VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Ảnh hưởng của tổ chức kết cấu theo đơn nguyên trong công nghệ đập Trụ đỡ đến nguy cơ nứt nhiệt của bê tông khối lớn

Thái Quốc Hiền[1], Mai Sỹ Hùng[2*]

[1] Viện Thủy Công – Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, Nghiên cứu sinh Trường Đại học Thủy lợi

[2] Khoa Công trình thủy – Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Công nghệ đập Trụ đỡ
Bê tông khối lớn
Nứt nhiệt
Ứng suất nhiệt
Điều kiện ràng buộc
Tổ chức kết cấu

TÓM TẮT

Công nghệ đập Trụ đỡ là công nghệ xây dựng cống vùng triều quy mô lớn do Việt Nam nghiên cứu và phát triển, có ưu điểm về điều kiện thi công, khả năng vượt khẩu độ lớn và hiệu quả kinh tế. Tuy nhiên, các cấu kiện chính như bệ trụ và trụ pin đều thuộc nhóm bê tông khối lớn, nên vẫn tiềm ẩn nguy cơ phát sinh ứng suất nhiệt và nứt nhiệt ở tuổi sớm. Trên cơ sở tổng quan các nghiên cứu về bê tông khối lớn và phân tích nguyên lý tổ chức kết cấu của công nghệ, bài báo làm rõ ảnh hưởng của phương thức tổ chức kết cấu theo các đơn nguyên độc lập đến điều kiện ràng buộc biến dạng của bê tông. Kết quả cho thấy, mặc dù không làm thay đổi quá trình thủy hóa, phương thức tổ chức này có thể làm giảm mức độ ràng buộc biến dạng, qua đó góp phần hạn chế nguy cơ nứt nhiệt ở bê tông tuổi sớm. Nghiên cứu bổ sung cơ sở lý luận về mối quan hệ giữa tổ chức kết cấu và ứng suất nhiệt của bê tông khối lớn, đồng thời gợi mở hướng nghiên cứu định lượng bằng mô phỏng số và quan trắc thực tế.

KEYWORDS

Tru do Dam technology
Mass concrete
Thermal cracking
Thermal stress
Deformation restraint
Structural configuration

ABSTRACT

The Tru Do Dam is a large-scale tidal barrage construction technology developed in Vietnam, offering advantages in long-span river crossings, construction efficiency, and economic performance. However, its main components, including buttress foundations and piers, are mass concrete structures susceptible to thermal stress and early-age thermal cracking. Based on a review of previous studies and an analysis of the structural characteristics of the Tru Do Dam, this paper clarifies the mechanism by which the arrangement of independent structural units influences deformation restraint. The results show that, although this arrangement does not alter heat generation during cement hydration, it reduces deformation restraint, thereby mitigating the risk of early-age thermal cracking as an inherent technical advantage. The findings contribute to the theoretical understanding of the relationship between structural configuration and thermal stress in mass concrete and suggest future validation through numerical simulation and field monitoring.

1. Giới thiệu

Bê tông khối lớn được sử dụng rộng rãi trong các công trình thủy lợi, thủy điện và hạ tầng giao thông nhờ khả năng chịu lực lớn, độ ổn định cao và tuổi thọ khai thác dài. Tuy nhiên, do nhiệt thủy hóa của xi măng trong quá trình đông cứng, các cấu kiện bê tông có kích thước lớn thường hình thành chênh lệch nhiệt độ đáng kể giữa vùng lõi và bề mặt. Khi sự biến dạng nhiệt bị hạn chế bởi điều kiện ràng buộc của kết cấu hoặc nền móng, ứng suất kéo có thể phát sinh và vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông ở tuổi sớm, dẫn đến nứt nhiệt. Các vết nứt này không chỉ ảnh hưởng đến khả năng chống thấm mà còn tạo điều kiện cho các tác nhân xâm thực xâm nhập vào bê tông, làm suy giảm độ bền lâu của công trình. [3,4,8].

