

MÔ PHỎNG VẾT NỨT DÀM BÊ TÔNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP
MÔ HÌNH Lò XO THÂN CỨNG (RBSM)
SIMULATION OF CONCRETE BEAM CRACKS USING
THE RIGID-BODY SPRING MODELING METHOD (RBSM)

PHẠM NGUYỄN HOÀNG^{a,*}, NGUYỄN QUANG PHÚ^a

^aTrường Đại học Thủy lợi

*Tác giả đại diện: Email: hoang.kcct@tlu.edu.vn

Ngày nhận 11/11/2025, Ngày sửa 27/12/2025, Chấp nhận 30/12/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol4-1>

Tóm tắt: Bài báo trình bày phương pháp mô phỏng sự hình thành vết nứt trong dầm bê tông thông qua mô hình lò xo thân cứng (RBSM) hai chiều, được xây dựng và phân tích trên nền tảng phần mềm SAP2000. Mô hình sử dụng để khảo sát là dầm bê tông có tiết diện 5×10 cm, dài 50 cm, chịu tải phân bố đều. Dầm được chia thành các phần tử đơn vị có kích thước 2 cm, mô phỏng bằng các nút không biến dạng liên kết với nhau thông qua các lò xo có độ cứng được xác định thông qua mô đun đàn hồi của bê tông. Phân tích trong SAP2000 với giá trị tải phân bố 1 kN/m đến 6 kN/m cho thấy lực dọc phát sinh trong các lò xo tăng tuyến tính theo tải trọng. Phần tử lò xo nguy hiểm nhất nằm ở giữa và phía dưới dầm - nơi có lực kéo lớn nhất. Bằng cách so sánh lực kéo lớn nhất trong lò xo với giá trị khả năng chịu kéo của phần tử bê tông, kết quả xác định được tải trọng gây nứt dầm là 4,61 kN/m. Ngoài ra việc tính toán mô men gây nứt tính toán theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 cũng được thực hiện, cho thấy sự tương đồng về kết quả, qua đó xác nhận độ tin cậy và tính khả thi của phương pháp mô hình hóa RBSM trong việc dự đoán vị trí và tải trọng gây nứt. Mô hình RBSM thể hiện tiềm năng ứng dụng trong phân tích cơ học phá hoại của kết cấu bê tông, đặc biệt phù hợp trong bối cảnh cần mô phỏng chi tiết sự hình thành và phát triển của vết nứt ở cấp độ cấu kiện.

Từ khóa: Mô hình lò xo nút cứng (RBSM), mô phỏng vết nứt, phần tử rời rạc

Abstract: This paper presents a method for simulating crack formation in concrete beams using a two-dimensional Rigid Body Spring Model (RBSM), developed and analyzed based on the SAP2000 software platform. The investigated model is a B20 concrete beam with a cross-section of 5×10 cm and a length of 50 cm, subjected to uniformly distributed loading. The beam is discretized into unit elements

with a size of 2 cm, modeled as rigid nodes interconnected by linear springs whose stiffness is determined from the elastic modulus of concrete. Analysis under some distributed load levels, from 1 kN/m to 6 kN/m, shows that the axial force in the springs increases linearly with the applied load. The critical spring elements are located at the mid-span and bottom of the beam-where tensile stress is highest. By comparing the maximum tensile force in these springs with the tensile strength of concrete, the cracking load is determined to be 4.61 kN/m. The results obtained from the RBSM simulation are compared with the cracking moment calculated according to TCVN 5574:2018, revealing a close agreement. This confirms the reliability and feasibility of the RBSM approach in predicting both the location and magnitude of cracking loads. The RBSM demonstrates strong potential for application in the fracture mechanics analysis of concrete structures, particularly in scenarios requiring detailed simulation of crack initiation and propagation at the component level.

Keywords: Rigid Body Spring Model (RBSM), Crack simulation, Discrete elements

1. Tổng quan

Trong vài thập kỷ gần đây, nhu cầu mô phỏng chính xác sự phá hoại và hình thành vết nứt trong vật liệu giòn, đặc biệt là bê tông, đã thúc đẩy sự phát triển mạnh mẽ của các phương pháp mô hình số phi tuyến. Trong số đó, các mô hình phần tử rời rạc đã chứng tỏ ưu thế nổi bật khi xử lý các quá trình biến dạng không liên tục, gãy đứt, tách lớp hoặc phá vỡ từng phần - những hiện tượng mà các phương pháp truyền thống như phần tử hữu hạn (FEM) gặp khó khăn trong việc biểu diễn chính xác. Các mô hình phần tử rời rạc được xây dựng dựa trên ý tưởng rằng vật liệu có thể được chia thành các phần tử riêng biệt,

