Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, NUCE 2020. 14 (5V): 77–86

ỨNG DỤNG KỸ THUẬT FLAT-JACK KHẢO SÁT TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT CỦA CÁC CẤU KIỆN CHỊU NÉN

Vũ Chí Công[a,*], Vũ Anh Tuấn[a], Nguyễn Hồng Minh[a]

[a]*Khoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng, số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 28/08/2020, Sửa xong 17/10/2020, Chấp nhận đăng 21/10/2020

Tóm tắt

Xác định trạng thái ứng suất phát sinh trong mỗi bộ phận kết cấu là một công việc rất quan trọng giúp đánh giá và tối ưu hóa kích thước hệ kết cấu chịu lực. Tuy nhiên, đây là một phép đo hết sức phức tạp và thường được xác định gián tiếp từ phép đo biến dạng. Kỹ thuật kích phẳng (flat jack) là một phương pháp thí nghiệm "không phá hủy" và thực hiện khá đơn giản, cho phép chúng ta xác định trực tiếp được ứng suất phát sinh trong cấu kiện thông qua giá trị áp suất dầu được bơm vào kích phẳng. Dựa trên các phân tích bằng mô hình số trên các cấu kiện chịu nén, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp diễn giải kết quả thí nghiệm kích phẳng để theo dõi sự phát triển ứng suất trong các cấu kiện chịu nén nói chung và áp dụng để giải thích sự thay đổi theo thời gian của trạng thái ứng suất phát sinh trong kết cấu vỏ hầm bê tông.

Từ khoá: kích phẳng; cấu kiện chịu nén; tường gạch xây; vỏ hầm; phép đo ứng suất.

APPLICATION THE FLAT-JACK TECHNIQUE FOR INVESTIGATING THE STRESS STATE IN COMPRESSION MEMBERS

Abstract

Determination of the stress state within a structural element is an important work for evaluating or optimizing the structural design. Nevertheless, that is a complicated measurement and often performed indirectly from the strain measurement. The flat jack technique, a non-destructive test and simple experiment, allows to directly determine the stresses within structure via the oil pressure pumped into the jack. Based on numerical modelling of two types of compression members, this paper proposes a novel interpretation of flat jack measurement to follow the evolution of the stress state in structural elements subjected compression loading in general and apply for interpreting the orthoradial stress evolution in a concrete tunnel lining as function of time.

Keywords: flatjack; compression members; mansory wall; tunnel lining; stress measurement.

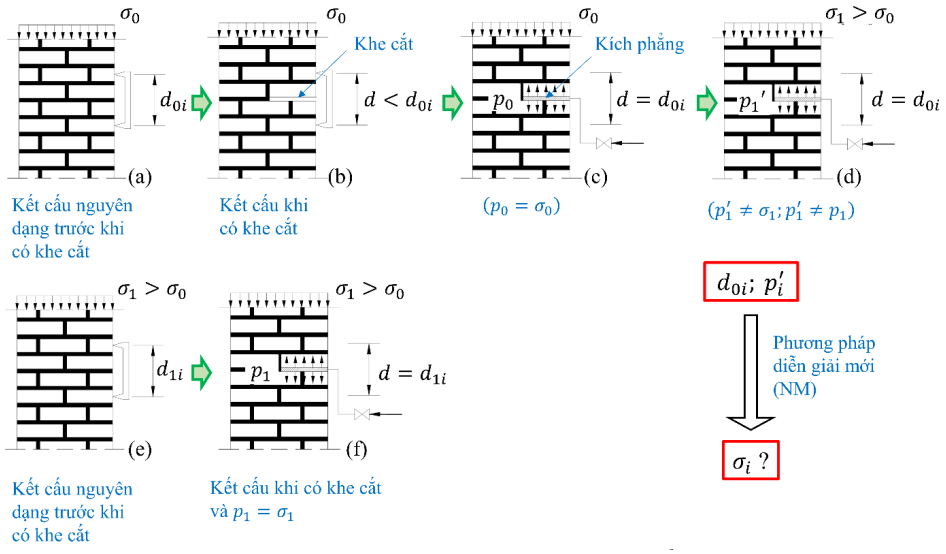
https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(5V)-07 © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Để xác định ứng suất phát sinh trong kết cấu, thông thường, có ba phương pháp được sử dụng: (1) đo trực tiếp thông qua các đầu đo ứng suất (stress gauge); (2) xác định gián tiếp thông qua các đầu đo biến dạng (strain gauge); và (3) xác định gián tiếp thông qua áp suất đo được từ thiết bị đo phụ trợ (ví dụ: flatjack technique - thí nghiệm kích phẳng) [1, 2]. Trong đó "kỹ thuật kích phẳng"là một phương pháp đo khá đơn giản và hiệu quả nhằm xác định: (i) ứng suất nén tại hiện trường (in-situ) của các kết cấu khác nhau như đập bê tông [3], vỏ hầm [4]; hoặc (ii) cường độ chịu nén của các vật liệu như gạch [5–9]; đá [10] ... Để đo được ứng suất nén phát sinh trong kết cấu, kỹ thuật này dựa trên nguyên

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* congvc@nuce.edu.vn (Công, V. C.)

lý cung cấp vào trong kích phẳng một áp suất nhằm cân bằng với ứng suất được giải phóng ra do việc tạo ra một khe cắt mỏng vuông góc với bề mặt chịu lực của kết cấu cần đo. Kỹ thuật kích phẳng có thể coi như là một thí nghiệm không phá hủy vì khe cắt có kích thước khá nhỏ so với kết cấu và sau thí nghiệm chúng ta có thể dễ dàng thu hồi lại được kích phẳng cũng như khôi phục lại kết cấu bằng việc chèn vữa bổ sung vào khe cắt.



