết diện đi theo đường chữ chi một cách tính hoàn toàn mang tính chất quy ước gần đúng. So sánh diện tích thực tính theo hai tiêu chuẩn được đưa về so sánh giữa hai giá trị:

$$(u^2 + s^2)^{1/2} \text{ (TCVN5575:2023[1])}$$

$$\text{và } u + s^2/4u \text{ (BS 5950[3])}$$

Qua các phép tính biến đổi sơ cấp, ta thấy hai giá trị này sẽ bằng nhau khi  $u = 0,25s\sqrt{2}$  hay  $u=0,35$ . Nếu  $u > 0,35s$ , trường hợp hay gặp, thì diện tích thực theo TCVN5575:2023 sẽ lớn hơn diện tích thực tính theo BS 5950. Như vậy tính toán theo TCVN5575:2023 sẽ tiết kiệm vật liệu hơn BS 5950.



Hình 2. Lỗ xếp so le và các đường phá hoại tới hạn 1 và 2 [1]

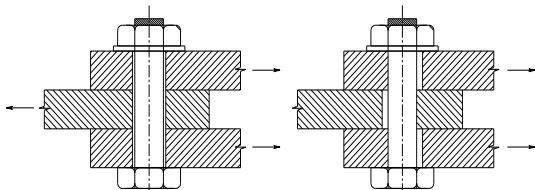
Trong đó:  $s$  là bước lỗ so le, tức là khoảng cách song song với phương của lực giữa tâm của các lỗ trên hai đường liên tiếp nhau;  $t$  là bề dày thanh thép có lỗ;  $u$  là khoảng đường lỗ, là khoảng cách vuông góc với phương của lực giữa tâm các lỗ trên hai đường liên tiếp.

- BS 5950[3] phân biệt hai loại diện tích hữu hiệu:

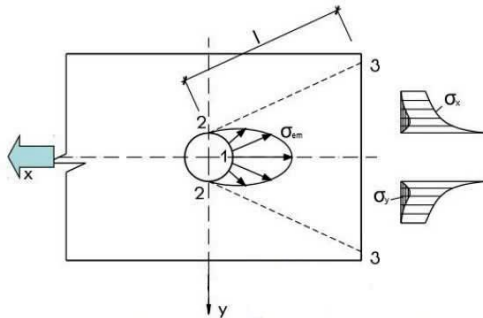
+ Diện tích thực hữu hiệu tại các nút liên kết: tại nút liên kết với các lỗ bu lông, tiết diện làm việc là tiết diện thực đã trừ lỗ. Tuy nhiên, tại nút liên kết, cấu kiện sẽ làm việc cho đến giới hạn bền  $U_s$  chứ không hạn chế ở giới hạn chảy  $Y_s$ . Khả năng chịu lực của cấu kiện tại nút liên kết sẽ bằng diện tích thực là  $A_n \times U_s$  trong khi tại vùng ngoài nút liên kết thì khả năng chịu lực của cấu kiện bằng diện tích nguyên nhân với giới hạn chảy  $Y_s$ , tiêu chuẩn BS cho phép nhân diện tích thực  $A_n$  với hệ số  $K_e = U_s/Y_s$ . Cụ thể

$K_e=1,2$  đối với thép S275,  $K_e=1,1$  với thép S355 [9]. Tiêu chuẩn TCVN không xét đến vấn đề này, nhưng có tăng khả năng của tiết diện thu hẹp tại nút liên kết bằng hệ số  $\gamma_b=1,05$  hoặc  $\gamma_b=1,1$ .

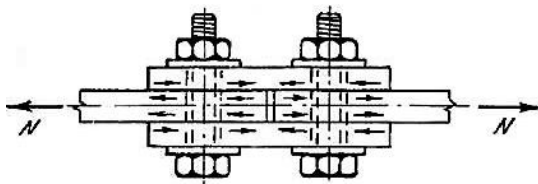
+ Diện tích hữu hiệu của thanh kéo chịu lực không đúng tâm: Đối với những thanh có tiết diện thép góc, chữ T hoặc chữ C chịu lực lệch tâm tại các nút liên kết thì có thể được tính như thanh kéo đúng tâm nhưng sẽ giảm khả năng chịu lực đi bằng cách coi như phần diện tích không được liên kết chỉ phát huy được 50% đến 70%. Khái niệm diện tích hữu hiệu là rất quan trọng trong kết cấu thép, không chỉ cho cấu kiện chịu kéo và mọi cấu kiện chịu lực. Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép của các nước phương Tây đều sử dụng khái niệm này.



