

Phân tích về nứt trong kết cấu chịu uốn sử dụng bê tông UHPC có gia cường cốt sợi

■ TS. NGUYỄN LỘC KHA

Phân hiệu tại TP. Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải

TÓM TẮT: Bài báo phân tích sự phát triển vết nứt trong bê tông UHPC có gia cố cốt sợi và trình bày phương pháp tính toán độ mở rộng vết nứt có xét đến sự tham gia của cốt sợi gia cường trong kết cấu chịu uốn sử dụng UHPC.

TỪ KHÓA: UHPC, khống chế nứt, tính toán về nứt của kết cấu chịu uốn.

ABSTRACT: This paper analyzes the crack growth in fiber-reinforced UHPC concrete and presents a method in calculating the crack width considering the participation of the reinforced fiber reinforcement in the flexural structure using UHPC.

KEYWORDS: UHPC, crack control, crack calculation of flexural structures.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong hầu hết các loại bê tông UHPC đều có gia cố cốt sợi. Theo lý thuyết thì các loại cốt sợi gia cường trong UHPC có thể ngăn ngừa nứt khi chịu tải trọng. Tuy nhiên, hầu hết hàm lượng sợi gia cường trong UHPC được thực hiện với một tỉ lệ vừa phải và được sử dụng kết hợp với cốt thép thường hoặc với cả cốt thép dự ứng lực. Điều đó có nghĩa, bản thân sợi gia cường trong UHPC không đủ khả năng thể hiện hành vi làm cứng biến dạng nên dưới tác dụng của tải trọng, nứt vẫn cho phép xuất hiện trong UHPC.

Theo một số tiêu chuẩn hiện nay, bề rộng vết nứt dưới tác dụng của tải trọng được xác định trực tiếp thông qua việc tính ứng suất trong cốt thép chịu kéo của kết cấu. Trong UHPC, cốt thép chịu kéo của kết cấu có thể gồm cốt thép thường kết hợp với sợi gia cố hoặc cốt thép thường kết hợp với cốt thép dự ứng lực và cùng với sợi gia cố.

Tuy nhiên, do:

- Không chắc chắn về sự phân bố và định hướng của các sợi gia cường được sử dụng;
- Không chắc chắn về hiệu quả của các sợi gia cường đến việc khống chế độ mở rộng vết nứt;
- Sự khác nhau về tính dính bám giữa bê tông và loại sợi gia cường được sử dụng;
- Chưa có xác minh nào liên quan đến hành vi chịu tải

của các sợi gia cường khi bị kéo đứt đến bề rộng vết nứt của kết cấu.

Do đó, việc tính toán xác định ứng suất kéo để tính toán về nứt cho kết cấu sử dụng UHPC cần phải hết sức thận trọng. Trong trường hợp này, sự phát triển của bề rộng vết nứt ở trạng thái giới hạn sử dụng cần được điều tra kỹ hơn và được trình bày theo quan điểm dưới đây của tác giả.

2. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN KIỂM SOÁT NỨT CỦA UHPC

Phương trình tổng quát để xác định giá trị bề rộng vết nứt được biết đến từ các triết lý tính toán về kết cấu bê tông cốt thép.

$$w_k = L_{crack,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (1)$$

Trong đó:

$L_{crack,max}$ - Khoảng cách giữa hai vết nứt lớn nhất ở trạng thái nứt ổn định;

ϵ_{sm} - Biến dạng trung bình cốt thép trên đoạn $L_{crack,max}$;

ϵ_{cm} - Biến dạng trung bình của bê tông trên đoạn $L_{crack,max}$;

Triết lý tính toán là lực kéo trong cốt thép F_s phải được tính có sự đóng góp của các sợi gia cường. Do đó, nội lực trong các thanh thép chịu kéo của kết cấu sử dụng UHPC sẽ nhỏ hơn so với nội lực các thanh thép chịu kéo trong bê tông cốt thép thông thường. Các sợi gia cường trong UHPC làm giảm tải trọng lên các thanh cốt thép chịu kéo và điều này sẽ có ảnh hưởng tích cực đến chiều dài truyền tải giữa các vết nứt, hay đúng hơn là khoảng cách giữa các vết nứt sẽ được dài hơn so với bê tông cốt thép thông thường.