Theo ACI 207.1R, bê tông khối lớn là kết cấu bê tông có kích thước đủ lớn để nhiệt sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng và sự tích tụ nhiệt bên trong khối bê tông cần được xem xét bằng các biện pháp kỹ thuật nhằm hạn chế chênh lệch nhiệt độ và ứng suất nhiệt. Nhiệt thủy hóa xi măng là lượng nhiệt được giải phóng trong các phản ứng hóa học giữa xi măng và nước khi bê tông đông cứng. Đối với các cấu kiện có kích thước lớn, quá trình tỏa nhiệt diễn ra nhanh trong khi khả năng thoát nhiệt ra môi trường bị hạn chế, làm nhiệt độ vùng lõi tăng cao hơn đáng kể so với bề mặt. Sự chênh lệch nhiệt độ này kết hợp với điều kiện ràng buộc biến dạng có thể làm phát sinh ứng suất kéo và gây nứt nhiệt ở tuổi sớm của bê tông [3,4,8].

Trong nhiều năm qua, kiểm soát nứt nhiệt của bê tông khối lớn đã trở thành một trong những nội dung nghiên cứu quan trọng trong lĩnh vực vật liệu và công nghệ xây dựng. Các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào tối ưu hóa thành phần vật liệu, sử dụng xi măng nhiệt thấp, phụ gia khoáng, kiểm soát nhiệt độ hỗn hợp bê tông, làm mát bên trong bằng ống tuần hoàn nước, bảo ôn bề mặt hoặc mô phỏng trường nhiệt nhằm lựa chọn trình tự và tiến độ thi công hợp lý. Những giải pháp này đã góp phần đáng kể trong việc hạn chế chênh

*Liên hệ tác giả: hungms@huce.edu.vn
Nhận ngày 02/07/2026, sửa xong ngày 29/07/2026, chấp nhận đăng ngày 30/07/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1438

lệch nhiệt độ và giảm nguy cơ nứt nhiệt ở nhiều loại công trình bê tông khối lớn [3,6,8].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu quốc tế đã khẳng định rằng, ngoài vật liệu và biện pháp thi công, điều kiện ràng buộc kết cấu cũng là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến ứng suất nhiệt và nguy cơ nứt của bê tông khối lớn. Tuy nhiên, ảnh hưởng của phương thức tổ chức kết cấu đến điều kiện ràng buộc biến dạng, đặc biệt đối với các công trình thủy có kết cấu theo đơn nguyên, vẫn còn ít được nghiên cứu.

Mặc dù vậy, phần lớn các nghiên cứu hiện nay đều xem hình thức kết cấu và điều kiện ràng buộc biến dạng là các điều kiện đầu vào của bài toán phân tích nhiệt. Nói cách khác, các nghiên cứu chủ yếu tìm kiếm giải pháp kiểm soát ứng suất nhiệt trong một hệ kết cấu đã được xác định, trong khi ảnh hưởng của phương thức tổ chức kết cấu đến mức độ ràng buộc biến dạng và nguy cơ phát sinh nứt nhiệt vẫn chưa được quan tâm đầy đủ. Đây là khoảng trống nghiên cứu có ý nghĩa cả về lý luận và thực tiễn, đặc biệt đối với các công nghệ xây dựng mới có tổ chức kết cấu khác với công trình bê tông toàn khối truyền thống [3,4].

Công nghệ đập Trụ đỡ được nghiên cứu và phát triển tại Việt Nam nhằm giải quyết đồng thời các yêu cầu về kết cấu, nền móng và tổ chức thi công đối với các công trình cống, đập ngăn nước trên sông. Đây là công nghệ được hình thành trên cơ sở tích hợp giữa giải pháp kết cấu và giải pháp thi công. Về kết cấu, công trình được tổ chức thành các bộ phận kết cấu độc lập gồm trụ pin đổ liền khối với bệ trụ và ngàm vào hệ cọc cắm sâu vào nền đất; dầm đỡ van gác lên hai hốc dầm trên bệ trụ; cửa van, và tường cừ chống thấm. Về thi công, các đơn nguyên được xây dựng theo từng phân đoạn bằng khung vây cừ thép mà không cần đắp đê quai toàn tuyến, đồng thời vẫn bảo đảm khả năng thoát nước và giao thông thủy trong quá trình xây dựng [1,2].

Trong công nghệ này, các bệ trụ và trụ pin đều có kích thước lớn đều thuộc các cấu kiện bê tông khối lớn, do đó vẫn phải đối mặt với nguy cơ phát sinh ứng suất nhiệt và nứt nhiệt trong giai đoạn đầu sau khi đổ bê tông. Tuy nhiên, khác với các công trình bê tông toàn khối truyền thống, các cấu kiện này được tổ chức thành các đơn nguyên độc lập về kết cấu và thi công, tạo nên điều kiện làm việc khác biệt của toàn hệ công trình.

