



## NGHIÊN CỨU SỰ HÌNH THÀNH VÀ MỞ RỘNG KHE NỨT THẲNG GÓC TRONG DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP KHI CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NGẮN HẠN

Phạm Thanh Tùng<sup>1\*</sup>, Phạm Quang Đạo<sup>2</sup>, Đinh Văn Tùng<sup>2</sup>, Nguyễn Văn Quang<sup>2</sup>

**Tóm tắt:** Nứt là hiện tượng khá phổ biến trong dầm bê tông cốt thép (BTCT). Các tiêu chuẩn hiện hành đều đưa ra công thức tính toán mô men nứt và bề rộng khe nứt thẳng góc nhưng có sự khác biệt đáng kể. Trong bài báo này, tác giả giới thiệu phương pháp tính toán mô men nứt và bề rộng khe nứt thẳng góc theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012. Tiêu chuẩn này là cơ sở để chỉnh sửa tiêu chuẩn hiện hành TCVN 5574:2012 về thiết kế kết cấu bê tông và BTCT. Phương pháp tính toán sự hình thành và mở rộng khe nứt theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 có thể thực hiện theo mô hình tải trọng giới hạn hoặc mô hình biến dạng phi tuyến. Ngoài ra, bài báo cũng trình bày nghiên cứu thực nghiệm 04 dầm BTCT trong điều kiện Việt Nam để xác định mô men nứt và bề rộng khe nứt thẳng góc của dầm. Từ đó sử dụng kết quả thực nghiệm để đánh giá khả năng áp dụng tính toán lý thuyết theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012 cho thiết kế kết cấu BTCT trong điều kiện Việt Nam.

**Từ khóa:** Khe nứt; mô men kháng nứt; bề rộng khe nứt; SP 63.13330.2012.

**A study on the appearance and development of the vertical crack of the reinforced concrete beam under short-term loading**

**Abstract:** Cracking is a common phenomenon in reinforced concrete beams(RC). Some current standards provide formulas for calculating the cracking moment and crack width on the vertical section with noticeable differences. In this paper, the author introduces the method for calculating the moment and vertical crack width according to Russian standard SP 63.13330.2012. This standard is the basis for editing the current standard TCVN 5574: 2012 for designing concrete and reinforced concrete elements. The method in SP 63.13330.2012 permits to design based on the the ultimate force or non-linear deformation model. In addition, the paper presents an experiment of four reinforced concrete beams subjected to short-term loading to determine the cracking moment and the vertical crack width of these beams. The obtained experimental results are used to evaluate the applicability of the theoretical calculation according to Russian standard SP 63.13330.2012 in RC design works in Vietnam.

**Keywords:** Crack; cracking moment; crack width; SP 63.13330.2012.

Nhận ngày 28/01/2018; sửa xong 12/02/2018; chấp nhận đăng 28/02/2018

Received: January 28<sup>th</sup>, 2018; revised: February 12<sup>th</sup>, 2018; accepted: February 28<sup>th</sup>, 2018



### 1. Giới thiệu

Trong cấu kiện chịu uốn bê tông cốt thép, nứt là hiện tượng thường gặp do cường độ chịu kéo thấp của vật liệu bê tông [1]. Nứt có thể do nhiều nguyên nhân như biến dạng vãn khuôn, co ngót của bê tông, sự thay đổi nhiệt độ và độ ẩm, do sự tác dụng của tải trọng hoặc các tác động khác. Khe nứt hình thành khi ứng suất bê tông vùng kéo vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông. Khe nứt có thể làm cho công trình mất khả năng chống thấm, bê tông không bảo vệ được cốt thép khỏi bị ăn mòn đặc biệt trong môi trường xâm thực [2]. Ngoài ra, khe nứt hình thành có thể làm cho cấu kiện giảm độ cứng, giảm năng lượng hấp thụ và giảm độ bền lâu của kết cấu [3].

Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã tìm ra công thức dự báo bề rộng khe nứt dựa trên lý thuyết và thực nghiệm. Dựa trên tính toán lý thuyết, Tomas [4] và Sliger [5] sử dụng mô hình Bond-Slip, Borm [6] và Base sử dụng mô hình No-Slip để tìm ra công thức tính toán bề rộng khe nứt. Các tác giả Gergely và

<sup>1</sup> PGS.TS, Khoa Xây dựng DD & CN, Trường Đại học Xây dựng.

<sup>2</sup> ThS, Khoa Xây dựng DD & CN, Trường Đại học Xây dựng.

