

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ TƯỜNG VÂY HỒ ĐÀO DẠNG TRỤ TRÒN

Phạm Việt Anh^{a,*}, Nguyễn Đức Mạnh^b, Nguyễn Xuân Trường^c, Trần Quốc Mạnh^d,

Nguyễn Trung Kiên^d, Nguyễn Trung Thành^d, Nguyễn Văn Nam^d

^aKhoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^cViện Khoa học công nghệ Xây Dựng (IBST),
81 phố Trần Cung, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

^dKhoa Xây dựng dân dụng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 24/12/2021, Sửa xong 15/4/2022, Chấp nhận đăng 18/5/2022

Tóm tắt

Hồ đào sâu dạng tròn ngày càng được sử dụng nhiều trong các hạng mục ngầm như trục thông gió, trục thoát hiểm của công trình ngầm, hoặc các trục hạ và thu hồi của máy khoan hầm (TBM). Do dạng kết cấu trụ tròn, sẽ tạo ra hiệu ứng vòm dẫn đến áp lực đất tác dụng lên tường vây nhỏ hơn thông thường, đồng thời toàn bộ áp lực hướng tâm sẽ chuyển thành lực vòng theo phương chu vi tường. Biến dạng hồ đào và nền xung quanh do đó cũng nhỏ. Thiết kế hồ đào sâu dạng tròn hiện nay chủ yếu sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Tuy nhiên việc tính toán phân tích hồ đào trụ tròn thường phức tạp, đòi hỏi phải sử dụng công cụ mô hình 3D. Trong bài báo này trình bày cách thiết kế hồ đào hình trụ xuất phát từ các công thức giải tích. Kết quả tính toán được so sánh với kết quả quan trắc của công trình thực tế. Trình tự thiết kế này có thể được sử dụng trong giai đoạn thiết kế sơ bộ của hồ đào dạng trụ tròn.

Từ khoá: áp lực đất; hồ đào sâu; hồ đào trụ tròn; địa kỹ thuật; hiệu ứng vòm.

A METHOD FOR THE ANALYSIS AND DESIGN OF CIRCULAR SHAFTS OF DEEP EXCAVATION

Abstract

The circular shaft are increasingly used in underground works such as ventilation shafts, escape shafts of underground structures, or lowering and recovery shafts of tunnel boring machines (TBM). The circular structure of circular shaft creates an arch effect, which leads to a reduction in earth pressure on the retaining wall. Radial pressure will be converted into a circular force in the direction of the wall circumference. Deformation of ground around the excavation is also small. However, the analysis of circular shafts is complicated, requiring the use of 3D modeling. In this paper, the method of determining the earth pressure acting on the retaining wall of a circular shaft is presented from analytical formulas. The calculated results are compared with the monitoring results in-situ. The methodology in this paper can be used in the preliminary design stage.

Keywords: earth pressure; deep excavation; circular shafts; geotechnical engineering; arching effect.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(2V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2V)-08) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, không gian ngầm đô thị đang ngày càng có nhu cầu lớn, ví dụ như các tuyến tàu điện ngầm, các bãi xe ngầm hay các trung tâm thương mại ngầm. Để thi công không gian

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: anhpv@huce.edu.vn (Anh, P. V.)

ngầm đô thị, người ta có thể sử dụng giải pháp hố đào mở với các hình dạng khác nhau. Hố đào dạng hình tròn với kết cấu tường vây hình trụ thường được sử dụng trong các hạng mục như trục thông gió, trục thoát hiểm của công trình ngầm, hoặc ở các trục hạ và thu hồi của máy khoan hầm (TBM) [1]. Ưu điểm chính của kiểu kết cấu tường vây trụ tròn là độ cứng vòng của tường vây và hiệu ứng vòm của đất xung quanh có thể tạo thành một hệ thống tự cân bằng, có nghĩa là áp lực đất tác dụng lên tường vây chuyển thành lực nén dọc theo chu vi của tường vây trụ tròn. Do đó tường vây có thể đảm bảo chịu lực với việc sử dụng bê tông cường độ thấp, đồng thời có thể loại bỏ cả hệ neo, giằng và thanh chống bên trong thành hố đào trong quá trình thi công [2, 3]. Việc sử dụng kiểu tường vây này có thể giảm đáng kể thời gian thi công hố đào, cũng như có thể giảm được giá thành thi công.

Nghiên cứu về hố đào sâu hình dạng tròn còn khá hạn chế so với các hố đào sâu dạng hình chữ nhật đã được nghiên cứu rộng rãi trước đây [2]. Các nghiên cứu về hố đào sâu dạng tròn chủ yếu tập trung vào xác định áp lực đất tác dụng lên thành hố đào, từ những nghiên cứu phát triển theo phương pháp giải tích, theo phương pháp mô hình hóa đến các phương pháp thực nghiệm mô hình nhỏ trong phòng. Không nhiều các nghiên cứu về hố đào sâu dạng tròn trong lĩnh vực thiết kế, đặc biệt thiếu những hướng dẫn tính toán thiết kế hố đào sâu dạng tròn này.