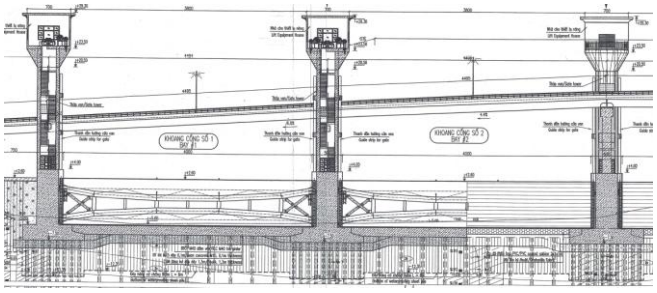
Cần nhấn mạnh rằng, nguyên lý phân đoạn kết cấu của công nghệ đập Trụ đỡ không được hình thành với mục tiêu kiểm soát nứt nhiệt. Mục tiêu ban đầu của công nghệ là tạo điều kiện thi công theo từng phân đoạn trong lòng sông mà không cần đắp đê quai toàn tuyến, đồng thời phù hợp với sơ đồ chịu lực trên nền cọc, yêu cầu thông thuyền và khả năng kết hợp cầu giao thông. Tuy nhiên, dưới góc độ cơ học kết cấu, phương thức tổ chức công trình thành các đơn nguyên độc lập có khả năng làm thay đổi điều kiện ràng buộc biến dạng của bê tông khối lớn trong quá trình phát triển nhiệt thủy hóa. Đây là một giá trị kỹ thuật chưa được phân tích trong các nghiên cứu trước đây.

Trên cơ sở đó, bài báo tập trung phân tích ảnh hưởng của tổ chức kết cấu theo phân đoạn trong công nghệ đập Trụ đỡ đến điều kiện ràng buộc biến dạng của các cấu kiện bê tông khối lớn, qua đó làm rõ cơ chế góp phần giảm nguy cơ nứt nhiệt như một giá trị kỹ thuật phát sinh của công nghệ, đồng thời bổ sung cơ sở khoa học cho việc đánh giá độ bền lâu của các công trình bê tông được xây dựng theo công nghệ này.

2. Công nghệ đập Trụ đỡ và đặc điểm tổ chức kết cấu của cấu kiện bê tông khối lớn

2.1. Công nghệ đập Trụ đỡ và nguyên lý tổ chức công trình

Công nghệ đập Trụ đỡ là một công nghệ xây dựng được phát triển nhằm giải quyết đồng thời các yêu cầu về ổn định chịu lực, chống thấm, chống xói và tổ chức thi công đối với các công trình ngăn nước trên sông. Khác với các kết cấu cống bê tông cốt thép truyền thống được hình thành từ một khối kết cấu liên tục, công nghệ đập Trụ đỡ tổ chức công trình thành các đơn nguyên kết cấu có khả năng chịu lực và thi công tương đối độc lập, sau đó liên kết thành một hệ công trình hoàn chỉnh [1,2] (Hình 1).



Hình 1. Dầm đáy gác lên bệ trụ pin trong đập trụ đỡ Cống Lèn (Thanh Hóa).

Về nguyên lý chịu lực, tải trọng của công trình được truyền chủ yếu thông qua trụ pin và bệ trụ ngàm chặt trên các nhóm cọc cắm sâu vào nền đất. Các trụ pin là kết cấu chịu lực chính, tiếp nhận tải trọng từ cầu giao thông, thiết bị vận hành và tải trọng thủy lực, sau đó truyền xuống bệ trụ và hệ cọc móng. Cách tổ chức này tạo nên sơ đồ truyền lực khác biệt so với các công trình cống truyền thống, trong đó bản đáy, trụ pin đổ liền khối và đóng vai trò là cấu kiện chịu lực liên tục trên nền.

Về nguyên lý chống thấm, công nghệ sử dụng đường viền thấm theo phương đứng. Trong mỗi khoang cống, trụ pin, bệ trụ, dầm đỡ van, cửa van và tường cừ chống thấm phối hợp tạo thành một hệ ngăn nước liên tục từ thân công trình xuống nền đất. Khác với đường viền thấm ngang là chiều rộng bản đáy của cống truyền thống, giải pháp này kéo dài đường thấm theo chiều sâu nền móng, góp phần nâng cao ổn định thấm của công trình [1,2].