\* Tác giả chính. E-mail: tungdtxl@gmail.com.

Lutz [7], Oh và Kang [8] từ các nghiên cứu thực nghiệm cũng đã xây dựng được công thức tính toán bề rộng khe nứt. Ngoài ra, công thức tính toán bề rộng khe nứt do Gergely và Lutz thiết lập và đưa ra trong tiêu chuẩn ACI 318-95 được sử dụng rộng rãi. Trong nghiên cứu này, tác giả giới thiệu phương pháp tính toán sự hình thành và mở rộng khe nứt thẳng góc theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012, đây là cơ sở để soạn thảo tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông và BTCT thay thế tiêu chuẩn TCVN 5574:2012. Phương pháp tính toán sự hình thành và mở rộng khe nứt theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 vừa chấp nhận tính toán theo nội lực giới hạn vừa chấp nhận theo mô hình biến dạng phi tuyến. Tính toán hình thành khe nứt theo nội lực giới hạn có kể đến các biến dạng đàn hồi trong cốt thép và biến dạng không đàn hồi trong bê tông vùng kéo, vùng nén. Ứng suất pháp lớn nhất khi kéo trong bê tông bằng giá trị tính toán của cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông  $R_{bt,ser}$ . Mặt khác, tính toán sự hình thành khe nứt theo mô hình biến dạng phi tuyến được tiến hành dựa vào các biểu đồ biến dạng của cốt thép, của bê tông vùng kéo và bê tông vùng nén trên cơ sở giả thiết tiết diện phẳng. Tiêu chí hình thành khe nứt theo quan điểm này là biến dạng tương đối của bê tông vùng kéo đạt tới giá trị cực hạn. Tính toán bề rộng khe nứt được xác định bằng tích của biến dạng tương đối trung bình của cốt thép trên đoạn giữa các khe nứt và chiều dài đoạn này. Biến dạng tương đối trung bình giữa các khe nứt được xác định có kể đến sự làm việc của bê tông vùng kéo giữa các khe nứt. Biến dạng tương đối của cốt thép giữa các khe nứt được xác định từ tính toán đàn hồi quy ước trong cấu kiện bê tông cốt thép có vết nứt với việc sử dụng mô đun biến dạng quy đổi của bê tông vùng nén; thông số này được xác định trên cơ sở biến dạng có kể đến biến dạng không đàn hồi của bê tông vùng nén. Khoảng cách giữa các khe nứt được xác định theo các điều kiện mà hiệu số nội lực trong cốt thép dọc tại tiết diện có khe nứt và tiết diện giữa các khe nứt cân bằng với ứng suất bám dính của cốt thép và bê tông trong khoảng cách đó.

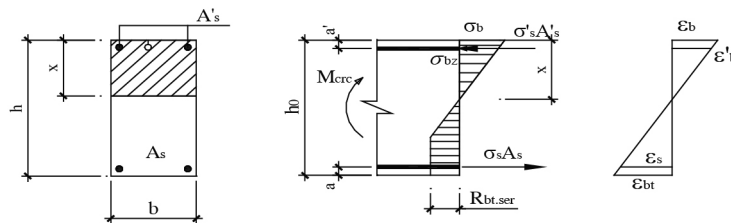
Ngoài việc giới thiệu phương pháp tính toán sự hình thành và mở rộng khe nứt thẳng góc theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012, bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm 04 dầm BTCT trong điều kiện Việt Nam để xác định khả năng chống nứt và bề rộng khe nứt của dầm; từ đó so sánh, kiểm chứng với phương pháp tính toán lý thuyết.

## 2. Tính toán sự hình thành và bề rộng khe nứt theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 [9]

### 2.1 Tính toán sự hình thành khe nứt

Tính toán sự hình thành khe nứt tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 dựa trên những giả thiết sau: Tiết diện phẳng, nghĩa là sau khi biến dạng tiết diện vẫn được coi là phẳng; Biểu đồ ứng suất trong vùng bê tông chịu nén có dạng tam giác; Biểu đồ ứng suất trong vùng bê tông chịu kéo có dạng hình thang với ứng suất lớn nhất bằng cường độ chịu kéo của bê tông  $R_{bt,ser}$ ; Biến dạng tương đối tại thớ chịu kéo ngoài cùng của bê tông lấy bằng giá trị cực hạn  $\varepsilon_{bt,u} = 0.00015$ ; Quan hệ ứng suất biến dạng trong cốt thép theo lý thuyết đàn hồi tuyến tính.