Hình 1. Nguyên lý của kỹ thuật kích phẳng [11]

Theo tiêu chuẩn ASTM-C1196 [11], các bước cơ bản của thí nghiệm sử dụng một kích phẳng nhằm xác định ứng suất nén tại hiện trường được minh họa trên Hình 1. Bước đầu tiên là xác định khoảng cách ban đầu d_{0i} giữa hai điểm đo cố định trên bề mặt kết cấu (Hình 1(a)). Tiếp theo, một khe cắt mỏng được tạo ra tại vị trí chính giữa hai điểm đo (Hình 1(b)). Dưới tác dụng của trường ứng suất nén σ_0, khoảng cách giữa hai điểm đo bị thu hẹp lại là $d < d_{0i}$ (Hình 1(b)). Kích phẳng sau đó được chèn vào khe cắt và dầu được bơm vào kích phẳng nhằm khôi phục lại vị trí ban đầu của hai điểm đo $d = d_{0i}$ (Hình 1(c)). Về mặt lý thuyết, với giả thiết trường ứng suất nén là đồng đều trên diện tích nhỏ của khe cắt, do đó áp suất dầu trong kích phẳng tại bước này (Hình 1(c)) là $p_0 = \sigma_0$. Tuy nhiên do sự hao hụt dầu bơm, sai số về kích thước, hình dạng của kích phẳng và sự không đồng nhất của kết cấu, giá trị ứng suất tại hiện trường (σ) được xác định theo công thức sau [8, 11]:

$$\sigma = K_a K_m p \tag{1}$$

trong đó, p là áp suất dầu trong kích phẳng nhằm khôi phục lại vị trí ban đầu của hai điểm đo; K_a là tỉ số giữa diện tích kích phẳng với diện tích khe cắt; K_m là hệ số hiệu chỉnh của kích phẳng, phụ thuộc vào áp suất (p) và hình dạng của kích phẳng [8]. Trong nghiên cứu này, phương pháp xác định ứng suất trong kết cấu theo công thức (1) được gọi là "phương pháp cổ điển (CM)".

Như minh họa trên Hình 1, sử dụng kỹ thuật kích phẳng để theo dõi sự phát triển theo thời gian của ứng suất trong kết cấu ($\sigma_0 \rightarrow \sigma_1$), có hai cách thực hiện như sau:

- Cách 1: Sử dụng một kích phẳng mới với các bước (a, b, c) trên Hình 1 được lặp lại. Tuy nhiên, khoảng cách ban đầu lúc này là d_{1i} tương ứng với trạng thái ứng suất σ_1 và $d_{1i} \neq d_{0i}$ (Hình 1(e)). Ứng suất σ_1 sau đó được xác định thông qua giá trị áp suất trong kích phẳng p_1 bằng việc sử dụng công thức (1).

- Cách 2: Kích phẳng sau thí nghiệm đầu tiên (Hình 1(a), (b), (c)) được giữ lại tại khe cắt. Giả sử tại thời điểm bất kỳ, ứng suất nén trong kết cấu lúc này là $\sigma_1 > \sigma_0$ (Hình 1(d)), áp suất dầu trong kích phẳng là p_0 sẽ không đủ để khôi phục lại khoảng cách ban đầu giữa hai điểm đo d_{0i}. Thay vào đó, cần cung cấp một áp suất $p'_1 > p_0$ nhằm đáp ứng yêu cầu này (Hình 1(d)). Tuy nhiên, chúng ta không thể sử dụng công thức (1) để xác định giá trị ứng suất σ_1 từ giá trị áp suất p'_1, vì d_{0i} không phải là khoảng cách ban đầu giữa hai điểm đo (d_{1i}) tương ứng với ứng suất σ_1 (như trong Hình 1(e)).

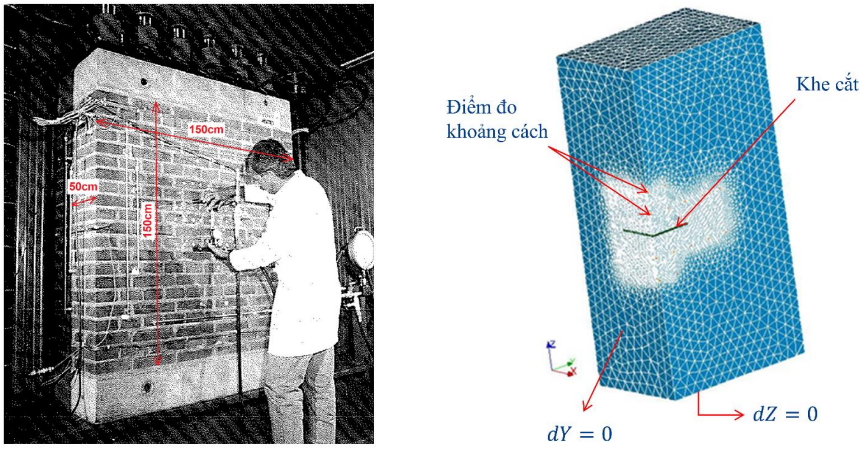
Mục đích của bài báo này là đề xuất một phương pháp mới (NM) để diễn giải kết quả của thí nghiệm kích phẳng (theo cách 2 như minh họa trên Hình 1d) nhằm phân tích sự phát triển theo thời gian của ứng suất nén phát sinh trong các kết cấu chịu nén chính. Áp dụng các tính toán giải tích kết hợp với phân tích mô hình số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) (Code-Aster [12]), mối quan hệ giữa áp suất trong kích phẳng với ứng suất trong hai dạng kết cấu: kết cấu tường xây bằng gạch và kết cấu vỏ hầm bằng bê tông được xác định. Những công thức này sau đó được sử dụng để diễn giải các kết quả ứng suất xác định từ thí nghiệm kích phẳng được thực hiện tại MHM-URL (Meuse/Haute-Marne-Underground Research Laboratory) và so sánh với kết quả thu được từ các thí nghiệm sử dụng đầu đo ứng suất trực tiếp.