tương tác với nhau thông qua các liên kết hoặc tiếp xúc. Những mô hình như mô hình phần tử rời rạc (Discrete Element Method - DEM), mô hình mạng lưới (Lattice Models), mô hình phần tử gián đoạn (Discontinuous Deformation Analysis - DDA) và mô hình lò xo thân cứng (Rigid Body Spring Model - RBSM). RBSM là một trong những mô hình nổi bật trong nhóm này, cho phép mô phỏng sự hình thành, lan truyền của các vết nứt trong vật liệu giòn một cách hiệu quả, phù hợp với kết cấu bê tông. Mô hình RBSM được xây dựng trên nguyên lý chia vật thể rắn thành các phần tử không biến dạng. Các phần tử này được liên kết với nhau thông qua hệ lò xo đàn hồi tại biên tiếp xúc. Khi vật thể chịu tải, các lò xo sẽ truyền lực giữa các phần tử và phá hủy xảy ra khi lực trong lò xo vượt ngưỡng tới hạn, được xác định từ đặc trưng vật liệu. Một trong những ưu điểm lớn nhất của RBSM là khả năng mô phỏng trực tiếp sự hình thành và lan truyền vết nứt mà không cần kỹ thuật tái tạo lưới như trong FEM. Vết nứt được hình thành tự nhiên khi các lò xo bị đứt và có thể lan theo bất kỳ hướng nào tùy thuộc vào mạng lưới phần tử.

Trong nghiên cứu của một số tác giả trên thế giới, các dạng mô hình phần tử rời rạc đã được áp dụng thành công để mô phỏng sự nứt gãy trong dầm bê tông chịu uốn, với kết quả gần với quan sát thực nghiệm. Từ khi được giới thiệu, RBSM đã được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng để mô phỏng các bài toán phá hủy trong vật liệu giòn, đặc biệt là bê tông. Kawai (1978) là người đầu tiên trình bày cơ sở lý thuyết về mô hình phần tử rời rạc mới nhằm phân tích ứng xử động của kết cấu chịu tác động động đất [15]. Cundall (1979) giới thiệu mô hình cho hạt rời [14]. Bolander (1998) phát triển RBSM trên mạng Voronoi mô phỏng vết nứt [13]. J.E.Bolander (2001) mở rộng thành RBSN, tích hợp mô hình dải nứt để kiểm soát kích thước phần tử [12]. K. Nagai (2002) áp dụng RBSM 3D cho vữa và bê tông, khẳng định tiềm năng dự đoán định lượng [11]. Yip, M (2005) phát triển phương pháp mô hình hóa 3D với mạng Voronoi, mô phỏng chính xác cốt thép và ứng xử dầm dự ứng lực [10]. Jan Elias (2008) so sánh mạng thanh kéo và RBSN, chỉ ra ưu thế RBSN trong tải hỗn hợp [9]. Xianglin Gu (2013) xét đến tiếp xúc sau khi lò xo bị phá hủy, mô phỏng ba pha bê tông, kết quả cho thấy khuyết tật làm giảm cơ tính, đồng thời phân tích thống kê chỉ ra ảnh hưởng lớn của cốt liệu [8].

Fuyuan Gong (2018) xây dựng mô hình vi mô, trung mô đánh giá ảnh hưởng của đóng băng, kết quả phù hợp với thực nghiệm [7]. Zhao Wang (2019) áp dụng RBSM trục đối xứng mô phỏng suy giảm liên kết cốt thép - bê tông do đóng băng, rã đông [6]. Yuliia Khmurovska (2021) trình bày mô hình 2D-RBSM dự đoán giãn nở thể tích do bức xạ [4]. Vito Tateo (2021) so sánh FEM và RBSM trong phân tích tường chịu va đập, cho thấy vai trò của lõi mềm [5]. Kumar Avadh (2022) dùng 3D RBSM mô phỏng suy giảm liên kết cốt thép - bê tông sau ăn mòn, nhấn mạnh tầm quan trọng của yếu tố chiều cao gờ thép [3]. Binbin Gong (2024) đề xuất mô phỏng số bằng RBSM và Voronoi để dự đoán phát triển vết nứt trong bê tông cốt thép, kiểm chứng trên dầm và tấm bê tông [1]. Dawei Ren (2024) tích hợp 3D RBSM với mô hình dẫn ẩm để mô phỏng đồng thời nứt và thấm ẩm, kết quả so sánh phù hợp thí nghiệm [2].

Tại Việt Nam, tuy ít công bố về RBSM nhưng đã có một số nghiên cứu phần tử rời rạc. L.B.Danh (2018) mô phỏng 3D sự phát triển vết nứt dầm bê tông bằng DEM với các hạt hình cầu, phản ánh đúng ứng xử vật liệu [19]. V.T.Trung (2021) áp dụng DEM nâng cao cho vật liệu không bão hòa, tích hợp lực mao dẫn, mô phỏng nén khối, va chạm; kết quả phù hợp thực nghiệm [18]. H.T.K.Thoa (2023) khẳng định tính vượt trội ngày càng rõ rệt của phương pháp phần tử rời rạc so với FEM [16].

