

CƠ CHẾ HÌNH THÀNH VÀ PHÁT TRIỂN VẾT NỨT CỦA BÊ TÔNG CỐT SỢI SIÊU MẢNH PHÂN TÁN

MECHANISM FOR PROPAGATING AND DEVELOPING CRACKS IN MICRO FIBER REINFORCED CONCRETE

Trần Văn Miên và Nguyễn Văn Chánh

Khoa Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại Học Bách Khoa, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

BẢN TÓM TẮT

Hiện tượng phá hoại bê tông và bê tông cốt sợi phân tán ngẫu nhiên xảy ra chủ yếu là do sự hình thành và phát triển vết nứt bên trong cấu trúc. Bài báo này đề cập đến việc nghiên cứu cơ chế hình thành và phát triển của vết nứt trong bê tông cốt sợi phân tán khi chịu tác dụng của tải trọng. Cơ chế hình thành và phát triển vết nứt được khảo sát, mô hình hoá dựa theo phương pháp phá hoại cơ học khi xét biểu đồ biểu diễn quan hệ ứng suất - độ mở rộng của miệng vết nứt. Dựa vào cơ chế hình thành và phát triển vết nứt, có thể dự đoán được sự làm việc của các cấu kiện bê tông cốt sợi phân tán ngẫu nhiên trong từng giai đoạn chịu lực.

ABSTRACT

The fracture of concrete or short random fiber - reinforced concrete is due to the crack propagation in the microstructure. In this paper, a mechanism of cracking propagation in short random fiber - reinforced concrete is presented. This mechanism is based on the fracture mechanic approach with the relation to the behavior of stress - crack mouth opening displacement ($\sigma - \delta$).

1. GIỚI THIỆU

Bê tông và bê tông cốt sợi phân tán ngẫu nhiên lần lượt là vật liệu dòn và bán dòn. Sự làm việc của những loại vật liệu này khi chịu tác dụng của tải trọng bị ảnh hưởng nhiều bởi quá trình hình thành và phát triển vết nứt. Để khảo sát sự hình thành và phát triển vết nứt trong bê tông cốt sợi phân tán, người ta thường xét biểu đồ quan hệ ứng suất - độ mở rộng của miệng vết nứt. Dựa theo biểu đồ quan hệ này, mô tả các hiện tượng nứt xảy ra khi ứng suất thay đổi.

Bê tông cốt sợi phân tán ngẫu nhiên được chia làm 2 pha : pha sợi và pha nền bê tông. Dưới tác dụng của tải trọng, phản ứng suất sinh ra sẽ do nền chịu khi vật liệu còn làm việc trong vùng đàn hồi. Nền bê tông bị nứt khi ứng suất vượt quá cường độ của nền. Sau khi nền nứt, vết nứt đơn này tiếp tục được phát triển, ứng suất do nền chịu được truyền qua sợi để hạn chế sự phát triển của vết nứt đơn, và hình thành nhiều vết nứt nhỏ. Bê tông cốt sợi phân tán bị phá hoại khi

ứng suất vượt quá cường độ giới hạn. Sự phá hoại xảy ra là do sự phát triển của một vết nứt đơn chính yếu, bên cạnh đó là sự hình thành và phát triển của nhiều vết nứt nhỏ. Vì vậy, nghiên cứu cơ chế hình thành và phát triển vết nứt của bê tông cốt sợi phân tán ngẫu nhiên khi chịu tải trọng là vấn đề cần thiết.