Về nguyên lý chống xói, công nghệ đập Trụ đỡ ưu tiên mở rộng tối đa khẩu độ thoát nước, bảo đảm tiết diện dòng chảy gần với điều kiện tự nhiên của lòng sông. Nhờ đó, lưu tốc qua công trình được giảm đáng kể, hạn chế nguy cơ xói cục bộ ở thượng lưu và hạ lưu, đồng thời giảm quy mô các công trình tiêu năng.

Điểm đặc trưng của công nghệ không chỉ nằm ở từng giải pháp riêng lẻ mà ở sự tích hợp giữa giải pháp kết cấu và giải pháp thi công. Ngay từ giai đoạn hình thành công nghệ, phương án phân đoạn kết cấu được lựa chọn nhằm cho phép thi công từng đơn nguyên bằng khung vây cừ thép, không cần đắp đê quai toàn tuyến, đồng thời vẫn duy trì khả năng thoát nước và giao thông thủy trong suốt quá trình xây dựng. Vì vậy, phân đoạn kết cấu không phải là hệ quả của quá trình thi công mà là một đặc trưng nội tại của chính công nghệ đập Trụ đỡ.

2.2. Đặc điểm tổ chức kết cấu của cấu kiện bê tông khối lớn trong đập Trụ đỡ

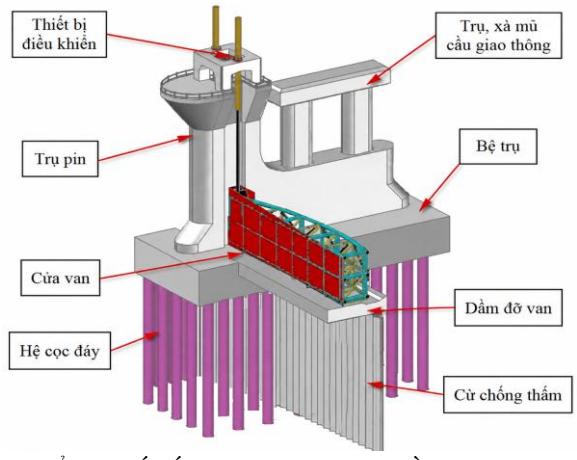
Các cấu kiện bê tông khối lớn trong công nghệ đập Trụ đỡ tập trung chủ yếu ở bệ trụ và trụ pin (Hình 2), là các cấu kiện chịu lực chính của công trình. Bệ trụ thường có chiều cao khoảng 2,5 ÷ 3,0 m, chiều rộng 8 ÷ 12 m và chiều dài theo phương dòng chảy từ 25 ÷ 40 m; trong khi trụ pin có chiều cao từ 6 ÷ 10 m, chiều dày 3 ÷ 5 m và chiều dài từ 20 ÷ 35 m. Với kích thước như vậy, các cấu kiện này thuộc nhóm bê tông khối lớn và chịu ảnh hưởng đáng kể của nhiệt thủy hóa trong giai đoạn đầu sau khi đổ bê tông[1,3].

Tuy nhiên, điểm khác biệt của công nghệ đập Trụ đỡ không nằm ở kích thước của các cấu kiện mà ở phương thức tổ chức kết cấu: Các cấu kiện chịu lực thành các bộ phận kết cấu độc lập. Mỗi khoang cống bao gồm bệ trụ liền khối với trụ pin và ngàm vào hệ cọc, dầm đỡ van gác lên hai hốc dầm trên bệ trụ, cửa van tỳ vào dầm van, tường cừ chống thấm gồm nhiều thanh cừ liên kết với nhau và liên kết ngàm với đáy dầm van, đáy bệ trụ tạo thành một hệ chịu lực và ngăn nước hoàn chỉnh.

Đặc điểm này xuất phát từ chính nguyên lý của công nghệ. Ngay từ giai đoạn thiết kế, công trình đã được phân chia thành các đơn nguyên nhằm đáp ứng yêu cầu thi công trong lòng sông bằng khung vây cừ thép mà không cần đắp đê quai toàn tuyến. Tùy theo điều kiện thủy văn, yêu cầu dẫn dòng và tiến độ xây dựng, mỗi đơn nguyên có thể được tổ chức thi công theo các tổ hợp khác nhau, như một trụ pin kết hợp với một dầm đỡ van hoặc hai trụ pin kết hợp với một dầm đỡ van. Như vậy, phân đoạn thi công không phải là giải pháp áp dụng sau khi thiết kế kết cấu, mà chính là hệ quả của phương thức tổ chức kết cấu ngay từ đầu. Đây là đặc điểm khác biệt cơ bản giữa công nghệ đập Trụ đỡ và các kết cấu cống bê tông truyền thống.