Từ các giả thiết trên, sơ đồ ứng suất và biến dạng tại tiết diện chuẩn bị nứt được thể hiện như Hình 1:



**Hình 1.** Sơ đồ ứng suất biến dạng tại tiết diện chuẩn bị nứt theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012

Mô men nứt của cấu kiện chịu uốn BTCT được xác định theo công thức (1):

$$M_{cr} = W_{pl} R_{bt,ser} \quad (1)$$

trong đó:  $R_{bt,ser}$  là cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông;  $W_{pl}$  là mô men kháng uốn đàn dẻo của tiết diện đối với thớ ngoài cùng.

Đối với tiết diện chữ nhật, giá trị  $W_{pl}$  được xác định theo công thức (2):

$$W_{pl} = \gamma W_{red}; \gamma = 1,3 \quad (2)$$

trong đó:  $W_{red}$  là mô men kháng uốn đàn hồi của tiết diện quy đổi được xác định theo công thức (3):

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t} \quad (3)$$

Ở đây  $I_{red}$  là mô men quán tính của tiết diện quy đổi đối với trục trung hòa, giá trị  $I_{red}$  được xác định theo công thức (1.4):

$$I_{red} = I + aI_s + aI'_s \quad (4)$$

trong đó:  $I$ ,  $I_s$ ,  $I'_s$  lần lượt là mô men quán tính của tiết diện bê tông, tiết diện cốt thép chịu kéo và tiết diện cốt thép chịu nén;  $y_t$  là khoảng cách từ mép bê tông chịu kéo ngoài cùng đến trục trung hòa của tiết diện quy đổi.

$$y_t = \frac{S_{t,red}}{A_{red}} \quad (5)$$

Ở đây  $A_{red}$  và  $S_{t,red}$  lần lượt là diện tích tiết diện ngang quy đổi và mô men tĩnh tiết diện quy đổi của thớ bê tông chịu kéo nhiều hơn.

## 2.2 Tính toán bề rộng khe nứt

Theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012 bề rộng khe nứt thẳng góc với trục dọc cấu kiện được xác định theo công thức (6):

$$a_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s \quad (6)$$

trong đó:  $\varphi_1=1$  đối với tải trọng ngắn hạn,  $\varphi_2=0,5$  đối với thép có gờ,  $\varphi_3=1$  đối với cấu kiện chịu uốn;  $\sigma_s$  là ứng suất trong cốt thép dọc chịu kéo tại tiết diện thẳng góc có khe nứt do ngoại lực tương ứng gây ra,  $\sigma_s$  được xác định theo công thức (7):

$$\sigma_s = \frac{M}{z_s A_s} \quad (7)$$

Ở đây  $z_s$  là khoảng cách từ trọng tâm vùng cốt thép chịu kéo đến điểm đặt hợp lực của vùng chịu nén của tiết diện được xác định theo công thức (8):

$$z_s = h_0 - \frac{x}{3} \quad (8)$$

$x$  là chiều cao bê tông vùng nén được tính theo công thức (9):

$$y_c = x_m = h_0 \left( \sqrt{(\mu_s \alpha_{s2})^2 + 2\mu_s \alpha_{s2}} - \mu_s \alpha_{s2} \right) \quad (9)$$

$\alpha_{s1}$ ,  $\alpha_{s2}$ : hệ số quy đổi cốt thép về bê tông.

$l_s$  là khoảng cách cơ sở giữa các vết nứt thẳng góc kề nhau và được xác định theo công thức (10).

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s} d_s \quad (10)$$

trong đó:  $A_{bt}$  là diện tích vùng bê tông chịu kéo được xác định theo chiều cao vùng chịu kéo của bê tông  $x$ , dựa trên nguyên tắc tính toán mô men nứt;  $d_s$  là đường kính danh nghĩa của cốt thép.