Thiết kế hố đào dạng trụ tròn hiện nay thường sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để xác định chuyển vị và nội lực của tường. Phương pháp này có ưu điểm là mô tả được những ứng xử thực tế của hố đào trong từng giai đoạn thi công. Tuy nhiên do tính không gian của hố đào trụ tròn nên thường phải sử dụng mô hình tính toán 3D. Điều này dẫn đến khối lượng tính toán lớn, thời gian xử lý bài toán lâu, từ yêu cầu số liệu đầu vào đến phân tích mô hình.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả nghiên cứu thiết kế hố đào sâu dạng trụ tròn theo phương pháp giải tích. Phương pháp hướng đến việc đơn giản trong công tác thiết kế, dễ ứng dụng trong giai đoạn thiết kế sơ bộ. Phương pháp giải tích đề xuất được áp dụng cho một trong trình thực tế để kiểm nghiệm lại. Kết quả tính toán chuyển vị từ phương pháp đề xuất được so sánh với kết quả quan trắc thực tế để đánh giá tính chính xác cũng như hiệu quả của phương pháp.

2. Thiết kế hố đào sâu dạng trụ tròn

Thiết kế của hố đào sâu dạng tròn dựa trên khái niệm ứng suất vòng. Áp lực đất xung quanh trục sẽ tạo ra ứng suất vòng nén lên lớp kết cấu thành hố đào. Khi áp lực đất thay đổi theo độ sâu, ứng suất vòng gây ra cũng sẽ thay đổi theo, điều kiện bên cần đảm bảo ứng suất vòng không được vượt quá ứng suất nén cho phép của kết cấu thành hố đào. Dựa trên nguyên lý này, trình tự các bước thiết kế hố đào sâu dạng tròn đề xuất như sau:

Bước 1: Xác định thông số đầu vào (thông số địa chất, thông số tường, ...).

Bước 2: Xác định áp lực đất tác dụng lên thành hố đào theo độ sâu, theo các phương pháp đề xuất trong (mục 2.1).

Bước 3: Xác định ứng suất biến dạng của thành hố đào theo độ sâu (mục 2.2).

2.1. Áp lực đất lên hố đào hình tròn

Trong các bài toán phẳng, các bài toán đối xứng trục, áp lực đất tác dụng lên thành hố đào thường được xác định bằng lý thuyết của Rankine hoặc Coulomb. Cả hai lý thuyết này đều dựa trên cân bằng dẻo, và áp lực đất thu được có dạng phân bố tuyến tính theo độ sâu. Tuy nhiên, trong các bài toán hố đào sâu dạng tròn (bài toán không gian), do ảnh hưởng của hình dạng kết cấu và hiệu ứng vòm, áp lực đất xác định theo Rankine và Coulomb không còn phù hợp, có nhiều sai khác so với thực tế [4]. Một vài phương pháp thực nghiệm cũng như lý thuyết đã được phát triển nhằm xác định áp lực đất

tác dụng lên hố đào dạng trụ tròn, Westergaard [5] và Terzaghi [6] đã đề xuất lời giải giải tích; Prater [7] đã sử dụng phương pháp cân bằng giới hạn; và các tác giả khác [8–13] đã sử dụng phương pháp đường trượt để xác định áp lực đất lên hố đào dạng trụ tròn. Áp lực đất chủ động được tính toán bằng phương pháp cổ điển theo Coulomb hoặc Rankine cơ bản là cho kết quả giống nhau với các bài toán phẳng, tuy nhiên trong điều kiện bài toán không gian kết quả áp lực đất có thể khác nhau đáng kể tùy thuộc vào phương pháp phân tích đã chọn [14].

Một vài nghiên cứu đã chỉ ra rằng, áp lực đất tác dụng lên hố đào dạng trụ tròn nhỏ hơn so với áp lực đất trong trường hợp bài toán đối xứng trục. Kim et al. [4] đã thực hiện thí nghiệm mô hình lý tâm trong phòng và thử nghiệm hiện trường tỷ lệ 1:1 đối với trường hợp hố đào hình trụ đứng. Các tác giả đã kết luận rằng áp lực đất tác dụng lên tường vây trụ tròn (trục thẳng) nhỏ hơn đối với các kết cấu địa kỹ thuật khác, nguyên nhân là do các hiệu ứng hình cung ba chiều (hình cung lồi và/hoặc vòm ngược). Cho et al. [15] trong nghiên cứu của mình đã chỉ ra, trong trường hợp một trụ tròn thẳng đứng, ảnh hưởng của vòm đối với áp lực đất ngang phụ thuộc nhiều vào đường kính và chiều cao của trụ, góc nội ma sát và lực dính của đất. Các tác giả cũng phát hiện ra rằng khi xem xét hiệu ứng hình cung, áp lực đất lên một trụ tròn thẳng đứng nhỏ hơn khoảng 80% so với áp lực đất được tính toán bằng lý thuyết của Rankine. Shin et Sagong [16] đã kết luận rằng áp lực đất lên tường trụ tròn giảm đáng kể nếu xảy ra biến dạng tường lớn hơn 1,5% bán kính trụ. Ở những biến dạng nhỏ, áp lực đất nằm trong khoảng giữa áp lực đất tĩnh và áp lực đất chủ động. Áp lực đất tác dụng lên bề mặt bên ngoài của trụ tròn nhỏ hơn áp lực đất tĩnh nếu tường có biến dạng đủ lớn, xảy ra khi biến dạng mặt phẳng do ứng suất giảm trong quá trình đào [16]. Các hiệu ứng vòm theo chiều ngang cũng ảnh hưởng đến sự phân bố của áp lực đất lên bề mặt tròn bên ngoài của trụ tròn [17]. Do các kết cấu tường vây chỉ có biến dạng nhỏ, do đó độ lệch của áp lực đất từ điều kiện tĩnh sang điều kiện chủ động do biến dạng tường không đáng kể, ngay cả khi đường kính trụ lớn.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả lựa chọn 3 phương pháp xác định áp lực đất lên thành hố đào dạng trụ tròn đứng, bao gồm phương pháp cân bằng giới hạn của Kim et al. [4], phương pháp đường trượt của Cheng [9] và Berezantzev [8].