2. CƠ CHẾ HÌNH THÀNH VÀ PHÁT TRIỂN VẾT NỨT TRONG BÊ TÔNG CỐT SỢI PHÂN TÁN

Bê tông là vật liệu dòn, sự phá hoại của bê tông hoàn toàn khác so với kim loại. Trong khi kim loại có hình thức phá hoại dẻo thì bê tông lại có hình thức phá hoại giòn. Bê tông cốt sợi phân tán có hình thức phá hoại nằm giữa bê tông thường và kim loại. Sự phá hoại của bê tông và bê tông cốt sợi phân tán chủ yếu là do quá trình hình thành và phát triển vết nứt gây ra. Đối với bê tông cốt sợi phân tán, cơ chế hình thành

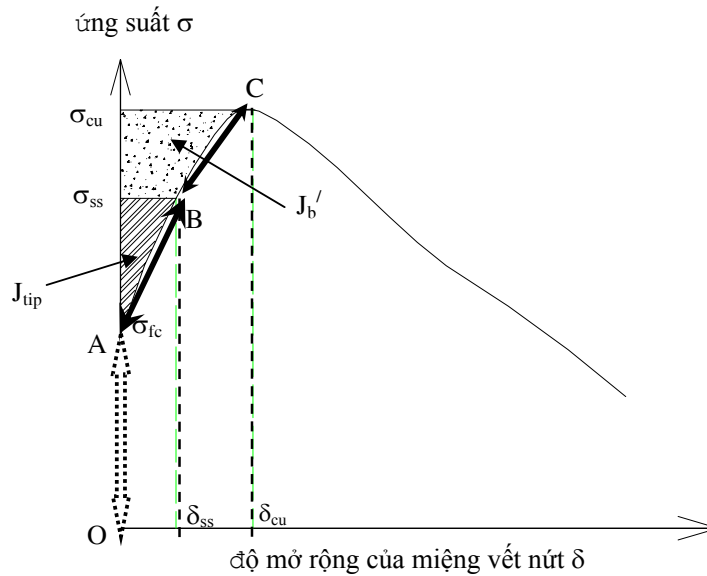
và phát triển vết nứt sẽ qua 3 giai đoạn sau (hình 1):[2, 4]

- Giai đoạn nền bê tông còn làm việc trong vùng đàn hồi cho đến khi xuất hiện vết nứt đầu tiên.
- Giai đoạn vết nứt đơn phát triển từ từ.
- Giai đoạn vết nứt đơn tiếp tục phát triển, hình thành và phát triển nhiều vết nứt nhỏ cho đến khi ứng suất đạt đến cường độ tới hạn của bê tông cốt sợi phân tán.

tông cốt sợi xuất hiện ứng suất, ứng suất này tăng lên cho đến khi đạt giá trị giới hạn của nền thì nền bê tông bị nứt và giai đoạn 1 của quá trình phát sinh vết nứt của bê tông cốt sợi phân tán kết thúc. Giá trị ứng suất làm cho nền xuất hiện vết nứt đầu tiên được tính theo công thức sau:

$$\hat{\sigma}_{fc} = g \left[\left(\frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\bar{c}} - \frac{\bar{c}}{4} \right) + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\bar{K}}{\bar{c}} \right] \quad (2)$$

Trong đó :



Hình 1 : Quá trình phát triển vết nứt trong bê tông cốt sợi phân tán qua các giai đoạn

2.1 Giai đoạn 1 : OA

Ở trong giai đoạn này, bê tông cốt sợi phân tán còn làm việc trong vùng đàn hồi, quan hệ ứng suất – biến dạng tuân theo định luật Hooke, đường biểu diễn quan hệ ứng suất – biến dạng là đường bậc nhất. Toàn bộ ứng suất do ngoại lực tác dụng đều do nền bê tông chịu.

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c \quad (1)$$

Trong đó, σ_c là ứng suất sinh ra trong bê tông cốt sợi ; E_c và ε_c lần lượt là mô đun đàn hồi và biến dạng tương đối của bê tông cốt sợi trong vùng đàn hồi.