**Hình 3. Sự làm việc chịu cắt của bu lông**



**Hình 4. Sự làm việc ép mặt của bu lông**

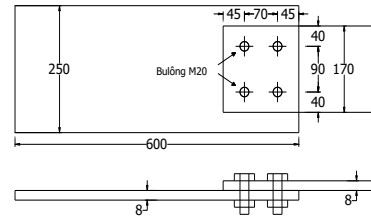


**Hình 5. Sự làm việc của bu lông CĐC**

Xác định sự làm việc của liên kết bu lông và khả năng chịu lực của bu lông [1]:

Trong TCVN5575:2023 mới chỉ dừng ở việc kiểm tra các điều kiện bền hay sự phân bố, tập trung ứng suất của các thành phần liên kết chịu tác dụng của tải trọng ngoài chứ chưa thể tiên lượng chính xác những vị trí, những vùng trọng yếu trong liên kết để bị phá hoại sớm tiên đoán sớm được các vùng nguy hiểm để bị phá hoại.

### 3. Ví dụ nghiên cứu



**Hình 6. Ví dụ nghiên cứu**

Hiện nay, các phần mềm thương mại như: DIANA, MIDAS, ANSYS, FRANC 3D,... đã và đang được sử dụng cho việc mô phỏng nghiên cứu các trạng thái làm việc trong liên kết kết cấu thép bằng bu lông hoặc đường hàn. Trong phạm vi bài báo này, tác giả đã sử dụng phần mềm ABAQUS [9] để mô hình 3D một ví dụ liên kết bu lông để phân tích được sự phân bố ứng suất quanh miệng lỗ bu lông trên bản thép.

#### 3.1. Mô hình hóa

Việc mô hình hóa sẽ được thực hiện với từng bước cụ thể như sau:

##### 3.1.1. Mô phỏng các thành phần liên kết

GERMANY STANDARD HEX BOLTS (FULL THREAD)							DIN 933
Grades A and B							
Thread size	M5	M6	M8	M10	M12	M14	
Pitch	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	
k	3.5	4	5.3	6.4	7.5	8.8	
e	A	8.79	11.05	14.38	18.9	21.1	24.49
	B	8.63	10.89	14.2	18.72	20.88	23.91
s	8	10	13	17	19	22	
L	8-40	8-50	12-60	16-60	20-80	25-80	
Thread size	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
Pitch	2	2.5	2.5	2.5	3	3	3.5
k	10	11.5	12.5	14	15	17	18.7
e	A	26.75	30.14	33.53	35.72	39.98	45.2
	B	26.17	29.56	32.95	35.03	39.55	45.2
s	24	27	30	32	36	41	46
L	30-100	30-100	40-100	50-100	50-100	60-100	70-100

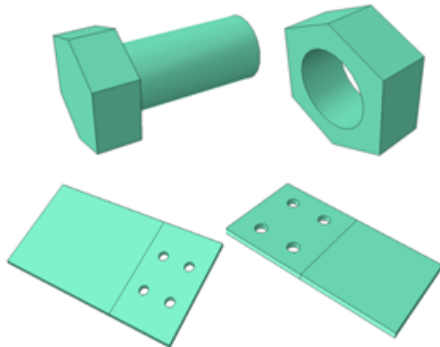
GERMANY STANDARD HEX NUTS							DIN 934
Thread size	M5	M6	M8	M10	M12	M16	
Pitch	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	
m	4	5	6.5	8	10	13	
e	8.79	11.05	14.38	18.9	21.1	26.75	
s	8	10	13	17	19	24	
Thread size	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56
Pitch	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
m	16	19	24	29	34	38	45
e	32.95	39.55	50.85	60.79	71.3	82.6	93.56
s	30	36	46	55	65	75	85