a. Áp lực đất theo phương pháp cân bằng giới hạn của Kim Kyoung-Yul

Kim et al. [4] mở rộng phương pháp cân bằng giới hạn của Prater [18], dựa trên giả thiết bề mặt trượt phá hoại là mặt phẳng, và dốc một góc $\beta = 45^\circ + \varphi/2$ (Hình 1), xét đến hiệu ứng vòm ba chiều với ba thành phần ứng suất (σ'_t , σ'_v , σ'_r). Áp lực đất tác dụng được xác định như sau:

$$p_i = K_{wa}\sigma'_v \quad (1)$$

- K_{wa} là hệ số của áp lực đất hướng tâm:

$$K_{wa} = \frac{3(N\cos^2\theta + \sin^2\theta)}{3N - (N - 1)\cos^2\theta} \quad (2)$$

với N và θ là hệ số được xác định theo phương trình:

$$N = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left[\frac{(N - 1 \pm \sqrt{(N - 1)^2 4N \tan^2\delta})}{2 \tan \delta}\right] \quad (4)$$

- σ'_v là ứng suất hữu hiệu theo phương đứng:

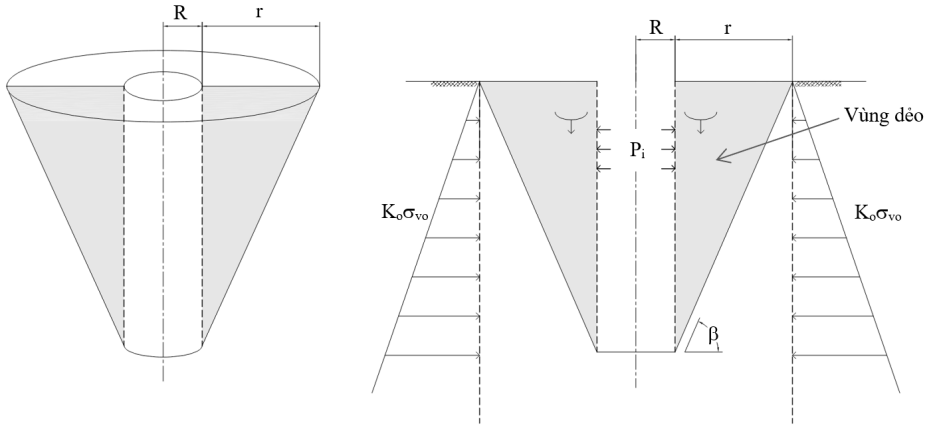
$$\sigma'_v = \left(q - \frac{T}{S}\right) e^{-S \times z} + \frac{T}{S} \quad (5)$$

với T và S là hai hệ số được xác định theo phương trình:

$$T = \gamma - \frac{2\pi}{A} \left[c_w + c(R + r) \left(1 + \frac{1}{\tan \beta} + \frac{1 + \tan \beta \times \tan \varphi}{\tan \beta - \tan \varphi} \right) \right] \quad (6)$$

$$S = \frac{2\pi}{A} \left[K_{wa} + R \tan \delta + (K_{wa}R + \lambda r) + \left(\frac{1 + \tan \beta \times \tan \varphi}{\tan \beta - \tan \varphi} \right) \right] \quad (7)$$

trong đó γ là trọng lượng của đất (kN/m^3); φ là góc ma sát của đất ($^\circ$); c là hệ số dính (kPa); R là bán kính ngoài của trụ tròn (m); r là chiều rộng của vùng dẻo ở độ sâu xác định (m); A là diện tích mặt cắt ngang của vùng dẻo (m^2); β là góc của mặt trượt $45^\circ + \varphi/2$; q là tải trọng phụ thêm trên bề mặt (kN/m^2); δ là góc ma sát trong giữa bề mặt tường và đất.



Hình 1. Ứng xử của đất xung quanh trụ tròn thẳng đứng: mô hình ứng suất - mặt trượt giả định

b. Áp lực đất theo phương pháp đường trượt của Berezantzev

Berezantzev [8] đã mở rộng phương pháp đường trượt để tính áp lực đất tác dụng lên thành hình trụ có mặt đất nằm ngang và tải trọng phụ thêm phân bố đều. Để giải các phương trình cân bằng trong điều kiện không đối xứng trục, tác giả đã giả định rằng bên trong vùng dẻo, ứng suất tiếp tuyến và ứng suất hướng tâm tương ứng bằng ứng suất chính lớn và ứng suất chính nhỏ, $\sigma'_t = \sigma'_v = \sigma_1$ và $\sigma'_r = \sigma_3$. Để đơn giản hóa tính toán, các đường trượt được giả định là các đường thẳng theo tiêu chí phá hoại Mohr – Coulomb. Tác giả đã thu được kết quả áp lực đất lên thành hố đào dạng tròn như sau:

$$p_a = \gamma R \frac{\sqrt{K_a}}{\eta - 1} \left(1 - \frac{1}{R_b^{\eta-1}} \right) + q \frac{1}{R_b^\eta} K_a - c \left(1 - \frac{1}{R_b^\eta} K_a \right) \cot \varphi \quad (8)$$

trong đó: K_a , η và R_b là các hệ số xác định theo như dưới đây:

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (9)$$

$$\eta = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \quad (10)$$

$$R_b = 1 + \frac{h}{R} \sqrt{K_a} \quad (11)$$

với q là tải trọng phân bố trên bề mặt (kPa); c lực dính của đất (kPa); R là bán kính trục (m); h là chiều sâu đào (m).