2. Khả năng ứng dụng SAP2000 cho mô hình RBSM

Trong nghiên cứu này, mô hình RBSM được triển khai trong môi trường phần mềm SAP2000, là một công cụ phân tích kết cấu thông dụng trong ngành Xây dựng. Mặc dù SAP2000 không được thiết kế chuyên biệt cho phân tích rời rạc, tuy nhiên phần mềm này có nhiều đặc điểm cho phép hiện thực hóa được một mô hình RBSM 2D ở mức cơ bản, nhờ vào khả năng mô phỏng các liên kết phi tuyến, định nghĩa phần tử lò xo với đặc tính cơ học tùy chỉnh, cũng như trích xuất dữ liệu chuyển vị, nội lực một cách chi tiết tại từng phần tử. Trong mô hình đề xuất, mỗi phần tử đơn vị được biểu diễn bằng một nút trong SAP2000. Các liên kết đàn hồi giữa các nút này được mô phỏng bằng phần tử lò xo. Trong đó, độ cứng pháp tuyến (k_n) của các phần tử lò xo được tính toán dựa trên đặc trưng cơ học của bê tông (mô đun đàn hồi E, diện tích mặt tiếp

xúc giữa 2 phần tử đơn vị đặt cạnh nhau và khoảng cách giữa các nút).

Một trong những ưu điểm nổi bật của việc sử dụng SAP2000 là khả năng trực quan hóa mô hình, dễ thao tác đối với người dùng phổ thông và phù hợp để triển khai các nghiên cứu sơ cấp, giảng dạy hoặc khảo sát ban đầu về đặc điểm hình thành vết nứt trong kết cấu. Dữ liệu kết quả từ SAP2000 có thể được trích xuất và phân tích bằng các công cụ như Excel hoặc Matlab, cho phép nghiên cứu sâu hơn về cơ chế phát triển vết nứt theo thời gian hoặc dưới các tổ hợp tải khác nhau. Mặc dù SAP2000 không hỗ trợ trực tiếp tạo lưới Voronoi, là cấu trúc lưới tiên tiến trong RBSM, nhưng người dùng hoàn toàn có thể tạo thủ công hoặc sử dụng phần mềm hỗ trợ ngoài để sinh lưới, sau đó nhập vào SAP2000 thông qua tập tin định dạng *.s2k hoặc API [17].

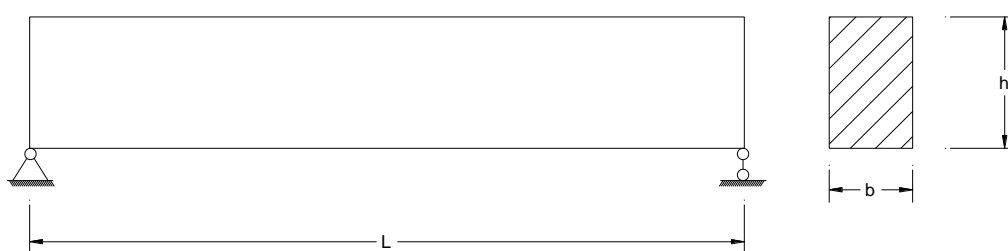
Việc triển khai mô hình RBSM trên SAP2000 cũng đặt ra một số thách thức nhất định. Thứ nhất, phần tử lò xo trong SAP2000 không cho phép tách rời hoàn toàn giữa các nút khi lò xo bị phá hoại, do đó cần có kỹ thuật giả lập việc đứt lò xo bằng cách giảm độ cứng về 0 hoặc sử dụng ngưỡng lực tới hạn. Thứ hai, SAP2000 không có cơ chế tự động cập nhật mô hình khi xảy ra phá hoại, do đó không phù hợp cho các mô phỏng động có tính thay đổi hình học theo thời gian. Tuy vậy, trong các nghiên cứu tĩnh tuyến tính tăng dần hoặc phân tích theo từng bước tải, mô hình này cho kết quả phù hợp và đáng tin cậy trong phạm vi khảo sát. Trong các trường hợp này, việc sử dụng phần mềm quen thuộc như SAP2000 giúp giảm thời gian làm quen, tận dụng hệ sinh thái xử lý dữ liệu sẵn có, đồng thời giúp người dùng bước đầu tiếp cận với tư duy mô hình rời rạc một cách trực quan và hiệu quả.