**Hình 7. Thông số kỹ thuật của bu lông DIN 933**

Trạng thái làm việc của vật liệu sử dụng làm bu lông, đai ốc hay bản thép được mô hình gần đúng là tuyến tính đàn hồi dẻo. Mô hình này cho gần đúng là vật liệu làm việc trong môi trường đồng nhất đẳng hướng, điều này là hoàn toàn phù hợp với các dạng

**Bảng 1. Thông số kỹ thuật của bản thép**

Vật liệu	Mô hình vật liệu	Đặc trưng cơ lý	Giá trị
Thép	Tuyến tính đàn hồi dẻo	Trọng lượng riêng	8030Kg/m <sup>3</sup>
		Young mô đun	193,1GPa
		Hệ số Poisson	0,3
		Giới hạn đàn hồi	275MPa



**Hình 8. Mô phỏng các thành phần liên kết**

phần tử tấm, dầm, vật thể rắn. Đường cong thể hiện mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của vật liệu được tiến hành tuân theo định luật Hooke:  $\sigma = E \cdot \epsilon$ .

- Bu lông, đai ốc được mô phỏng chính xác đúng với loại sản xuất theo tiêu chuẩn Đức DIN 933, loại M20 [10].

- Mô phỏng bản thép: Ví dụ đề cập sử dụng 02 bản thép cùng chiều dày là 8mm và diện tích lần lượt là 330x170 (mm); 600x250 (mm) với các thông số như Bảng 1.

**3.1.2. Mô hình phần tử hữu hạn**

- Có nhiều dạng phần tử hữu hạn: Phần tử một chiều, hai chiều, ba chiều. Trong mỗi dạng đó, đại lượng khảo sát có thể biến thiên bậc nhất, bậc hai hoặc bậc ba,... Dưới đây là một số dạng phần tử hữu hạn thường gặp được thể hiện trên Hình 9.

Phần mềm ABAQUS khuyên dùng phần tử C3D8R (8 nút, 3 bậc tự do và đây cũng là dạng phần tử lăng trụ bậc nhất) cho phần tử khối đặc trưng vật liệu bê tông hoặc thép. Loại phần tử này có thể được sử dụng cho các phân tích tuyến tính và phi tuyến phức tạp liên quan đến tiếp xúc, dẻo và biến dạng lớn của kết cấu. Trong bài báo này, toàn bộ các thành phần tham gia trong liên kết bu lông sẽ được mô phỏng bằng phần tử dạng C3D8R có điểm tích phân đặt tại trọng tâm của khối.

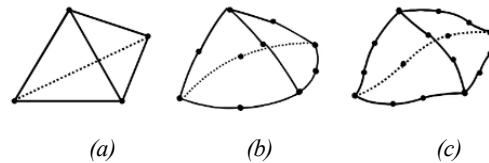
**3.1.3. Mô hình tương tác giữa các mặt tiếp xúc trong liên kết**

- Mô hình tương tác khi kể đến ma sát:

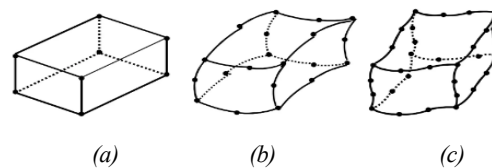
Trong liên kết này, hai bản thép sẽ có bề mặt tiếp xúc trực tiếp lên nhau. Mặt bản thép phía trên sẽ tiếp xúc trực tiếp với mặt dưới của mũ bu lông. Mặt bản thép phía dưới sẽ tiếp xúc trực tiếp lên bề mặt của đai ốc.

Hệ số ma sát ở các bề mặt có giá trị phụ thuộc vào phương pháp làm sạch bề mặt của bản thép trước

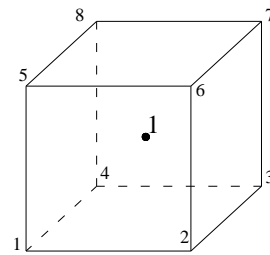
Phần tử tứ diện:



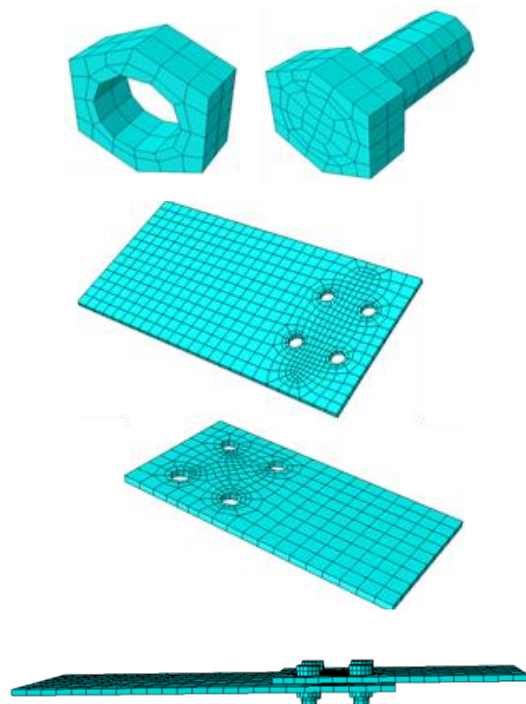
Phần tử lăng trụ:



**Hình 9. Phân tử ba chiều, (a) phân tử bậc nhất; (b) phân tử bậc hai; (c) phân tử bậc ba**



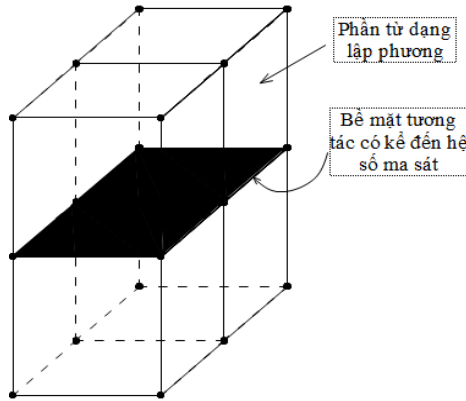
**Hình 10. Phần tử C3D8R**



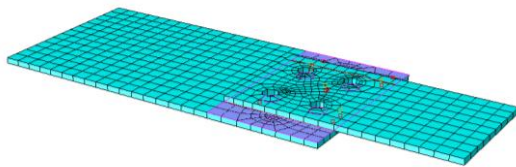
**Hình 11. Mô hình FEM của liên kết**

liên kết và trong mô hình này giá trị này sẽ được lấy bằng 0,5 [1].

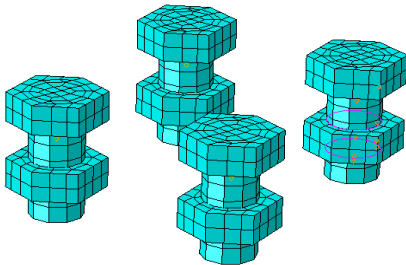
Những mặt tiếp xúc khác có trong liên kết sẽ lần lượt được khai báo tương tự.



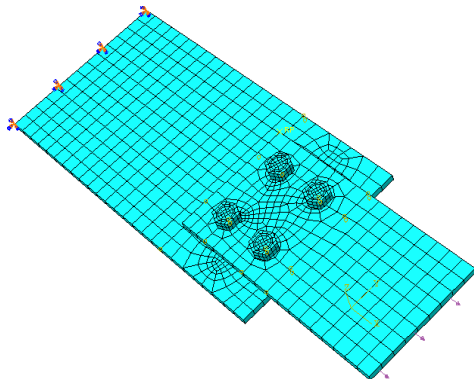
Hình 12. Tương tác bề mặt giữa các phần tử có kể đến hệ số ma sát



Hình 13. Khai báo mặt tiếp xúc giữa các bản thép có hệ số ma sát 0,5



Hình 14. Khai báo liên kết giữa đai ốc và bu lông



Hình 15. Mô hình tổng thể

- Mô hình liên kết khi khai báo bu lông và đai ốc:

Để hoàn thiện được liên kết và giữ cho liên kết không bị lỏng lẻo, ta phải xiết chặt các đai ốc vào thân bu lông. Do sử dụng loại bu lông thường nên lực xiết bu lông này coi như gây ra lực kéo trong thân bu lông và lực ép mặt giữa các bề mặt tiếp xúc là nhỏ. Những lực này sẽ không đề cập đến trong mô hình.

