

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA TƯỜNG CỪ BÊ TÔNG CỐT THÉP ỨNG SUẤT TRƯỚC TRONG CÔNG TRÌNH KÈ BỜ BẰNG LÝ THUYẾT CƠ HỌC RẠN NỨT

STUDY ON THE CALCULATION OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE SHEET PILES IN RETAINING WALL STRUCTURES USING FRACTURE MECHANICS THEORY

TRẦN LONG GIANG

Viện Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email: giangtl.ird@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Việc sử dụng lý thuyết cơ học rạn nứt trong thiết kế tường kè bê tông cốt thép là một phương pháp tiên tiến giúp đánh giá chính xác hơn khả năng chịu lực và độ bền của kết cấu, đặc biệt khi xét đến sự hình thành và phát triển của các vết nứt trong vật liệu.

Trong bài viết này, tác giả phân tích các bộ phận kết cấu của công trình kè bờ được xây dựng từ các cọc cừ bê tông cốt thép ứng suất trước và giới thiệu phương pháp tính toán kết cấu dựa trên lý thuyết cơ học rạn nứt. Thông qua việc so sánh kết quả tính toán của một ví dụ cụ thể, tác giả đã đánh giá ưu điểm và hạn chế của việc áp dụng lý thuyết cơ học rạn nứt, theo Eurocode 2-2004 cũng như TCVN 5574:2018 trong thiết kế công trình kè bờ sử dụng cọc cừ bê tông cốt thép ứng suất trước. Kết quả tính bề rộng vết nứt theo Eurocode 2-2004 cho giá trị nhỏ hơn nhiều so với theo TCVN 5574:2018. Từ đó, tác giả đề xuất áp dụng tính toán vết nứt theo Eurocode 2-2004 dựa trên mô hình đàn hồi tuyến tính (LEFM). Mô hình này phù hợp với các giả định về ứng xử đàn hồi của bê tông và cốt thép trong điều kiện tải trọng thông thường, giúp đơn giản hóa quá trình tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết, phù hợp cho việc thiết kế các công trình kè bờ sử dụng cọc cừ bê tông cốt thép ứng suất trước tại Việt Nam.

Từ khóa: *Lý thuyết cơ học rạn nứt, kè bờ, cọc cừ, bê tông cốt thép, ứng lực trước.*

Abstract

The use of fracture mechanics theory in the design of reinforced concrete retaining walls is an advanced method that helps to more accurately assess the load-bearing capacity and durability of the structure, especially when considering the formation and propagation of cracks in the material.

In this paper, the author analyzes the structural

components of a revetment constructed from prestressed reinforced concrete piles and introduces a calculation method based on fracture mechanics theory. Through the comparison of calculation results from a specific example, the author evaluates the advantages and limitations of applying fracture mechanics theory and TCVN 5574:2018 in the design of retaining structures using prestressed reinforced concrete piles. The results of crack width calculations according to Eurocode 2-2004 are significantly smaller than those according to TCVN 5574:2018. Based on this, the author proposes applying crack width calculations based on Eurocode 2-2004, which utilizes the Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) model. This model aligns with the assumptions of elastic behavior in concrete and reinforcement under normal loading conditions, simplifying the calculation process while ensuring the necessary accuracy. It is well-suited for the design of revetment structure using prestressed reinforced concrete sheet piles in Vietnam.

Keywords: *Fracture mechanics theory, revetment, Sheet Pile, Reinforced concrete, Prestressed.*

1. Giới thiệu về lý thuyết cơ học rạn nứt

Lý thuyết cơ học rạn nứt là một nhánh của cơ học vật liệu nghiên cứu về sự hình thành, phát triển và lan truyền các vết nứt trong vật liệu dưới tác động của tải trọng. Nó cung cấp công cụ lý thuyết để đánh giá khả năng chịu lực và độ bền của các cấu kiện khi xuất hiện các vết nứt, một yếu tố quan trọng trong việc thiết kế các công trình có tính bền vững cao như cầu, tường kè, bể chứa, và các kết cấu chịu tải trọng lớn [1].