Trong vùng đàn hồi, cả sự phân bố ứng suất và biến dạng trên một mặt cắt tiết diện của bê tông cốt sợi theo dạng đường thẳng (hình 2)[1]. Do bị ảnh hưởng của ngoại lực tác dụng, bên trong bê

$$\hat{\sigma}_{fc} = \frac{\sigma_{fc}}{\sigma_0}, \sigma_0 = \frac{V_f \cdot \tau_i}{2} \cdot \left(\frac{L_f}{d_f} \right), g = \frac{2}{4 + f^2} \cdot (1 + e^{\pi/2}), \bar{c} = \frac{\sqrt{\hat{c}}}{\hat{\delta}^*}$$

$$\hat{c} = \frac{c}{c_0}, \hat{\delta}^* = \frac{2\tau_i}{E_f(1+\eta)} \cdot \frac{L_f}{d_f}$$

$$\eta = \frac{V_f \cdot E_f}{V_m \cdot E_m}, \bar{K} = \frac{K_{tip}}{\sigma_0 \cdot \sqrt{c_0}} \cdot \frac{1}{g \cdot \hat{\delta}^*}, K_{tip} = K_m \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \right)$$

$$c_0 = \left(\frac{L_f \cdot E_c}{2 \cdot K_{tip}} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{16 \cdot (1 - \nu^2)^2}$$

f là hệ số hiệu chỉnh, τ_i là cường độ lực dính tại bề mặt phân giới

V_f là thể tích sợi, E_f là mô đun đàn hồi của sợi

V_m là thể tích nền, E_m là mô đun đàn hồi của nền

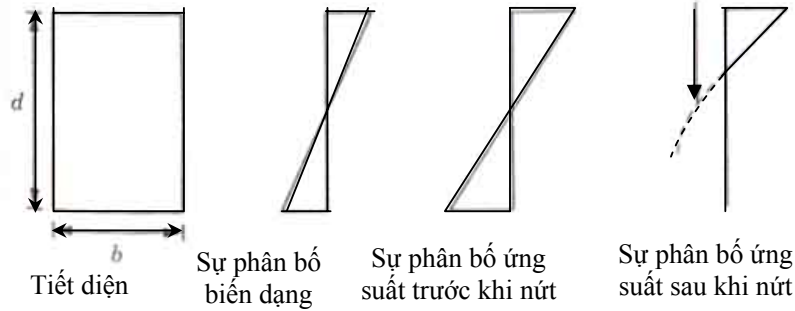
L_f là chiều dài của sợi, d_f là đường kính của sợi

c là bán kính nứt

K_m là độ dẻo dai của nền khi phá hoại

E_c là môđun đàn hồi của bê tông cốt sợi, và n là hệ số Poisson.

Với $G(x,a,h)$ là hàm trọng lượng đặc trưng cho sự phân bố của lực trên bề mặt vết nứt, $\sigma_b(\delta(x))$



Hình 2 : Sự phân bố ứng suất và biến dạng của bê tông cốt sợi phân tán trong vùng đàn hồi

2.2 Giai đoạn 2 : AB

Sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên, vết nứt này bắt đầu được phát triển một cách từ từ do có sự tham gia chịu lực của sợi khi nền bị nứt.

Vết nứt đầu tiên tiếp tục được phát triển lên thành vết nứt đơn chính yếu khi

$$K_{tip} = K_{IC} \quad (3)$$

Trong đó :

K_{IC} là độ cứng khi phá hoại của nền bê tông. K_{IC} phụ thuộc vào hàm lượng cốt liệu và tỉ số N/X, giá trị độ lớn của K_{IC} nằm trong khoảng 0,2 - 0,5.

$$K_{tip} = K_a + K_b \quad (4)$$

được gọi là cường độ ứng suất tại đỉnh xuất hiện nứt.

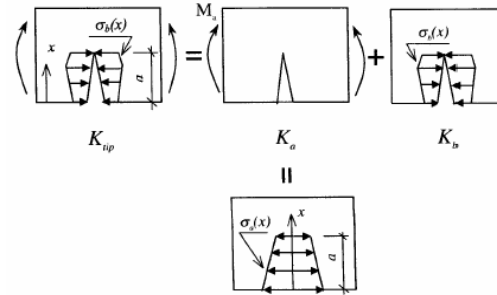
Trong quá trình hình thành vết nứt đầu tiên, do cốt liệu trong nền bê tông có khả năng liên kết và truyền ứng suất qua những vùng khác, cho nên dọc theo chiều dài vết nứt có sự phân bố ứng suất $\sigma_a(x)$ và $\sigma_b(x)$ sinh ra do ngoại lực tác dụng và do lực liên kết của cốt liệu trong nền (hình 3)[3].