Hệ số kể đến biến dạng bê tông vùng kéo được tính toán bởi công thức (11):

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}}{M} \quad (11)$$

## 2.3 Yêu cầu khống chế bề rộng khe nứt theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012

Tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 quy định cụ thể bề rộng giới hạn của khe nứt. Tùy vào cấp chống nứt, điều kiện làm việc của kết cấu mà quy định bề rộng khe nứt giới hạn  $a_{crc}$ . Giới hạn bề rộng khe nứt đối với cốt thép thanh, điều kiện làm việc ngoài trời thể hiện trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Giới hạn bề rộng khe nứt theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012

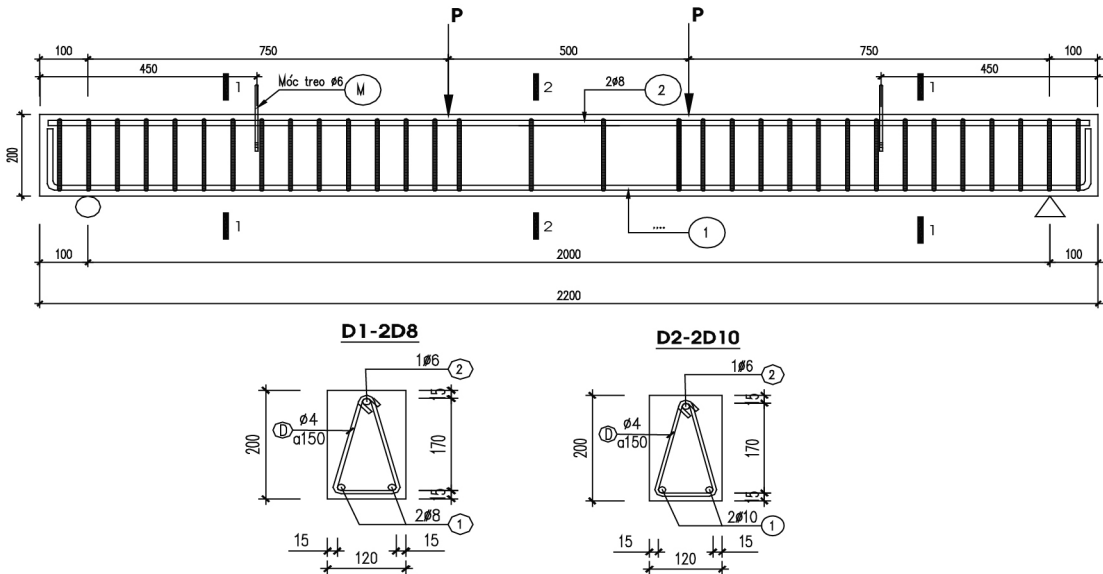
| Điều kiện                   | Bề rộng khe nứt giới hạn (mm) |                            |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
|                             | Tải trọng tác dụng ngắn hạn   | Tải trọng tác dụng dài hạn |
| Hạn chế thấm cho kết cấu    | $a_{crc} = 0,3$               | $a_{crc} = 0,2$            |
| Bảo vệ an toàn cho cốt thép | $a_{crc} = 0,4$               | $a_{crc} = 0,3$            |



### 3. Nghiên cứu thực nghiệm

#### 3.1 Mẫu thí nghiệm và vật liệu chế tạo mẫu

Mẫu thí nghiệm: Thí nghiệm được thực hiện trên 04 mẫu dầm BTCT chiều dài 2200 mm, tiết diện mẫu hình chữ nhật  $b \times h = 120 \times 200$  mm. Để tạo ra khe nứt thẳng góc hay tạo ra vùng có mô men uốn thuần túy, tác giả chọn sơ đồ thí nghiệm dầm đơn giản đặt 2 lực tập trung như Hình 2, cốt đai 2 đầu dầm đặt dày với khoảng cách 60 mm. Trong nghiên cứu này, để bỏ qua sự làm việc của cốt thép vùng nén, tác giả sử dụng cốt thép chịu nén là 1 thanh thép  $\phi 6$ . Bốn dầm BTCT chia làm hai nhóm dầm, nhóm 1 gồm 02 dầm với cốt thép chịu kéo  $2\phi 8$ , nhóm 2 gồm 02 dầm với cốt thép chịu kéo  $2\phi 10$  tương ứng với hàm lượng cốt thép là 0,45% và 0,71%. Các thông số cấu tạo hai nhóm dầm thí nghiệm được trình bày trong Bảng 2.



**Hình 2.** Cấu tạo dầm thí nghiệm

**Bảng 2.** Thông số cấu tạo các dầm thí nghiệm

| STT | Thông số cấu tạo dầm | D1                                |      | D2     |      |
|-----|----------------------|-----------------------------------|------|--------|------|
|     |                      | D1.1                              | D1.2 | D2.1   | D2.2 |
| 1   | Thép dọc lớp trên    | 1 Ø6                              |      |        |      |
| 2   | Thép dọc lớp dưới    | 2 Ø8                              |      | 2 Ø10  |      |
| 3   | Hàm lượng cốt thép   | 0.45%                             |      | 0,71%  |      |
| 4   | Thép đai             | Ø6 – a = 60 mm và Ø6 – a = 150 mm |      |        |      |
| 5   | Số lượng dầm         | 02 dầm                            |      | 02 dầm |      |

Các mẫu cơ bản cũng được chế tạo để xác định đặc trưng cơ học của bê tông bao gồm 03 mẫu xác định cường độ chịu nén, 03 mẫu xác định mô đun đàn hồi và 03 mẫu xác định cường độ chịu kéo khi bẻ.

