

# ỨNG SUẤT CỤC BỘ CỦA CÁC LOẠI LỖ BU LÔNG XÉT ĐẾN SỰ TỒN TẠI CỦA ỨNG SUẤT DƯ

## LOCAL STRESS OF BOLT HOLE CONSIDER SURVIVAL RESIDUAL STRESS

**Nguyễn Đăng Điềm**

Trường Đại học Giao thông Vận tải

**Tóm tắt:** Bài báo phân tích ứng suất cục bộ tại khu vực mép lỗ bu lông của các loại lỗ khác nhau bằng phương pháp phần tử hữu hạn xét đến sự tồn tại của ứng suất dư. Các loại lỗ được nghiên cứu bao gồm: Lỗ chuẩn, lỗ quá cỡ, lỗ ovan ngắn, lỗ ô van dài. Phần tử được lựa chọn để phân tích là phần tử tam giác bậc 3 với 10 nút, hàm chuyển vị được chọn là đa thức bậc 3 đầy đủ. Ứng suất trong phần tử sẽ phân bố bậc 2 phù hợp hơn với bài toán thực tế. Tác giả phân tích sự tồn tại của ứng suất dư trong kết cấu theo mô hình của BJORHOVDE, ứng suất dư được xem xét sinh ra do nguyên nhân là quá trình nguội không đều trong quá trình gia công. Kết quả phân tích ứng suất cục bộ thấy được sự làm việc của các loại lỗ bu lông. Qua đó người thiết kế có thể chủ động lựa chọn loại lỗ bu lông cho phù hợp.

**Từ khóa:** Ứng suất cục bộ, ứng suất dư, lỗ bu lông, phương pháp phần tử hữu hạn, liên kết bu lông.

**Chỉ số phân loại:** 2.1

**Abstract:** This paper analyzes local stress of different bolt hole by finite element method consider survival residual stress. The types of holes studied include: Standard hole, oversized hole, short oval hole, long oval hole. The element selected for analysis is a triangular third-order element with 10 nodes, a displacement function chosen as a full-scale polynomial. Stress in the element will distribute the quadratic order more suitable for the real problem. The author analyzes the existence of residual stress in the structure according to the model of BJORHOVDE, the residual stress is considered to be generated by the reason that the process is not uniformly cold during processing. The results of local stress analysis show the working of the bolt holes. Thereby the designer can actively select the type of bolt hole accordingly.

**Keywords:** Local stress, residual stress, bolt hole, finite element method, connection bolt.

**Classification number:** 2.1

### 1. Giới thiệu

Khi chế tạo liên kết bu lông trên thép cơ bản cần gia công lỗ bu lông, những khu vực này xuất hiện ứng suất cục bộ tại mép lỗ. Theo [1], khi liên kết kết cấu thép bằng liên kết bu lông thì có các loại lỗ bu lông: Lỗ chuẩn, lỗ quá cỡ, lỗ ô van ngắn và lỗ ô van dài, kích thước của các loại lỗ này chỉ phụ thuộc vào đường kính của bu lông, không phụ thuộc vào loại bu lông và loại liên kết.

Trong quá trình gia công nhiệt, gia công cơ học và luyện thép làm xuất hiện ứng suất dư trong vật liệu thép. Ứng suất dư do gia công nhiệt hình thành khi sự nguội xảy ra không đều. Ứng suất dư do gia công cơ học xảy ra bởi biến dạng dẻo không đều khi bị kích ép. Ứng suất dư do luyện kim sinh ra do sự thay đổi cấu trúc phân tử của thép. Sự tồn tại

của ứng suất dư trong vật liệu thép có nhiều giả thiết khác nhau, tiêu biểu là quan điểm của (BJORHOVDE, 1992) [8] về ứng suất dư khi tính toán và thiết kế kết cấu thép.