Bê tông cốt thép là vật liệu phức tạp do sự kết hợp giữa bê tông (vật liệu giòn) và cốt thép (vật liệu dẻo), nên việc hiểu rõ cơ chế rạn nứt giúp đảm bảo an toàn và độ bền của kết cấu.

1.1. Đặc điểm của rạn nứt trong bê tông cốt thép

Bê tông: Là vật liệu giòn, dễ bị nứt dưới tác dụng của tải trọng kéo. Khi bê tông bị nứt, các vết nứt thường xuất hiện tại các vị trí có ứng suất kéo vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông.

Vết nứt trong bê tông thường bắt đầu từ các khuyết tật vi mô hoặc vùng có ứng suất tập trung.

Khi ứng suất kéo vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông, vết nứt sẽ hình thành và phát triển.

Cốt thép: Là vật liệu dẻo, có khả năng chịu kéo tốt. Khi bê tông bị nứt, cốt thép sẽ chịu lực kéo và giúp hạn chế sự mở rộng của vết nứt.

Cốt thép giúp kiểm soát sự mở rộng của vết nứt bằng cách chịu lực kéo và phân bố lại ứng suất.

1.2. Các mô hình lý thuyết cơ học rạn nứt trong bê tông cốt thép

a. Mô hình đàn hồi tuyến tính (Linear Elastic Fracture Mechanics - LEFM)

Ứng dụng: LEFM được sử dụng để phân tích các vết nứt trong bê tông khi vật liệu được coi là đàn hồi tuyến tính và vùng biến dạng dẻo tại đầu vết nứt là nhỏ [1].

Thông số chính:

Hệ số cường độ ứng suất (Stress Intensity Factor - K): Đánh giá trạng thái ứng suất tại đầu vết nứt.

Độ dai chống nứt (Fracture Toughness - K_{IC}): Giá trị tới hạn của K , khi vượt quá giá trị này, vết nứt

sẽ phát triển.

b. Mô hình đàn hồi - Dẻo (Elastic-Plastic Fracture Mechanics - EPFM)

Ứng dụng: EPFM được sử dụng khi vùng biến dạng dẻo tại đầu vết nứt là đáng kể, thường xảy ra trong bê tông cốt thép do sự kết hợp giữa bê tông giòn và cốt thép dẻo.

Thông số chính:

J-Integral: Đo lường năng lượng giải phóng khi vết nứt phát triển.

Độ mở đầu vết nứt (Crack Tip Opening Displacement - CTOD): Đánh giá khả năng chịu tải của vật liệu khi có vết nứt.

c. Mô hình năng lượng (Energy-Based Models)

Nguyên lý Griffith: Vết nứt sẽ phát triển khi năng lượng giải phóng do sự phát triển của vết nứt lớn hơn hoặc bằng năng lượng bề mặt cần thiết để tạo ra bề mặt mới.

Ứng dụng: Phân tích sự phát triển của vết nứt trong bê tông dựa trên cân bằng năng lượng.

1.3. Ứng dụng trong thiết kế và kiểm tra kết cấu

Thiết kế kết cấu: Sử dụng lý thuyết cơ học rạn nứt để thiết kế các kết cấu bê tông cốt thép có khả năng chịu tải tốt và hạn chế sự phát triển của vết nứt.

Kiểm tra và đánh giá: Phân tích các vết nứt hiện có trong kết cấu để đánh giá mức độ an toàn và đề xuất các biện pháp sửa chữa, gia cố.



