



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ ĐẶC TRƯNG CƠ HỌC CỦA BÊ TÔNG ĐẾN SỰ PHÁT TRIỂN VẾT NỨT TRÊN KẾT CẤU BÊ TÔNG

Nguyễn Trung Hiếu¹

Tóm tắt: Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của một số đặc trưng cơ học của bê tông đến sự phát triển của vết nứt dạng 1 trên kết cấu bê tông bằng phương pháp mô phỏng số. Thí nghiệm mẫu bê tông hình lăng trụ có vết nứt trước làm việc chịu uốn được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn dựa trên cơ sở mô hình vết nứt ảo (Fictitious Crack Model). Những kết quả thu được cho phép hiểu rõ hơn ảnh hưởng một số đặc trưng cơ học của bê tông như mô đun đàn hồi, cường độ chịu kéo, biến dạng từ biến và độ mở rộng vết nứt giới hạn đến sự hình thành và phát triển của vết nứt trên kết cấu bê tông.

Từ khóa: Bê tông; nứt; mô hình vết nứt ảo.

Summary: This paper presents the influence of concrete mechanical characteristics to the development of the crack type 1 in concrete structures by numerical simulation method. Bending tests of the prismatic concrete samples with cracks were simulated by finite element method based on Fictitious Crack Model. The results help to understand the influence of concrete mechanical characteristics such as elastic modulus, tensile strength, creep deformation and ultimate crack width to the development of cracks in concrete structures.

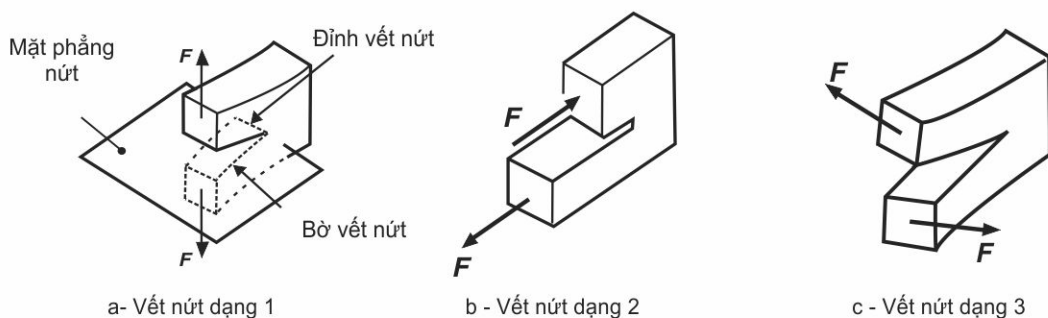
Key words: Concrete; crack; fictitious crack model.

Nhận ngày 05/3/2015, chỉnh sửa ngày 18/3/2015, chấp nhận đăng 31/3/2015



1. Đặt vấn đề

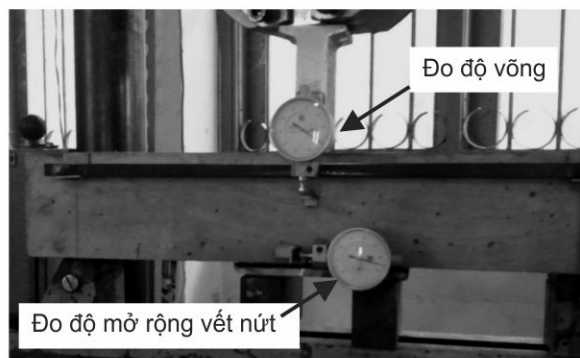
Bê tông là loại vật liệu xây dựng được sử dụng rộng rãi hiện nay. Độ bền hay tuổi thọ của kết cấu bê tông được quyết định bởi nhiều yếu tố khác nhau trong đó vết nứt trên kết cấu bê tông, do nhiều nguyên nhân khác nhau gây ra (do tải trọng, do biến dạng co ngót của bê tông bị ngăn cản, do tác động của nhiệt độ môi trường...) là yếu tố chính. Phần lớn vết nứt trong kết cấu bê tông là vết nứt dạng 1 (xem Hình 1a) mà nguyên nhân hình thành và phát triển của dạng vết nứt này do ứng suất kéo vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông.