#### - Vật liệu sử dụng

Sử dụng bê tông cấp độ bền B22.5 độ sụt  $10 \pm 2$  cm, cấp phối bê tông được thể hiện trong Bảng 3.

Dầm thí nghiệm và mẫu cơ bản được chế tạo theo đúng kích thước thiết kế (Hình 3 và 4).

Sau khi chế tạo, các mẫu dầm và mẫu cơ bản được bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn. Kết quả thí nghiệm chỉ tiêu cơ lý của vật liệu được thể hiện trong Bảng 4.

**Bảng 3.** Thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông [kg/m<sup>3</sup>]

| Xi măng PCB30 [kg] | Cát vàng [kg] | Đá 1×2 [kg] | Nước [kg] |
|--------------------|---------------|-------------|-----------|
| 430                | 597           | 1207        | 197       |



Hình 3. Công tác gia công cốt thép



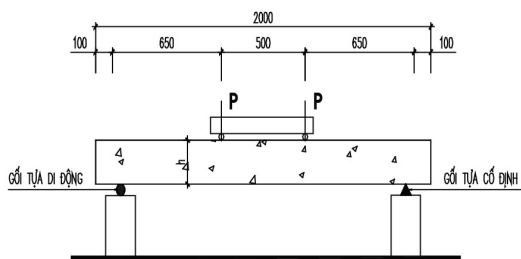
Hình 4. Công tác đúc mẫu thí nghiệm

**Bảng 4. Kết quả thí nghiệm xác định tính chất cơ lý của vật liệu chế tạo dầm**

| Tên thí nghiệm                                         | Số lượng mẫu | Kết quả thí nghiệm (MPa) |
|--------------------------------------------------------|--------------|--------------------------|
| Xác định cường độ chịu nén ( $R_p$ )                   | 03           | 29.5                     |
| Xác định cường độ chịu kéo khi bở ( $R_{kb}$ )         | 03           | 2.7                      |
| Xác định mô đun đàn hồi của bê tông ( $E_b$ )          | 03           | 30600                    |
| Xác định cường độ giới hạn chảy của cốt thép ( $f_y$ ) | 03           | 382                      |

### 3.2 Sơ đồ thí nghiệm

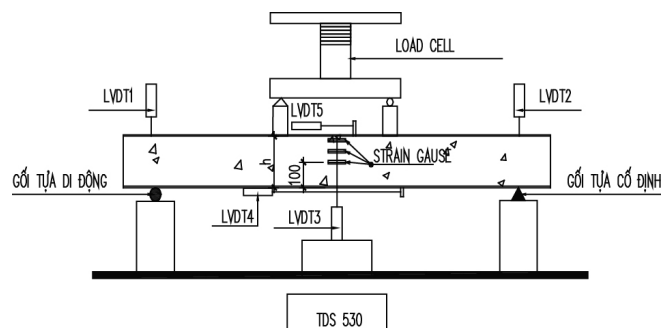
Sơ đồ thí nghiệm là dầm đơn giản chịu tác dụng của 02 lực tập trung là  $P$  được thể hiện trên Hình 5. Sử dụng kích thủy lực loại 20 tấn kết hợp với dầm phân tải để gia tải thí nghiệm. Giá trị tải trọng tập trung đầu kích được xác định thông qua 01 dụng cụ đo lực điện tử (load cell) được kết nối với bộ xử lý số liệu Data - Logger TDS 530 (hãng Tokyo Sokki - Nhật Bản).



Hình 5. Sơ đồ thí nghiệm

### 3.3 Sơ đồ bố trí dụng cụ đo

Các thông số khảo sát trong quá trình thí nghiệm bao gồm: Lực tác dụng lên dầm, biến dạng cốt thép vùng kéo, biến dạng của bê tông vùng kéo, bề rộng khe nứt. Ngoài ra tác giả khảo sát quan hệ ứng suất biến dạng trên bề mặt bê tông tại vị trí giữa dầm. Từ mục đích khảo sát này, bố trí sơ đồ dụng cụ đo như Hình 6; số lượng, vị trí và thông số dụng cụ đo được trình bày trong Bảng 5.