2. Phương pháp diễn giải mới (NM)

Thông qua các phân tích mô hình số theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) áp dụng cho hai dạng kết cấu: (i) tường gạch xây dưới tác động của tải trọng nén phân bố đều; và (ii) vỏ hầm dưới tác dụng của tải trọng nén hướng tâm phân bố đều, mối quan hệ giữa ứng suất σ_1 với hai thông số d_{0i} và p'_1 (xem minh họa ở Hình 1(d)) được thiết lập.

2.1. Kết cấu tường gạch xây

Trong phần này, chúng ta thực hiện phân tích mô hình số mô phỏng lại thí nghiệm kích phẳng trên kết cấu tường gạch xây đã được Rossi [8] thực hiện năm 1985. Mẫu thí nghiệm có kích thước (cao × rộng × dày = 150 × 150 × 50 cm) chịu tác dụng của tải trọng phân bố đều ở cạnh trên của tường (xem



(a) Thí nghiệm kích phẳng trên mẫu tường gạch xây dưới tác dụng của tải trọng phân bố đều [8]

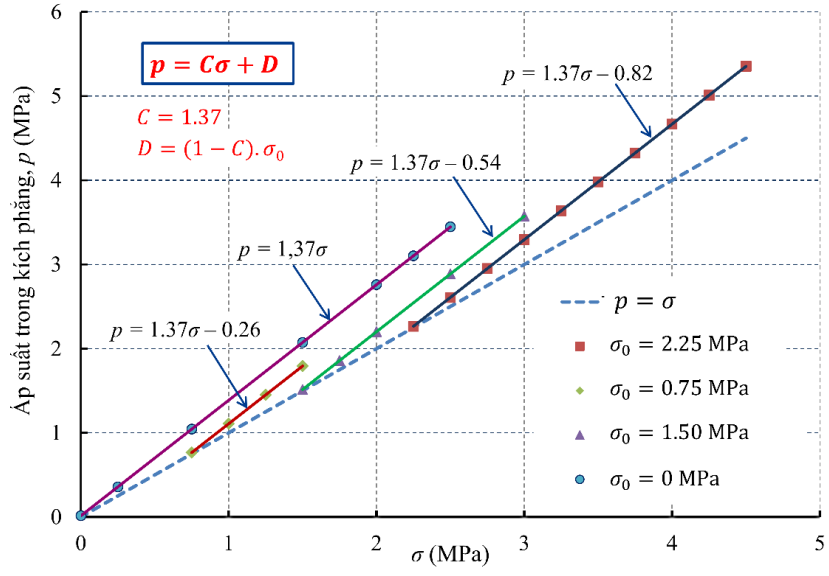
(b) Mô hình số theo phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng cho mô phỏng thí nghiệm kích phẳng bên trái

Hình 2. Mô phỏng số thí nghiệm kích phẳng thực hiện trên mẫu tường gạch xây

Hình 2(a)). Tải trọng phân bố đều tác dụng lên đỉnh tường được tạo ra bởi các kích thủy lực với các cấp áp suất nén biết trước và được gọi là "tải trọng tác dụng". Thông số này sau đó được so sánh với "ứng suất đo được" trong tường được chỉ ra từ thí nghiệm kích phẳng. Thực hiện nhiều thí nghiệm với các giá trị tải trọng tác dụng và hình dạng kích phẳng khác nhau, Rossi [8] đã xác định được tương quan giữa ứng suất đo được và tải trọng tác dụng. Tương quan giữa hai thông số này cũng có ý nghĩa tương tự như mối quan hệ giữa σ_1 và p'_1 trên Hình 1(d). Do tính chất đối xứng của mẫu thí nghiệm (Hình 2(a)), chúng ta chỉ mô hình một nửa mẫu tường gạch như thể hiện trên Hình 2(b). Hai mô hình được sử dụng tương ứng với hai trạng thái: (Mô hình 1) kết cấu nguyên dạng (trước khi có khe cắt) và (Mô hình 2) kết cấu sau khi có khe cắt. Các điều kiện biên (thể hiện thông qua ràng buộc về chuyển vị theo các trục dX, dY, dZ) được sử dụng trong mô hình như thể hiện trên Hình 2(b); áp suất dầu trong kích phẳng (p) được gán phân bố đều trực tiếp lên hai bề mặt trong của khe cắt.

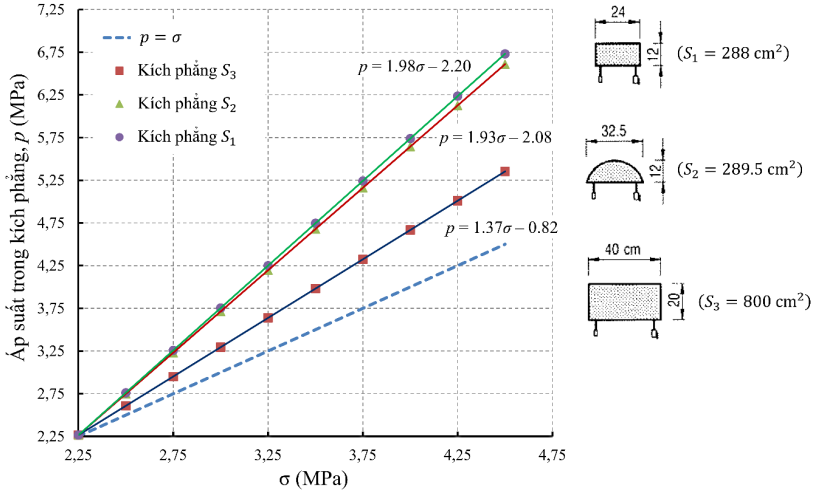
Sử dụng kết quả đo chuyển vị của các điểm đo trên tường được cung cấp bởi Rossi trong [8], hai thông số đàn hồi của mẫu được xác định như sau: Môđun đàn hồi E = 3800 MPa và hằng số Poisson là ν = 0,25. Hai giá trị này sau đó được sử dụng như thông số đầu vào cho các mô phỏng bằng mô hình số.