Như vậy, có thể thấy rằng việc tích hợp mô hình lò xo liên kết các nút cứng trong SAP2000 là hoàn toàn khả thi, phù hợp cho việc mô phỏng quá trình hình thành và phát triển vết nứt trong dầm bê tông. Mặc dù còn tồn tại một số giới hạn so với các nền tảng chuyên biệt hay mã nguồn tùy chỉnh bằng Python/Matlab, nhưng SAP2000 lại có lợi thế về tính dễ sử dụng, khả năng trình diễn mô hình và tính linh hoạt trong xây dựng phần tử. Việc tận dụng mô hình này có thể giúp nghiên cứu sâu hơn về phân bố ứng suất, xác định vùng tập trung biến dạng, và từ đó phát triển các mô hình nâng cao hơn phục vụ mục đích thực tiễn. Đây là một bước đi hiệu quả trong hướng tiếp cận mô hình rời rạc từ phần mềm phổ thông tới các công cụ chuyên sâu hơn.

3. Mô phỏng dầm bê tông theo phương pháp RBSM trong SAP2000

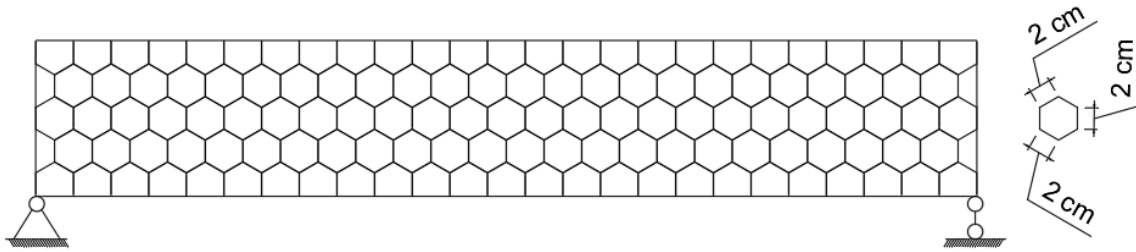
3.1 Đặc trưng hình học và vật liệu dầm bê tông

Chọn mẫu dầm bê tông có chiều dài $L = 50\text{cm}$, tiết diện $b = 5\text{cm}$, $h = 10\text{cm}$ để nghiên cứu khảo sát (Hình 1). Việc lựa chọn dầm có kích thước tương đối nhỏ như trên để giảm tải khối lượng tính toán trong phần mềm, đồng thời tương đồng với kích thước mang tính tiết kiệm vật liệu của các mẫu dầm bê tông được chế tạo trong phòng thí nghiệm. Để đơn giản hóa việc tính toán coi như vật liệu bê tông được xem xét như vật liệu đàn hồi tuyến tính, có các đặc trưng vật liệu của bê tông là: mô đun đàn hồi của bê tông, $E = 27,5\text{GPa}$; hệ số Poisson, $\nu = 0,2$ (tương đương gần giống với vật liệu bê tông B20); cường độ chịu tính toán chịu kéo dọc trục $R_{keo} = 1,35\text{MPa}$. Dầm bê tông trong nghiên cứu này được xét như là mô hình dầm đơn giản hai đầu khớp. Tải trọng tác dụng lên dầm là tải phân bố đều, giá trị tải trọng phân bố đều khảo sát sẽ từ 1kN/m đến 6kN/m (tính cả trọng lượng bản thân của dầm).

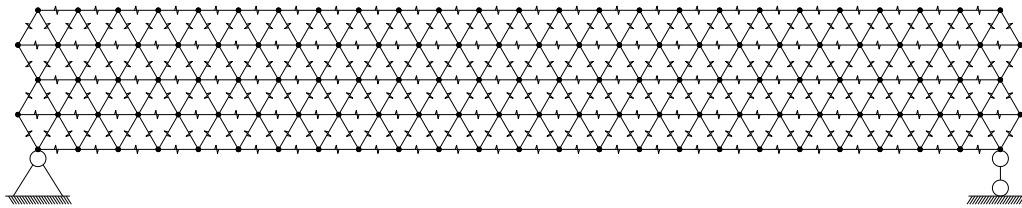


Hình 1. Dầm bê tông khảo sát trong bài báo

Chia nhỏ dầm thành các phần tử đơn vị là các đa giác có kích thước mỗi cạnh là 2cm như Hình 2. Mỗi phần tử đơn vị sẽ được mô phỏng như 1 nút, các nút sẽ liên kết với nhau thông qua các lò xo có độ cứng k_n (công thức 1).