Hình 6. Sơ đồ bố trí dụng cụ đo

**Bảng 5. Bảng thống kê các dụng cụ, thiết bị đo**

| STT | Tên dụng cụ đo                                  | Số lượng | Vị trí đo                                                                | Thông số dụng cụ đo        |
|-----|-------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1   | Dụng cụ đo chuyển vị LVDT                       | 03       | 02 gối tựa và vị trí giữa dầm                                            | Chuẩn đo $L_0=15\text{cm}$ |
| 2   | Kính soi nứt quang học chuyên dụng JKX          | 02       | Cùng với mặt cốt thép chịu kéo                                           | Độ chính xác 0.01mm        |
| 3   | Strain gauge đo biến dạng của cốt thép chịu kéo | 02       | Giữa dầm                                                                 | Độ chính xác 10-6          |
| 4   | Strain gauge đo biến dạng của bê tông           | 01       | Vị trí giữa dầm, mặt phẳng cốt thép chịu nén và trung điểm 2 vị trí trên | Độ chính xác 10-6          |
| 5   | LVDT đo biến dạng của bê tông                   | 01       | Mặt bê tông vùng nén và mặt bê tông vùng kéo                             | Độ chính xác 10-6          |

### 3.4 Quy trình thí nghiệm

- Thí nghiệm chỉ tiêu cơ học của bê tông: Hình 7.
- Thí nghiệm xác định bề rộng khe nứt dầm BTCT.



a) Cường độ chịu nén



b) Cường độ chịu kéo



c) Mô đun đàn hồi

**Hình 7. Thí nghiệm xác định đặc trưng cơ học của bê tông**

Sau khi công việc lắp dựng thí nghiệm hoàn tất, tiến hành gia tải thử với tải trọng  $P = 2 \text{ kN}$  để loại trừ các sai số về lắp dựng kết cấu và kiểm tra sự làm việc ổn định của thiết bị đo và hệ gia tải. Khi thấy hệ và các dụng cụ đo ổn định ta tiến hành đưa các số liệu về giá trị ban đầu là 0. Sau đó, tiến hành gia tải bằng kích thủy lực với tốc độ dịch chuyển của xy lanh 1,2mm/phút.

Trong quá trình gia tải dựa vào tính toán, biểu đồ biến dạng của bê tông vùng kéo và cốt thép vùng kéo để xác định thời điểm xuất hiện khe nứt. Tiến hành tăng tải trọng theo từng cấp tải, dừng lại để đo bề rộng khe nứt tại từng cấp tải trọng.



**Hình 8. Thiết bị soi nứt quang học**



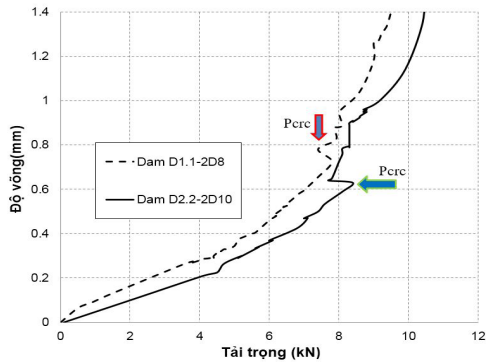
## 4. Phân tích và đánh giá kết quả tính toán lý thuyết và thí nghiệm

### 4.1 Sự hình thành khe nứt

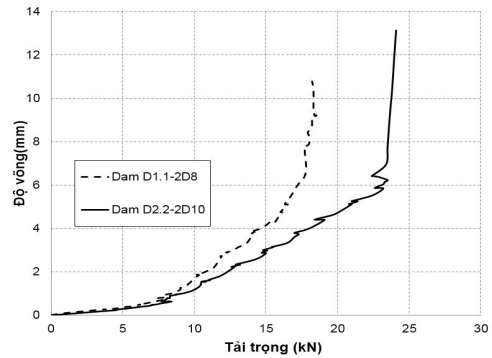
Hình 9 là biểu đồ quan hệ tải trọng và độ võng. Để thấy rõ hơn giai đoạn trước và sau khi dầm hình thành khe nứt, Hình 9 được phóng to ở giai đoạn đầu để được biểu đồ Hình 10.

