



NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ PHÁ HỦY VỎ CHỐNG HẦM TRẠM BƠM DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA DAO ĐỘNG CƯỜNG BỨC

Phạm Quang Nam

Trường Đại học Điện lực, 235 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 09/3/2026

Ngày nhận bài sửa: 03/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 10/5/2026

Tác giả liên hệ:

Email: mampq@epu.edu.vn

TÓM TẮT

Hầm bơm nước ở các mỏ than hầm lò với vai trò thu gom và thoát nước phục vụ duy trì sản xuất là công trình có tính chất quan trọng trong tổ hợp các công trình ngầm của hệ thống. Quá trình làm việc của hầm bơm ngoài chịu tải trọng đất đá xung quanh còn chịu tác dụng ảnh hưởng của vận hành các thiết bị trong hầm, ... Thực tế sản xuất cho thấy, mặc dù hầm bơm được thiết kế với vỏ bê tông cốt thép dày, hiện tượng nứt và bong vữa cục bộ vẫn xảy ra phổ biến. Bằng phương pháp phân tích giải tích dựa trên lý thuyết tương tác đá-kết cấu và tiêu chuẩn phá hoại Hoek-Brown nghiên cứu đã xác định việc đào hầm với tiết diện lớn (30 m^2) ở độ sâu lớn tới (-520 m so với bề mặt địa hình) sinh ra vùng dẻo lan sâu $2,1 \text{ m}$ vào nền đá, gây suy thoái nghiêm trọng độ cứng nền và chuyển hóa cơ chế chịu lực của vỏ chống sang nén-uốn kết hợp. Đặc biệt, dưới tác động của tải trọng dao động cường bức từ tổ hợp máy bơm (1480 vòng/phút), hệ số khuếch đại động lực học được xác định đạt tới $2,71$ lần, gây ra hiệu ứng tích lũy vi khe nứt do mỗi làm suy giảm 40% cường độ chịu kéo của bê tông. Chỉ số trạng thái giới hạn tổng hợp tính toán được xấp xỉ $3,01$ lần, chứng minh ứng suất kéo thực tế vượt gấp 3 lần ngưỡng an toàn của vật liệu. Kết quả nghiên cứu khẳng định sự cần thiết phải tích hợp thành phần nội lực uốn và hệ số động vào quy trình thiết kế, đồng thời đề xuất hướng ứng dụng giải pháp gia cố khối đá bằng hóa chất polyme để chủ động tiêu tán năng lượng rung động và bảo vệ kết cấu hầm bơm bền vững.

Từ khóa: hầm bơm nước, tải trọng động, hệ số khuếch đại, phá hoại mỏi, gia cố hóa chất.

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong khai thác hầm lò sâu, hệ thống hầm bơm giữ có vai trò đặc biệt quan trọng trong việc đảm bảo an toàn thoát nước và duy trì điều kiện sản xuất ổn định. Do yêu cầu lắp đặt nhiều tổ hợp bơm công suất lớn, không gian hầm bơm thường có tiết diện mở rộng, kết cấu phức tạp và chịu tác động tổng hợp của ứng suất địa tầng, áp lực nước cũng như tải trọng từ thiết bị công nghệ (Hình 1).

Tại các mỏ hầm lò, Hầm bơm là công trình ngầm có vai trò thiết yếu trong hệ thống khai thác do đảm nhiệm chức năng thu gom và thoát nước mỏ. Khác với các đường lò thông thường, hầm bơm thường có kích thước lớn hơn và tiết diện mặt cắt ngang phức tạp hơn để đáp ứng yêu cầu bố trí thiết bị (Hình 2). Sự gia tăng quy mô hình học này

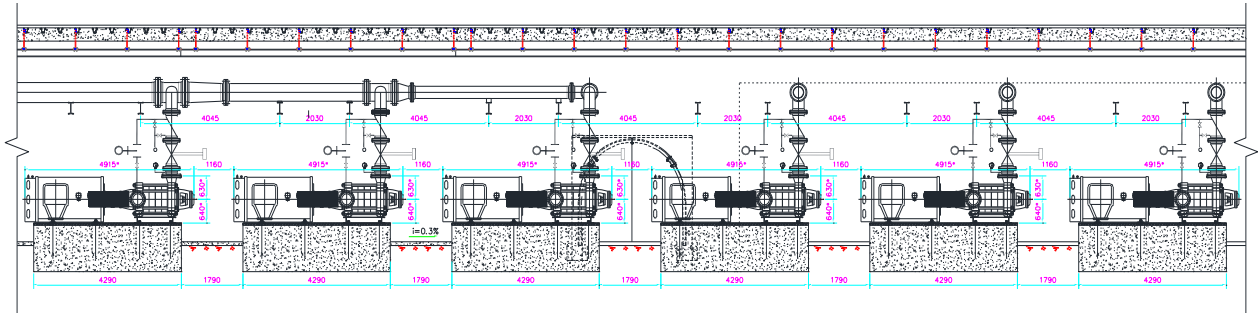
kéo theo sự thay đổi đáng kể về đặc trưng cơ học của kết cấu chống giữ, đặc biệt là nội lực uốn và độ cứng tổng thể.

Tại Việt Nam các nghiên cứu về hình dạng, kích thước mặt cắt ngang, cấu tạo các hầm trạm trong mỏ cũng đã được các tác giả quan tâm [1], [2]. Việc tính toán và thiết kế kết cấu chống giữ cho các hầm bơm cũng như các hạng mục khác trong các mỏ hầm lò chủ yếu dựa trên các phương pháp truyền thống, trong đó tải trọng tác dụng lên kết cấu chống được xem xét chủ yếu là tải trọng tĩnh, bao gồm ứng suất nguyên sinh của khối đá, áp lực đất đá sau khai đào và ảnh hưởng của điều kiện địa chất công trình [3]-[7] mà còn ít quan tâm đến các tải trọng vận hành của các thiết bị trong hệ thống công trình.