Hình 2. Chia dầm thành các phần tử đơn vị



Hình 3. Mô hình dầm thành các điểm nút nối với nhau qua các lò xo

3.2 Thông số lò xo trong mô hình

Độ cứng mỗi lò xo được xác định theo công thức (1).

$$k_n = \frac{EA}{L} \tag{1}$$

trong đó:

A - diện tích tại mặt tiếp xúc giữa hai phần tử, A = 5,77 cm²;

L - chiều dài lò xo, L = 2cm;

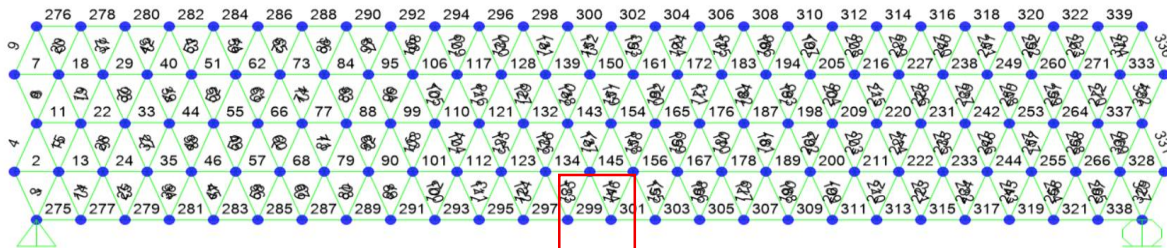
E - mô đun đàn hồi của bê tông, E = 27,5GPa = 2750 kN/cm².

Thay vào công thức (1) tính được giá trị độ cứng lò xo k_n:

$$k_n = \frac{EA}{L} = \frac{2750 * 5,77}{2} = 7939kN / cm \tag{2}$$

3.3 Xây dựng mô hình trong SAP2000

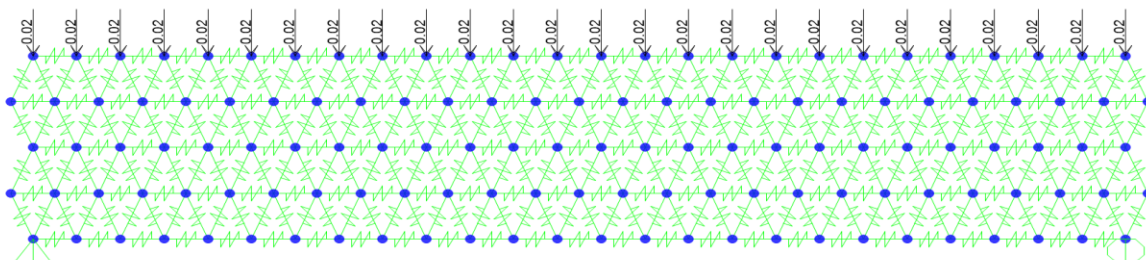
Từ dữ liệu mô hình dầm trong Hình 3 và kết quả độ cứng lò xo trong công thức (2), tiến hành mô hình các nút và các lò xo liên kết trong phần mềm SAP2000. Kết quả thu được thể hiện trên Hình 4, với tổng cộng 137 nút và 339 liên kết dạng lò xo. Phần tử lò xo phía dưới và ở giữa có số hiệu là 299, đây sẽ là lò xo chịu lực kéo lớn nhất khi khảo sát mô hình (Hình 4, Hình 6).



Hình 4. Mô hình dầm bê tông thông qua nút cứng và lò xo trong Sap2000

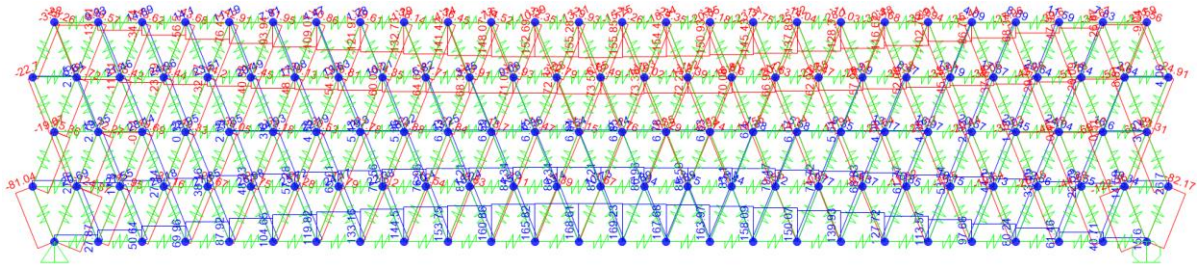
Xét trường hợp dầm bê tông chịu tải trọng phân bố đều: q₁ = 1 kN/m, khi đó quy đổi tải thành các lực

tập trung tác dụng lên các nút ở mặt trên cùng. Giá trị của các lực tập trung đó là: P₁ = 0,02 kN (Hình 5).



Hình 5. Tải trọng tác dụng lên dầm quy đổi về lực tập trung tại các điểm nút phía trên

Tiến hành phân tích mô hình trong SAP2000, kết quả độ lớn của lực dọc trong các lò xo thể hiện ở Hình 6.