Cường độ ứng suất do ngoại lực tác dụng và do lực liên kết của cốt liệu lần lượt được ký hiệu là K_a và K_b . Độ lớn của cường độ ứng suất K_a và K_b được tính toán theo những công thức sau :

$$K_a = 2 \int_0^a G(x, a, h) \cdot \sigma_a(x) \cdot dx \quad (5)$$

$$K_b = -2 \int_0^a G(x, a, h) \cdot \sigma_b(\delta(x)) \cdot dx \quad (6)$$

là trường ứng suất phân bố trên vết nứt khi độ rộng của miệng vết nứt $\delta(x)$ thay đổi.



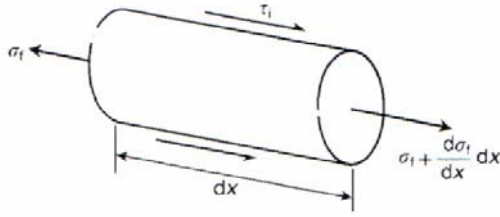
Hình 3 : Sự phân bố ứng suất khi xuất hiện vết nứt

Vết nứt đơn chính yếu đầu tiên bắt đầu phát triển rộng ra khi $K_{tip} = K_{IC}$. Tuy nhiên, sự phát triển của vết nứt này sẽ diễn ra từ từ do có sự tham gia chịu lực của sợi, sợi đóng vai trò làm những cầu nối vết nứt để truyền phần ứng suất do tải trọng gây ra vào phần còn lại của nền chưa bị nứt. Phần ứng suất do nền chịu khi xuất hiện vết nứt đầu tiên sẽ được truyền vào sợi dọc theo chiều dài của sợi, quá trình truyền ứng suất từ nền qua sợi được thực hiện thông qua lực bám dính giữa sợi và nền. ứng suất truyền từ nền qua sợi tạo thành ứng suất cắt $\tau(x)$ trên bề mặt tiếp xúc giữa sợi và nền, ứng suất cắt $\tau(x)$ được chuyển hoá thành ứng suất kéo trong sợi (hình 4).

Xét một phân tử sợi hình tròn có đường kính d và chiều dài dx , sự cân bằng của những lực tác dụng trên phân tử sợi dx được biểu diễn như sau:

$$\left(\sigma_f + \frac{d\sigma_f}{dx} \cdot dx\right) \cdot \frac{\pi d^2}{4} - \sigma_f \cdot \frac{\pi d^2}{4} + \tau_f \cdot \pi d \cdot dx = 0 \quad (7)$$

$$\Rightarrow \frac{d\sigma_f}{dx} = \frac{-4}{d} \cdot \tau_i \Rightarrow \tau_i = \frac{n}{2} \cdot E_f \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\sin(na \cdot \frac{2x}{l})}{\cos(na)} \quad (8)$$



Hình 4 : Tác dụng của ứng suất trên một phân tử chiều dài sợi

Giả sử rằng lực bám dính giữa sợi và nền là hoàn hảo, tức là biến dạng của sợi bằng với biến dạng của nền thì hàm phân bố ứng suất kéo dọc theo chiều dài x của sợi được biểu diễn như sau :

$$\sigma_f(x) = E_f \cdot \varepsilon_1 \left\{ 1 - \left[\frac{\cos(na \cdot \frac{2x}{l})}{\cos(na)} \right] \right\} \quad (9)$$

Trong đó $a = l/d$ và $x = 0$ khi xét tại trung điểm của sợi.

$$n = \left[\frac{2G_m}{E_f \cdot \ln(2R/d)} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Khi ứng suất của tải trọng truyền qua sợi thì ứng suất cắt tồn tại trên bề mặt sợi sẽ đạt giá trị lớn nhất ở hai đầu sợi và bằng 0 tại trung điểm sợi. Ngược lại, ứng suất kéo sinh ra trong sợi sẽ bằng 0 ở hai đầu sợi và lớn nhất tại trung điểm sợi (hình 5).