c. Áp lực đất theo phương pháp trượt đường của Cheng

Cheng [10] đã mở rộng lý thuyết của Berezantzev để phát triển một giải pháp tổng quát hơn xem xét hệ số áp lực đất thay đổi. Áp lực đất được tính theo công thức sau:

$$p_a = K_{ay}\gamma z + K_{aq}q - K_{ac}c \quad (12)$$

với các hệ số áp lực đất K_{ay} , K_{aq} và K_{ac} :

$$K_{ay} = \frac{\sqrt{K_a} R}{\eta - 1} \frac{1}{z} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{z}{R} \sqrt{K_a} \right)^{\eta-1}} \right] \quad (13)$$

$$K_{aq} = \frac{1}{\left(1 + \frac{z}{R} \sqrt{K_a} \right)^{\eta}} K_a \quad (14)$$

$$K_{ac} = \left(\frac{1 - \lambda + \eta}{\eta} - \xi \frac{K_a}{\left(1 + \frac{z}{R} \sqrt{K_a} \right)^{\eta}} \right) \cot \varphi \quad (15)$$

$$\eta = \lambda \frac{(1 + \sin \varphi)^2}{\cos^2 \varphi} - 1 = \lambda \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \quad (16)$$

$$\xi = \frac{1 - \lambda}{\eta} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 1 \quad (17)$$

trong đó: K_a là hệ số xác định theo phương pháp của Berezantzev [8]; R là bán kính ngoài của trụ (m), z là độ sâu tính toán áp lực đất (m); λ là hệ số tỷ lệ giữa ứng suất tiếp và ứng suất hướng tâm ($= \sigma'_t / \sigma'_v$), theo Berezantzev [8] giả định rằng bên trong vùng dẻo, ứng suất tiếp tuyến và ứng suất xuyên tâm tương ứng bằng ứng suất chính lớn và nhỏ, $\sigma'_t = \sigma'_v = \sigma_1$ và $\sigma'_r = \sigma_3$, λ sẽ nằm trong khoảng $\lambda = 1$ và $K_0 = 1 - \sin \varphi$; c là lực dính (kPa) và φ là góc ma sát trong của đất ($^\circ$).

2.2. Ứng suất và biến dạng trong tường vây dạng tròn

Ứng suất trong tường vây dạng tròn có thể được ước tính bằng cách xác định sự phân bố ứng suất trong một hình trụ chịu áp lực hướng tâm đều, thay đổi theo độ sâu, tác dụng lên mặt ngoài của trụ. Lý thuyết này được ứng dụng từ kết quả của bài toán Lamé [17, 19, 20].

Đối với bài toán kết cấu thành trụ tròn, chiều dày của thành trụ có ảnh hưởng lớn đến phân bố ứng suất và biến dạng của thành trụ. Nếu chiều dày của thành trụ lớn hơn 1/10 bán kính của thành trụ, đây được coi là thành trụ dày. Trong trường hợp này, Vullo et al. [20], và Chehaddeh [21] đã đưa ra công thức xác định ứng suất biến dạng trong trụ tròn chịu ứng suất hướng tâm bên ngoài đều, p_e , ứng suất hướng tâm bên trong bằng 0 và ứng suất dọc trục bằng 0 (hoặc cân bằng với bên ngoài) như sau:

$$\sigma_z = 0 \quad (18)$$

$$\sigma_t = -p_e \frac{r_e^2 (r^2 + r_i^2)}{r^2 (r_e^2 - r_i^2)} \quad (19)$$

$$\sigma_r = -p_e \frac{r_e^2 (r^2 - r_i^2)}{r^2 (r_e^2 - r_i^2)} \quad (20)$$

Ứng suất lớn nhất trong thành trụ được xác định như sau:

$$\sigma_{t\max} = -p_e \frac{2r_e^2}{r_e^2 - r_i^2}; \quad r = r_i \quad (21)$$

$$\sigma_{r\max} = -p_e; \quad r = r_e \quad (22)$$

$$\tau_{\max} = \frac{(\sigma_r - \sigma_t)_{\max}}{2} = p_e \frac{r_e^2}{(r_e^2 - r_i^2)}; \quad r = r_i \quad (23)$$

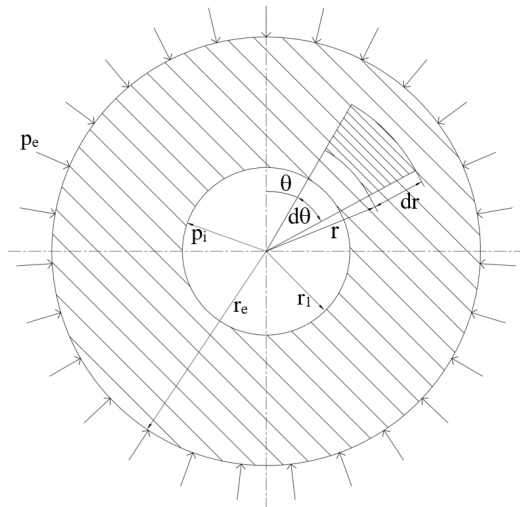
Chuyển vị của trụ tròn được xác định theo phương trình sau:

$$u_{r=r_e} = -\frac{p_e}{E} \left(\frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} - \nu \right) r_e \quad (24)$$

$$u_{r=r_i} = -\frac{p_e}{E} \frac{2r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} r_i \quad (25)$$

$$w = \nu \frac{p_e}{E} \frac{2r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} z \quad (26)$$

trong đó, các đại lượng được minh họa trong Hình 2 gồm σ_z là ứng suất theo phương đứng; σ_r là ứng suất hướng tâm; σ_t là ứng suất tiếp (ứng suất vòng); r_e và r_i là bán kính ngoài và bán kính trong của



Hình 2. Mặt cắt ngang của một hình trụ tròn có thành dày, với một phần tử vi phân của nó

trụ tròn; r là bán kính tại điểm tính toán; τ ứng suất cắt; u_{ra} là chuyển vị của thành ngoài trụ tròn; u_{ri} là chuyển vị của thành trong trụ tròn; w là chuyển vị theo phương đứng của trụ; E là mô đun biến dạng của vật liệu trụ; ν là hệ số Poisson của vật liệu trụ.