Ở trong nước đã có những nghiên cứu phân tích ứng suất cục bộ của lỗ hình tròn bằng phương pháp giải tích hoặc phương pháp phần tử hữu hạn trên cơ sở sử dụng các phần mềm thương mại như Midas FEA. Tuy nhiên các nghiên cứu mới chỉ dừng ở lỗ tròn mà chưa đề cập đến các loại lỗ chuẩn, lỗ ô van ngắn, lỗ ô van dài và đồng thời xem xét đến sự tồn tại của ứng suất dư trong kết cấu. Trong phạm vi bài báo này, tác giả chỉ đề cập đến ứng suất dư do sinh ra bởi sự nguội không đều của cấu kiện trong quá trình gia công hay chế tạo ở nhà máy. Nguyên tắc cơ bản của ứng suất dư có thể được tóm tắt: Các thớ lạnh đầu

tiên chịu ứng suất dư nén, các thớ lạnh sau cùng chịu ứng suất dư kéo (Bjorhovde, 1992).

Trên thế giới có nghiên cứu về ứng suất cục bộ xung quanh các lỗ bu lông của mối nối đường ray [2] hay sự ảnh hưởng qua lại giữa hai lỗ trên chi tiết [3]. Các công bố này tập trung giải quyết cho lỗ hình tròn chưa xem xét đến hình dạng lỗ và xét đến sự tồn tại của ứng suất dư. Do đó phân tích ứng suất cục bộ tại mép các loại lỗ trong liên kết bu lông cần tiếp tục được nghiên cứu. Qua việc phân tích ứng suất cục bộ này cho ta thấy được sự làm việc của các loại lỗ trong liên kết. Người thiết kế có thể chủ động hơn trong việc lựa chọn loại lỗ cho phù hợp.

## 2. Cơ sở lý thuyết

Trong bài báo này tác giả lựa chọn phương pháp phần tử hữu hạn theo mô hình chuyển vị, phương pháp này hiệu quả đối với sự trợ giúp của máy tính điện tử. Qua đó tác giả xây dựng chương trình tính thông qua lập trình Matlab. Với phạm vi nghiên cứu của mình tác giả chỉ đề cập đến sự làm việc của các loại lỗ trong cấu kiện chịu kéo, do đó bài toán được giải quyết là bài toán ứng suất phẳng. Hàm chuyển vị được lựa chọn là đa thức bậc ba đầy đủ, với mô hình chuyển vị này ứng suất trong phần tử sẽ thay đổi bậc 2 phản ánh tốt trạng thái ứng suất của phần tử, nó cũng thích hợp với dạng biên cong của phần tử. Phần tử tam giác bậc ba gồm 10 nút: 3 nút ở đỉnh của tam giác và 6 nút ở các cạnh tam giác và một nút nằm ở trọng tâm của phần tử tam giác, hàm chuyển vị được xấp xỉ (1), ứng suất dư tồn tại trong kết cấu tác giả sử dụng mô hình của Bjorhovde, 1992. Ứng suất dư ban đầu trong phần tử tam giác được coi như tải trọng ban đầu [8].

Chuyển vị theo phương x và phương y được xấp xỉ dưới dạng đa thức bậc hai đầy đủ (1). Các chuyển theo chiều trục x:  $u(x,y)$  và chuyển vị theo chiều trục y:  $v(x,y)$  được tổ hợp tuyến tính từ 10 hàm nội suy (2):

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 + a_2x + a_3y \\ &+ a_4x + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x^2y \\ &+ a_8xy^2 + a_9x^3 + a_{10}y^3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v(x, y) &= a_{11} + a_{12}x + a_{13}y \\ &+ a_{14}xy + a_{15}x^2 + a_{16}y^2 + \\ &+ a_{17}x^2y + a_{18}xy^2 + a_{19}x^3 + a_{20}y^3 \end{aligned}$$

$$u(x, y) = \sum_{i=1}^{10} N_i \times u_i = [N] \times \{q_u\}_e \quad (2)$$

$$v(x, y) = \sum_{i=1}^{10} N_i \times v_i = [N] \times \{q_v\}_e$$

Ma trận các hàm dạng được xác định theo (3) trong hệ tọa độ diện tích:

$$[N] = [N_i], i = 1 \rightarrow 10 \quad (3)$$

$$N_i = \frac{1}{2} L_i (3L_i - 1)(3L_i - 2) \quad (4)$$

$$N_4 = \frac{9}{2} L_1 L_2 (3L_1 - 1) \quad (5)$$

$$N_5 = \frac{9}{2} L_1 L_2 (3L_2 - 1) \quad (6)$$

$$N_6 = \frac{9}{2} L_2 L_3 (3L_2 - 1) \quad (7)$$

$$N_7 = \frac{9}{2} L_2 L_3 (3L_3 - 1) \quad (8)$$

$$N_8 = \frac{9}{2} L_3 L_1 (3L_3 - 1) \quad (9)$$

$$N_9 = \frac{9}{2} L_1 L_3 (3L_1 - 1) \quad (10)$$

$$N_{10} = 27L_1 L_2 L_3 \quad (11)$$

$L_i$ : Tọa độ tự nhiên của phần tử tam giác

Ma trận độ cứng phần tử:

$$[K]^e = \iiint_V [B]^T \times [D] \times [B] dv \quad (12)$$

Ma trận các hệ số đàn hồi của bài toán ứng suất phẳng:

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$\nu$ : Hệ số Poisson của vật liệu

Ma trận tính biến dạng:

$$[B] = [\nabla][N] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} [N] \quad (14)$$

Ứng suất của phần tử được xác định:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \{\varepsilon\}_e = [D] \times [\nabla][u]_e \quad (15)$$

$$= [D] \times [\nabla][N] \times \{q\}_e = [D] \times [B] \times \{q\}_e$$

Véc tơ biến dạng của phần tử:

$$\{\varepsilon\}_e = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

+  $\{u\}_e$ : Véc tơ chuyển vị của phần tử;

+  $\{q\}_e$ : Véc tơ chuyển vị nút của phần tử.

Ứng suất hiệu dụng Von Mises:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2} \times \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 6\tau_{xy}^2 \right\}} \quad (17)$$

### 3. Ví dụ tính toán minh họa

Trong phạm vi nghiên cứu của mình tác giả tính toán cho tấm có kích thước 100 mm x 100 mm và chiều dày là 12 mm, vật liệu thép được đưa vào tính toán có mô đun đàn hồi  $E = 2 \times 10^8$  kN/m<sup>2</sup>, hệ số Poisson  $\nu = 0.25$ , thép kết cấu sử dụng loại M270 cấp 250 có cường độ chảy  $F_y = 250$  Mpa, ứng suất dư phân bố theo mô hình của Bjorhovde, 1992. Bu lông có đường kính  $d$  để đưa vào tính toán, các quy định về khoảng cách giữa các bu lông được

lựa chọn theo [1 và 4] đảm bảo không có sự tương tác giữa các lỗ bu lông với nhau. Tấm được chia thành các phần tử tam giác, các phần tử tam giác được sử dụng là phần tử bậc ba với 10 nút tại đỉnh cùng các cạnh tam giác và trọng tâm tam giác phù hợp hơn với biên cong. Tại khu vực mép lỗ các lưới được chia với khoảng cách đủ nhỏ vừa phản ánh đúng điều kiện làm việc vừa đảm bảo khối lượng tính toán. Theo [1] khi sử dụng bu lông có đường kính  $d = 22$  mm thì có các dạng lỗ bu lông là:

+ Lỗ tròn tiêu chuẩn có  $d_1 = 24$  mm (Lỗ TC);

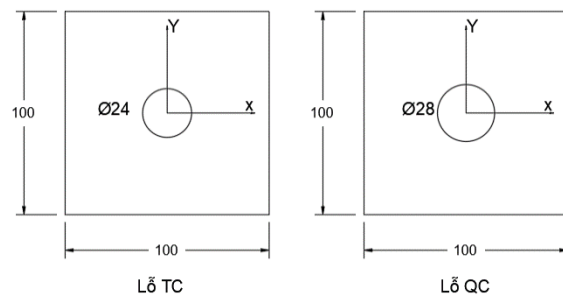
+ Lỗ tròn quá cỡ có  $d_2 = 28$  mm (Lỗ QC);

+ Lỗ ô van ngắn: Trục ngắn x dài = 24 x 30 mm, khoan theo phương ngang (Lỗ E2430n);