Hình 6. Lực dọc sinh ra trong các lò xo (đơn vị: N)

Nhận thấy kết quả lực kéo lớn nhất xuất hiện tại phần tử lò xo 299 trong mô hình (xem lại vị trí trong Hình 4). Đây là phần tử nằm ở vị trí phía dưới và ở giữa dầm. Giá trị độ lớn của lực dọc trong phần tử lò xo 299 ứng với trường hợp tải trọng phân bố đều 1kN/m, 2kN/m, 3kN/m, 4kN/m,

5kN/m và 6kN/m tác dụng lên mặt trên của dầm tương ứng lần lượt là 0,169 kN, 0,338kN, 0,507 kN, 0,676 kN, 0,845 kN và 1,104 kN. Bảng 1 thể hiện giá trị tải phân bố đều tác dụng lên mặt trên của dầm và giá trị lực dọc tương ứng tại phần tử lò xo 299.

Bảng 1. Tải trọng tác dụng lên dầm và lực dọc trong lò xo giữa dầm

STT	Tải phân bố q_i (kN/m)	Lực dọc trên phần tử 299 N_i (kN)
1	1	0,169
2	2	0,338
3	3	0,507
4	4	0,676
5	5	0,845
6	6	1,014

3.4 Xác định lực dọc phá hoại lò xo và tải trọng gây nứt trong dầm bê tông

Khả năng chịu lực kéo của lò xo chính là lực dọc gây nứt của phần tử bê tông tại vị trí đó, giá trị được xác định theo công thức (3).

$$N_{nut} = R_{keo} \cdot A \quad (3)$$

trong đó:

R_{keo} - cường độ chịu kéo của bê tông, $R_{keo} = 1,35$ MPa = 0,135 kN/cm²;

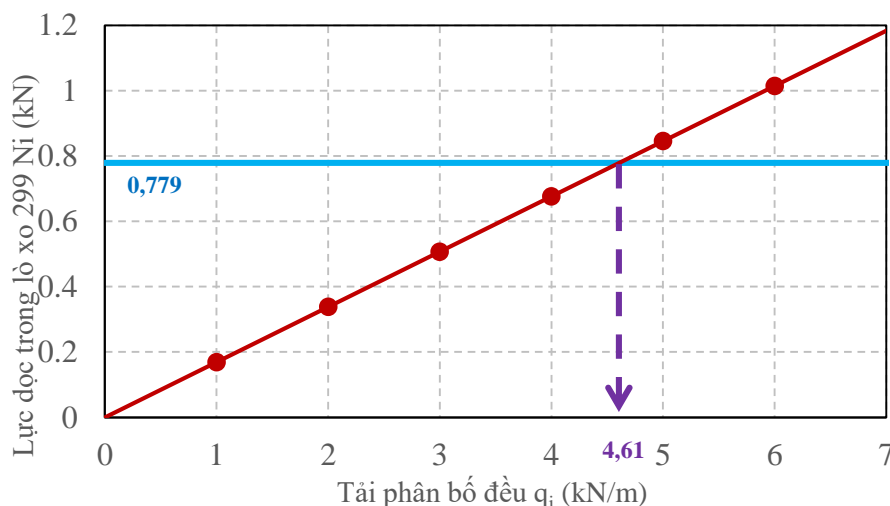
A - diện tích mặt tiếp xúc giữa hai phần tử, $A = 5,77$ cm².

Thay vào công thức (3) tính được giá trị N_{nut} :

$$N_{nut} = 0,135 \cdot 5,77 = 0,779 \text{ kN} \quad (4)$$

Khi lực dọc trong lò xo đạt đến giá trị $N = N_{nut}$, nếu tiếp tục tăng tải trọng tác dụng lên dầm thì lò xo sẽ vượt quá khả năng làm việc và bị đứt, tương ứng khi đó dầm bê tông sẽ bị nứt.

Dựa vào kết quả Bảng 1 có thể thiết lập biểu đồ quan hệ của tải trọng phân bố đều q_i tác dụng lên dầm bê tông và lực dọc N_i xuất hiện trong lò xo nằm tại vị trí bên dưới và ở giữa của mô hình dầm. Kết quả thể hiện ở Hình 7.



Hình 7. Biểu đồ quan hệ tải phân bố và lực dọc trong phần tử lò xo giữa dầm

Dựa vào biểu đồ, suy ra được tải phân bố đều tác dụng lên mặt trên của dầm ứng với lực dọc gây nứt $N_{nut} = 0,779 \text{ kN}$ là: $q_{nut} = 4,61 \text{ kN/m}$.