Hình 1. Các dạng vết nứt trong kết cấu bê tông

¹TS, Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp. Trường Đại học Xây dựng. E-mail: ngtrunghieugd@gmail.com

Các nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến vết nứt dạng 1 của kết cấu bê tông thường được thực hiện thông qua các thí nghiệm kéo trực tiếp hoặc thí nghiệm uốn các mẫu thử bê tông có vết nứt trước (mỗi nứt) được tạo ra trong quá trình chế tạo mẫu. Trên Hình 2 giới thiệu thí nghiệm uốn ba điểm mẫu bê tông có vết nứt trước, kích thước 100 x 100 x 500 mm, được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định công trình, Trường Đại học Xây dựng [1]. Kết quả thu được thông qua nghiên cứu thực nghiệm trong trường hợp này là các mối quan hệ giữa tải trọng - độ võng và tải trọng - độ mở rộng vết nứt.



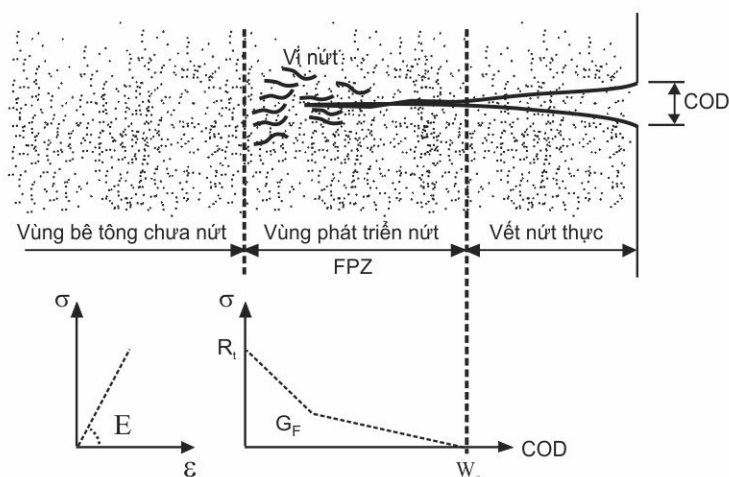
a - Mẫu thí nghiệm và dụng cụ đo



b - Hình ảnh phát triển của vết nứt

Hình 2. Thí nghiệm uốn ba điểm mẫu bê tông có vết nứt trước [1]

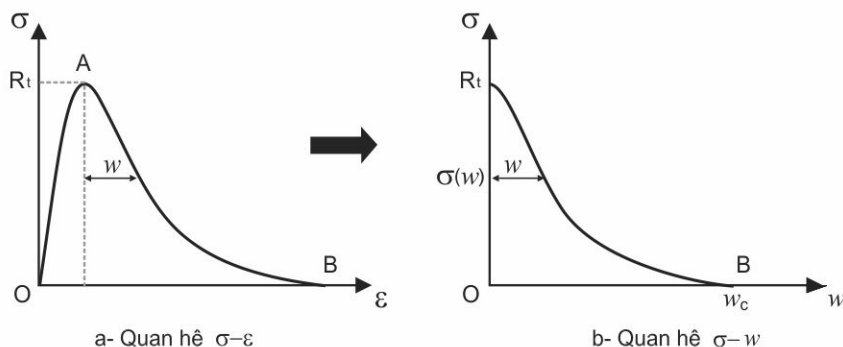
Bên cạnh các nghiên cứu thực nghiệm về sự phát triển vết nứt trên kết cấu bê tông, rất nhiều nghiên cứu mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn đã được thực hiện. Trong đó phương pháp sử dụng mô hình vết nứt ảo (fictitious crack model) do Hillerborg [3] đề xuất được sử dụng phổ biến cho việc mô phỏng sự phát triển của vết nứt dạng 1. Mô hình này được xây dựng dựa trên giả thuyết về “vùng phát triển nứt - Fracture Process Zone FPZ” như minh họa trên Hình 3. Theo giả thuyết này, tồn tại một vùng có kích thước hữu hạn ngay tại đỉnh vết nứt mà trong đó tập hợp rất nhiều các vi nứt. Sự hình thành và phát triển của vết nứt là kết quả của sự hợp nhất của các vi nứt này và khi ứng suất kéo vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông [3,4]. Đặc tính của vết nứt ảo là mối quan hệ ứng suất kéo - độ mở rộng vết nứt ($\sigma - w$) được xây dựng dựa trên cơ sở quan hệ ứng suất - biến dạng ($\sigma - \varepsilon$) của mẫu bê tông chịu kéo trực tiếp ở giai đoạn sau khi ứng suất kéo đạt đến cường độ chịu kéo của bê tông (Hình 4a).