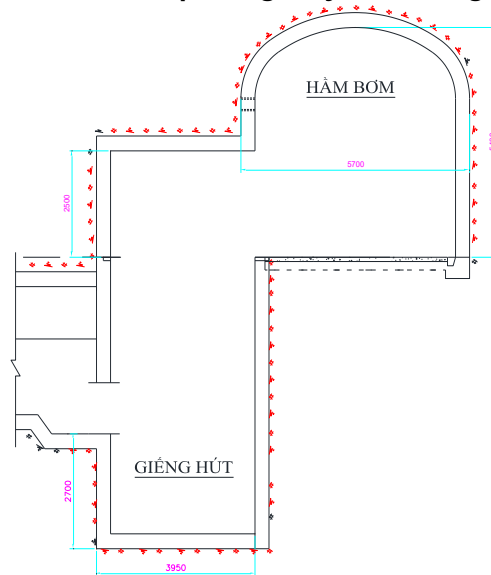


Trên thế giới việc nghiên cứu xem xét các thiết kế tính toán kết cấu chống giữ các công trình ngầm, các gian hầm trạm có xem xét đến sự thay đổi hình dạng, kích thước cũng như bước thi công khai đào đã được các nhà khoa học quan tâm trong các tài liệu [8]-[13]. Tuy nhiên, việc xem xét các tính toán vỏ hầm có xem xét đến yếu tố tải trọng

tuần hoàn, tải trọng rung động và sự già hóa, biểu hiện từ biến và biến dạng lâu dài của vỏ hầm bơm thì còn ít và chưa được quan tâm thấu đáo. Điều này cũng đòi hỏi phải có các nghiên cứu chuyên sâu để giải quyết và trả lời trên thực tế, đặc biệt trong điều kiện địa kỹ thuật phức tạp như khu vực mỏ than Vàng Danh [9].



Hình 1. Hầm bơm với hệ thống máy bơm công suất lớn [9].



Hình 2. Tiết diện mặt cắt ngang hầm bơm tại vị trí có giếng hút [9]

Thực tế, trong quá trình vận hành hệ thống hầm bơm, tại một số mỏ đã ghi nhận hiện tượng nứt và bong vỡ vỏ bê tông, tập trung tại phần tường và khu vực tiếp giáp với các giếng hút. Các vị trí này đồng thời là nơi có sự gián đoạn hình học và chịu mô men uốn lớn. Điều này cho thấy cơ chế làm việc của kết cấu chống không hoàn toàn được phản ánh bởi mô hình tính toán thuần túy tĩnh, việc tính toán thiết kế kết cấu chống chống giữ hầm bơm dựa trên các giả thiết tải trọng tĩnh vẫn chưa phản ánh đầy đủ điều kiện làm việc thực tế của kết cấu chống mà còn cần phải xem xét đến sự hiện diện của tải trọng động chu kỳ trong quá trình vận hành hầm bơm. Điều này cần đặt ra các câu hỏi và

bổ sung các nghiên cứu để làm sáng tỏ những đặc điểm trên của kết cấu hầm bơm tại các mỏ than hầm lò.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Hầm bơm nghiên cứu được sử dụng là hầm bơm thoát nước trung tâm mức -175 - Công ty CP Than Vàng Danh-Vinacomin với các thông số đầu vào chính như sau [9]: Độ sâu tính từ bề mặt địa hình đến mặt bằng bố trí hầm bơm trung tâm mức -175 trung bình khoảng 520 m. Môi trường xung quanh khu vực hầm bơm là xen lẫn của các loại đá cát kết, bột kết và sét kết với các đặc tính cơ lý trung bình như trong Bảng 1.

**Bảng 1. Đặc tính cơ lý của đá xung quanh khu vực hầm bơm trung tâm mức -175 [9]**

Loại đá	Cường độ kháng nén (MPa)	Cường độ kháng kéo (MPa)	Khối lượng thể tích (kg/m ³)	Khối lượng riêng (kg/m ³)	Lực dính kết (MPa)	Góc nội ma sát (độ)
Cát kết	101,99	15,26	2650	2720	36,95	28°30'
Bột kết	57,55	8,87	2660	2730	17,34	27°00'
Sét kết và than	28,30	4,92	2620	2700	10,94	26°17'

Phụ thuộc vào nhu cầu bố trí trang thiết bị, hầm bơm được đào với tiết diện 30m² và được chống giữ cố định bằng kết cấu vỏ bê tông cốt thép, trong khi đó, các đường lò xây dựng cơ bản khác có tiết diện mặt cắt ngang khoảng từ 13,2÷16,0 m². Theo thiết kế, hầm bơm trung tâm mức -175 được bố trí 09 tổ hợp máy bơm công suất lớn với các thông số chính như sau:

- Lưu lượng bơm: $Q_b = 850 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Áp lực đẩy của bơm: $H_D = 460 \text{ mH}_2\text{O}$;
- Chiều cao hút của bơm: $H_H = 6 \text{ mH}_2\text{O}$;
- Động cơ phòng nổ: $P = 1250 \text{ kW}$; $U = 6 \text{ kV}$;

$n = 1480$ vòng/phút.