Trên mô hình 1 tương ứng với trạng thái nguyên dạng của kết cấu (không có khe cắt), với tải trọng tác dụng ban đầu là σ_0, chúng ta có khoảng cách ban đầu (tham chiếu) giữa hai điểm đo là $d_i(\sigma_0)$. Bốn giá trị σ_0 được xem xét: σ_0 =0; 0,75; 1,50 và 2,25 MPa. Thông qua phân tích FEM, giá trị khoảng cách tham chiếu $d_i(\sigma_0)$ tương ứng với từng cấp tải trọng σ_0 được xác định. Ở mỗi một giá trị σ_0, trên mô hình 2 tương ứng với trạng thái khi kết cấu đã có khe cắt, chúng ta thay đổi các giá trị (σ) từ σ_0 đến $2\sigma_0$ với bước tăng tải $\Delta\sigma$ = 0,25MPa. Tương ứng với một cặp giá trị ứng suất (σ_0, σ), áp suất trong kích phẳng (mô phỏng) (p) được xác định thông qua phân tích FEM ngược nhằm thỏa mãn điều kiện khoảng cách giữa hai điểm đo trên mô hình 2 (kết cấu có khe cắt) $d = d_{0i}$. Hình 3 thể hiện mối quan hệ giữa (p) và (σ) tương ứng với các cấp tải trọng ban đầu (σ_0) khác nhau. Chúng ta nhận thấy rằng, trong cả bốn cấp tải trọng, σ_0, p và σ phụ thuộc tuyến tính với nhau theo công thức: $p = C\sigma + D$,



Hình 3. Mối quan hệ giữa áp suất dầu trong kích phẳng (p) và tải trọng tác dụng lên tường (σ) tương ứng với các cấp tải trọng ban đầu (σ_0) khác nhau. Kích phẳng (khe cắt trên mô hình) là hình chữ nhật có kích thước (dài × rộng = 40 × 20 cm)

trong đó (C, D = const). Trên Hình 3, dễ dàng nhận thấy hằng số C không phụ thuộc vào tải trọng ban đầu σ_0. Tuy nhiên, như thể hiện trên Hình 4, C bị thay đổi tùy theo kích thước của kích phẳng, C tăng khi diện tích của kích phẳng giảm. Cũng trên Hình 4, hai kích phẳng S_1 và S_2 tuy có hình dạng khác nhau nhưng diện tích bề mặt gần bằng nhau thì có hằng số C gần như nhau. Điều này có nghĩa là, hằng số C chỉ phụ thuộc duy nhất vào kích thước của kích phẳng. Vì đường thẳng $p = C\sigma + D$ phải đi qua điểm ($p = \sigma_0, \sigma = \sigma_0$), do đó chúng ta có thể suy ra $D = (1 - C)\sigma_0$.



Hình 4. Mối quan hệ giữa áp suất dầu trong kích phẳng (p) và tải trọng tác dụng (σ) cho các kích phẳng có hình dạng khác nhau tương ứng với cấp tải trọng ban đầu (σ_0 = 2,25 MPa)

Từ kết quả phân tích ở trên, có thể kết luận rằng nếu sử dụng một kích phẳng được giữ lại trong khe cắt để theo dõi sự phát triển của ứng suất trong kết cấu thì: tại các thí nghiệm sau thí nghiệm đầu tiên, ứng suất trong kết cấu (σ) phải được hiệu chỉnh như công thức (2) dưới đây:

$$\sigma = \frac{p}{C} + (1 - C)\frac{\sigma_0}{C} \tag{2}$$

trong đó, C là hằng số phụ thuộc vào kích thước kích phẳng.

2.2. *Kết cấu vỏ hầm*

Không giống như kết cấu tường gạch xây ở phần trên (a), tải trọng tác dụng lên mặt trên của vỏ hầm khác ứng suất nén trong vỏ hầm. Hơn thế nữa, giá trị ứng suất này không phân bố đều trên toàn bộ mặt cắt và phụ thuộc vào chiều dày của vỏ hầm. Xem vỏ hầm như một ống dài vô hạn chịu tác dụng của tải trọng hướng tâm phân bố đều σ_c trên toàn bộ diện tích mặt ngoài vỏ hầm, áp dụng lý thuyết đàn hồi, ứng suất và chuyển vị trong vỏ hầm được xác định theo các công thức sau [13]:

$$\sigma_{rr} = \sigma_c \frac{R_{ext}^2(r^2 - R_{\text{int}}^2)}{r^2(R_{ext}^2 - R_{\text{int}}^2)} \tag{3}$$

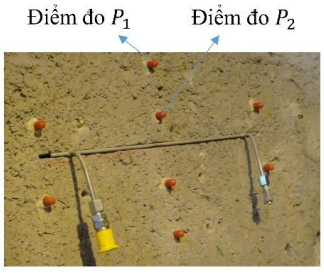
$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_c \frac{R_{ext}^2(r^2 + R_{\text{int}}^2)}{r^2(R_{ext}^2 - R_{\text{int}}^2)} \tag{4}$$

$$u_r = \sigma_c \left(\frac{R_{ext}^2 r}{2(\lambda + G)(R_{ext}^2 - R_{\text{int}}^2)} + \frac{R_{ext}^2 R_{\text{int}}^2}{2G(R_{ext}^2 - R_{\text{int}}^2)r} \right) \tag{5}$$

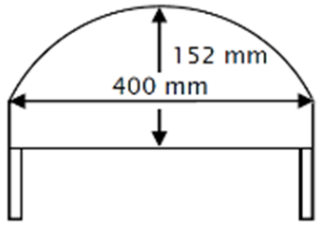
trong đó, σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$, u_r lần lượt là ứng suất hướng tâm, ứng suất tiếp tuyến và chuyển vị hướng tâm; R_{int} và R_{ext} lần lượt là bán kính trong và ngoài của vỏ hầm ($R_{\text{int}} \leq r \leq R_{ext}$); λ và G là các hằng số Lamé.