Hình 1. Vị trí công trình nghiên cứu



Hình 2. Cọc cừ SW840 dùng cho công trình kè bờ

2. Tính toán kết cấu kè tường cừ bê tông cốt thép ứng suất trước theo lý thuyết cơ học rạn nứt

Hiện nay, việc tính toán vết nứt trong kết cấu kè tường cừ bê tông cốt thép ứng suất trước tại Việt Nam chủ yếu áp dụng các tiêu chuẩn ACI 318, Eurocode 2-2004 và TCVN 5574:2018. Trong đó, ACI 318 có phương pháp tính toán đơn giản, nhưng công thức xác định chiều rộng vết nứt lại sử dụng một hệ số phụ thuộc vào môi trường, dao động từ 0,5 đến 1,0, dẫn đến kết quả tính toán có sự biến động lớn và phụ thuộc vào kinh nghiệm của người thiết kế. Bài báo này sẽ tập trung vào việc so sánh và phân tích bề rộng vết nứt theo hai tiêu chuẩn còn lại, áp dụng cho một công trình cụ thể.

2.1. Thông số đầu vào

Công trình được lựa chọn để nghiên cứu là kè bờ sông Cẩm của Thành phố Hải phòng. Công trình nằm dọc theo mom Thủy Đội và sông Cẩm (Hình 1). Điểm đầu tuyến tại vị trí K26 (Km0+495,5), điểm cuối tuyến K40 tiếp giáp với kè bờ hiện hữu chân cầu Hoàng Văn Thụ (Km0+815,5). Chiều dài kè sông Cẩm khoảng 320,0m chia làm 11 phân đoạn, cao trình đỉnh kè +2,80m.

Phương án kết cấu kè: Dạng kè tường đứng bằng cọc cừ BTCT ứng suất trước loại SW840 có neo trong bằng hệ thanh neo bản neo.

Cọc cừ bê tông cốt thép dùng cho công trình được

sản xuất sẵn ở các nhà máy theo yêu cầu thiết kế như trong Hình 2.

Chi tiết thông số hình học của kết cấu và vật liệu như sau:

Thông số hình học của mặt cắt cọc bê tông cốt thép được quy đổi ra tiết diện hình chữ nhật như sau:

$$b = 533\text{mm};$$

$$h = 533\text{mm};$$

$$A = 283915\text{mm}^2.$$

Thông số vật liệu đầu vào:

- Sử dụng bê tông cấp độ bền B60 tra bảng có:

$$R_b = 60\text{MPa}$$

- Cọc cừ SW840 trong ví dụ sử dụng ba loại thép: (1) thép cường độ cao loại tạo xoắn 7 sợi, đường kính 15,24 mm, phù hợp với tiêu chuẩn ASTM 416, (2) cốt thép gờ D12mm, tuân thủ theo TCVN 1651:2018, và (3) thép tròn trơn D10mm, phù hợp với TCVN 1651:2018. Để tính toán vết nứt, tác giả đã quy đổi các loại thép trên về một loại thép tương đương với các thông số như sau:

$$R_f = 500\text{Mpa};$$

$$E_f = 2 \times 10^6 \text{Mpa};$$

$$A_f = 4259 \text{mm}^2.$$

Nội lực tính toán:

$$M = 249\text{kN.m};$$

$$C = 30\text{mm};$$

$$d_f = 16\text{mm}.$$

2.2. Tính toán vết nứt theo Eurocode 2-2004

Tính toán vết nứt theo Eurocode 2-2004 là theo mô hình đàn hồi tuyến tính (LEFM). Mô hình này phù hợp với các giả định về ứng xử đàn hồi của bê tông và cốt thép trong điều kiện tải trọng thông thường, giúp đơn giản hóa quá trình tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết.