2.1. Sự phân bố ứng suất và ảnh hưởng của kích thước tiết diện đào

Các lời giải đại số giải tích thường chỉ được giải trên giả thuyết công trình ngầm mặt cắt ngang tròn trong môi trường đàn hồi đồng nhất đẳng hướng. Tuy nhiên, mặt cắt ngang hầm bơm có hình dạng phức tạp, thay đổi về hình dạng, kích thước trên mặt cắt ngang, do đó cần thiết phải xem xét chuyển đổi mặt cắt ngang của hầm bơm về dạng mặt cắt ngang hình tròn với bán kính tương đương. Bài toán được đơn giản hóa dưới dạng công trình ngầm mặt cắt ngang tròn, được chống giữ cố định bằng kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường đàn hồi đồng nhất, đẳng hướng. Phương pháp này cho phép xác định mức độ thay đổi nội lực do mở rộng kích thước tiết diện mà không phụ thuộc vào giả thiết tải trọng bổ sung. Cách tiếp cận này nhằm bỏ qua các ảnh hưởng của các tác động địa chất và tải trọng động khi chỉ xem xét ảnh hưởng của sự thay đổi tiết diện hầm bơm.

Trong các công trình ngầm thi công ở độ sâu lớn, trạng thái ứng suất địa tầng ban đầu đóng vai trò quyết định đến quá trình biến dạng và ổn định của khối đá xung quanh. Ứng suất thẳng đứng ban đầu được xác định theo biểu thức:

$$\sigma_v = (\gamma \cdot H), \text{ MPa} \quad (1)$$

Trong đó: σ_v - Ứng suất thẳng đứng tại độ sâu khảo sát, MPa; γ - Dung trọng trung bình của khối

đất đá, MN/m³; H - Độ sâu công trình tính từ mặt đất, m.

Với $\gamma = 0,025 \text{ MN/m}^3$ và $H = 520 \text{ m}$, ta có: $\sigma_v = 0,025 \times 520 = 13 \text{ MPa}$.

Trong điều kiện tự nhiên, trạng thái ứng suất trong khối đá là trạng thái ba trục, trong đó ngoài ứng suất thẳng đứng còn tồn tại ứng suất ngang. Quan hệ giữa ứng suất ngang và ứng suất thẳng đứng được biểu diễn thông qua hệ số ứng suất bên "k":

$$k = (\sigma_h / \sigma_v) \quad (2)$$

Trong đó: σ_h - Ứng suất ngang trung bình, MPa; k - Hệ số ứng suất bên, phụ thuộc vào điều kiện địa chất và lịch sử kiến tạo.

Đối với các thành tạo đá trầm tích ở độ sâu trung bình, giá trị k thường nằm trong khoảng 0,8÷1,2. Trong nghiên cứu này, để đơn giản hóa, giả thiết $k \approx 1,0$ được sử dụng, tương ứng với trạng thái ứng suất gần đẳng hướng.

Sau khi đào hầm, trường ứng suất ban đầu bị phá vỡ và tái phân bố xung quanh biên công trình. Đối với trường hợp lỗ tròn trong môi trường đàn hồi đẳng hướng, phân bố ứng suất được mô tả bởi nghiệm Kirsch. Ứng suất tiếp tuyến tại một điểm trên biên đào được xác định theo:

$$\sigma_\theta = \sigma_v \cdot (1+k) - 2 \cdot \sigma_h \cdot \cos(2\theta), \text{ MPa} \quad (3)$$

Trong đó: σ_θ - Ứng suất tiếp tuyến tại biên hầm, MPa; θ - góc vị trí xét trên biên hầm, độ.

Ứng suất tiếp tuyến đạt giá trị lớn nhất tại các vị trí $\theta = 0^\circ$ và 90° . Với giả thiết $k \approx 1,0$, biểu thức trên có thể được xấp xỉ trong khoảng: $\sigma_\theta \approx (2 \div 3) \cdot \sigma_v$.

Thay số với $\sigma_v = 13 \text{ MPa}$, ta thu được: $\sigma_\theta \approx 26 \div 39 \text{ MPa}$.

Tuy nhiên, Kirsch trong [8] xây dựng trên giả thiết môi trường đàn hồi tuyến tính và đồng nhất, trong khi khối đá thực tế thường có tính dị hướng, tồn tại khe nứt và chịu ảnh hưởng của quá trình đào. Do đó, trong nghiên cứu này, giá trị σ_θ được lựa chọn trong khoảng 30÷32 MPa nhằm phản ánh điều kiện làm việc bất lợi kể trên.

Bên cạnh trạng thái ứng suất địa tầng, kích thước tiết diện đào cũng có ảnh hưởng đáng kể



đến mức độ tập trung ứng suất và nội lực trong kết cấu chống. Để thuận tiện cho việc áp dụng các lời giải giải tích trong môi trường đàn hồi, tiết diện này được quy đổi về dạng mặt cắt tròn tương đương theo nguyên lý bảo toàn diện tích. Bán kính tương đương được xác định theo biểu thức:

$$a = (S/\pi)^{1/2} \quad (4)$$

Trong đó: S - Diện tích mặt cắt ngang thực của công trình, m².

Với các thông số lựa chọn tính toán ở trên, ta có bán kính tương đương của các đường lò thông thường (tiết diện 16 m²) là $a_1 \approx 2,3$ m và bán kính tương đương của hầm bơm là $a_2 \approx 3,1$ m. Sự gia tăng kích thước tiết diện dẫn đến sự thay đổi đáng kể nội lực trong kết cấu chống. Trong điều kiện ứng suất địa tầng không đổi, mô men uốn trong lớp vỏ chống có xu hướng tỷ lệ với bình phương kích thước đặc trưng của công trình (bán kính tương đương) [8]. Do đó, tỷ số nội lực uốn giữa hai tiết diện có thể được biểu diễn gần đúng:

$$(M_2/M_1) = (a_2/a_1)^2 \approx 1,8. \quad (5)$$

Như vậy có thể thấy, kích thước tiết diện đào lớn có thể làm tăng lên đáng kể (≈ 80 %) thành phần nội lực uốn trong vỏ chống hầm bơm so với đường lò thông thường, ngay cả khi ứng suất địa tầng không đổi. Kết quả này cho thấy sự gia tăng kích thước tiết diện làm thay đổi bản chất làm việc của hệ chống từ cơ chế nén vòng chủ đạo sang trạng thái nén-uốn kết hợp, đặc biệt tại các đoạn tường cao.