Từ những phương trình trên, ứng suất truyền từ nền qua sợi tỉ lệ thuận với tỉ số đặc trưng bề mặt sợi l/d .

Với sự tham gia chịu lực của sợi, ứng suất do tải trọng gây ra đối với bê tông cốt sợi phân tán sẽ bằng tổng phần ứng suất do pha sợi và pha nền chịu.

$$\sigma_c = V_f \cdot \overline{\sigma_f} + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \quad (11)$$

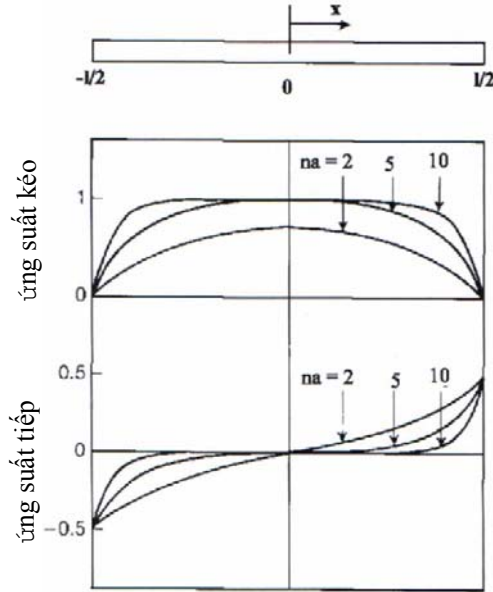
Trong $\overline{\sigma_f}$ đó là ứng suất trung bình dọc theo chiều dài sợi, và σ_m là ứng suất trong nền bê tông.

$$\overline{\sigma_f} = \frac{1}{x} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \sigma_f \cdot dx \Rightarrow \overline{\sigma_f} = E_f \cdot \varepsilon_1 \left\{ 1 - \left[\frac{\tan(na)}{na} \right] \right\} \quad (12)$$

Đặt $\eta_1 = 1 - \left[\frac{\tan(na)}{na} \right]$ là hệ số hiệu chỉnh ứng suất dọc theo chiều dài sợi, 1 phụ thuộc vào tích số na .

$$\Rightarrow E_1 = \eta_1 \cdot V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m \quad (13)$$

Giai đoạn 2 kết thúc khi ứng suất do tải trọng gây ra đạt đến ứng suất làm phá vỡ trạng thái phát triển từ từ của vết nứt đơn s_{ss} (hình 1).



Hình 5: Phân bố ứng suất kéo và ứng suất tiếp dọc theo chiều dài sợi

2.3 Giai đoạn 3 : BC

Đây là giai đoạn hình thành và phát triển của nhiều vết nứt nhỏ phức tạp phân bố ngẫu nhiên trong bê tông cốt sợi phân tán, vết nứt đơn tiếp tục phát triển. Trong giai đoạn này, những vết nứt nhỏ chỉ xuất hiện khi thoả mãn 2 điều kiện sau :

- Ứng suất làm cho nền xuất hiện vết nứt đầu tiên phải nhỏ hơn cường độ tới hạn của bê tông cốt sợi phân tán :

$$\sigma_{fc} < \sigma_{cu} \quad (14)$$

Tồn tại trạng thái vết nứt đơn phát triển từ từ ở giai đoạn 2 :

$$J_{tip} < J_b' \quad (15)$$

Trong đó :

$$+ J_{ip} = \sigma_{ss} \delta_{ss} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma_c(\delta) d\delta \quad (16)$$

là năng lượng do bê tông cốt sợi phân tán hấp thụ ở giai đoạn vết nứt đơn phát triển từ từ (giai đoạn 2), δ_{ss} là độ mở rộng của miệng vết nứt đơn ứng với ứng suất σ_{ss} .