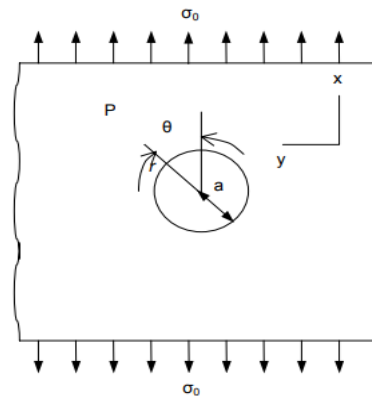
Bề mặt tương tác giữa thân bu lông và mặt trong của đai ốc được khai báo theo kiểu bề mặt ràng buộc cố định “tie constraint surfaces”.

### 3.1.4. Gán điều kiện biên và tải trọng ngoài

Để đảm bảo tính ổn định của liên kết thì một đầu bản thép sẽ được khai báo cố định và đầu còn lại bản thép kia thì gán một tải trọng ngoài  $N = 70\text{kN}$ , tải trọng này trong khai báo sẽ được quy về thành tải trọng phân bố đều tác dụng tại đầu bản thép.

## 3.2. Trình tự tính toán theo phương pháp giải tích

- Xuất phát từ việc phân tích một số thành phần ứng suất trên bản thép có một lỗ liên kết bu lông như trên Hình 16.



Hình 16. Tấm phẳng vô hạn có một lỗ tròn

- Với giả sử một tấm bản thép vô hạn theo hướng y, như trên hình trên, vật liệu là đàn hồi đẳng hướng:

Căn cứ theo nghiên cứu của Boresi, A.P [11], ta xác định được một số công thức giải tích xác định ứng suất  $\sigma_{\theta\theta}$ ;  $\sigma_{rr}$ ;  $\sigma_{r\theta}$ .

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \left(1 - 3\frac{a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{3a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\sigma_{r\theta} = -\frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \left(1 + 3\frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (3)$$

Bằng cách sử dụng phương trình biến đổi ứng

suất hai chiều, các thành phần ứng suất theo trục  $x$  và trục  $y$  sẽ được xác định tại bất kỳ điểm nào xung quanh ranh giới của lỗ tròn.

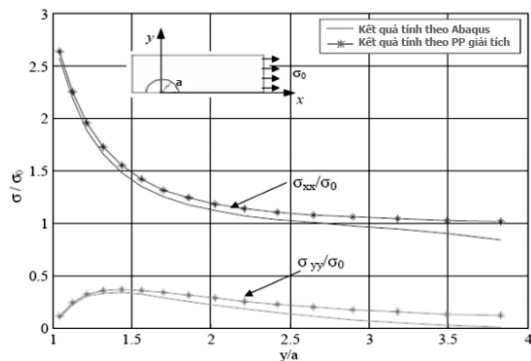
Khi đặt  $\theta=90^\circ$  và  $r=x$  đối với sự phân bố ứng suất dọc theo trục  $y$  và đặt  $\theta=0^\circ$  và  $r=x$  đối với sự phân bố ứng suất dọc theo trục  $x$  là hoàn toàn có thể xác định được.

Sau đó, các công thức xác định phân bố ứng suất theo trục  $X$  và  $Y$  trên đã được biến đổi qua một số bước cuối cùng để chuyển về công thức tính được  $\sigma_{xx}/\sigma_0$  và  $\sigma_{yy}/\sigma_0$ .

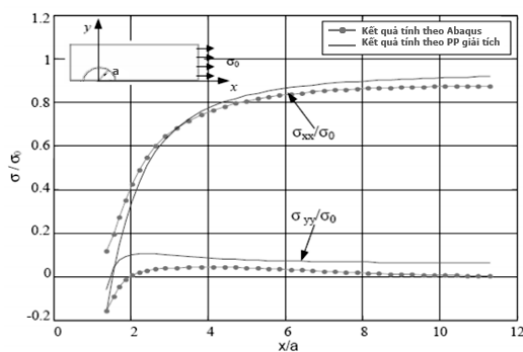
$$\sigma_{rr} = \sigma_{xx} = \frac{\sigma_0}{2} \left( \frac{3a^2}{x^2} - \frac{3a^4}{x^4} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{yy} = \frac{\sigma_0}{2} \left( 2 + \frac{a^2}{x^2} + \frac{3a^4}{x^4} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{r\theta} = \tau_{xy} = 0 \quad (6)$$