2.2. Ảnh hưởng của tải trọng động đến trạng thái làm việc của kết cấu chống

2.2.1. Xác định đặc trưng dao động của hệ kết cấu vỏ hầm - khối đá

Khác với các đường lò tĩnh, hầm bơm ngầm là một hệ thống động lực học phức tạp, chịu kích thích dao động liên tục từ hệ thống máy bơm công suất lớn. Trong môi trường này, kết cấu vỏ bê tông không dao động độc lập mà luôn có sự tương tác qua lại với khối đá xung quanh. Do đó, để đánh giá đúng trạng thái làm việc của hầm bơm, bắt buộc phải mô hình hóa hệ thống "vỏ hầm - nền đá" thành một hệ dao động tương đương để xác định các đặc trưng động lực học cốt lõi, đặc biệt là tần số dao động riêng.

Dựa trên nguyên lý cơ bản của động lực học công trình [14], hầm bơm được xem xét như một hệ dao động một bậc tự do có tần số dao động riêng (f_n) được xác định bằng phương trình:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ Hz.} \quad (6)$$

Trong đó: k - Độ cứng tương đương của hệ kết cấu vỏ hầm-khối đá (N/m) được xác định theo lời giải mô hình tương tác kết cấu-nền đá của N.S. Bullychev [15]; m - Khối lượng quy đổi của hệ (kg) được xác định dựa trên lý thuyết động lực học nền móng của D.D. Barkan [16].

Với giả thiết hầm bơm được chống giữ cố định bằng vỏ chống bê tông cốt thép mác 250, dày 400mm, ta xác lập được giá trị tần số dao động riêng của hệ kết cấu vỏ chống-khối đá $f_n = 30,3 \div 31,5$. Việc xác lập tần số dao động riêng của hệ kết cấu cho phép đánh giá mức độ biến đổi về mặt động lực học trong quá trình làm việc của kết cấu chống. Khi tần số dao động riêng của hệ kết cấu chống tiệm cận sát với tần số kích thích của các tổ máy bơm công suất lớn sẽ đẩy kết cấu vào trạng thái rủi ro rất cao, bởi đây chính là tiền đề cơ học dẫn đến hiện tượng cộng hưởng và khuếch đại nội lực phá hoại vỏ hầm.

2.2.2. Tải trọng dao động từ hệ thống bơm

Trong hầm bơm ngầm, tải trọng tác động lên vỏ chống không chỉ dừng lại ở áp lực địa tĩnh nguyên sinh mà còn chịu sự chi phối mạnh mẽ của tải trọng động từ quá trình vận hành của tổ hợp máy bơm ly tâm công suất lớn. Khi vận hành ở tốc độ cao, tổ hợp máy bơm sinh ra lực quán tính ly tâm biến thiên tuần hoàn, tạo thành một tải trọng kích thích điều hòa truyền trực tiếp qua bộ máy xuống nền đá và vách hầm.

Tần số của tải trọng kích thích (f_b) phụ thuộc trực tiếp vào tốc độ vòng quay của rô-to. Với tổ hợp máy bơm công suất lớn tại hầm bơm nghiên cứu có tốc độ vận hành định mức $n = 1480$ vòng/phút, tần số kích thích cơ học đập vào vỏ hầm được xác định bằng:

$$f_b = (n/60) = (1480/60) \approx 24,7 \text{ Hz.}$$

Theo lý thuyết động lực học công trình [14], mức độ nguy hiểm của tải trọng động không nằm ở giá trị lực ly tâm ban đầu, mà nằm ở hiệu ứng khuếch đại khi năng lượng dao động tương tác với kết cấu. Hệ số khuếch đại động lực học của hệ một bậc tự do được xác định bởi công thức:

$$\beta = 1 / [(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2]^{1/2}. \quad (7)$$

Trong đó: $r = f_b/f_n$ - Tỷ số giữa tần số vận hành của máy bơm và tần số riêng của hệ kết cấu chống giữ; như ở trên đã tính toán, ta có $r = f_b/f_n = 24,7/30,8 \approx 0,8$; ξ - Hệ số cản nhớt của môi trường xung quanh kết cấu chống giữ (đất đá). Theo nghiên cứu thực nghiệm của Chopra [14] và Barkan [16], hệ số cản nhớt đối với vật liệu bê tông cốt thép chịu ứng suất cao và môi trường khối đá nứt nẻ dập nát thường dao động trong khoảng từ $\xi = 0,05 \div 0,1$.



Thay số vào công thức tính toán, ta có:

$$\beta = 1 / [(1 - 0,8^2)^2 + (2,0,05 \cdot 0,8)^2]^{1/2} = 2,71.$$

Từ kết quả tính toán trên đây cho thấy hệ số khuếch đại động lực học đạt mức $\beta = 2,71$, nghĩa là nội lực thực tế tác động lên vách hầm bị đẩy lên gấp gần 3 lần so với tính toán tĩnh thông thường.