+ J_b' là vùng năng lượng do bê tông cốt sợi hấp thụ vào trong quá trình hình thành và phát triển nhiều vết nhỏ, vùng năng lượng này được tính cho đến khi ứng suất trong bê tông đạt giá trị cực đại.

$$J_b' = \sigma_{cu} \delta_{cu} - \int_0^{\delta_{cu}} \sigma_c(\delta) d\delta \quad (17)$$

với δ_{cu} là độ mở rộng của miệng vết nứt khi ứng suất đạt đến ứng suất giới hạn σ_{cu} .

Ở giai đoạn này, ứng suất tiếp τ_1 trên bề mặt tiếp xúc giữa sợi và nền tăng nhanh, ứng suất tiếp này chuyển hoá thành ứng suất kéo σ_f trong sợi và làm cho ứng suất kéo trong sợi ngày càng tăng cao. Sự gia tăng đồng thời ứng suất tiếp và ứng suất kéo trong sợi làm cho vùng tiếp xúc giữa sợi với nền bị phá hoại từ từ. Cùng với quá trình gia tăng ứng suất là quá trình phát triển của nhiều vết nứt nhỏ bên cạnh sự phát triển của một vết nứt đơn chính yếu. ứng suất tiếp tục gia tăng cho đến khi đạt đến cường độ tới hạn của bê tông cốt sợi thì hiện tượng phá hoại xảy ra. Hiện tượng phá hoại xảy ra bởi sự phát triển của một vết nứt đơn chính yếu, bên cạnh đó là sự xuất hiện của nhiều vết nứt nhỏ phân bố ngẫu nhiên trong bê tông cốt sợi. Sự phá hoại xảy ra có thể là do:

- Ngoại lực tác dụng làm sinh ra ứng suất tiếp τ_1 vượt quá cường độ bám dính tại bề mặt phân giới giữa sợi và nền, từ đó làm cho sợi bị tuột ra khỏi nền.
- Ứng suất tiếp τ_1 chuyển hoá thành ứng suất kéo σ_f trong sợi, ứng suất kéo này vượt quá cường độ chịu kéo của sợi, từ đó làm cho sợi bị đứt khi hiện tượng phá hoại xảy ra.

Giai đoạn 3 kết thúc khi ứng suất đạt đến cường độ cực đại của bê tông cốt sợi và bê tông cốt sợi bị phá hoại.

3. KẾT LUẬN

- Dùng biểu đồ biểu diễn quan hệ ứng suất – độ mở rộng của miệng vết nứt ($\sigma - \delta$) để nghiên cứu cơ chế hình thành và phát triển vết nứt của bê tông cốt sợi phân tán ngẫu nhiên khi chịu tải trọng.

- Sự hình thành và phát triển vết nứt trong bê tông cốt sợi phân tán ngẫu nhiên gồm 3 giai đoạn :

+ Giai đoạn hình thành vết nứt đầu tiên trong nền bê tông.

+ Giai đoạn phát triển từ từ của vết nứt đơn đầu tiên

+ Giai đoạn vết nứt đơn tiếp tục phát triển, hình thành và phát triển nhiều vết nứt nhỏ cho đến khi bê tông cốt sợi phân tán bị phá hoại

- Bê tông cốt sợi phân tán bị phá hoại bởi một vết nứt đơn chính yếu, bên cạnh đó là sự xuất hiện và phát triển của nhiều vết nứt nhỏ trong nền bê tông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Perumalsmy N. Balaguru, “Fiber reinforced cement – composites”, McGraw – Hill, New York, 1992.
2. Jun Zhang and Victor C Li, “Modeling of Mode I Crack Propagation in Fiber Reinforced Concrete by Fracture Mechanics”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992.
3. Kanda, Tetsushi and Li, Victor C, “Multiple Cracking Sequence and Saturation in Fiber Reinforced Cementitious Composites”, ASCE, 1993.
4. Li, V . C and Leung, K .Y, “Steady – state and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 118, No. 11, Nov, 1992.
5. Byounggeon Kim, W. Jason Weiss, “Using Acoustic Emission to Quantify Damage in Restrained Fiber – Reinforced Cement Mortars”, Cement and Concrete Research, 2002.