Sau khi hoàn thành, các đơn nguyên được liên kết với nhau để tạo thành một hệ công trình thống nhất về khả năng chịu lực, ngăn nước và khai thác. Tuy nhiên, xét dưới góc độ cơ học kết cấu, mỗi đơn nguyên vẫn duy trì phạm vi làm việc riêng của các cấu kiện bê tông khối lớn. Điều này dẫn đến sự khác biệt về điều kiện ràng buộc biến dạng so với kết cấu bê tông toàn khối liên tục, đặc biệt trong giai đoạn phát triển nhiệt thủy hóa của bê tông tuổi sớm.

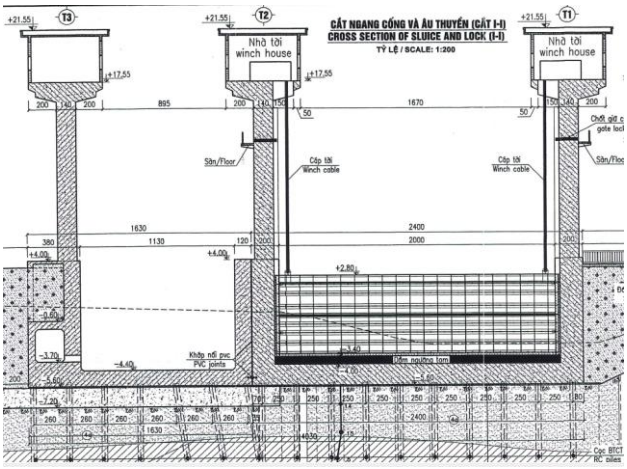
Có thể thấy rằng, tổ chức kết cấu theo đơn nguyên là đặc trưng cốt lõi của công nghệ đập Trụ đỡ. Đặc trưng này ban đầu được hình thành nhằm giải quyết các yêu cầu về thi công, nền móng và điều kiện khai thác, nhưng đồng thời tạo nên một điều kiện cơ học khác biệt đối với các cấu kiện bê tông khối lớn. Đây cũng chính là cơ sở để phân tích ảnh hưởng của tổ chức kết cấu theo đơn nguyên đến nguy cơ phát sinh ứng suất nhiệt và nứt nhiệt được trình bày trong phần tiếp theo.



Hình 2. Tổ chức kết cấu đập trụ đỡ (Báo cáo Đề tài Ngăn Sông Lớn).

3. Cơ chế ảnh hưởng của tổ chức kết cấu theo đơn nguyên đến nguy cơ nứt nhiệt của bê tông khối lớn

3.1. Điều kiện ràng buộc biến dạng của kết cấu bê tông khối lớn truyền thống



Hình 3. Trụ pin và bản đấy liền khối trong kết cấu cống truyền thống (cống Kênh De).

Trong quá trình đóng rắn của bê tông khối lớn, nhiệt thủy hóa xi măng làm nhiệt độ bên trong khối bê tông tăng lên đáng kể. Sau khi đạt nhiệt độ cực đại, bê tông bắt đầu nguội dần và có xu hướng co lại do biến dạng nhiệt. Nếu sự co ngót này bị hạn chế bởi nền móng, các cấu kiện lân cận hoặc các bộ phận khác của công trình, trong bê tông sẽ phát sinh ứng suất kéo. Khi ứng suất kéo vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông ở tuổi sớm, các vết nứt nhiệt sẽ xuất hiện [3,4].

Đối với các công trình cống bê tông cốt thép truyền thống, nhiều khoang cống liên kết thành một khối kết cấu liên tục (hình 3): Bản đáy, trụ pin, tường ngực và các kết cấu liên quan được đổ bê tông liên tục hoặc liên kết cứng với nhau, tạo thành một hệ kết cấu có

độ cứng lớn. Đồng thời, toàn bộ công trình được đặt trực tiếp trên nền đã xử lý trên bản đáy liên tục, làm cho khả năng biến dạng tự do của từng cấu kiện bị hạn chế đáng kể.