Biểu đồ trong Hình 9 và Hình 10 cho thấy tại thời điểm ứng suất trong bê tông vùng kéo thứ ngoài cùng đạt giá trị  $R_{bt,ser}$  khe nứt hình thành. Tại vị trí khe nứt ứng suất trong bê tông vùng kéo trở về 0, ứng suất kéo do cốt thép chịu hoàn toàn. Khi hình thành khe nứt độ cứng trong dầm suy giảm, độ võng có sự tăng đột ngột dẫn đến lực kích tác dụng lên dầm sẽ bị "tụt", giá trị lực đo được từ load cell sẽ giảm, biểu đồ tải trọng biến dạng có bước nhảy. Đây là dấu hiệu nhận biết thời điểm hình thành khe nứt.

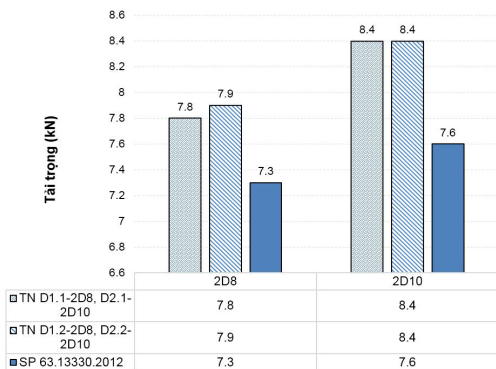
Hình 11 và Hình 12 trình bày mô men nứt của 04 dầm thí nghiệm, kết quả tính toán theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 và biến dạng bê tông vùng kéo tại thời điểm trước và sau khi hình thành khe nứt.



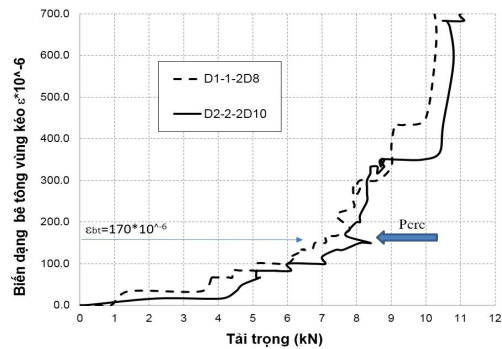
**Hình 9.** Biểu đồ xác định tải trọng hình thành khe nứt của dầm D1.1 và D2.2



**Hình 10.** Quan hệ tải trọng và độ võng của dầm D1.1 và D2.2



**Hình 11.** Biểu đồ tải trọng hình thành khe nứt



**Hình 12.** Quan hệ tải trọng và biến dạng bê tông vùng kéo của dầm D1.1 và D2.2

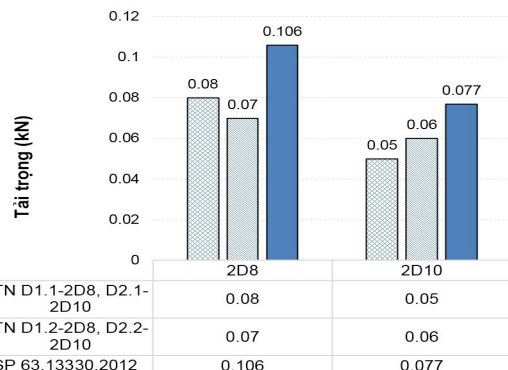
Kết quả thu được ở Hình 11 cho thấy tải trọng gây nứt (mô men nứt) theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012 khá sát so với thực nghiệm. Điều này được giải thích do khi tính toán mô men nứt theo tiêu chuẩn Nga biểu đồ ứng suất của bê tông vùng kéo được giả thiết có dạng hình thang, khi đó kể đến 1 phần biến dạng dẻo của bê tông vùng kéo, điều này phù hợp với thực nghiệm. Biểu đồ biến dạng bê tông vùng kéo được thể hiện trên Hình 12.

Hàm lượng cốt thép có ảnh hưởng nhỏ đến tải trọng gây nứt của dầm bê tông cốt thép. Khi hàm lượng cốt thép tăng thì tải trọng hình thành khe nứt tăng không đáng kể. Cụ thể dầm D1-2D8 và D2-2D10 khi tăng hàm lượng cốt thép 55% giá trị tải trọng hình thành khe nứt chỉ tăng khoảng 3,8%.

Biểu đồ thu được ở Hình 12 cho thấy trong khi tải trọng còn nhỏ quan hệ tải trọng biến dạng gần như là đường thẳng, trong giai đoạn này bê tông vùng kéo làm việc gần như là đàn hồi. Tăng tải trọng đến khi gần hình thành khe nứt biến dạng bê tông vùng kéo có biến dạng phi tuyến, lúc này bê tông vùng kéo phát triển biến dạng dẻo. Giá trị biến dạng tương đối tại thời điểm hình thành khe nứt đạt thu được là 0.00017. Giá trị này khá sát so với giả thiết biến dạng cực hạn của bê tông vùng kéo theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012 là 0.00015.