Để thiết lập mối quan hệ giữa áp suất trong kích phẳng và ứng suất tiếp tuyến trong vỏ hầm, chúng ta sẽ tiến hành phân tích mô hình số mô phỏng lại thí nghiệm kích phẳng (Hình 5) đã được thực hiện tại MHM-URL như thể hiện trên Hình 6. Trong đó, tải trọng σ tác dụng lên vỏ hầm được giả thiết là tải trọng hướng tâm phân bố đều trên mặt ngoài của vỏ hầm. Vỏ hầm là bê tông được phun tại chỗ với chiều dày là 31 cm và có đường kính trong là 2,15 m. Bê tông có môđun đàn hồi $E = 30$ GPa và hệ số Poisson $\nu = 0{,}25$. Hai vị trí đo khoảng cách ban đầu được cố định trên vỏ hầm với khoảng cách so với tâm kích phẳng (khe cắt) là 250 mm (điểm đo P1) và 100 mm (điểm đo P2) (xem Hình 5). Do tính đối xứng của kết cấu và vị trí thí nghiệm, chúng ta chỉ phân tích một phần tư mô hình của vỏ hầm như thể hiện trên Hình 6. Các bước phân tích chính như sau: (1) xác định các giá trị chuyển vị thẳng đứng u_{01}^0 và u_{02}^0 của hai điểm đo P1 và P2 trên kết cấu nguyên dạng trước khi có khe cắt dưới tác động của tải trọng $\sigma = \sigma_0$; (2) xác định các giá trị chuyển vị thẳng đứng u_{01} và u_{02} tại hai điểm đo P1 và P2 trên kết cấu nguyên dạng trước khi có khe cắt dưới tác động của tải trọng $\sigma \geq \sigma_0$; (3) xác định các chuyển vị thẳng đứng u_1 và u_2 tại hai điểm đo P1 và P2 trên kết cấu đã có khe cắt nhưng chưa đặt kích phẳng; (4) trên kết cấu đã có khe cắt với giá trị tải trọng $\sigma \geq \sigma_0$, xác định giá trị áp suất trong kích phẳng p_1 và p_2 nhằm lần lượt thỏa mãn điều kiện $u_1 = u_{01}$ và $u_2 = u_{02}$; (5) trên kết cấu đã có khe cắt với giá trị tải trọng $\sigma \geq \sigma_0$, xác định giá trị áp suất cần cung cấp vào trong kích phẳng p_{1m} và p_{2m} nhằm thỏa mãn lần lượt điều kiện $u_1 = u_{01}^0$ và $u_2 = u_{02}^0$. Các bước (1) (2) và (3) được phân tích trực tiếp qua mô hình số theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Trong khi đó, kết quả ở bước (4) và (5) được xác định thông qua chương trình phân tích ngược (inverse analysis) lập trình bằng PYTHON [14].

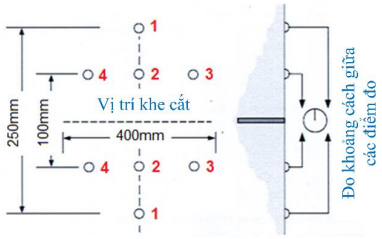




(a) Lắp đặt kích phẳng và thực hiện đo khoảng cách giữa các điểm đo



(b) Kích thước kích phẳng sử dụng



(c) Vị trí các điểm đo khoảng cách trên mặt trong vỏ hầm

Hình 5. Thí nghiệm kích phẳng được thực hiện tại MHM-URL

Dưới tác dụng của tải trọng hướng tâm phân bố đều σ, các chuyển vị u_{01} và u_{02} có thể được xác định thông qua chuyển vị hướng tâm u_r trong công thức (5) như sau:

$$u_{01} = u_r(R_{\text{int}}) \sin\theta_1 \tag{6}$$

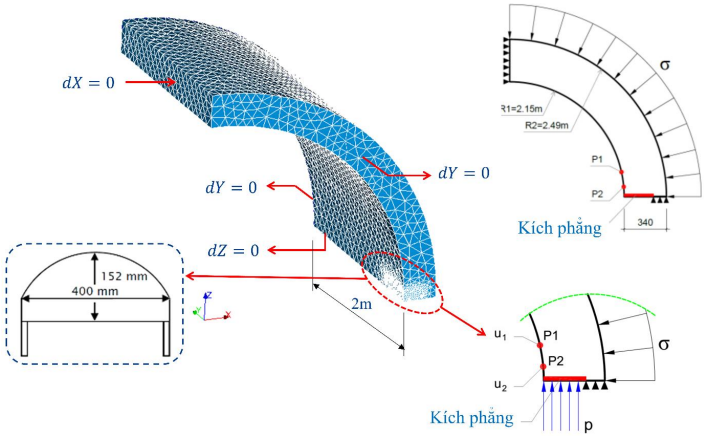
$$u_{02} = u_r(R_{\text{int}}) \sin\theta_2 \tag{7}$$