Hình 3. Vùng phát triển nứt áp dụng cho nghiên cứu vết nứt dạng 1 [3]

Theo nhiều tác giả [2,3,4,5], một số đặc trưng cơ bản của bê tông có ảnh hưởng đến quá trình hình thành và phát triển vết nứt gồm: Mô đun đàn hồi E ; Cường độ chịu kéo R_t ; Biến dạng từ biến; Quan hệ $\sigma - w$ và độ mở rộng giới hạn của vết nứt w_c : đây được coi là những đặc trưng cơ bản cho ứng xử phi tuyến sau đỉnh phá hoại của bê tông sau khi tải trọng đạt giá trị giới hạn và bắt đầu giảm xuống (giai đoạn AB trên đồ thị Hình 4.a). Quan hệ $\sigma - w$ được xác định một cách gián tiếp từ quan hệ ứng suất - biến dạng thu được từ thí

nghiệm kéo trực tiếp mẫu bê tông có vết nứt trước. Trên Hình 4 giới thiệu một phương pháp xây dựng quan hệ này theo RILEM TC - 162 [7] trong đó độ mở rộng vết nứt w được xác định bằng hiệu của tổng biến dạng của mẫu trừ đi giá trị biến dạng tương ứng với giá trị ứng suất phá hoại mẫu thử. Độ mở rộng giới hạn của vết nứt w_c được xác định tương ứng với ứng suất kéo bằng không.



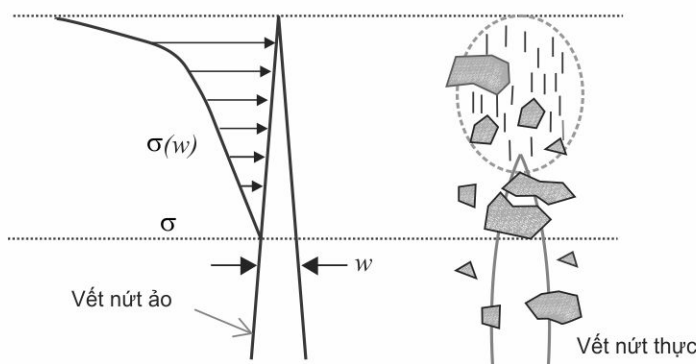
Hình 4. Xác định quan hệ $\sigma-w$ từ quan hệ $\sigma-\varepsilon$ - theo RILEM TC-162 [7]

Trong khuôn khổ bài báo, thí nghiệm uốn ba điểm mẫu bê tông hình lăng trụ có vết nứt trước được mô phỏng số dựa trên mô hình vết nứt ảo. Kết quả mô phỏng là cơ sở cho việc đánh giá ảnh hưởng của các đặc trưng cơ học kể trên đến sự hình thành phát triển của vết nứt trong kết cấu bê tông.