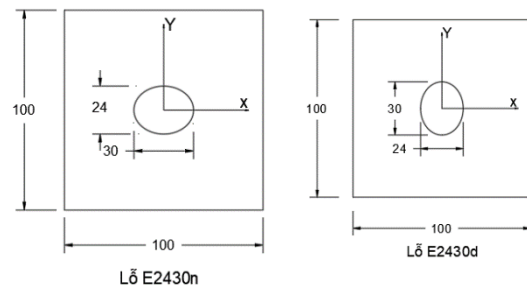
+ Lỗ ô van dài: Trục ngắn x dài = 24 x 30 mm, khoan theo phương dọc (Lỗ E2430d);

+ Lỗ ô van ngắn: Trục ngắn x dài = 24 x 55 mm, khoan theo phương ngang (Lỗ E2455n);

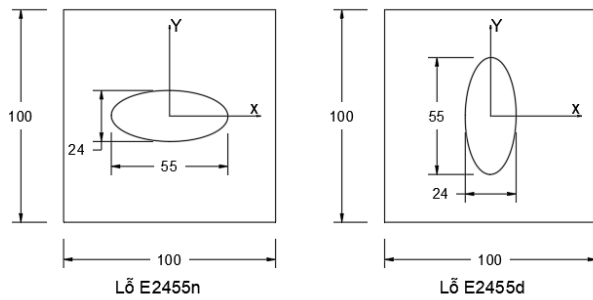
+ Lỗ ô van dài: Trục ngắn x dài = 24 x 55 mm, khoan theo phương dọc (Lỗ E2455d).



Hình 1. Cấu tạo lỗ chuẩn, quá cỡ.

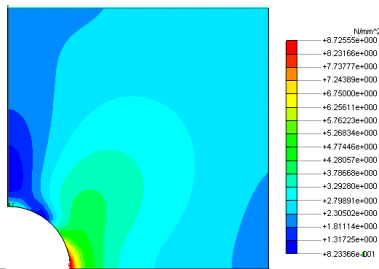


Hình 2. Lỗ ô van ngắn.

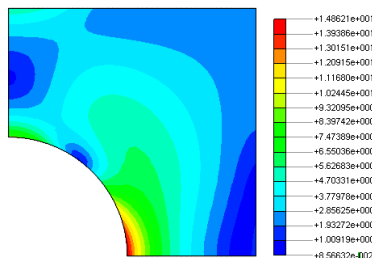


Hình 3. Lỗ ovan dài.

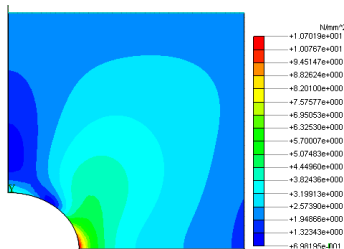
Do các tấm là đối xứng theo hai phương nên khi phân tích ta chỉ phân tích cho 1 phần tư tấm, tấm chịu tải trọng phân bố đều theo phương y trên mép theo trục x của tấm, tải trọng có độ lớn bằng 20 kN/m. Sử dụng phương pháp đã trình bày ở mục 2, ta thu được kết quả như hình 4, 5, 6, 7, 8, 9:



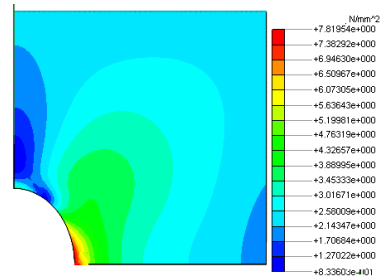
Hình 4. Trường ứng suất lỗ chuẩn.



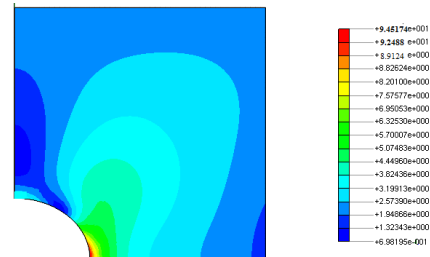
Hình 5. Trường ứng suất lỗ quá cỡ.



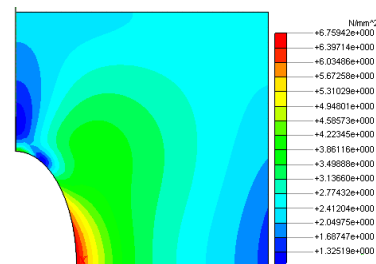
Hình 6. Trường ứng suất lỗ ovan ngắn chịu lực theo phương ngang lỗ.