Sự thay đổi của các áp suất trong kích phẳng $p_i\,(i = 1,2)$ theo ứng suất tiếp tuyến $\sigma_{\theta\theta}\,(R_{\text{int}})$ dưới tác động của tải trọng thay đổi từ 0,5 MPa đến 2,5 MPa được thể hiện trên Hình 7, trong đó $\sigma_{\theta\theta}\,(R_{\text{int}})$ được xác định từ công thức (4). Kết quả chỉ ra rằng (i) p_1 và p_2 khác nhau $\left(\dfrac{p_1}{p_2} \sim 1{,}3\right)$, do đó việc sử dụng các giá trị $p_i\,(i = 1,2)$ để xác định một giá trị σ theo công thức (1) là không hợp lý trong trường hợp của kết cấu vỏ hầm; (ii) $p_i\,(i = 1,2)$ và $\sigma_{\theta\theta}\,(R_{\text{int}})$ phụ thuộc tuyến tính với nhau và có thể được minh họa bởi các biểu thức như sau:

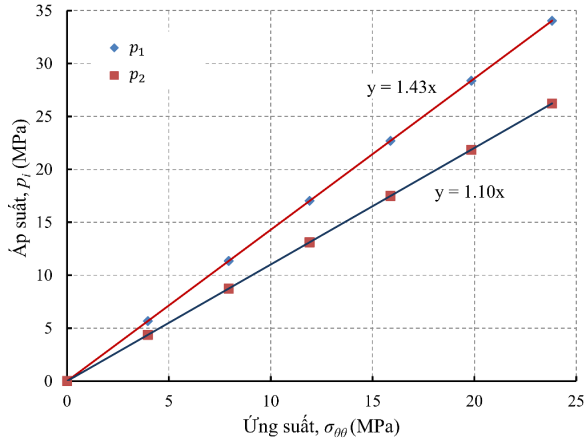
$$p_1 = C_1\sigma_{\theta\theta} = 1{,}43\sigma_{\theta\theta} \tag{8}$$

$$p_2 = C_2\sigma_{\theta\theta} = 1{,}10\sigma_{\theta\theta} \tag{9}$$

trong đó, hệ số góc $C_i\,(i = 1,2)$ tăng khi khoảng cách của điểm đo so với vị trí kích phẳng tăng.



Hình 6. Mô hình số mô phỏng thí nghiệm kích phẳng thực hiện tại MHM-URL

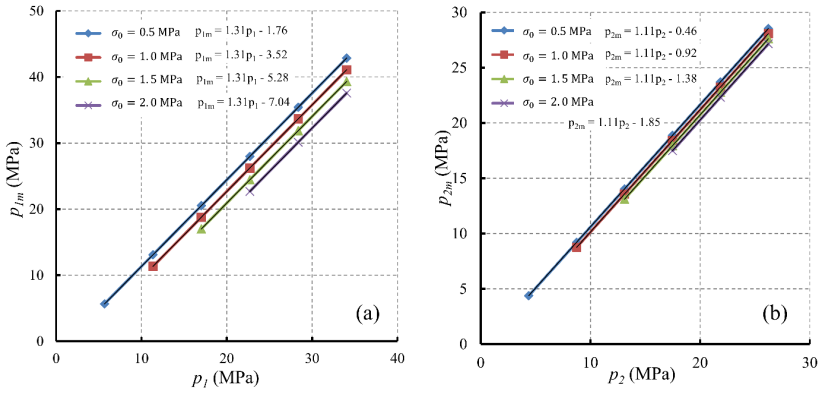


Hình 7. Sự thay đổi của các áp suất trong kích phẳng p_1, p_2 theo ứng suất tiếp tuyến $\sigma_{\theta\theta}\,(R_{\text{int}})$

Tương tự như với kết cấu gạch xây ở trên, bốn giá trị của tải trọng ban đầu σ_0 = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 MPa được xem xét để thiết lập mối quan hệ giữa p_i và p_{im} $(i = 1,2)$. Ứng với mỗi giá trị σ_0, các giá

trị p_i và p_{im} $(i = 1, 2)$ được xác định thông qua các phân tích ngược nhằm thỏa mãn hai điều kiện lần lượt là $u_i = u_{0i}\,(i = 1, 2)$ và $u_i = u_{0i}^0\,(i = 1, 2)$ cho các giá trị tải trọng khác nhau $\sigma \geq \sigma_0$. Hình 8 thể hiện sự thay đổi của p_{1m} và p_{2m} theo p_1 và p_2. Chúng ta nhận thấy rằng, với các giá trị σ_0 khác nhau, p_{im} và $p_i\,(i = 1, 2)$ quan hệ tuyến tính với nhau theo các đường thẳng song song với cùng một hệ số góc C_{im}:

$$p_{im} = C_{im} p_i + b_i, \text{ với } (i = 1, 2) \tag{10}$$



Hình 8. Mối quan hệ giữa các áp suất trong kích phẳng: (a) p_1 và p_{1m}; (b) p_2 và p_{2m} tương ứng với các giá trị σ_0 khác nhau

Như trên Hình 8, xấp xỉ hàm cho kết quả $C_{1m} = 1{,}30$ và $C_2 = 1{,}11$, trong khi đó giá trị b_i phụ thuộc theo tải trọng ban đầu σ_0. Áp dụng với trường hợp $\sigma = \sigma_0$, chúng ta có $p_{im} = p_i$, từ các công thức (4) và (10), giá trị $b_i\,(i = 1, 2)$ có thể được xác định theo công thức sau:

$$b_i = (1 - C_{im}) C_i \frac{2R_{ext}^2}{(R_{ext}^2 - R_{\text{int}}^2)} \sigma_0, \text{ với } (i = 1, 2) \tag{11}$$