2. Mô phỏng thí nghiệm uốn mẫu bê tông hình lăng trụ có vết nứt trước

Mô phỏng thí nghiệm uốn mẫu lăng trụ có vết nứt trước được thực hiện bằng chương trình CAST3M [http://www-cast3m.cea.fr/], dựa trên cơ sở mô hình vết nứt ảo. Đây là chương trình được xây dựng và phát triển bởi Trung tâm nghiên cứu hạt nhân của Pháp CEA (Centre French Alternative Energies and Atomic Energy Commission). Việc mô phỏng được thực hiện trên các cơ sở sau: Mô phỏng cho bài toán ứng suất phẳng (2D); Quan hệ ứng suất - biến dạng của phần bê tông không nứt là đàn hồi tuyến tính; Vết nứt sinh ra bởi ứng suất kéo trong kết cấu bê tông và phát triển theo dạng 1; Vị trí của vết nứt được định trước trùng với trục đối xứng của mẫu; Các điểm nằm trên bờ vết nứt sẽ chịu tác dụng của ứng suất kéo $\sigma(w)$ mà giá trị của chúng phụ thuộc vào độ mở rộng vết nứt (Hình 5). Vết nứt phát triển khi ứng suất kéo ở đỉnh vết nứt vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông.

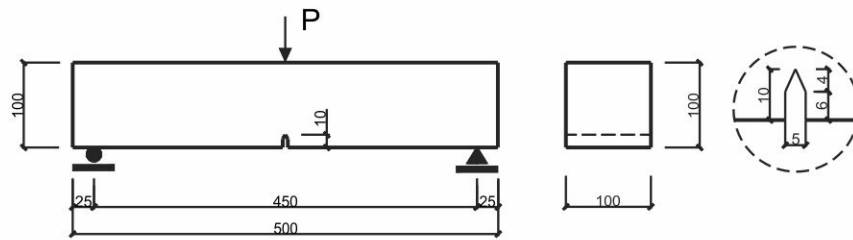


Hình 5. Ứng suất kéo $\sigma(w)$ trên bờ vết nứt ảo

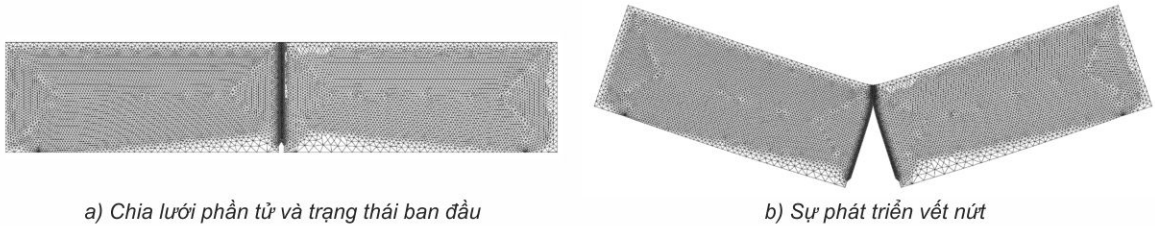
Trên Hình 6 giới thiệu kích thước hình học của mẫu bê tông được mô phỏng và sơ đồ tác dụng của tải trọng. Trên Hình 7 giới thiệu hình ảnh chia lưới phần tử và hình ảnh phát triển của vết nứt dưới tác dụng của tải trọng. Các đặc trưng cơ học của bê tông sử dụng cho mô phỏng được trình bày trong Bảng 1, trong đó quan hệ $\sigma-w$ và giá trị w_c được lấy theo kiến nghị của Toumi [8].

Bảng 1. Một số đặc trưng cơ học của bê tông sử dụng trong bài toán mô phỏng

STT	Đặc trưng cơ học	Đơn vị	Giá trị
1	Cường độ chịu kéo R_t	MPa	4,1
2	Mô đun đàn hồi E	MPa	$32,2 \cdot 10^3$
3	Quan hệ $\sigma-w$		$\sigma(w) = R_t e^{-5 \frac{w}{w_c}} \quad (1)$
4	Độ mở rộng giới hạn của vết nứt w_c	mm	0,15