Hình 7. Trường ứng suất lỗ ovan ngắn chịu lực theo phương dọc lỗ.



Hình 8. Trường ứng suất lỗ ovan dài chịu lực theo phương ngang lỗ.



Hình 9. Trường ứng suất lỗ ovan dài chịu lực theo phương dọc lỗ.

Kết quả phân bố ứng suất cho thấy ứng suất cục bộ tại mép lỗ lớn nhất theo phương x và giảm rất nhanh khi điểm tính ứng suất càng xa lỗ khoan.

Lỗ quá cỡ có ứng suất tập trung lớn nhất trong các loại lỗ (gấp 1.703 lần so với ứng suất của lỗ chuẩn và giá trị ứng suất lớn nhất trong biểu đồ ứng suất chiếm 0.2%). Vì vậy nên sử dụng lỗ quá cỡ cho các lớp liên kết chịu ma sát, khi đó các bản ép vào nhau nhờ lực xiết trong các bu lông, lực ép giữa các bản đủ lớn không cho các bản trượt. Không dùng lỗ quá cỡ cho liên kết làm việc ép mặt khi đó thân bu lông ép mặt lên thép cơ bản tạo ra ứng suất cục bộ lớn tại mép lỗ.

So sánh ứng suất cục bộ của hai dạng lỗ ovan trong trường hợp cạnh dài của ovan nằm song song và vuông góc với phương tác dụng

của lực. Với trường hợp cạnh dài ovan nằm vuông góc với phương tác dụng của lực thì cho ứng suất cục bộ lớn hơn. Qua đó ta nên hạn chế sử dụng lỗ ovan có cạnh dài vuông góc với phương tác dụng của lực để tránh trường hợp lỗ bị phá hoại.

#### 4. Kết luận

Từ kết quả phân tích ở trên, tác giả nhận thấy ứng suất tập trung lớn nhất theo phương x, phương vuông góc với lực tác dụng. Ứng suất cục bộ phát triển nhanh theo phương x từ mép lỗ đến phía ngoài liên kết.

Đối với lỗ quá cỡ và lỗ ô van dài tỷ lệ phần trăm có ứng suất lớn nhất chiếm cao (tương ứng với 0.2% và 0.3%). Do đó tác giả khuyến cáo có thể sử dụng lỗ chuẩn, lỗ elip cạnh ngắn và cạnh dài cho các liên kết bu lông cường độ cao chịu ma sát hoặc ép mặt. Tuy nhiên khi sử dụng lỗ elip cạnh ngắn và dài cho liên kết chịu ép mặt thì phải chú ý đặt cạnh dài song song với phương tác dụng của lực. Đối với lỗ quá cỡ thì chỉ được dùng trong liên kết bu lông cường độ cao chịu ma sát. Trong nghiên cứu này tác giả chưa đề cập đến ảnh hưởng của nhóm lỗ trong cùng một liên kết và ứng suất dư mới chỉ dừng lại do nguyên nhân do quá trình gia công trong nhà máy.

Đây chính là hướng mở rộng nghiên cứu tiếp khi xét đến ảnh hưởng của nhóm lỗ bu lông và ảnh hưởng của ứng suất dư do đầy đủ các nguyên nhân □

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Bộ giao thông vận tải, *Tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN 272-05*, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, 2005
- [2] Hiroo KATAOKA, *Evaluation of stresses around fish bolt holes of jointed rails*, 7th International Heavy Haul Conference, 2001.
- [3] W.Z.Zhuang, *Prediction of rack growth from bolt holes in a disc*, International Journal of Fatigue, 2000.
- [4] Daryl L.Logan, *A first course in the finite element method*, fifth edition.
- [5] William J. Palm III, University of Rhode Island, *MATLAB for Engineering Applications*, 4e.
- [6] Stormy Attaway, Boston University, *MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving*, 5e.
- [7] Holly Moore, Salt Lake Community College, *MATLAB for Engineers*, 5e.
- [8] *Design of highway Bridge An LRFD Approach* Third Edition.

**Ngày nhận bài: 25/4/2019**

**Ngày chuyển phản biện: 29/4/2019**

**Ngày hoàn thành sửa bài: 20/5/2019**

**Ngày chấp nhận đăng: 27/5/2019**