Trong điều kiện đó, sự thay đổi nhiệt độ của một cấu kiện không chỉ chịu ảnh hưởng của chính cấu kiện đó mà còn chịu tác động ràng buộc từ toàn bộ hệ kết cấu lân cận. Nói cách khác, ứng suất nhiệt trong bê tông không chỉ phụ thuộc vào chênh lệch nhiệt độ mà còn phụ thuộc vào mức độ ràng buộc biến dạng của hệ kết cấu. Vì vậy, đối với các công trình bê tông toàn khối, điều kiện ràng buộc thường được xem là một trong những nguyên nhân quan trọng làm gia tăng nguy cơ nứt nhiệt [3,6].

3.2. Sự thay đổi điều kiện ràng buộc trong công nghệ đập Trụ đỡ

Công nghệ đập Trụ đỡ không tổ chức công trình dưới dạng một khối bê tông liên tục mà phân chia thành các đơn nguyên kết cấu độc lập. Mỗi đơn nguyên bao gồm bệ trụ, trụ pin, dầm đỡ van, hệ cọc, cửa van và tường cừ chống thấm, được thi công và hoàn thiện độc lập trước khi hình thành toàn bộ công trình.

Đối với các cấu kiện bê tông khối lớn như bệ trụ và trụ pin, phạm vi chịu ảnh hưởng của điều kiện ràng buộc vì vậy chủ yếu giới hạn trong từng đơn nguyên kết cấu. Các đơn nguyên liền kề không tạo thành một khối bê tông liên tục mà được bố trí khe nối kín nước và làm việc theo nguyên lý truyền lực riêng. Điều này làm giảm mức độ tương tác cưỡng bức về biến dạng giữa các cấu kiện bê tông khối lớn nằm ở các khoang khác nhau.

Cần nhấn mạnh rằng, việc tổ chức kết cấu theo đơn nguyên không được lựa chọn nhằm mục đích kiểm soát ứng suất nhiệt, mà xuất phát từ yêu cầu công nghệ thi công, điều kiện địa chất nền móng, yêu cầu thông thuyền và giải pháp kết hợp cầu giao thông. Tuy nhiên, dưới góc độ cơ học kết cấu, chính phương thức tổ chức này đã làm thay đổi điều kiện biên của bài toán nhiệt. Thay vì một hệ kết cấu có phạm vi ràng buộc lớn, mỗi cấu kiện bê tông khối lớn chủ yếu chịu ảnh hưởng của phạm vi ràng buộc trong chính đơn nguyên mà nó thuộc về.

Xét về cơ học, khi phạm vi ràng buộc giảm, khả năng biến dạng tự do của bê tông trong quá trình tăng nhiệt và hạ nhiệt được cải thiện. Mặc dù nhiệt thủy hóa của vật liệu không thay đổi, ứng suất phát sinh do biến dạng bị hạn chế có xu hướng giảm theo mức độ giảm của điều kiện ràng buộc. Đây là cơ sở lý thuyết giải thích vì sao tổ chức kết cấu theo đơn nguyên có thể ảnh hưởng đến nguy cơ nứt nhiệt của bê tông khối lớn.

3.3. Hàm ý của tổ chức kết cấu theo đơn nguyên đối với nguy cơ nứt nhiệt và độ bền lâu của kết cấu

Các phân tích trên cho thấy, tổ chức kết cấu theo đơn nguyên trong công nghệ đập Trụ đỡ không làm thay đổi bản chất của quá trình phát sinh nhiệt thủy hóa trong bê tông. Nhiệt lượng sinh ra vẫn phụ thuộc chủ yếu vào loại xi măng, thành phần cấp phối, kích thước cấu kiện, điều kiện môi trường và biện pháp thi công. Do đó, các yêu cầu về kiểm soát nhiệt độ, lựa chọn vật liệu và tổ chức thi công đối với bê tông khối lớn vẫn cần được tuân thủ theo các quy định và hướng dẫn kỹ thuật hiện hành [3,8].

Tuy nhiên, dưới góc độ cơ học kết cấu, phương thức tổ chức công trình theo các đơn nguyên độc lập có thể làm thay đổi điều kiện ràng buộc biến dạng của các cấu kiện bê tông khối lớn. Đây không phải là giải pháp tác động trực tiếp vào nguồn sinh nhiệt, mà là sự thay đổi về điều kiện làm việc của kết cấu trong quá trình phát triển và tiêu tán nhiệt. Vì vậy, ảnh hưởng của tổ chức kết cấu cần được xem xét như một yếu tố bổ sung bên cạnh các giải pháp truyền thống trong đánh giá nguy cơ nứt nhiệt.