Đối với trường hợp trụ tròn đều chịu ứng suất hướng tâm cả trong và ngoài thành trụ p_e và p_i , ứng suất và chuyển vị được xác định theo bài toán Lamé như sau [19]:

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} - \frac{(p_i - p_e) r_i^2 r_e^2}{r^2 (r_i^2 - r_e^2)} \quad (27)$$

$$\sigma_t = \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} + \frac{(p_i - p_e) r_i^2 r_e^2}{r^2 (r_i^2 - r_e^2)} \quad (28)$$

$$u = \frac{r}{E} \left[\frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} (1 - \nu) + \frac{(1 + \nu) (p_i - p_e) r_i^2 r_e^2}{r^2 (r_i^2 - r_e^2)} \right] \quad (29)$$

2.3. Các thuyết bền trong tính toán thiết kế tường vây dạng tròn

Ứng suất trong hệ tọa độ cực ($\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}$) trong kết cấu dạng tròn được kiểm tra theo thuyết bền ứng tương ứng, Vullo et al. [20] đưa ra bốn lý thuyết cường độ để phân tích thiết kế với ứng suất tương đương σ_e , được định nghĩa ở dưới đây.

| Thuyết bền (Strength theory) | Ứng suất tương đương (General relation - σ_e) |
|------------------------------|---|
| σ_{\max} | $\sigma_e = \sigma_{\max} = \sigma_t$ |
| ε_{\max} | $\sigma_e = E \varepsilon_{\max} = \sigma_{\max} = \sigma_t - \nu (\sigma_r + \sigma_z)$ |
| τ_{\max} | $\sigma_e = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_t - \sigma_r$ |
| ED_{\max} | $\sigma_e^2 = \sigma_t^2 + \sigma_z^2 + \sigma_r^2 - (\sigma_t \sigma_z + \sigma_t \sigma_r + \sigma_z \sigma_r)$ |

3. Kiểm nghiệm phương pháp đề xuất

Để kiểm nghiệm lại phương pháp đề xuất, một tính toán cho trường hợp cụ thể hố đào sâu trụ tròn đã được thực hiện, kết quả tính toán được so sánh với kết quả quan trắc thực tế để đánh giá hiệu quả của phương pháp giải tích đề xuất.

3.1. Công trình hố đào sâu dạng tròn sử dụng cọc cát tuyến

Công trình lựa chọn là nằm ở phía Tây Bắc của đảo Caofeidian, Trung Quốc. Tường vây trụ tròn có chiều dài 45 m, đường kính ngoài 15m, đường kính trong hố 14 m, bề dày tường là 1 m, chiều sâu hố đào 28 m, tường được gia cường bằng một dầm trên cùng và sáu dầm giữa (được tạo ra trong quá trình đào). Thông số chi tiết của công trình được trình bày trong [22]. Trong bài toán này, tác giả đã giả thiết bỏ qua các sai số có thể xảy ra trong thi công tường, bỏ qua các hệ số điều kiện làm việc cũng như các hệ số ảnh hưởng của biện pháp thi công tường; bỏ qua ảnh hưởng của áp lực nước trong đất (mực nước ngầm đủ sâu). Các chỉ tiêu cơ lý của đất nền và thông số của tường được trình bày lần lượt trong Bảng 1 và Bảng 2. Trong quá trình thi công, 8 vị trí đo biến dạng, đo áp lực đất và đo chuyển vị ngang của tường đặc lắp đặt tại các độ sâu 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m và 40 m.

Các giai đoạn đào được thể hiện trong Bảng 3. Kết quả đo chuyển vị hướng tâm và ứng suất vòng ở các giai đoạn đào được thể hiện trong Hình 3. Hình 3 cho thấy chuyển vị của thành hố đào khá nhỏ,

Bảng 1. Thông số địa chất khu vực xây dựng hồ đào [22]

| Lớp đất | Phân loại đất | Chiều dày (m) | Dung trọng tự nhiên γ (kN/m ³) | Lực dính c (kN/m ²) | Góc ma sát trong φ (°) |
|---------|---------------|---------------|---|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Đất lấp | 5 | 19,7 | 0 | 10 |
| 2 | Sét pha | 3 | 19,3 | 6,1 | 20 |
| 3 | Cát mịn | 6 | 19,6 | 2,0 | 25 |
| 4 | Cát mịn | 6 | 19,5 | 6,0 | 23 |
| 5 | Sét pha | 8 | 18,7 | 7,7 | 27 |
| 6 | Sét pha | 11 | 19,2 | 8,5 | 32 |
| 7 | Cát bụi | ∞ | 18,0 | 10 | 35 |