Chênh lệch biến dạng trung bình giữa cốt thép thanh và cốt sợi - bê tông có thể được biểu thị như sau [4]:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \epsilon_s^f - \epsilon_{cs} - \alpha_b \cdot \frac{f_{ctm} \cdot (1 + n \cdot \rho_{eff}) - \sigma_{ct}}{\rho_{eff} \cdot E_s} \geq (1 - \alpha_b) \cdot (\epsilon_s^f - \epsilon_{cs}) \quad (2)$$

Trong đó:

ϵ_s^f - Biến dạng cốt thép tại vết nứt có tính đến các sợi gia cố (tiết diện ở trạng thái cân bằng);

α_b - Hệ số tải trọng. $\alpha_b = 0,6$ cho tải trọng tác dụng ngắn hạn; $\alpha_b = 0,4$ cho tải trọng tác dụng dài hạn;

f_{ctm} - Giá trị trung bình của ứng suất kéo tại vết nứt trong vùng diện tích bê tông và cốt sợi gia cường của kết cấu (ma trận bê tông + cốt sợi gia cường);

ρ_{eff} - Tỷ lệ gia cố có hiệu của cốt thép thanh ($\rho_{eff} = A_s / A_{cef}$);

A_s - Diện tích mặt cắt ngang của các thanh cốt thép chịu kéo;

A_{cef} - Diện tích chịu kéo (của bê tông) có hiệu có tính đến sự phân bố ứng suất phi tuyến trong vùng chịu kéo của bê tông tại vết nứt;

σ_{cf} - Ứng suất kéo do cốt sợi truyền qua tại vết nứt;

ϵ_{cs}^* - Biến dạng co ngót sau nứt trong bê tông có gia cường cốt sợi tại mép của vết nứt, giá trị này có thể được tính như sau [5]:

$$\epsilon_{cs}^* = \frac{\epsilon_{cs} \cdot (1 + n \cdot \rho_{eff})}{1 + n \cdot \rho_{eff} \cdot (1 + \rho \cdot K)} \quad (3)$$

(Để an toàn, ϵ_{cs}^* có thể được giả định là bằng với biến dạng co ngót tự do của bê tông ϵ_{cs});

$n = E_c / E_s$ - Hệ số tỉ lệ mô-đun đàn hồi giữa thép và bê tông;

K - Hệ số từ biến của UHPC;

$\rho = 0,8$ - Hệ số dẫn dài.

Ứng suất kéo hữu hiệu do cốt sợi truyền qua tại vết nứt có thể được xác định với sự trợ giúp từ mối quan hệ giữa ứng suất và bề rộng vết nứt [1]:

$$\sigma_{cf} = \sigma_{cf0k} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{w_k}{w_0}} - \frac{w_k}{w_0} \right) \quad (4)$$

Trong đó:

σ_{cf0k} - Giá trị đặc trưng hiệu suất của ứng suất trong cốt sợi gia cường;

w_0 - Bề rộng vết nứt ứng với hiệu quả sợi gia cường đạt cao nhất.

$$w_0 = \frac{\tau_{fm} \cdot l_f^2}{E_f \cdot d_f} \quad (5)$$

τ_{fm} - Độ bền liên kết của sợi gia cường trung bình với giả thiết là mối liên hệ liên kết là cứng - dẻo;

d_f, l_f, E_f - Đường kính, chiều dài và mô-đun đàn hồi của sợi gia cường.

Do ứng suất trong cốt sợi gia cường trong giai đoạn kéo ban đầu chỉ giảm nhẹ, nên để đơn giản trong quá trình tính toán bề rộng vết nứt cũng có thể lấy $w_k \approx w_0$ hay $\sigma_{cf} = \sigma_{cf0k}$.

Khoảng cách tối đa giữa hai vết nứt $L_{crack,max}$ có thể được viết như sau:

$$L_{crack,max} = \frac{(f_{ctfm} - \sigma_{cf}) \cdot d}{2 \cdot \tau_{sm} \cdot \rho_{ef}} \leq \frac{(\epsilon_s^f - \epsilon_{cs}^*) \cdot E_s \cdot \phi_s}{2 \cdot \tau_{sm}} \quad (6)$$

Trong đó:

ϕ_s - Đường kính của thanh cốt thép;

τ_{sm} - Ứng suất liên kết trung bình của thanh cốt thép

trong phạm vi khoảng cách vết nứt tối đa $L_{crack,max}$;

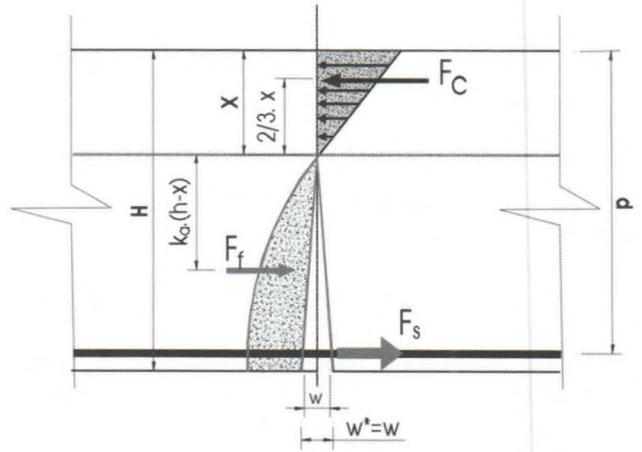
Giá trị ứng suất tham chiếu trung bình τ_{sm} có thể lấy trong Bảng 2.1 [4].