Bước 1: Tính module đàn hồi của bê tông

$$E_{cm} = 22 \left[\left(\frac{f_{ck}+8}{10} \right) \right] 0.3 \text{ (GPa)} \quad (1)$$

Module đàn hồi của cốt thép $E_s=200 \text{ GPa}$

$$E_{cm} = 39.1 \text{ GPa}$$

Bước 2: Tính hệ số Module

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} * (1 + \varphi) \text{ (nếu tính dài hạn)} \quad (2)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} \text{ (nếu tính ngắn hạn)}$$

$$\alpha_e = 5.12$$

Bước 3: Tính cường độ trung bình tại thời điểm nứt

$$B_{cc(t)}: \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (3)$$

$B_{cc(t)}$: Hệ số phụ thuộc vào tuổi bê tông t ngày tuổi

s : Hệ số phụ thuộc vào loại xi măng

= 0,20 đối với xi măng có cường độ Lớp CEM 42,5 R, CEM 52,5 N và CEM 52,5 R (Lớp R)

= 0,25 đối với xi măng có cường độ Lớp CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Lớp N)

= 0,38 đối với xi măng có cường độ Lớp CEM 32,5 N (Lớp S).

$$F_{cm(t)} = B_{cc(t)} * f_{cm} \quad (4)$$

f_{cm} : Cường độ nén trung bình ở 28 ngày tuổi (xem Bảng 3.1 [4]).

$$f_{cm} = f_{ck}+8 \text{ (MPa)} \quad (5)$$

$f_{cm(t)}$: Cường độ nén trung bình tại thời điểm nứt

$$F_{cm(t)} = 58,1 \text{ MPa}$$

Bước 4: Tính cường độ chịu kéo của bê tông

$$F_{ct,eff} = 0.3 * f_{ck}^{2/3} \text{ nếu } f_{ck} < 50 \text{ MPa}$$

$$F_{ct,eff} = 2.12 * \ln \left\{ 1 + \left(\frac{f_{cm}}{10} \right) \right\} f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

$$F_{ct,eff} = 3,72 \text{ MPa}$$

Bước 5: Tính trục trung hòa tiết diện không nứt

$$X_u = \frac{\left[\frac{bh^2}{2} + (\alpha_e - 1)(A_s * d + A_{s2} * d_2) \right]}{[bh + (\alpha_e - 1)(A_s + A_{s2})]} \text{ (mm)} \quad (6)$$

$$X_u = 266,53 \text{ mm}$$

Bước 6: Mô men thứ cấp của khu vực không nứt

$$I_u = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - X_u \right)^2 + (\alpha_e - 1) [A_s(d - X_u)^2 + A_{s2}(X_u - d_2)^2] \text{ (mm}^4 \text{ 10}^6) \quad (7)$$

$$I_u = 8530 \text{ mm}^4 \text{ 10}^6$$

Bước 7: Tính Momen gây nứt

$$M_{cr} = f_{ct,eff} * \frac{I_u}{h - X_u} \text{ (kN.m)} \quad (8)$$

$M > M_{cr}$ thì cấu kiện bị nứt

$$M = 249 \text{ kN.m} > M_{cr} = 119,17 \text{ kN.m}$$

⇒ Cấu kiện bị nứt.

Bước 8: Trục trung hòa của tiết diện nứt

$$X_c =$$

$$\frac{(-A_s * \alpha_e - A_{s2}(\alpha_e - 1) + [A_s * \alpha_e + A_{s2}(\alpha_e - 1)]^2 - 2b[-A_s * \alpha_e * d - A_{s2} * d_2(\alpha_e - 1)]^{\frac{1}{2}}}{b}$$

$$\text{ (mm)} \quad (9)$$

$$X_c = 146,53 \text{ mm.}$$

Bước 9: Ứng suất bê tông

$$\sigma_c = \frac{M}{\left[b * X_u \left(\frac{d - X_u}{2} + \frac{(\alpha_e - 1) A_{s2} (d - d_2) (X_u - d_2)}{X_u} \right) \right]} \text{ (MPa)} \quad (10)$$

$$\sigma_c = 10,73 \text{ MPa}$$

Bước 10: Ứng suất kéo trong thép

$$\sigma_s = \frac{\sigma_c * \alpha_e (d - X_u)}{X_u} \text{ (MPa)} \quad (11)$$