#### 4.2 Bề rộng khe nứt

Từ kết quả tính toán và đo đạc bề rộng khe nứt đối với các dầm thí nghiệm. Biểu đồ trong Hình 13 so sánh bề rộng khe nứt giữa các dầm thí nghiệm với kết quả tính toán theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012 tại cấp tải  $P = 12 \text{ kN}$ .



**Hình 13.** Bề rộng khe nứt các dầm tại cấp tải  $P=12\text{kN}$

Từ biểu đồ Hình 13 cho thấy giá trị bề rộng khe nứt tại cấp tải  $P = 12 \text{ kN}$  của dầm D1.1 và D1.2 lần lượt là 0,08mm và 0,07mm, trong khi giá trị tính toán theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 là 0,106mm; giá trị bề rộng khe nứt của dầm D2.1 và D2.2 lần lượt là 0,05mm và 0,06mm, trong khi giá trị tính toán theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 là 0,077mm. Bề rộng khe nứt theo tính toán lý thuyết lớn hơn so với thực nghiệm cho thấy tính toán theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 thiên về an toàn.

Hàm lượng cốt thép có ảnh hưởng đến bề rộng khe nứt tại cùng một cấp tải trọng. Trong kết quả nghiên cứu này tại cùng một cấp tải trọng khi sử dụng hàm lượng cốt thép lớn bề rộng khe nứt sẽ nhỏ hơn khi sử dụng hàm lượng cốt thép bé.



## 5. Kết luận

Kết quả thực nghiệm trong điều kiện Việt Nam phù hợp với kết quả tính toán lý thuyết về sự hình thành và mở rộng khe nứt theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012. Từ các kết quả của bài báo, có thể đưa ra một số kết luận sau:

- Tính toán sự hình thành khe nứt theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012, có kể đến một phần biến dạng dẻo của bê tông vùng kéo, sơ đồ ứng suất có dạng hình thang;
- Biến dạng cực hạn của bê tông vùng kéo theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 là 0,00015. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong phạm vi bài báo là 0,00017;
- Mô men kháng nứt tăng không đáng kể khi tăng hàm lượng cốt thép vùng kéo;
- Bề rộng khe nứt tính toán theo tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 lớn hơn so với kết quả thực nghiệm.



## 6. Kiến nghị

Từ kết quả tính toán lý thuyết theo tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012 và thực nghiệm, nhận thấy tính toán về sự hình thành và phát triển khe nứt theo tiêu chuẩn này là khá phù hợp, phương pháp tính toán cũng khá quen thuộc với kỹ sư Việt Nam. Vì vậy, tác giả kiến nghị cần thực hiện thêm số lượng thí nghiệm để có cơ sở khẳng định sự phù hợp của việc áp dụng tiêu chuẩn SP 63.13330.2012 thay thế cho tiêu chuẩn TCVN 5574:2012 trong phần tính toán liên quan đến khe nứt trong cấu kiện BTCT chịu uốn./.

## Tài liệu tham khảo:

1. Wight K.J., Macgregor J.G. (2012), *Reinforced concrete mechanics and Design*, Pearson Education, New Jersey.
2. Phan Quang Minh, Ngô Thế Phong, Nguyễn Đình Cống (2011), *Kết cấu bê tông cốt thép : Phần cấu kiện cơ bản*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
3. Mosley B., Bungey J., Hulse R. (2007), *Reinforced concrete design to Eurocode 2*, Palgrave macmillan.
4. Tomas F.G., *Cracking in reinforcement concrete*.
5. Sliger R. (1980), *High grade steel in reinforcement concrete*, International Association for Bridges and Structural Engineering Preliminary, Berlin-Munich.
6. Broms B., "Crack width and crack spacing in reinforced concrete member", *Journal of American Concrete Institute*.
7. Gergely P., Lutz A.L. (1968), *Maximum Crack Width in RC Flexural Members*, American Concrete.
8. Oh H.B., Kang Y.J. (2012), "New formulars for maximum crack width and crack spacing in reinforced concrete flexural member", *ACI Structural Journal*.
9. SP 63.13330 (2012), *Concrete and reinforced concrete structures*, Russian Federation, Moscow.