Thay các công thức (9) và (11) vào công thức (10), chúng ta có:

$$p_{im} = C_{im} C_i \sigma_{\theta\theta} + (1 - C_{im}) C_i \frac{2R_{ext}^2}{(R_{ext}^2 - R_{\text{int}}^2)} \sigma_0, \text{ với } (i = 1, 2) \tag{12}$$

hoặc

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{C_{im} C_i} p_{im} + \frac{(C_{im} - 1)}{C_{im}} \frac{2R_{ext}^2}{(R_{ext}^2 - R_{\text{int}}^2)} \sigma_0, \text{ với } (i = 1, 2) \tag{13}$$

Nếu sử dụng kỹ thuật kích phẳng để theo dõi sự phát triển ứng suất trong kết cấu theo "cách 2" công thức (13) cho phép xác định được ứng suất tiếp tuyến $\sigma_{\theta\theta}$ tại mặt trong của vỏ hầm từ các giá trị áp suất trong kích phẳng (p_{im}) và tải trọng ban đầu (σ_0). Thông thường, giá trị σ_0 được giả thiết bằng 0 nếu thí nghiệm kích phẳng được thực hiện ngay sau khi vỏ hầm vừa xây dựng xong [15]. Tuy nhiên trên thực tế việc này là rất khó thực hiện vì để đảm bảo an toàn, kết cấu vỏ hầm bằng bê tông được phun ngay sau khi kết thúc chu kỳ đào. Một cách đơn giản hóa,với $\sigma_0 = 0$, công thức (12) trở thành:

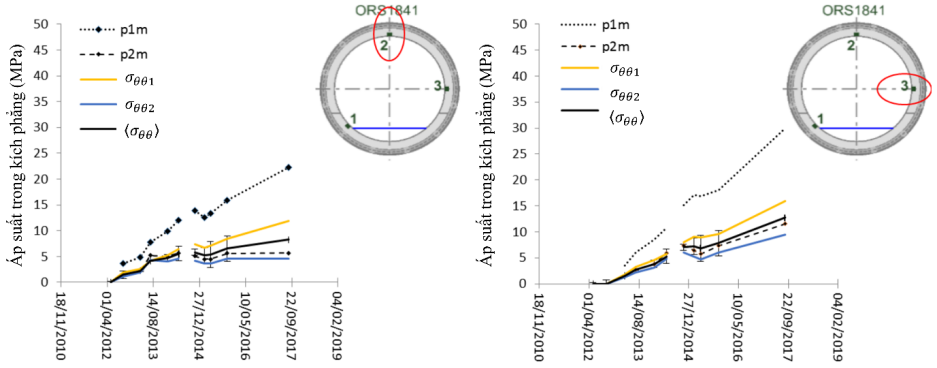
$$p_{im} = C_{im} C_i \sigma_{\theta\theta}, \text{ với } (i = 1, 2) \tag{14}$$

Thay các giá trị C_{im} và C_i tìm ra ở trên vào công thức (14), ta có mối quan hệ giữa $p_{im}\,(i = 1, 2)$ với $\sigma_{\theta\theta}$ trong trường hợp thí nghiệm kích phẳng tại MHM-URL như sau:

$$p_{1m} = 1{,}87\sigma_{\theta\theta}; \quad p_{2m} = 1{,}22\sigma_{\theta\theta} \quad \text{và} \quad \frac{p_{1m}}{p_{2m}} = 1{,}54 \tag{15}$$

3. Áp dụng phương pháp diễn giải mới (NM) cho thí nghiệm kích phẳng tại MHM-URL

Sự thay đổi của các áp suất trong kích phẳng $p_{im}\,(i = 1, 2)$ theo thời gian, thu được từ các thí nghiệm kích phẳng thực hiện tại MHM-URL được thể hiện trên Hình 9. Từ các giá trị áp suất $p_{im}\,(i = 1, 2)$, giá trị ứng suất tiếp tuyến $(\sigma_{\theta\theta})$ tại mặt trong của vỏ hầm được xác định từ công thức (15). Sự thay đổi theo thời gian của ứng suất $(\sigma_{\theta\theta})$ tại các vị trí thí nghiệm kích phẳng khác nhau ở cùng một mặt cắt vỏ hầm cũng được trình bày trên Hình 9. Về mặt lý thuyết, cả hai giá trị áp suất p_{1m} và p_{2m} phải cho ra một giá trị ứng suất $\sigma_{\theta\theta}$. Tuy nhiên, như thể hiện trên Hình 9: (i) p_{1m} lớn hơn khá nhiều so với p_{2m}; (ii) tồn tại hai giá trị $\sigma_{\theta\theta}(\sigma_{\theta\theta1}$ và $\sigma_{\theta\theta})$ tương ứng với p_{1m} và p_{2m}; và (iii) sự khác nhau giữa $\sigma_{\theta\theta1}$ và $\sigma_{\theta\theta2}$ và giữa các giá trị ứng suất này với các áp suất tương ứng $(p_{1,2m})$ ngày càng tăng theo thời gian. Sự vượt trội về giá trị của p_{1m} so với p_{2m} cũng như sự chênh lệch lớn giữa hai giá trị này so với ứng suất tương ứng $\sigma_{\theta\theta1,2}$ (điểm (i) và điểm (iii) là khá phù hợp với các giá trị hệ số góc trong công thức (15). Trong khi đó, điểm (ii) có thể được giải thích là do trong điều kiện thực tế độ dày của vỏ hầm là không đồng đều và tải trọng tác dụng lên mặt ngoài của vỏ hầm cũng không phải là phân bố đều tuyệt đối (như trong mô hình đã phân tích ở phần trên). Tuy nhiên, như thể hiện trên Hình 9, giá trị ứng suất tiếp tuyến trung bình $\left(\langle\sigma_{\theta\theta}\rangle = \dfrac{\sigma_{\theta\theta1} + \sigma_{\theta\theta2}}{2}\right)$ tại hai vị trí thí nghiệm khác nhau (2) và (3) của cùng một mặt cắt vỏ hầm là khá tương đồng nhau theo thời gian. Đặc biệt, các giá trị ứng suất $(\langle\sigma_{\theta\theta}\rangle \approx 12$ MPa) này cũng phù hợp với các kết quả ứng suất đo được từ các thí nghiệm xác định thông qua các thí nghiệm sử dụng đầu đo ứng suất trực tiếp [1].