$$\sigma_s = 130,5 \text{ MPa}$$

Bước 11: Diện tích chịu kéo hữu hiệu

$$A_{c,eff} = \text{Min} \left[2.5(h - d), \frac{(h - x)}{3}, \frac{h}{2} \right] * b - A_s \quad (12)$$

$$A_{c,eff} = 46361 \text{ mm}^2$$

$$P_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (13)$$

$$P_{p,eff} = 0,0919$$

Bước 12: Khoảng cách giữa các vết nứt lớn nhất

$$S_{r,max} = \text{Min} \left[\left(\frac{1.3}{h - X_u} \right), \left(3.4c + \frac{0.17\varnothing}{\rho_{p,eff}} \right) \right] \text{ (mm)}$$

$$S_{r,max} = 131,6 \text{ mm} \quad (14)$$

c : Là lớp phủ cho cốt thép dọc;

$\varnothing$: Là đường kính cốt thép.

Bước 13: Biến dạng trung bình để tính chiều rộng vết nứt

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - K_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e * \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_c}{E_s} (\mu\text{strain}) \quad (15)$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = 473,7 * 10^{-6}$$

K_t : là một yếu tố phụ thuộc vào thời gian tải;

$K_t = 0,6$ cho tải trọng ngắn hạn (S);

$K_t = 0,4$ cho tải trọng dài hạn (L).

Bước 14: Tính chiều rộng vết nứt

$$W_k = S_{r,max} * (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (\text{mm})$$

$$W_k = 0,062\text{mm} \quad (16)$$

2.3. Tính toán vết nứt theo TCVN 5574:2018

Tính toán vết nứt theo TCVN 5574:2018 chủ yếu dựa trên mô hình đàn hồi tuyến tính (LEFM). Các tính toán như sau:

Xác định chiều cao vùng nén x:

$$x = h_0 \left(\sqrt{(\mu_f \alpha_{f1})^2 + 2\mu_f \alpha_{f1} - \mu_f \alpha_{f1}} \right) \quad (17)$$

$$x = 15,45\text{cm}$$

$$\alpha_{f1} = \frac{E_f}{E_{b,red}} \quad (18)$$

$$\alpha_{f1} = 5.8$$

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,n}}{\epsilon_{b1,red}} \quad (19)$$

$$E_{b,red} = 170.000\text{MPa}$$

$$\sigma_f = \frac{M}{Z_f A_f} \quad (20)$$

$$\sigma_f = 2317,1 \text{ (daN/cm}^2\text{)}$$

$$\Psi_f = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}}{M} \quad (21)$$

$$\Psi_f = 0,75$$

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W_{pl} \quad (22)$$

$$M_{crc} = 77,63\text{KN.m}$$

$$W_{pl} = 1,3W_{red} \quad (23)$$

$$W_{pl} = 39.808,13\text{cm}^3$$

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t}$$

$$W_{red} = 30621,64 \text{ cm}^3 \quad (24)$$

$$I_{red} = I + I_f \alpha_f \quad (25)$$

$$I_{red} = 816.066,73\text{cm}^4$$

Trong đó: I , I_f mô men quán tính của tiết diện quy đổi với trục trọng tâm.

2.3.1. Chiều rộng vết nứt do tác dụng dài hạn của tải trọng thường xuyên và tạm thời dài hạn $a_{crc,1}$

$$a_{crc,1} = \varphi_1 * \varphi_2 * \varphi_3 * \Psi_f * \sigma_f \frac{L_f}{E_f} \quad (26)$$