Bảng 2.1. Giá trị ứng suất tham chiếu trung bình

Giá trị đặc trưng của chiều rộng vết nứt w_k	Ứng suất liên kết trung bình của thanh cốt thép τ_{sm}	
	$f_R = 0,024$	$f_R = 0,072$
0,05 mm	1,2 f_{ctm}	2,0 f_{ctm}
0,10 mm	1,7 f_{ctm}	3,3 f_{ctm}

3. PHÂN TÍCH, XÂY DỰNG CÔNG THỨC TÍNH TOÁN NỨT CHO KẾT CẤU CHỊU UỐN

Xét điều kiện cân bằng nội lực tại một vết nứt của kết cấu chịu uốn (Hình 3.1) cho ta:



Hình 3.1: Cân bằng nội lực kết cấu chịu uốn

$$F_c = -N_{Ed} + F_s + F_f \quad (7)$$

$$\sum M = M_{Eds} - F_{cd} \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right) + F_{fd} \cdot [d - x - k_a \cdot (h - x)] = 0 \quad (8)$$

Thay công thức (7) vào (8) và giải theo F_s được:

$$F_s = \frac{M_{Eds}}{z} + N_{Ed} - F_f \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot \frac{x}{d} + k_a \cdot \left(\frac{h-x}{d} \right)}{1 - \frac{x}{3d}} \quad (8a)$$

$$= \frac{M_{Eds}}{z} + N_{Ed} - \sigma_{cf0} \cdot b \cdot h \cdot \left[\alpha_f \cdot \left(1 - \frac{x}{h} \right) \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot \frac{x}{d} + k_a \cdot \left(\frac{h-x}{d} \right)}{1 - \frac{x}{3d}} \right]$$

Với:

$$\alpha_f = \alpha_R \cdot \left(1 - \frac{x}{h} \right) \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot \frac{x}{d} + k_a \cdot \left(\frac{h-x}{d} \right)}{1 - \frac{x}{3d}} \quad (8b)$$

Thuật ngữ $(M_{Eds}/z + N_{Ed})$ tương ứng với nghiệm đã biết cho các điều kiện cân bằng đối với kết cấu bê tông cốt thép. Biểu thức $\alpha_f \cdot \sigma_{cf0} \cdot A_c$ mô tả tỉ lệ của lực mà các cốt sợi gia cường đã đảm nhận làm giảm hàm lượng cốt thép chịu kéo [2].

Trong trường hợp chiều sâu vùng nén tương đối lớn thì có thể lấy tỉ số $x/d = 0,5$ và khi đó $\alpha_f \approx 0,4$. Còn ở trường hợp giới hạn $x = 0$, khi đó tỉ số $d/h = 5/6$ thì $\alpha_f \approx 0,5$. Sử dụng cách tiếp cận tương tự có thể ước tính α_f cho các trường hợp khác của d/h .

Cuối cùng, biến dạng của cốt thép ϵ_s^f tại vết nứt được tính theo công thức:

$$\epsilon_s^f = \frac{F_s}{(A_s \cdot E_s)} \quad (9)$$

Ứng suất trong bê tông cốt sợi tính theo công thức (1), (2) và (6) là phụ thuộc vào bề rộng vết nứt (w_k) và do đó chỉ có thể tìm thấy (w_k) bằng phương pháp lặp [3]. Cũng có thể vận dụng cách phân tích trên để tính hàm lượng cốt thép chịu kéo cần thiết A_s ứng với một giới hạn bề rộng vết nứt đến một giá trị nhất định. Nếu xem phần biến dạng của bê tông là nhỏ có thể bỏ qua thì diện tích cốt thép chịu kéo cần thiết cho kết cấu chịu uốn để đảm bảo khống chế độ mở rộng vết nứt như sau [4]:

**) Đối với vết nứt đơn:*

$$A_s = \frac{F_s}{\sqrt{\frac{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm} \cdot w_k}{(1 + \alpha_b) \cdot d_s} + \epsilon_{cs}^* \cdot E_s}} \quad (10)$$