Hình 6. Hình dạng và kích thước mẫu lăng trụ có vết nứt trước

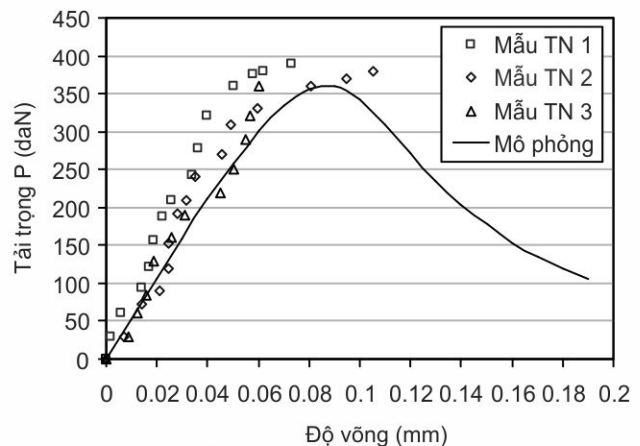


a) Chia lưới phần tử và trạng thái ban đầu

b) Sự phát triển vết nứt

Hình 7. Hình ảnh mô phỏng mẫu thí nghiệm

Hình 8 trình bày quan hệ tải trọng - độ võng thu được từ mô phỏng số và từ thực nghiệm. Các số liệu thực nghiệm được lấy từ kết quả thí nghiệm trình bày trong [1], trong đó 03 mẫu bê tông thí nghiệm có các đặc trưng cơ học trình bày trong Bảng 1. Có thể thấy việc áp dụng mô hình vết nứt ảo để mô phỏng thí nghiệm uốn ba điểm mẫu bê tông có vết nứt mới là phù hợp.



Hình 8. So sánh kết quả mô phỏng với kết quả thực nghiệm



3. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số đặc trưng cơ học của bê tông đến sự phát triển vết nứt trong bê tông

Như đã trình bày ở trên, trong thí nghiệm uốn mẫu bê tông có vết nứt trước thì quan hệ tải trọng tác dụng - độ võng phản ánh sự phát triển của vết nứt trên mẫu thí nghiệm. Trong phần này sẽ trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của một số đặc trưng cơ học của bê tông đến sự phát triển của vết nứt, dựa trên mô phỏng thí nghiệm uốn mẫu bê tông có vết nứt trước bằng mô hình vết nứt ảo.

3.1 Mô đun đàn hồi

Trên Hình 9 giới thiệu quan hệ giữa tải trọng - độ võng khi mẫu bê tông có các giá trị mô đun đàn hồi khác nhau. Hai thông số cơ bản đánh giá sự hình thành và phát triển của vết nứt là:

- Tải trọng cực hạn P_{max} : giá trị P_{max} tương ứng với thời điểm các vi nứt nhỏ trên mẫu bê tông xuất hiện trước đó có sự liên kết lại với nhau và tạo thành vết nứt trên kết cấu bê tông (có thể quan sát bằng mắt thường) dẫn đến phá hoại mẫu. Đây được xem là thời điểm hình thành vết nứt trên bê tông.

- Quan hệ tải trọng - độ võng sau khi đạt tải trọng tác dụng đạt giá trị P_{max} : giai đoạn này thể hiện ứng xử phi tuyến của bê tông. Sau khi xuất hiện vết nứt, khả năng chịu tải của mẫu giảm đồng thời với sự phát triển của vết nứt trong mẫu bê tông. Tốc độ phát triển của vết nứt được thể hiện qua sự suy giảm giá trị của tải trọng tác dụng ứng với mỗi giá trị của độ võng.

Khi mô đun đàn hồi của bê tông có giá trị là $18 \cdot 10^3$ MPa, mẫu bê tông bắt đầu bị nứt khi P_{max} bằng 320 daN (ứng với độ võng 0,13 mm) trong khi với giá trị mô đun đàn hồi là $40 \cdot 10^3$ MPa, vết nứt xuất hiện khi P_{max}

bằng 395 daN (ứng với độ võng 0,06 mm). Điều này cho thấy nếu bê tông có tính biến dạng cao (hay mô đun đàn hồi nhỏ) sẽ làm chậm quá trình hình thành vết nứt. Kết quả cũng cho thấy, sau khi xuất hiện vết nứt, với cùng một giá trị độ võng thì tải trọng tương ứng sẽ nhỏ khi mô đun đàn hồi của bê tông lớn. Như vậy, khả năng biến dạng của bê tông có vai trò làm chậm lại quá trình phát triển vết nứt.