Về mặt toán học, tải trọng động truyền đến kết cấu chống giữ có thể được biểu diễn dưới dạng tải chu kỳ [14]:

$$\sigma_d(t) = \sigma_{do} \cdot \sin(\omega \cdot t), \text{ MPa} \quad (8)$$

Trong đó: σ_{do} - Biên độ ứng suất động ban đầu;

ω - Tần số góc dao động kích thích.

Tổng ứng suất trạng thái tác dụng lên kết cấu chống giữ được xác định theo nguyên lý cộng tác dụng:

$$\sigma_t = \sigma_{st} \cdot \beta \cdot \sigma_d(t), \text{ MPa.} \quad (9)$$

Trong trường hợp này, mặc dù thành phần ứng suất động ban đầu (σ_{do}) có biên độ nhỏ hơn nhiều so với ứng suất địa tĩnh (σ_{st}), nhưng dưới tác động lặp lại với số chu kỳ lớn và bị khuếch đại bởi hệ số $\beta = 2,71$, nó trở thành tác nhân vô cùng nguy hiểm. Cụ thể, thành phần ứng suất kéo cục bộ trong lớp bê tông vốn đã gia tăng khoảng 80 % do ảnh hưởng của yếu tố hình học khi đào hầm tiết diện lớn.

Đồng thời, đặc thù vận hành gián đoạn của máy bơm tạo ra các xung động quá độ tại thời điểm khởi động và dừng máy. Dù vận hành không liên tục, với tần số kích thích 24,7 Hz, lớp vỏ bê tông vẫn phải gánh chịu hàng trăm ngàn chu kỳ tải trọng lặp mỗi ngày. Theo nguyên lý của cơ học phá hoại mỏi, sự tích lũy tổn thương này kích hoạt các vi khe nứt, làm cường độ chịu kéo thực tế của bê tông suy giảm tới 40 % so với trạng thái tĩnh ban đầu. Khi ứng suất kéo tổng hợp vượt qua ngưỡng chịu tải đã bị suy thoái này ($R_{bt} \approx 1,5 \div 2,0 \text{ MPa}$), sự xuất hiện của các vết nứt và hiện tượng bong tách cục bộ trong kết cấu là hệ quả tất yếu.

2.3. Sự phát triển vùng dẻo và tương tác đá-kết cấu

Trong thực tế, khối đá xung quanh công trình không làm việc như vật liệu đàn hồi lý tưởng mà được mô tả phù hợp hơn theo tiêu chuẩn bền của Hoek-Brown [10], [11]. Khi ứng suất tiếp tuyến tại biên đào tiệm cận cường độ bền của khối đá, vùng biến dạng dẻo bắt đầu hình thành và phát triển xung quanh hầm.

Dựa trên các chỉ tiêu cơ lý của các lớp đá trầm tích trong khu vực nghiên cứu, giá trị đại diện hợp lý cho môi trường đá xen kẹp được lựa chọn khoảng $\sigma_{ci} \approx 45 \div 50 \text{ MPa}$. Đối với khối đá nứt nẻ, các tham số đặc trưng theo tiêu chuẩn Hoek-Brown được xác định với chỉ số chất lượng khối đá

$GSI \approx 40 \div 45$, hằng số vật liệu $m \approx 12$ và hệ số ảnh hưởng thi công $D = 0,5$ (phản ánh điều kiện đào lò bằng khoan nổ mìn ở mức trung bình có kiểm soát).

Với các thông số trên, cường độ chịu lực tương đương của khối đá giảm đáng kể so với đá nguyên khối, ước tính đạt khoảng $\sigma_{cm} \approx 10 \div 12 \text{ MPa}$. Trong điều kiện đó, với ứng suất tiếp tuyến tại biên công trình $\sigma_\theta \approx 31 \text{ MPa}$, tỷ số ứng suất đạt xấp xỉ 2,8 so với cường độ khối đá $\sigma_\theta / \sigma_{cm} = (31/11) = 2,8$. Điều này cho thấy trạng thái ứng suất xung quanh công trình đã tiệm cận và bắt đầu vượt qua trạng thái giới hạn, dẫn đến sự hình thành vùng biến dạng dẻo cục bộ quanh biên đào.

Quy mô vùng dẻo có thể được ước lượng theo quan hệ gần đúng giữa ứng suất tiếp tuyến và cường độ khối đá [10]:

$$r_p \approx [a \cdot (\sigma_\theta / \sigma_{cm})^{1/2}] \approx (1,67 \cdot a), \text{ m} \quad (10)$$

Với hầm bơm có bán kính tương đương $a \approx 3,1 \text{ m}$, bán kính vùng dẻo phát triển sẽ vào khoảng $r_p \approx 5,2 \text{ m}$, tương đương với phạm vi vùng dẻo quanh biên đào khoảng 2,1 m. Sự phát triển sâu rộng của vùng dẻo này làm suy giảm nghiêm trọng độ cứng của khối đá, làm thay đổi hoàn toàn cơ chế truyền tải trọng từ môi trường xung quanh vào kết cấu vỏ chống. Theo Brady & Brown [12], khi độ cứng nền giảm, nội lực trong lớp chống có xu hướng gia tăng do sự mất đi cơ chế vòm chịu lực tự nhiên của khối đá.

Đặc biệt, dưới tác động lặp của tải trọng động từ máy bơm (như đã phân tích ở mục 1), vùng dẻo này liên tục phải chịu các chu kỳ tăng/giảm tải, làm suy thoái thêm lực dính bám của nền đá bao quanh.