Cần thấy rằng, nguy cơ nứt nhiệt của bê tông khối lớn là kết quả tổng hợp của nhiều yếu tố, bao gồm kích thước khối đổ, thành phần và cấp phối bê tông, đặc tính nhiệt thủy hóa của xi măng, điều kiện môi trường, trình tự thi công và điều kiện ràng buộc của kết cấu. Trong đó, các yếu tố vật liệu và công nghệ thi công chủ yếu ảnh hưởng đến quá trình phát sinh, tích tụ và tiêu tán nhiệt trong bê tông, còn điều kiện ràng buộc kết cấu quyết định mức độ chuyển hóa biến dạng nhiệt thành ứng suất nhiệt. Vì vậy, tổ chức kết cấu theo đơn nguyên không thay thế các giải pháp truyền thống về vật liệu và thi công mà được xem là một yếu tố bổ sung, góp phần cải thiện điều kiện làm việc của kết cấu trong quá trình phát triển nhiệt thủy hóa. Sự kết hợp đồng bộ giữa các giải pháp về vật liệu, công nghệ thi công và tổ chức kết cấu được kỳ vọng sẽ mang lại hiệu quả cao hơn trong việc kiểm soát nguy cơ nứt nhiệt của bê tông khối lớn.

Đối với công nghệ đập Trụ đỡ, các bệ trụ và trụ pin được tổ chức thành một đơn nguyên kết cấu và độc lập với nhau. Cách tổ chức này được hình thành nhằm đáp ứng yêu cầu chịu lực, nền móng và thi công theo từng phân đoạn trong điều kiện xây dựng trên sông. Tuy nhiên, xét dưới góc độ cơ học kết cấu, việc giới hạn phạm vi ràng buộc của từng cấu kiện trong từng đơn nguyên có thể tạo điều kiện thuận lợi hơn cho sự phát triển biến dạng nhiệt tự do của bê tông tuổi sớm. Đây được xem là một giá trị kỹ thuật phát sinh của công nghệ, không phải là mục tiêu thiết kế ban đầu nhưng có ý nghĩa đối với việc kiểm soát nguy cơ nứt nhiệt.

Nứt nhiệt ở tuổi sớm thường là bước khởi đầu của nhiều quá trình suy giảm chất lượng kết cấu bê tông trong môi trường làm việc lâu dài. Các vết nứt tạo điều kiện cho nước và các ion xâm thực như clorua hoặc sunfat thâm nhập vào bê tông, thúc đẩy quá trình ăn mòn cốt thép, làm giảm khả năng chống thấm và ảnh hưởng đến tuổi thọ khai thác của công trình. Vì vậy, mọi giải pháp góp phần hạn chế nguy cơ nứt nhiệt ngay từ giai đoạn thi công đều có ý nghĩa tích cực đối với độ bền lâu của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường thủy lợi và vùng ven biển [4,7].

Ngoài việc nâng cao độ bền lâu, việc hạn chế nguy cơ nứt nhiệt còn có thể làm giảm nhu cầu xử lý và sửa chữa các vết nứt trong quá trình thi công cũng như giai đoạn khai thác công trình, qua đó góp phần tiết kiệm chi phí bảo trì, sửa chữa và nâng cao hiệu quả đầu tư. Mặc dù chưa được đánh giá định lượng trong phạm vi nghiên cứu

này, đây là một lợi ích thực tiễn đáng quan tâm của phương thức tổ chức kết cấu theo đơn nguyên trong công nghệ đập Trụ đỡ.

Bên cạnh ý nghĩa về mặt cơ học kết cấu, việc hạn chế nguy cơ nứt nhiệt ngay từ giai đoạn thi công còn mang lại những lợi ích thực tiễn đối với quá trình xây dựng và khai thác công trình. Khi giảm được các vết nứt do nhiệt, nhu cầu xử lý, sửa chữa và gia cường kết cấu sau thi công có thể được hạn chế, qua đó góp phần giảm chi phí khắc phục, rút ngắn thời gian thi công và nâng cao hiệu quả đầu tư. Đồng thời, việc hạn chế sự hình thành các vết nứt ban đầu cũng góp phần cải thiện khả năng chống thấm, giảm nguy cơ xâm nhập của các tác nhân ăn mòn, từ đó nâng cao độ bền lâu và tuổi thọ khai thác của công trình. Mặc dù các lợi ích này cần được đánh giá định lượng trong các nghiên cứu tiếp theo, song đây là những ý nghĩa thực tiễn đáng chú ý của phương thức tổ chức kết cấu theo đơn nguyên trong công nghệ đập Trụ đỡ.