**) Vết nứt đang ổn định:*

$$A_s = \Omega^f \cdot \left(-\varepsilon_{cs} + \sqrt{\varepsilon_{cs}^2 + 2 \cdot \frac{F_s - \alpha_b \cdot (F_{f,cr,ef} - F_{f,ef})}{\Omega^f \cdot E_s}} \right) \quad (11)$$

Trong đó:

$$\Omega_j = \frac{(F_{f,cr,ef} - F_{f,ef}) \cdot d_s}{4 \cdot w_k \cdot \tau_{sm}} \quad (12)$$

$F_{f,ef}$ - Lực kéo do các sợi truyền tải vết nứt trong vùng ảnh hưởng của cốt thép;

$$F_{f,ef} = A_{c,ef} \cdot \sigma_{cf}$$

$F_{f,cr,ef}$ - Lực gây nứt của vùng ảnh hưởng của cốt thép;

$$F_{f,cr,ef} = A_{c,ef} \cdot f_{ctfm}$$

Nếu cả cốt thép thường và thép dự ứng lực đều được sử dụng, thì phải tính đến các đặc tính liên kết khác nhau của hai loại cốt thép [1]. Trong trường hợp này, biến dạng trong cốt thép (ε^f) trong công thức (2) và (3) phải được tính toán trên cơ sở biến đổi ứng suất trong cốt thép chịu kéo [4].

* Với vết nứt đơn:

$$\sigma_{s2}^f = \frac{F_{s+p}}{A_s + \xi_1 \cdot A_p} \quad (13)$$

* Với vết nứt đang ổn định:

$$\sigma_{s2}^f = \frac{F_{s+p}}{A_s + A_p} + \alpha_b \cdot (f_{ctfk} - \sigma_{cf}) \cdot \left(\frac{1}{\rho_{ef}} - \frac{1}{\rho_{s+p}} \right) \quad (14)$$

Với:

F_{s+p} - Tổng lực kéo tại vết nứt do cốt thép thường và cốt thép dự ứng lực mang lại và có tính đến sự đóng góp của các cốt sợi gia cường.

ξ_1 - Tỷ lệ ứng suất liên kết trung bình đối với cốt thép thường và cốt thép ứng suất trước có tính đến các đường kính khác nhau.

$$\xi_1 = \frac{\tau_{pm} \cdot d_s}{\tau_{sm} \cdot d_p} \quad (15)$$

ρ_{ef} - Tỷ lệ hàm lượng "hiệu quả" của cốt thép thường với cốt thép ứng suất trước:

$$\rho_{ef} = \frac{(A_s + \xi_1^2 \cdot A_p)}{A_{c,ef}} \quad (16)$$

$A_{c,ef}$ - Diện tích chịu kéo có hiệu có tính đến sự phân bố ứng suất phi tuyến tính trong vùng chịu kéo bê tông tại vết nứt.

ρ_{s+p} - Tỷ lệ gia cường của cốt thép cộng với thép ứng suất trước:

$$\rho_{s+p} = \frac{(A_s + A_p)}{A_{c,ef}} \quad (17)$$

4. KẾT LUẬN

Bài báo phân tích về nứt và giải pháp tính toán độ mở rộng vết nứt, hàm lượng cốt thép chịu kéo cho kết cấu chịu uốn khi sử dụng bê tông UHPC có gia cường cốt sợi. Với kết quả phân tích trên sẽ góp phần cho việc nghiên cứu, đánh giá bê tông UHPC ngày càng hoàn thiện về mặt lý thuyết. Bài báo cũng có thể làm tài liệu giảng dạy cho sinh viên trong việc phân tích kết cấu và tính toán kết cấu công trình khi sử dụng UHPC.

Tài liệu tham khảo

[1]. Tanaka, Y., Maekawa, K., Kameyama (2010), *The innovation and application of UHPFRC Bridges in Japan, in Designing and Building with UHPFRC.*

[2]. CEB - FIP Model code (2012), *Final draft, federation international the beton.*

[3]. *Design and Construction of Field - Cast UHPC Connections - FHWA Publication NO: FHWA - HRT -20-020;*

[4]. Ekkehard Fehling, Michael Schmidt Joost Walraven, Torsten Leutbecher Susanne (2015), *Ultra -High Performance Concrete UHPC, Fundamentals, Design, Examples.*

[5]. TCVN 11823 -1-2017.

Ngày nhận bài: 07/01/2022

Ngày chấp nhận đăng: 12/02/2022

Người phản biện: TS. Trần Xuân Hòa

TS. Nguyễn Thạch Quang