Đối với hầm bơm có chiều cao tường lớn, hiệu ứng vòm bị suy giảm, dẫn đến tăng đáng kể thành phần uốn dọc thân tường. Sự cộng hưởng giữa ba yếu tố: nền đá bị dẻo hóa làm mất ngầm giữ, ứng suất uốn gia tăng do hình học, và tải trọng động khuếch đại chu kỳ, đã tạo ra điều kiện cực kỳ thuận lợi cho sự hình thành các vết nứt dọc hoặc hiện tượng bong tách bê tông tại vùng tiếp giáp trong kết cấu vỏ chống của hầm bơm.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiệu ứng hình học và sự chuyển dịch cơ chế chịu lực của vỏ chống

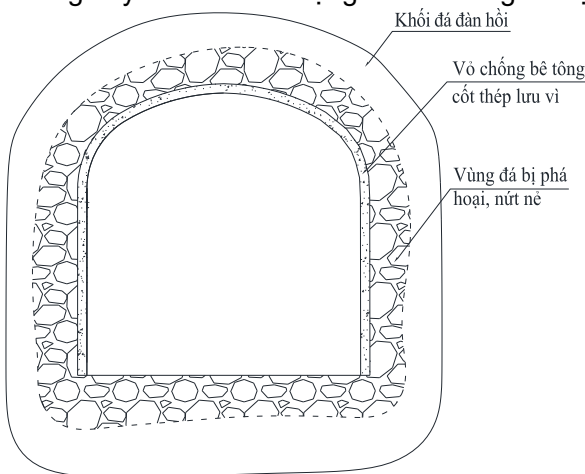
Trong điều kiện khai thác ở độ sâu khoảng - 520 m với điều kiện cụ thể ở Công ty than Vàng Danh, ứng suất nguyên sinh thẳng đứng tác dụng lên khối đá đạt khoảng 13 MPa. Khi tiến hành khai đào hầm bơm, áp dụng bài toán đàn hồi phẳng theo nghiệm Kirsch cho bài toán đường lò hình tròn, ứng suất tiếp tuyến cực đại tập trung tại vị trí



biên vách được xác định xấp xỉ 30÷32 MPa. Nếu chỉ so sánh đơn thuần giá trị ứng suất này với cường độ nén đơn trục của đá nguyên khối $\sigma_{ci}=45\div50$ MPa, hệ số huy động cường độ vẫn nằm trong giới hạn an toàn. Điều này khẳng định rằng sự mất ổn định của hầm bơm không xuất phát từ cơ chế phá hoại nén vỡ lan rộng của toàn bộ khối đá (Hình 3).

Tuy nhiên, khi đánh giá theo tiêu chuẩn Hoek-Brown cho môi trường khối đá nứt nẻ thực tế, kết quả tính toán (như đã trình bày ở mục 2.3) cho thấy bán kính vùng dẻo đạt tới $r_p \approx 5,2$ m. Đồng nghĩa với việc vùng dẻo đã lan sâu khoảng 2,1 m vào trong nền đá bao quanh hầm. Sự tồn tại của vùng dẻo rộng lớn này làm suy giảm nghiêm trọng độ cứng của khối đá, triệt tiêu cơ chế vòm chịu lực tự nhiên, dẫn đến việc toàn bộ tải trọng bị dồn ép trực tiếp lên kết cấu vỏ chống.

Đồng thời, do kích thước tiết diện hầm bơm lớn hơn đáng kể so với các đường lò thông thường, bản chất làm việc của hệ chống bị thay đổi từ cơ chế chịu nén thuần túy sang trạng thái chịu nén - uốn kết hợp. Trong điều kiện các yếu tố khác không đổi, mô men uốn đặc trưng trong vỏ tỷ lệ thuận với bình phương bán kính công trình. Do đó, mô men uốn tại hầm bơm đã tăng khoảng $(3,1/2,3)^2 \approx 1,8$ lần (tương ứng mức gia tăng 80 %) so với đường lò thông thường. Sự cộng hưởng giữa tải trọng dồn ép do vùng dẻo và mô men uốn gia tăng đẩy kết cấu vào trạng thái vô cùng bất lợi.

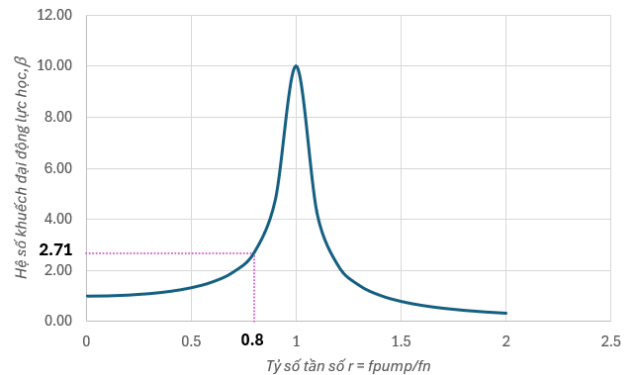


Hình 3. Vùng biến dạng dẻo (phá hủy) xung quanh hầm bơm

3.2. Về hiệu ứng khuếch đại động lực học và sự suy thoái môi

Khác với các công trình ngầm tĩnh, bản chất làm việc của hầm bơm là chịu tải trọng động điều hòa từ hệ thống thiết bị quay công suất lớn. Dựa trên nền tảng động lực học kết cấu [14], với hệ số

cần của môi trường $\xi=0,05$ và tỷ số giữa tần số vận hành của máy bơm và tần số riêng của hệ kết cấu chống giữ hầm bơm $r \approx 0,8$, hệ số khuếch đại động lực học đã đạt tới $\beta \approx 2,71$ (Hình 4).