3.2 Cường độ chịu kéo

Trên Hình 10 trình bày ảnh hưởng của cường độ chịu kéo R_t của bê tông đến quan hệ giữa tải trọng tác dụng và độ võng của mẫu bê tông. Có thể dễ dàng nhận thấy cường độ chịu kéo của bê tông ảnh hưởng rõ rệt đến sự hình thành và phát triển của vết nứt. Như vậy, cường độ chịu kéo cao cho phép làm chậm quá trình hình thành và phát triển của vết nứt trong mẫu bê tông.

3.3 Biến dạng từ biến của bê tông

Ảnh hưởng của biến dạng từ biến được kể đến thông qua việc sử dụng mô đun đàn hồi hiệu dụng E_{eff} , được xác định theo công thức sau:

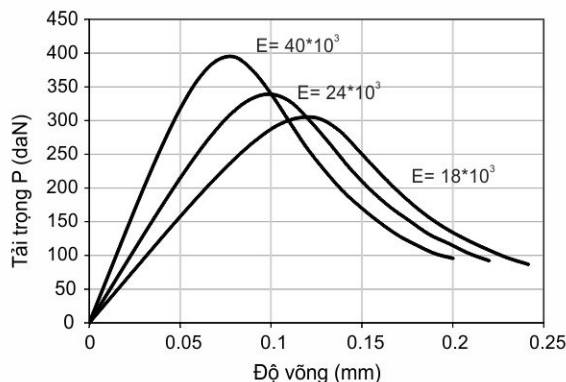
$$E_{eff} = \frac{E}{1+\phi} \quad (2)$$

trong đó E là mô đun đàn hồi tức thời của bê tông và ϕ là hệ số từ biến của bê tông.

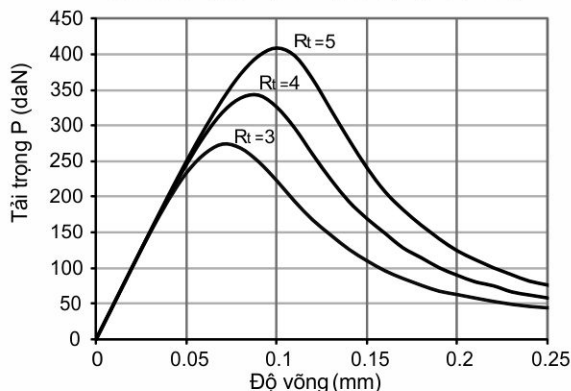
Trên Hình 11 trình bày ảnh hưởng của biến dạng từ biến, thông qua hệ số từ biến ϕ , đến quan hệ tải trọng - độ võng. Kết quả thu được cho thấy nếu bê tông có biến dạng từ biến lớn (ϕ lớn) sẽ có tác dụng làm chậm sự hình thành và phát triển vết nứt.

3.4 Ảnh hưởng của độ mở rộng vết nứt giới hạn w_c

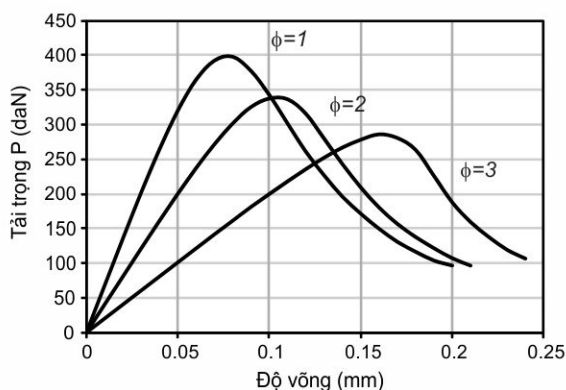
Ảnh hưởng của độ mở rộng vết nứt giới hạn đến sự hình thành và phát triển của vết nứt được trình bày trên Hình 12. Kết quả thu được cho thấy độ mở rộng vết nứt giới hạn của bê tông tăng sẽ cho phép hạn chế sự phát triển của vết nứt. Theo một số nghiên cứu, với bê tông thông thường, độ mở rộng giới hạn vào khoảng 0,15 mm và việc thay đổi đại lượng này không phụ thuộc vào cường độ chịu nén hay cấp độ bền của bê tông [5,8]. Hiện nay, việc sử dụng bê tông cốt sợi thép (Steel Fibre Reinforced Concrete) là một giải pháp cho phép gia tăng đáng kể độ mở rộng vết nứt giới hạn.