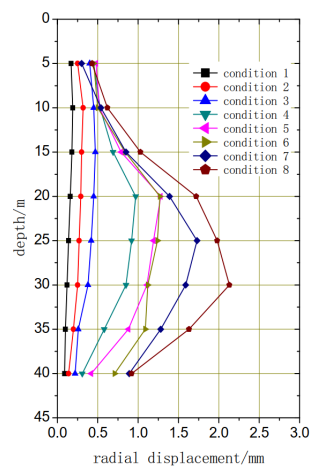
Bảng 2. Thông số tường trong hồ đào [22]

| Thông số | Ký hiệu | Giá trị | Đơn vị |
|-------------------------|-----------------|---------|-------------------|
| Modun biến dạng | E | 31500 | MPa |
| Bề dày | d | 1,0 | m |
| Hệ số Poisson | ν | 0,2 | |
| Trọng lượng riêng tường | γ_{wall} | 26 | kN/m ³ |
| Bán kính ngoài của trụ | r_e | 15 | m |
| Bán kính trong của trụ | r_i | 14 | m |
| Chiều dày trụ | d | 1 | m |
| Chiều dài trụ | L | 45 | m |

lớn nhất là 2,13 mm ở giai đoạn đào cuối cùng, chuyển vị hướng tâm có xu hướng lớn hơn ở giữa độ sâu đào và nhỏ hơn ở trên đỉnh và đáy hồ đào. Chuyển vị hướng tâm nhỏ cho thấy tác dụng vòm đáng kể của tường vây hình trụ, đã hạn chế sự biến dạng bên.

Bảng 3. Các giai đoạn thi công hồ đào [22]

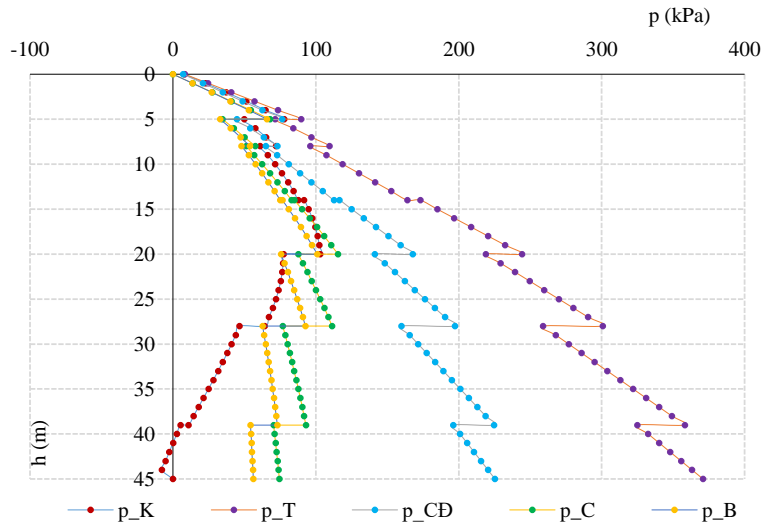
| Giai đoạn đào | Độ sâu đào |
|---------------|------------|
| 1 | 4 |
| 2 | 8 |
| 3 | 12 |
| 4 | 16 |
| 5 | 20 |
| 6 | 23 |
| 7 | 26 |
| 8 | 28 |



Hình 3. Kết quả chuyển vị hướng tâm tại các điểm quan trắc dọc theo thành hồ đào trong các giai đoạn đào [22]

3.2. Áp lực đất lên hố đào dạng tròn theo các phương pháp

Tác giả đã tính toán áp lực đất lên hố đào trụ tròn theo các phương pháp của Kim, Cheng và Berezantzev, cùng với áp lực chủ động thông thường theo Coulomb với mục đích so sánh. Đối với hố đào trụ tròn lựa chọn, kết quả quan trắc chuyển vị hướng tâm nhỏ cho thấy chưa có chuyển vị đủ lớn để hình thành áp lực chủ động, do đó áp lực đất tĩnh đã được tính toán để so sánh đánh giá.



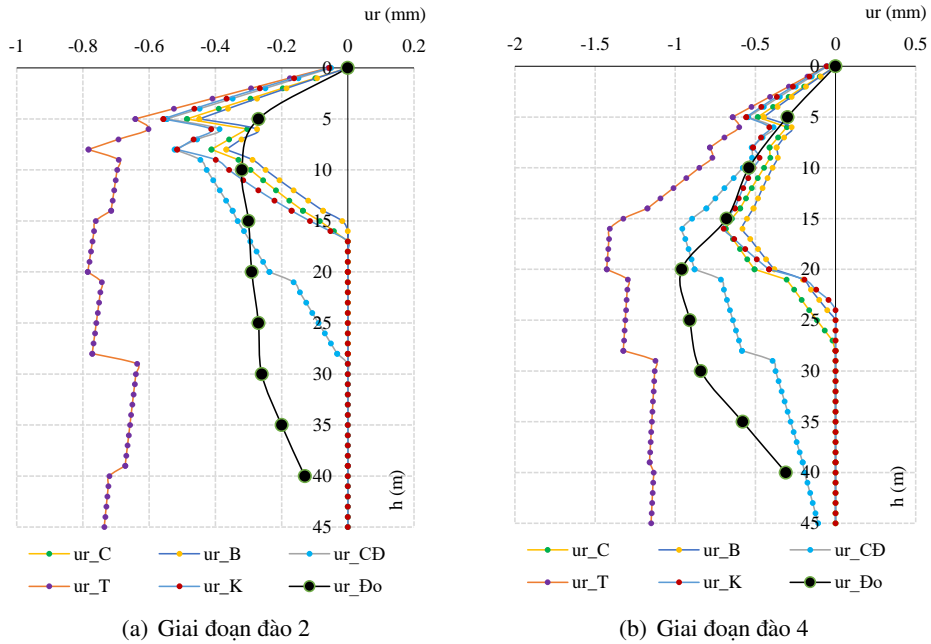
Hình 4. Áp lực đất tác dụng lên thành ngoài hố đào theo các phương pháp (p_T : áp lực lên tường là áp lực tĩnh, p_CĐ áp lực lên tường là áp lực chủ động, p_C áp lực lên tường phương pháp của Cheng, p_B áp lực lên tường theo phương pháp của Berezantzev và p_K áp lực lên tường theo phương pháp của Kim)