Cần nhấn mạnh rằng, những phân tích trong nghiên cứu này được xây dựng trên cơ sở phân tích nguyên lý tổ chức kết cấu và cơ chế làm việc của công nghệ đập Trụ đỡ. Để đánh giá định lượng mức độ ảnh hưởng của phương thức tổ chức kết cấu đến ứng suất nhiệt và nguy cơ nứt của bê tông khối lớn, cần tiếp tục thực hiện các nghiên cứu mô phỏng trường nhiệt - ứng suất bằng phương pháp phần tử hữu hạn, kết hợp với quan trắc nhiệt độ và biến dạng tại các công trình thực tế. Đây cũng là hướng nghiên cứu cần được triển khai trong thời gian tới nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học cho việc thiết kế và thi công các công trình bê tông khối lớn theo công nghệ này.

4. Kết luận

Từ kết quả phân tích, có thể rút ra một số kết luận sau:

1. Trong công nghệ đập Trụ đỡ, các cấu kiện chịu lực chính như bệ trụ và trụ pin đều thuộc nhóm kết cấu bê tông khối lớn, do đó vẫn phải đối mặt với nguy cơ phát sinh ứng suất nhiệt và nứt nhiệt trong giai đoạn đầu sau khi đổ bê tông.

2. Đặc trưng nổi bật của công nghệ là tổ chức các cấu kiện thành các đơn nguyên kết cấu độc lập gắn liền với giải pháp thi công theo phân đoạn. Phương thức tổ chức này được hình thành nhằm đáp ứng yêu cầu chịu lực, nền móng và thi công, không phải nhằm kiểm soát nứt nhiệt.

3. Xét dưới góc độ cơ học kết cấu, tổ chức kết cấu theo đơn nguyên làm thay đổi điều kiện ràng buộc biến dạng của các cấu kiện bê tông khối lớn. Đây là cơ sở lý thuyết cho thấy công nghệ đập Trụ đỡ có khả năng góp phần hạn chế nguy cơ nứt nhiệt của bê tông tuổi sớm như một giá trị kỹ thuật phát sinh trong quá trình phát triển và ứng dụng công nghệ.

4. Kết quả nghiên cứu góp phần bổ sung góc nhìn về mối quan hệ giữa tổ chức kết cấu và ứng suất nhiệt của bê tông khối lớn, đồng thời gợi mở hướng nghiên cứu định lượng bằng mô phỏng số và quan trắc thực tế để đánh giá đầy đủ hơn ảnh hưởng của yếu tố này đối với độ bền lâu của công trình.

Tài liệu tham khảo

[1]. Trần Đình Hòa, (2022), *Hiệu quả khoa học và công nghệ nổi bật trong Dự án hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

[2]. Trần Minh Thái, Nguyễn Tài Thành, Dương Ngọc Hùng (2018), Công nghệ đập Trụ đỡ và triển vọng ứng dụng trong xây dựng công trình ngăn sông vùng ven biển miền Trung, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi số 51.

[3]. ACI Committee 207. (2023). *Guide to Mass Concrete (ACI 207.1R-23)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

[4]. American Concrete Institute (ACI). (2001). *ACI 224R-01: Control of Cracking in Concrete Structures*. Farmington Hills, MI, USA.

[5]. Fairbairn, E. M. R., & Azenha, M. (Eds.). (2019). *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS*. Springer, Cham.

[6]. Zhu, B. (2013). *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. Butterworth-Heinemann, Elsevier.

[7]. Fédération internationale du béton (fib). (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn, Berlin.

[8]. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2012). *TCVN 9341:2012 – Bê tông khối lớn – Thi công và nghiệm thu*. Hà Nội.

[9]. Zhang, Y., Kim, T., Castel, A., & Xu, T. (2023). Thermal Cracking in High Volume of Fly Ash and GGBFS Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17, Article 65.

[10]. Sheng, X., Xiao, S., Zheng, W., Sun, H., Yang, Y., & Ma, K. (2023). Experimental and finite element investigations on hydration heat and early cracks in massive concrete piers. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01926.