Hình 17. Phân bố ứng suất  $\sigma_{xx}/\sigma_0$  và  $\sigma_{yy}/\sigma_0$  quanh miệng lỗ bu lông theo trục  $Y$



Hình 18. Phân bố ứng suất  $\sigma_{xx}/\sigma_0$  và  $\sigma_{yy}/\sigma_0$  quanh miệng lỗ bu lông theo trục  $X$

### 3.3. Kết quả và thảo luận

Dưới đây là đường cong so sánh kết quả phân bố ứng suất quanh miệng lỗ bu lông theo trục  $X$  và  $Y$  giữa kết quả từ phân tích mô hình phân tử hữu hạn dựa trên mô phỏng bằng phần mềm Abaqus và kết

quả tính theo phương pháp giải tích.

Trong đó  $\sigma_{xx}$  và  $\sigma_{yy}$ : Là ứng suất chịu kéo theo phương  $X$  và theo phương  $Y$  tại vị trí lỗ bu lông;  $\sigma_0$  là ứng suất chính;  $a$  là bán kính của lỗ bu lông.

Qua so sánh những đường cong phân bố ứng suất đều không có sự khác biệt quá lớn, nên kết quả đạt được từ phân tích mô hình 3D như trong nghiên cứu này là hoàn toàn có đủ độ tin cậy và làm cơ sở cho việc so sánh các giá trị nội lực khác có trong liên kết dạng này.

### 4. Kết luận

Bài báo này đã xây dựng được một ví dụ liên kết bu lông dựa trên mô hình 3D với những giả định về hệ số ma sát xuất hiện trong liên kết để tìm hiểu được sự phân bố của ứng suất có trong từng thành phần của liên kết dưới tác dụng của tải trọng ngoài. Độ tin cậy của mô hình mô phỏng số, thực hiện cho một liên kết cụ thể, gồm 2 bản thép và 4 bu lông, được kiểm chứng bằng việc so sánh với phương pháp giải tích. Do đó, các nhà thiết kế có thể sử dụng phương pháp của bài báo trong phân tích độ bền và thiết kế tối ưu kết cấu thép với liên kết bằng bu lông. Do xây dựng một mô hình tính toán với những mô phỏng chính xác nên những kết quả thu được hoàn toàn đáng tin cậy và có thể được sử dụng cho những nghiên cứu tiếp theo.

Việc xác định được sự phân bố ứng suất của từng thành phần có trong liên kết dưới tác dụng của tải trọng ngoài sẽ giúp tiên lượng chính xác được những vị trí, những vùng trọng yếu trong liên kết dễ bị phá hoại sớm.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 5575:2023, *Kết cấu thép - Tiêu chuẩn thiết kế*.
- [2] AISC-ASD 89.
- [3] BS 5950.
- [4] EN 1993-1-1: *Eurocode 3: Design of steel structures*.
- [5] AS 4100-1998 *Steel structures*.
- [6] T. F. Lehnhoff, W. E. Wistehuff (1996), *Nonlinear Effects on the Stresses and Deformations of Bolted Joints*, *J. Pressure Vessel Technol*, Vol.118(1): pp.54-58.
- [7] Jung, C. K., and Han, F. S., (2000), *Fatigue Life Prediction of Bolted Joints*, *Key Engineering Materials*, Vol.183-187, pp.1011-1016.
- [8] Cope D.A, Lacy T.E (2004). *Modeling Mechanical Fasteners in Single Shear Lap joints*. *Journal of Aircraft*, Vol.41, pp.1491-1497.

- [9] ABAQUS/Standard Users Manual.
- [10] Bu lông DIN 933.
- [11] Boresi, A.P., Schmidt, R.J., and Sidebottom, O.M., (1993), *Advanced Mechanics of Materials*, John Wiley & Sons, INC.

Ngày nhận bài:	02/08/2024
Ngày nhận bản sửa lần 01:	07/08/2024
Ngày nhận bản sửa lần 02:	30/08/2024
Ngày duyệt đăng:	10/09/2024