Hình 4 thể hiện kết quả tính toán áp lực đất tác dụng lên thành ngoài của tường vây. Áp lực đất theo phương pháp của Cheng (2005) và của Berezantzev (1958) ra kết quả tương đối gần nhau và nhỏ hơn nhiều so với áp lực chủ động cũng như áp lực tĩnh khi tính toán theo Coulomb. Áp lực đất theo phương pháp của Kim (2009) có xu hướng về giá trị bằng 0 tại chân hố đào, giá trị áp lực này cũng nhỏ hơn nhiều so với áp lực chủ động và áp lực tĩnh. Các giá trị áp lực này sẽ được sử dụng để tính toán chuyển vị và ứng suất trong tường với các giai đoạn đào khác nhau, kết quả được thể hiện trong mục dưới đây.

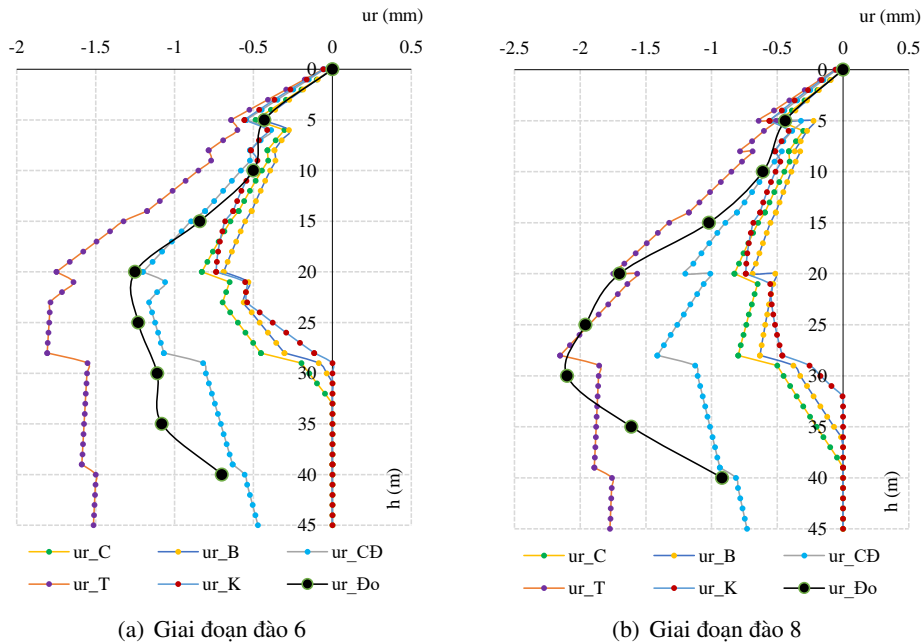
3.3. Chuyển vị của tường vây

Chuyển vị của hố đào trong các giai đoạn đào được xác định theo mục 2.2. Kết quả tính toán được so sánh với kết quả quan trắc, được thể hiện trong Hình 5 và Hình 6. Trong bài báo này chỉ minh họa kết quả điển hình tính toán cho các giai đoạn đào 2, 4, 6, 8, tương ứng với chiều sâu hố đào có sự thay đổi lớn.

Hình 5(a) cho thấy trong giai đoạn đào 2 (đào đến độ sâu 8 m), kết quả quan trắc khá gần với kết quả tính toán chuyển vị theo 3 phương pháp đề xuất trong mục 2.1. Chuyển vị tăng dần theo chiều sâu đào, sau khi vượt qua chiều sâu hố đào chuyển vị giảm dần. Các đường dự báo có kết quả lớn hơn đường quan trắc (màu đen) trong phạm vi trên chiều sâu đào. Trong giai đoạn đào 4 đến độ sâu 16 m (Hình 5(b)), kết quả tính toán có xu hướng phù hợp với kết quả quan trắc, đặc biệt là kết quả chuyển vị tính toán theo áp lực chủ động và áp lực tĩnh. Kết quả chuyển vị tính toán theo 3 phương pháp được lựa chọn nhỏ hơn kết quả quan trắc.



Hình 5. Kết quả tính chuyển vị hướng tâm



Hình 6. Kết quả tính chuyển vị hướng tâm

Chú thích: (ur_T : chuyển vị tính toán với áp lực tĩnh, ur_{CD} chuyển vị tính toán với áp lực chủ động, ur_C chuyển vị tính toán với áp lực theo phương pháp của Cheng, ur_B chuyển vị tính toán với áp lực theo phương pháp của Berezantzev và ur_K chuyển vị tính toán với áp lực theo phương pháp của Kim).

Giai đoạn đào 6 tới độ sâu 23 m, và giai đoạn đào 8 tới độ sâu 28 m (Hình ??) cho thấy chuyển vị tính toán theo áp lực đất tĩnh là phù hợp nhất với kết quả quan trắc. Kết quả theo ba phương pháp đề xuất có cùng xu hướng nhưng giá trị nhỏ hơn với kết quả quan trắc. Điều này cũng có thể giải thích do chuyển vị của hố đào nhỏ (lớn nhất 2,13 mm) nên chưa thể hình thành mặt trượt như trong giả thiết của các phương pháp sử dụng để phân tích. Như [16] đã chỉ ra rằng áp lực đất lên tường trụ tròn giảm đáng kể nếu xảy ra biến dạng tường lớn hơn 1,5% bán kính trụ.