4. Xác định mô men gây nứt trong dầm bê tông theo TCVN 5574-2018

Tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 - Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế [20] là văn bản quy phạm kỹ thuật quốc gia quy định các nguyên tắc và yêu cầu cơ bản trong thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép toàn khối hoặc lắp ghép chịu tác động của tải trọng tĩnh, động và môi trường. Tiêu chuẩn này được biên soạn trên cơ sở kế thừa TCVN 5574:2012 và cập nhật các tiến bộ khoa học kỹ thuật hiện đại trong lĩnh vực thiết kế kết cấu, có tham khảo một số nội dung từ tiêu chuẩn Eurocode 2 và các hệ thống thiết kế quốc tế khác. TCVN 5574:2018 áp dụng cho cả kết cấu chịu lực chính và kết cấu phụ trong công trình dân dụng, công nghiệp, hạ tầng kỹ thuật và giao thông. Nội dung tiêu chuẩn bao gồm các quy định về tải trọng tính toán, tổ hợp tải trọng, trạng thái giới hạn, độ bền vật liệu, khả năng chịu lực và khả năng sử dụng lâu dài của kết cấu. Bên cạnh đó, tiêu chuẩn cũng đưa ra các yêu cầu cụ thể cho việc tính toán cấu kiện chịu uốn, chịu nén, chịu kéo, cấu kiện ứng suất trước và cấu kiện làm việc trong môi trường xâm thực. Đây là cơ sở pháp lý và kỹ thuật quan trọng cho các kỹ sư thiết kế kết cấu tại Việt Nam.

Xét vật liệu bê tông có cấp độ bền là B20 và có kích thước đúng bằng kích thước tiết diện dầm đã khảo sát ở mục 3. Theo đó, mô men gây nứt M_{cr} trong dầm được tính toán dựa theo công thức 158, trang 99 trong TCVN 5574-2018, được thể hiện trong công thức (5) dưới đây.

$$M_{cr} = R_{bt,ser} W_{pl} \quad (5)$$

trong đó:

$R_{bt,ser}$ - cường độ tính toán chịu kéo dọc trục theo TTGH thứ 2, $R_{bt,ser} = 1,35 \text{ MPa}$;

W_{pl} - mô men kháng uốn đàn dẻo của tiết diện, $W_{pl} = \gamma W_{red}$;

Tính toán mô men kháng uốn đàn dẻo W_{pl} của tiết diện theo công thức (6).

$$W_{pl} = \gamma W_{red} \quad (6)$$

trong đó:

γ - hệ số xét đến ảnh hưởng của biến dạng không đàn hồi của bê tông vùng chịu kéo, $\gamma = 1,3$;

W_{red} - mô men kháng uốn đàn hồi của tiết diện, được tính toán trong công thức (7):

$$W_{red} = \frac{bh^2}{6} = \frac{5 \cdot 10^2}{6} = 83,33 \text{ cm}^3 \quad (7)$$

Thay giá trị W_{red} từ công thức (7) vào công thức (6) tính ra được giá trị W_{pl} :

$$W_{pl} = 1,3 \cdot 83,33 = 108,33 \text{ cm}^3 \quad (8)$$

Tiếp tục thay giá trị của W_{pl} từ (8) vào công thức (5) tính được giá trị mô men gây nứt:

$$M_{cr} = R_{bt,ser} W_{pl} = 0,135 \cdot 108,33 = 14,63 \text{ kNcm} \quad (9)$$

Giá trị gây nứt là đặc trưng của dầm bê tông B20, có chiều dài $L = 50 \text{ cm}$, tiết diện $b = 5 \text{ cm}$, $h = 10 \text{ cm}$, qua tính toán thu được giá trị là $M_{cr} = 14,63 \text{ kN}$, giá trị này là giá trị đặc trưng không đổi của dầm kể trên.

Bây giờ, tiếp tục kiểm tra dầm bê tông B20 ở trên, chịu tác dụng của tải trọng phân bố đều q_1 có giá trị đúng bằng giá trị tải phân bố đều đã khảo sát ở mục 3 của bài báo $q_1 = q_{nut} = 4,61 \text{ kN/m}$. Bằng công thức cơ học kết cấu, xác định mô men lớn nhất tại mặt vị trí giữa dầm như công thức (10):

$$M_{max} = \frac{q_{nut} \cdot l^2}{8} = \frac{4,61 \cdot 0,5^2}{8} = 14,40 \text{ kNcm} \quad (10)$$

Nhận xét thấy rằng, giá trị mô men gây nứt tính theo TCVN 5574-2018 (công thức 9) và mô men lớn nhất tại giữa dầm sinh tính theo công thức (10) khi dầm chịu tải phân bố đều $q_1 = q_{nut}$ có giá trị tương đối gần với nhau.

5. Kết luận

Kết quả phân tích bằng mô hình RBSM hai chiều trên nền tảng SAP2000 đã mô phỏng thành công quá trình hình thành vết nứt trong dầm bê tông, đây là phương pháp xác định vị trí và giá trị tải trọng gây ra vết nứt đầu tiên (4,61 kN/m).