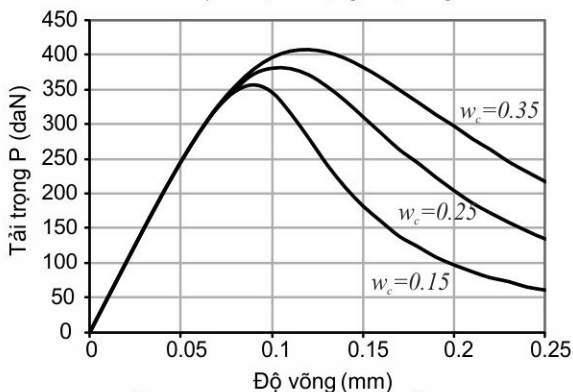
Hình 9. Ảnh hưởng của mô đun đàn hồi E (Mpa) của bê tông đến quan hệ tải trọng - độ võng



Hình 10. Ảnh hưởng của cường độ chịu kéo R_t (MPa) của bê tông đến quan hệ tải trọng - độ võng



Hình 11. Ảnh hưởng của biến dạng từ biến của bê tông đến quan hệ tải trọng - độ võng



Hình 12. Ảnh hưởng của độ mở rộng vết nứt giới hạn w_c đến quan hệ tải trọng - độ võng



4. Kết luận và kiến nghị

Từ những kết quả thu được có thể thấy rõ ảnh hưởng của mô đun đàn hồi, cường độ chịu kéo, biến dạng từ biến và độ mở rộng vết nứt giới hạn của bê tông đến sự hình thành và phát triển vết nứt dạng 1. Những kết quả trình bày trong khuôn khổ bài báo này góp phần hiểu rõ hơn ứng xử cơ học của bê tông đối với sự hình thành và phát triển vết nứt trên vật liệu này. Với thực tế hiện nay khi mà tình trạng nứt xảy ra trên bê tông rất phổ biến thì những kết quả trình bày trong bài báo này còn có ý nghĩa trong việc định hướng lựa chọn vật liệu bê tông hợp lý nhằm hạn chế tình trạng nứt trên công trình xây dựng sử dụng loại vật liệu này.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Trung Hiếu (2011), *Mô phỏng vết nứt dạng 1 trong kết cấu bê tông sử dụng mô hình vết nứt*, Báo cáo đề tài NCKH cấp trường, mã số : 57-2011/KH XD.
2. Ju J. (1989), "On energy-based coupled elastoplastic damage theories: constitutive modelling and computational aspects", *Int.J. Solids and Structures*, 25: 803-833.
3. Hillerborg A., Modeer M., Petersson P. E. (1976), "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finis elements", *Cement and Concrete Research*, 6: 773-782.
4. Hillerborg A. (1980), "Analysis of fracture by mean of the fictitious crack model, particularly for fiber reinforced concrete", *The International Journal of Cement Composites*, 2(4): 177-184.
5. Van Mier J. G. M. (1991), "Mode I Fracture of Concrete: Discontinuous crack growth and crack interface grain bridging", *Cement and Concrete Research*, 21: 1-15.
6. Hordijk D. A. (1991), *Local approach to fatigue of concrete*, PhD thesis, Delft, Hollande.
7. RILEM TC 162-TDF (2002), "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, design of steel fibre reinforced concrete using the sigma-epsilon method: principles and applications", *Materials and Structures*, 35: 262-278.
8. Toumi A. (1998), *Etude du processus de propagation de fissures par fatigue dans le béton*, PhD thesis, Université de Paul Sabatier de Toulouse.
9. CAST3M <http://www-cast3m.cea.fr/>.