Kết quả kiểm nghiệm cho thấy kết quả tính toán chuyển vị theo các phương pháp tương đối phù hợp với kết quả quan trắc. Điều này cho phép phương pháp đề xuất là khả thi để thiết kế sơ bộ hố đào sâu dạng tròn. Tùy thuộc vào chiều sâu hố đào, ta có thể xác định áp lực đất theo các phương pháp khác nhau để khảo sát trong giai đoạn thiết kế sơ bộ.

4. Kết luận

Trong bài báo này chúng tôi đã đề xuất thiết kế hố đào sâu dạng trụ tròn theo phương pháp giải tích, trong đó có khuyến nghị các phương pháp khác nhau xác định áp lực đất tác dụng lên tường vây của hố đào sâu dạng trụ tròn. Kết quả tính toán cho thấy phương pháp đề xuất là phù hợp và có thể áp dụng trong giai đoạn thiết kế cơ sở. Trong tính toán sơ bộ có thể tính toán đồng thời áp lực đất theo các quan điểm khác nhau (theo quan điểm áp lực tĩnh, áp lực chủ động hay áp lực đất kể đến hiệu ứng vòm của Kim et al., Cheng hay của Berezantsev) để phân tích ứng suất và chuyển vị của hố đào sâu trụ tròn. Kết quả chuyển vị nhỏ trong tính toán cũng như quan trắc cho thấy hiệu quả của giải pháp hố đào sâu trụ tròn, khi hầu hết áp lực đất hướng tâm chuyển thành ứng suất nén trong kết cấu tường, giảm biến dạng và chuyển vị của tường.

Tài liệu tham khảo

- [1] Aye, T. T., Tong, M., Yi, K., Arunasoruban, E. (2014). *Design and Construction of Large Diameter Circular Shafts*.
- [2] Jia, J., Zhai, J.-Q., Li, M.-G., Zhang, L.-L., Xie, X.-L. (2019). [Performance of Large-Diameter Circular Diaphragm Walls in a Deep Excavation: Case Study of Shanghai Tower](#). *Journal of Aerospace Engineering*, 32(5):04019078.
- [3] Chehadeh, A., Turan, A., Abed, F., Yamin, M. (2017). [Lateral earth pressures acting on circular shafts considering soil-structure interaction](#). *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(2):139–151.
- [4] Kim, K.-Y., Lee, D.-S., Cho, J., Jeong, S.-S., Lee, S. (2013). [The effect of arching pressure on a vertical circular shaft](#). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37:10–21.
- [5] Westergaard, H. M. (1940). *Plastic state of stress around a deep well*.
- [6] Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Prater, E. G. (1977). [An examination of some theories of earth pressure on shaft linings](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 14(1):91–106.
- [8] Beresantsev, V. G. (1958). Earth pressure on the cylindrical retaining walls. *Conference on Earth Pressure Problem*, 21–27.
- [9] Cheng, Y. M., Hu, Y. Y. (2005). Active earth pressure on circular shaft lining obtained by simplified slip line solution with general tangential stress coefficient. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1.
- [10] Cheng, Y. M., Hu, Y. Y., Wei, W. B. (2007). [General Axisymmetric Active Earth Pressure by Method of Characteristics—Theory and Numerical Formulation](#). *International Journal of Geomechanics*, 7(1): 1–15.
- [11] Liu, F. Q., Wang, J. H. (2008). [A generalized slip line solution to the active earth pressure on circular retaining walls](#). *Computers and Geotechnics*, 35(2):155–164.

- [12] Liu, F. Q., Wang, J. H., Zhang, L. L. (2009). [Axi-symmetric active earth pressure obtained by the slip line method with a general tangential stress coefficient](#). *Computers and Geotechnics*, 36(1-2):352–358.
- [13] Liu, F. Q. (2014). [Lateral Earth Pressures Acting on Circular Retaining Walls](#). *International Journal of Geomechanics*, 14(3):04014002.
- [14] Tobar, T., Meguid, M. A. (2010). [Comparative evaluation of methods to determine the earth pressure distribution on cylindrical shafts: A review](#). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2):188–197.
- [15] Cho, J., Lim, H., Jeong, S., Kim, K. (2015). [Analysis of lateral earth pressure on a vertical circular shaft considering the 3D arching effect](#). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 48:11–19.
- [16] Shin, Y., Sagong, M. (2007). Ground pressure acting on cylindrical retaining wall of a shaft in soft ground. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(2):3689–3696.
- [17] Chehadeh, A., Turan, A., Abed, F. (2015). [Numerical investigation of spatial aspects of soil structure interaction for secant pile wall circular shafts](#). *Computers and Geotechnics*, 69:452–461.
- [18] Prater, E. G. (1977). [An examination of some theories of earth pressure on shaft linings](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 14(1):91–106.
- [19] Liên, T. V. (2008). *Cơ học môi trường liên tục*.
- [20] Vullo, V. (2014). [Circular cylinders and pressure vessels](#). Springer International Publishing.
- [21] Chehadeh, A. (2015). *Analysis and design of circular shafts using finite element method*.
- [22] Wu, C. F., An, H. C., Li, F. Z. (2013). Analysis of the mechanical and deformation characteristics of a circular diaphragm wall. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18:4979–4996.