So sánh mô men gây nứt dự đoán bằng RBSM 2D và cách tính thông thường theo TCVN 5574:2018 cho thấy sai lệch nhỏ, chứng tỏ độ tin cậy cao của mô hình đơn giản hóa để phục vụ dự đoán vết nứt. Kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng RBSM trong mô phỏng cơ học phá hoại của kết cấu bê tông, đặc biệt hữu ích cho công tác thiết kế và đánh giá sự làm việc của cấu kiện trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Binbin Gong, Hao Li (2024). *A couple Voronoi-RBSM modeling strategy for RC structures*. Structural Engineering and Mechanics, Volume 91.
- [2] Dawei Ren, Dheeraj Waghmare, Punyawut Jiradilok, Kohei Nagai (2024). *RBSM investigation of the effects of cracking and ITZ on moisture transport in reinforced concrete by integrating mechanical and conduit models*. Construction and Building Materials, Volume 441.
- [3] Kumar Avadh, Kohei Nagai (2022). *3D RBSM Analysis of Bond Degradation in Corroded Reinforced Concrete as Observed Using Digital Image Correlation*. Materials (MDPI), Volume 15.
- [4] Yuliia Khmurovska, Petr Štemberk (2021). *RBSM-based model for prediction of radiation-induced volumetric expansion of concrete aggregates*. Construction and Building Materials, Volume 294.
- [5] Vito Tateo, Siro Casolo (2021). *Explicit Dynamic Analysis by a Rigid Body-Spring Model of Impact Loads of Artillery on Middle Age Fortifications*. Buildings (MDPI), Volume 11.
- [6] Zhao Wang, Dawei Zhang, Fuyuan Gong, Saeid Mehrpay, Tamon Ueda (2019). *Mesoscale simulation of bond behaviors between concrete and reinforcement under the effect of frost damage with axisymmetric Rigid Body Spring Model*. Construction and Building Materials, Volume 215.
- [7] Fuyuan Gong, Tamon Ueda, Dawei Zhang (2018). *Two-dimensional rigid body spring method based micro-mesoscale study of mechanical strengthening/damaging effects to concrete by frost action*. Structural Concrete, Volume 19.
- [8] Xianglin Gu, Li Hong, Zhuolin Wang, Feng Lin (2013). *A modified rigid-body-spring concrete model for prediction of initial defects and aggregates distribution effect on behavior of concrete*. Computational Materials Science, Volume 77.
- [9] Jan Elias (2008). *Simulation of Fracture Process Using Spring Networks*. Engineering Mechanics.
- [10] Yip, M., Mohle, J., & Bolander, J. E. (2005). *Automated modeling of three-dimensional structural components using irregular lattices*. Computers & Structures, 83(24–25), 2354–2366.
- [11] K. Nagai, Y. Sato & T. Ueda (2002). *Numerical simulation of fracture process of plain concrete by Rigid Body Spring Method*. Proceedings of fib Congress.
- [12] J.E.Bolander, M.Yip, K.Moriizumi, M.Kunieda (2001). *Rigid-Body-Spring Network modeling of cement-based composites*. Fracture Mechanics of Concrete Structures.
- [13] Bolander, J. E., & Saito, S. (1998). *Fracture analyses using spring network models: formulation and applications*. Engineering Fracture Mechanics, 61(5-6), 569–591.
- [14] Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). *A discrete numerical model for granular assemblies*. Géotechnique, 29(1), 47–65.
- [15] Kawai, T. (1978). *New discrete models and their application to seismic response analysis of structures*. Nuclear Engineering and Design, Volume 48.
- [16] Hồ Thị Kim Thoa, Võ Văn Đẩu (2023). *Tổng quan về phương pháp phần tử rời rạc (DEM) ứng dụng trong nghiên cứu vật liệu địa kỹ thuật*. Tạp chí khoa học trường Đại học Cần Thơ, tập 59.
- [17] Phạm Nguyễn Hoàng, Ngô Văn Thuyết, Hồng Tiến Thắng (2022). *Hướng dẫn sử dụng phần mềm Sap2000 trong tính toán kết cấu công trình*. Nhà Xuất bản Xây dựng.
- [18] Võ Thành Trung (2021). *Áp dụng phương pháp phần tử rời rạc nâng cao để mô phỏng các dạng vật liệu không bão hòa*. Tạp chí khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng, tập 19.
- [19] Lê Bá Danh, Trần Tiến Đạt (2018). *Mô phỏng 3D sự xuất hiện và phát triển của vết nứt trong dầm bê tông bằng phương pháp phần tử rời rạc*. Hội nghị khoa học quốc tế kỷ niệm 55 năm ngày thành lập Viện KHCN Xây dựng.
- [20] TCVN 5574:2018. *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*, Tiêu chuẩn Việt Nam.