Hình 4. Hệ số khuếch đại dao động của hệ kết cấu chống vỏ hầm bơm-khối đá

Hiệu ứng khuếch đại này đẩy ứng suất kéo cực đại tại biên vách lên mức 3,5÷4,0 MPa, vượt xa ngưỡng chịu kéo của vật liệu bê tông. Nghiêm trọng hơn, dưới tác động của hàng trăm ngàn chu kỳ dao động lặp lại liên tục, hiện tượng mỏi (fatigue) của vật liệu được kích hoạt. Sự xuất hiện của các vi khe nứt do mỏi không chỉ làm cường độ chịu kéo của bê tông bị suy giảm 40 %, mà còn làm đứt gãy sự liên kết tổ hợp với thép vòm SVP-27. Khung thép lúc này phải chuyển sang trạng thái chịu tải độc lập, gánh thêm 10÷15 % nội lực so với dự kiến thiết kế ban đầu. Sự suy giảm độ cứng tổng thể này càng làm giảm tần số riêng của hệ, kéo kết cấu lún sâu hơn vào vùng cộng hưởng nguy hiểm.

3.3. Về sự chuyển dịch cơ chế phá hoại và trạng thái giới hạn

Như đã phân tích ở các phần trên, sự mất ổn định cục bộ của hệ thống hầm bơm thực chất là hệ quả từ sự hội tụ của ba yếu tố cơ học cốt lõi: (1) hiệu ứng kích thước mở rộng, (2) sự dẻo hóa nền đá và (3) sự gia tăng tải trọng động.

Để đánh giá định lượng sự chuyển dịch cơ chế này, trạng thái giới hạn cục bộ của vỏ hầm được kiểm soát thông qua một chỉ số giới hạn không thứ nguyên [14]:

$$\Pi = (\beta \cdot \sigma_{st}) / f_t \quad (11)$$

Trong đó: β - Hệ số khuếch đại động lực học; σ_{st} - Ứng suất kéo tĩnh cực đại phát sinh do mô men uốn ở hầm tiết diện lớn. Với bán kính $a=3,1$



m, tính toán giải tích cho thấy ứng suất kéo dư tại mép ngoài vỏ bê tông đạt khoảng $\sigma_{st}=1,0$ MPa; f_t - Cường độ chịu kéo của bê tông sau khi đã bị suy thoái do mỗi chu kỳ cao (giảm 40 % so với cường độ tĩnh $R_{bt}=1,5$ MPa), tương đương $f_t=1,5 \times 0,6=0,9$ MPa.

Thay các giá trị vào biểu thức (11), ta có $\Pi=(2,71.1,0)/0,9=3,01$.

Kết quả cho thấy $\Pi(3,01)>>1,00$, cho thấy Ứng suất kéo thực tế tác dụng lên vỏ hầm đã vượt gấp 3 lần ngưỡng chịu tải an toàn của vật liệu bê tông (sau khi xét đến yếu tố suy thoái mỗi). Đây chính là nguyên nhân cơ học cốt lõi dẫn đến các vết nứt dọc và hiện tượng bong tách diện rộng tại hầm bơm thực tế.

3.4. Giải pháp kiểm soát ổn định

Từ những phân tích định lượng về cơ chế phá hoại tổng hợp nêu trên, có thể thấy rằng việc kiểm soát ổn định cho hầm bơm ngầm không nên chỉ dừng lại ở các giải pháp thụ động như tăng chiều dày vỏ bê tông hay tăng hàm lượng cốt thép. Để giải quyết tận gốc rễ vấn đề, định hướng ứng dụng công nghệ bơm ép hóa chất (các loại keo tổng hợp, nhựa gốc polyme hoặc polyurethane) vào khối đá nứt nẻ xung quanh biên đào là một hướng tiếp cận phù hợp.

Về mặt bản chất cơ học, vật liệu hóa chất khi thẩm thấu và đông kết sẽ thực hiện "mục tiêu kép": Thứ nhất, nó hàn gắn các vi nứt, phục hồi độ cứng và tính toàn vẹn của khối đá nền, từ đó giảm áp lực tĩnh truyền lên vỏ hầm, hạn chế sự gia tăng của mô men uốn. Thứ hai, và cũng là yếu tố quan trọng nhất đối với hầm bơm, bản thân các loại vật liệu polyme có đặc tính đàn hồi-nhớt (viscoelastic) rất cao. Khi được bơm vào khối đá, nó đóng vai trò như một lớp đệm "giảm xóc" tự nhiên, làm tăng đáng kể hệ số cản tiêu tán năng lượng (ξ) của môi trường. Sự gia tăng hệ số cản này sẽ triệt tiêu năng lượng dao động cưỡng bức, làm giảm trực tiếp hệ số khuếch đại động lực học (β), qua đó bảo vệ lớp vỏ bê tông khỏi trạng thái vượt giới hạn chịu kéo do mỏi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn Đức và Võ Trọng Hùng, *Công nghệ xây dựng công trình ngầm*, tập 1-2, NXB Giao thông Vận tải, 1998.
- [2] Trần Tuấn Minh, *Giáo trình cơ sở thiết kế cấu tạo công trình ngầm*, NXB Xây dựng, 2014.
- [3] Nguyễn Quang Phích, *Cơ học đá*, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2007.
- [4] Nghiêm Hữu Hạnh, *Cơ học đá*, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2004.
- [5] Võ Trọng Hùng và Phùng Mạnh Đắc, *Cơ học đá ứng dụng trong xây dựng công trình ngầm và khai thác mỏ*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2005.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành phân tích toàn diện cơ chế làm việc của hệ kết cấu chống giữ hầm bơm tại các mỏ hầm lò sâu dưới tác động tổng hợp của kích thước hình học, tương tác khối đá-vỏ chống và tải trọng động lực học. Các kết quả cốt lõi được rút ra như sau:

➤ Sự suy thoái nền đá và hiệu ứng hình học: Tại độ sâu lớn (-520 m) và khẩu độ khai đào mở rộng (bán kính tương đương khoảng 3 m), vùng biến dạng dẻo đã lan sâu 2,1 m vào nền đá xung quanh. Sự dẻo hóa này làm mất đi cơ chế vòm chịu lực tự nhiên, đồng thời kích thước lớn làm gia tăng xấp xỉ 80 % mô men uốn trong vỏ chống, chuyển hóa cơ chế chịu lực từ nén thuần túy sang nén-uốn kết hợp vô cùng bất lợi;

➤ Hiệu ứng khuếch đại động lực học: Dưới kích thích dao động liên tục từ hệ thống máy bơm công suất lớn (1480 vòng/phút), trạng thái làm việc của kết cấu bị chi phối mạnh bởi tải trọng động. Hiện tượng tiệm cận cộng hưởng đã đẩy hệ số khuếch đại động lực học lên tới 2,71 lần so với tính toán tĩnh;

➤ Sự phá hoại mỏi và trạng thái giới hạn: Tác động của hàng trăm ngàn chu kỳ tải trọng lặp đã gây ra hiện tượng tích lũy vi nứt do mỏi, làm suy giảm 40 % khả năng chịu kéo của lớp vỏ bê tông. Chỉ số đánh giá trạng thái giới hạn tổng hợp đạt mức 3,01, chứng minh minh xác bằng toán học rằng ứng suất kéo thực tế đã vượt gấp 3 lần cường độ chịu kéo mỏi của vật liệu, là nguyên nhân gốc rễ gây nứt vỡ kết cấu hầm bơm trên thực tế;

➤ Định hướng thiết kế và giải pháp: Đối với hầm bơm ngầm khẩu độ lớn, quy trình thiết kế truyền thống thuần tĩnh là không đủ mức độ an toàn. Cần thiết phải tích hợp tải trọng động và độ bền mỏi vào khâu tính toán. Về mặt thực tiễn, nghiên cứu đề xuất giải pháp ứng dụng công nghệ bơm ép hóa chất polyme vào nền đá nhằm "mục tiêu kép": vừa gia cố phục hồi độ cứng khối đá, vừa tạo lớp đệm đàn hồi - nhớt chủ động tiêu tán năng lượng rung động (ξ), từ đó bảo vệ kết cấu hầm bơm phát triển bền vững □



- [6] Nguyễn Sỹ Ngọc, *Cơ học đá*, Nhà xuất bản Giao thông Vận tải, Hà Nội, 2005.
- [7] Trần Tuấn Minh, *Giáo trình cơ học đá và khối đá*, NXB Xây dựng, 2016.
- [8] G. Kirsch, "Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre," *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, vol. 42, pp. 797-807, 1898.
- [9] Công ty Cổ phần Tư vấn Đầu tư Mỏ và Công nghiệp - Vinacomin, *Khai thác phần lò giếng mức +00÷-175 khu Vàng Danh - Mỏ than Vàng Danh*, báo cáo kỹ thuật, 2019.
- [10] E. Hoek and E. T. Brown, "Empirical strength criterion for rock masses," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol. 106, no. GT9, pp. 1013-1035, 1980.
- [11] E. Hoek, C. Carranza-Torres and B. Corkum, "Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition," in *Proceedings of NARMS-TAC Conference*, Toronto, 2002, pp. 267-273.
- [12] B. H. G. Brady and E. T. Brown, *Rock Mechanics for Underground Mining*, 3rd ed., Springer, 2006.
- [13] S.P. Timoshenko and J. M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill, 1961.
- [14] A.K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th ed., Pearson, 2012.
- [15] N.S. Buldychev, *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy* (Mechanics of Underground Structures), 2nd ed., Nedra, Moscow, 1994.
- [16] D.D. Barkan, *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill, New York, 1962.

RESEARCH ON FRACTURE MECHANISM OF WATER PUMP STATION LININGS UNDER FORCED VIBRATION

Quang Nam Pham

Electric Power University, 235 Hoang Quoc Viet, Ha Noi, Vietnam

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 09/3/2026

Revised: 03/5/2026

Accepted: 10/5/2026

*Corresponding author:

Email: nampq@epu.edu.vn

ABSTRACT

The water pumping station in underground coal mines is a crucial structure for water collection and drainage to maintain production. The operation of a pump station involves not only bearing the load of the surrounding rock mass but also the forced vibration from large-capacity equipment. Production experience shows that, despite being designed with thick reinforced concrete linings, longitudinal cracking and wall fracturing are common occurrences. Using analytical methods based on rock-structure interaction theory and the Hoek-Brown failure criterion, the study determined that expanding the tunnel opening to 30 m² at a depth of -520 m generates a ductile zone extending into the bedrock, causing severe degradation of the rock stiffness and transforming the bearing mechanism of the lining into a combined compression-bending mechanism. Specifically, under the forced oscillating load from the pump assembly (1480 rpm), the dynamic amplification factor was determined to reach 2.71, causing the cumulative development of microcracks due to fatigue, which reduced the tensile strength of the concrete by 40 %. The calculated overall limit state index was approximately 3.01, demonstrating that the actual tensile stress exceeded the material's safety threshold by three times. The research confirms the necessity of integrating dynamic coefficients into the design process and proposes reinforcing the rock mass with polymer chemicals to proactively dissipate vibration energy and sustainably protect the pump linings

Keywords: Water pump; dynamic load; Amplification coefficient; Fatigue failure; Chemical reinforcement.

@Vietnam Mining Science and Technology Association