Hình 9. Sự thay đổi của áp suất trong kích phẳng $p_{im}\,(i = 1, 2)$ đo được từ thí nghiệm kích phẳng thực hiện tại MHM-URL và ứng suất tiếp tuyến tại mặt trong vỏ hầm $\sigma_{\theta\theta}$ theo thời gian

Trên Hình 9, các giá trị ứng suất tiếp tuyến $\sigma_{\theta\theta1}$ và $\sigma_{\theta\theta2}$ tăng theo thời gian nhưng với mức độ tăng bé hơn nhiều so với độ tăng của $p_{im}\,(i = 1, 2)$. Điều này có ý nghĩa rằng: nếu áp dụng cách diễn giải truyền thống như đã áp dụng với kết cấu tường gạch xây ở phần trên (công thức (1)) cho kết cấu vỏ hầm, thì sẽ dẫn đến một giá trị $\sigma_{\theta\theta}$ lớn hơn rất nhiều so với giá trị thực tế.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã tập trung phân tích và đề xuất một phương pháp diễn giải kết quả mới nhằm theo dõi sự phát triển ứng suất mà trong đó kích phẳng được giữ lại trong kết cấu theo thời gian. Thông qua các phân tích mô hình số theo phương pháp phần tử hữu hạn mô phỏng các thí nghiệm kích phẳng cho hai dạng kết cấu: kết cấu tường gạch xây và kết cấu vỏ hầm, mối quan hệ tuyến tính giữa áp suất trong kích phẳng và ứng suất trong kết cấu được thiết lập với việc bổ sung các hệ số phụ

thuộc vào kích thước của kích phẳng và tải trọng ban đầu tác dụng lên kết cấu. Phương pháp diễn giải mới này, sau đó được áp dụng để xác định các giá trị ứng suất tiếp tuyến ở mặt trong của vỏ hầm thí nghiệm tại MHM-URL tại các thời điểm khác nhau ở các vị trí đo khác nhau trên mặt cắt vỏ hầm. Kết quả ứng suất tính toán được khá phù hợp với kết quả được đo từ hiện trường thông qua các đầu đo ứng suất trực tiếp [1]. Điều này cho phép kiểm chứng sự phù hợp của phương pháp diễn giải mà chúng tôi đã đề xuất trong nghiên cứu này. Tuy vậy, để tăng tính thuyết phục của phương pháp diễn giải mới này, một chuỗi các thí nghiệm "mới" nên được thực hiện mà trong đó kích phẳng mới sẽ được lắp đặt gần với vị trí của kích phẳng cũ. Sau đó, tại các thời điểm khác nhau, tiến hành đồng thời và so sánh kết quả thu được từ cả hai thí nghiệm với kích phẳng mới và cũ. Với kích phẳng mới, ứng suất $\sigma_{\theta\theta}$ được xác định từ công thức (8) hoặc (9), trong khi đó công thức (13) được áp dụng cho kích phẳng cũ.

Tài liệu tham khảo

[1] Zghongdi, J., Vu, M. N., Armand, G. (2017). Mechanical behavior of different concrete lining supports in the Callovo Oxfordian claystone. *7th International conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, Davos, Switzerland.

[2] Khoa, H. N., Công, V. C. (2012). Phân tích trường nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXD*, 6(4):17–27.

[3] Fedele, R., Maier, G. (2007). Flat-jack tests and inverse analysis for the identification of stress states and elastic properties in concrete dams. *Meccanica*, 42(4):387–402.

[4] Le Mouel, A., Philippe, J., Robert, J. (1994). Essai au vérin plat: suivi des deformations et contraintes. *In: XIII ICSMFE*, New Delhi, India, 883–886.

[5] Chisari, C., Macorini, L., Amadio, C., Izzuddin, B. (2015). An inverse analysis procedure for material parameter identification of mortar joints in unreinforced masonry. *Computers & Structures*, 155:97–105.

[6] Binda Maier, L., Rossi, P. P., Sacchi Landriani, G. (1983). Diagnostic analysis of masonry building. *In: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Symposium on Strengthening of Building Structures - Diagnosis and Therapy*, Venice, Italy, 131–138.

[7] Rossi, P. P. (1982). Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of in-situ tests. *6th IBMaC*, Rome, Italy, 77–85.

[8] Rossi, P. P. (1985). Flat-jack test for the analysis of mechanical behaviour of brick masonry structures. *In: 7th International Brick Masonry Conference*, Melbourne, Australia, 137–148.

[9] Simões, A., Gago, A., Lopes, M., Bento, R. (2012). Characterization of old masonry walls: flat-jack method. *15th World Conference on Earthquake Engineering, SPES, Lisbon*, 1–10.

[10] Li, L., Cornet, F. H. (2004). Three dimensional consideration of flat jack tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41:255–260.

[11] ASTM-C1196-14a (2014). *Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements*.

[12] Code_Aster (2015). *www.code-aster.org*. EDF R&D.

[13] Fjar, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier, Oxford, UK.

[14] Python v2.7.10 (2015). *www.python.org*. Python Software Foundation.

[15] Vu, M. N., Zghondi, J., Armand, G., Vu, C. C. (2018). Proposition d'une nouvelle méthode d'interprétation des essais au vérin plat pour suivre l'évolution de contrainte dans des revêtements des galeries du laboratoire souterrain en Meuse/Haute-Marne. *In: Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Champs-sur-Marne, France, 1–8.