Khoảng cách cơ sở giữa các vết nứt thẳng góc kề nhau:

$$L_f = 0,5 \cdot (A_b / A_f) \cdot d_f \quad (27)$$

$$L_f = 40\text{cm}.$$

Các hệ số kể đến thời hạn tác dụng của tải trọng được lấy như sau:

$$\varphi_1 = 1,4 ; \varphi_2 = 0,5 ; \varphi_3 = 1,0;$$

$$a_{crc,1} = 0,243\text{mm}.$$

2.3.2. Chiều rộng vết nứt do tác dụng ngắn hạn của tải trọng thường xuyên và tạm thời $a_{crc,2}$

Các hệ số kể đến thời hạn tác dụng của tải trọng được lấy như sau:

$$\varphi_1 = 1,0 ; \varphi_2 = 0,50 ; \varphi_3 = 1,0;$$

$$a_{crc,2} = 0,174\text{mm}.$$

2.3.3 Chiều rộng vết nứt do tác dụng ngắn hạn của tải trọng thường xuyên và tạm thời dài hạn $a_{crc,3}$

Các hệ số kể đến thời hạn tác dụng của tải trọng được lấy như sau:

$$\varphi_1 = 1,0; \varphi_2 = 0,50; \varphi_3 = 1,0;$$

$$a_{crc,3} = 0,174\text{mm}.$$

Bề rộng vết nứt:

$$a_{crc} = a_{crc,1} + a_{crc,2} - a_{crc,3} \quad (28)$$

$$a_{crc} = 0,243 + 0,174 - 0,174 = 0,243\text{mm} < a_{crc,u} = 0,4\text{mm} \text{ theo TCVN 5574:2018 Bảng 17: Chiều rộng vết nứt cho phép.}$$

* Cấu kiện đảm bảo điều kiện chiều rộng vết nứt.

3. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tác giả đã trình bày nội dung tính toán kết cấu kê tường cừ bê tông cốt thép theo lý thuyết cơ học rạn nứt, đồng thời đã áp dụng tính toán cho một công trình cụ thể. Kết quả tính toán đã chỉ ra khả năng chịu lực của công trình khi xuất hiện vết nứt vẫn đảm bảo, nhưng nếu xét theo điều kiện bề rộng vết nứt của bê tông theo TCVN 5574:2018 thì kết quả tính toán sẽ lớn hơn 4 lần (do sử dụng nhiều hệ số kể đến thời hạn tác dụng của tải trọng φ_1 ; φ_2 φ_3 được lấy theo kinh nghiệm). Đây là một hạn chế của tính toán trong thiết kế hiện nay. Do vậy tác giả cũng kiến nghị nên xem xét áp dụng tính toán kết cấu theo lý thuyết cơ học rạn nứt trong thiết kế công trình, cũng như trong phân tích các vết nứt hiện có trong kết cấu để đánh giá mức độ an toàn và đề xuất các biện pháp sửa chữa, gia cố (theo tiêu chuẩn ACI 318-19 và Eurocode 2004, [3], [4]). Cách tính này phù hợp với các giả định về ứng xử đàn hồi của bê tông và cốt thép trong điều kiện tải trọng thông thường, giúp đơn giản hóa quá trình tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết.

Nghiên cứu này góp phần vào việc phát triển phương pháp tính toán kết cấu kê bê tông cốt thép, có tính an toàn và độ tin cậy cao, phục vụ cho công tác bảo vệ bờ biển và bờ sông. Bên cạnh đó, nó cũng mở ra hướng tiếp cận mới trong tính toán thiết kế cho các kỹ sư và học viên trong lĩnh vực công trình thủy.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài Mã số: **DT24-25.157**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TS. Trần Thế Truyền, TS. Nguyễn Xuân Huy, (2011), *Phá hủy, rạn nứt bê tông cơ học và ứng dụng*, Nhà xuất bản Xây dựng.
- [2] GS.TS. Phan Quang Minh, GS.TS. Ngô Thế Phong (2024), *Kết cấu bê tông cốt thép - Thiết kế theo Tiêu chuẩn Châu Âu*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [3] ACI 318-19, Building Code for Structural for concrete.
- [4] Eurocode 2 - 2004. Design of concrete structures.
- [5] TCVN 5574 -2018 Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép.

Ngày nhận bài:	08/02/2025
Ngày nhận bản sửa lần 01:	25/02/2025
Ngày nhận bản sửa lần 02:	10/03/2025
Ngày duyệt đăng:	10/03/2025