



3D FRACTURE MODELING OF CONCRETE MATERIAL USING PRINCIPAL STRESS IN DISCRETE ELEMENT METHOD

Le Ba Danh*, Pham Duy Hoa

Hanoi University of Civil Engineering, No 55 Giai Phong Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 19/09/2021

Revised: 29/09/2021

Accepted: 01/10/2021

Published online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.3>

* *Corresponding author*

Email: danhlab@nuce.edu.vn; Tel: +84984282396

Abstract. Mechanical behavior modeling of concrete materials is an important content in the process of designing and evaluating the actual state of the works. To limit the disadvantages of the continuous method, this paper presents a 3D fracture modeling of concrete material using principal stress in the Discrete Element Method (DEM). The Open source Granular Object Oriented (GranOO) was used. In GranOO, the materials are discretized by a great number of spherical elements interacting with each other. Their radiuses vary according to a uniform distribution to optimize the filling process of the continuum medium. The mechanical behavior of an assembly of interacting particles is defined locally at the contact level by the cohesive beam. The micro-parameters of these beams are determined through the calibration process. A process of geometric and mechanical modeling is presented. A single tensile test on a cube specimen of concrete is considered in elastic and fracture state. The numerical results obtain are convergence to the theory on: Young's modulus, the appearance and growth of cracks.

Keywords: 3D fracture modeling, concrete material, discrete element method, principal stress.



MÔ PHỎNG 3D VẾT NÚT TRONG BÊ TÔNG SỬ DỤNG ỨNG SUẤT CHÍNH TRONG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC

Lê Bá Danh*, Phạm Duy Hòa

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 19/09/2021

Ngày nhận bài sửa: 29/09/2021

Ngày chấp nhận đăng: 01/10/2021

Ngày xuất bản Online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.3>

* Tác giả liên hệ

Email: danhlb@nuce.edu.vn; Tel: +84984282396

Tóm tắt. Nghiên cứu mô phỏng ứng xử cơ học của vật liệu bê tông là một nội dung rất quan trọng trong quá trình thiết kế, đánh giá hiện trạng công trình trong thực tế. Để hạn chế một số nhược điểm mô phỏng của phương pháp liên tục, nội dung của nghiên cứu này trình bày quá trình mô phỏng 3D vết nứt trong vật liệu bê tông sử dụng ứng suất chính trong phương pháp phần tử rời rạc (Discrete Element Method - DEM). Mã nguồn mở Granular Object Oriented (GranOO) đã được sử dụng. Trong GranOO, vật liệu liên tục được coi là một tập hợp gồm các phần tử có hình cầu liên kết với nhau. Ứng xử cơ học của vật liệu được mô phỏng thông qua các dầm liên kết nối giữa các phần tử tiếp xúc. Các thông số vi mô của các dầm này được xác định thông qua quá trình hiệu chỉnh. Nghiên cứu đã giới thiệu quá trình mô hình hóa hình học và mô hình hóa cơ học trong DEM. Quá trình mô phỏng thí nghiệm số kéo giãn đơn mẫu bê tông hình lập phương có cạnh 10 cm đã được thực hiện ở miền đàn hồi và phá hủy. Kết quả mô phỏng thu được rất sát với lý thuyết về giá trị mô đun Young, cũng như sự xuất hiện và phát triển của vết nứt.

Từ khóa: Mô hình nứt 3D, vật liệu bê tông, phương pháp phần tử rời rạc, ứng suất chính.

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông là vật liệu phổ biến nhất hiện nay được sử dụng cho các công trình xây dựng. Do đó, việc nghiên cứu về vật liệu này là một nội dung rất quan trọng liên quan đến tính an toàn và bền vững của công trình. Để đánh giá được khả năng làm việc của vật liệu và kết cấu bê tông, chúng ta cần hiểu rõ về các ứng xử cơ học của nó. Các ứng xử cơ học này phụ thuộc vào

các tham số như mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, cường độ chịu kéo, nén, tính đồng nhất, các khuyết tật xuất hiện trong vật liệu bê tông (nứt, lỗ rỗng...). Do đó, việc nghiên cứu các ứng xử cơ học của vật liệu bê tông, là một vấn đề rất quan trọng, nó giúp chúng ta biết được khả năng làm việc của vật liệu, kết cấu, từ đó có các biện pháp xử lý trong quá trình thiết kế cũng như trong thực tế. Để thực hiện việc nghiên cứu này, ngoài các thí nghiệm thực tế phải tiến hành để xác định các đặc trưng cơ học của vật liệu (mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, cường độ chịu nén, uốn, kéo, . . .), thì việc mô hình hóa chúng bằng các phương pháp số là một nội dung rất quan trọng trong quá trình nghiên cứu, nó cho phép chúng ta tính toán, đánh giá và dự đoán về khả năng làm việc của vật liệu. Lợi thế của việc mô phỏng là có thể xác định ứng xử của vật liệu, kết cấu bê tông mà không cần phải thực hiện các thí nghiệm thực tế gây tốn kém hoặc khó khăn trong quá trình thực hiện.

Hiện nay có rất nhiều phương pháp số khác nhau dựa trên lý thuyết cơ học môi trường liên tục đã được sử dụng để nghiên cứu ứng xử cơ học của vật liệu, chẳng hạn như phương pháp vùng dính kết [1], [2], phương pháp phần tử biên [3], [4], phương pháp phần tử hữu hạn [5], [6], phương pháp phần tử hữu hạn mở rộng [7], [8],... Trong số các phương pháp trên thì phương pháp phần tử hữu hạn là được sử dụng phổ biến nhất vì phạm vi ứng dụng của nó khá rộng: tĩnh học, động học, nhiệt động học,... Tuy nhiên, các phương pháp số này cũng tồn tại một số nhược điểm khi mô phỏng ứng xử nứt của bê tông. Nhược điểm của phương pháp vùng dính kết là phải xác định chiều dài mô phỏng của vết nứt, và việc xử lý tính chất không liên tục của môi trường xung quanh vết nứt. Nhược điểm của phương pháp phần tử biên là việc đưa vào các điều kiện cho các ma trận trong quá trình giải, cũng như việc lưu trữ giữ liệu chiếm rất nhiều bộ nhớ của máy. Với phương pháp phần tử hữu hạn, nhược điểm chính khi mô phỏng sự xuất hiện và phát triển của vết nứt trong bê tông là phải chia lại lưới trong quá trình vết nứt phát triển, khó khăn trong việc mô hình hóa sự khép lại của vết nứt hay việc khó thể hiện bản chất vật lý tại mặt tiếp xúc bê tông/cốt thép.

Nhằm mục đích hạn chế những khó khăn của các phương pháp số đã trình bày ở trên, nghiên cứu này sẽ giới thiệu về phương pháp phần tử rời rạc (Discrete Element Method - DEM) sử dụng để mô hình hóa ứng xử cơ học của vật liệu bê tông, đặc biệt là nghiên cứu quá trình xuất hiện và phát triển của vết nứt. Trong phương pháp này, vật liệu bê tông được rời rạc hóa thành các phần tử tiếp xúc với nhau. Vết nứt được nghiên cứu thông qua các lực tương tác giữa các phần tử tiếp xúc này. DEM cho phép mô phỏng ứng xử cơ học của vật liệu đẳng hướng cũng như các vật liệu không đẳng hướng một cách dễ dàng. Sự xuất hiện của vết nứt được thể hiện thông qua sự mất liên kết giữa các phần tử tiếp xúc.

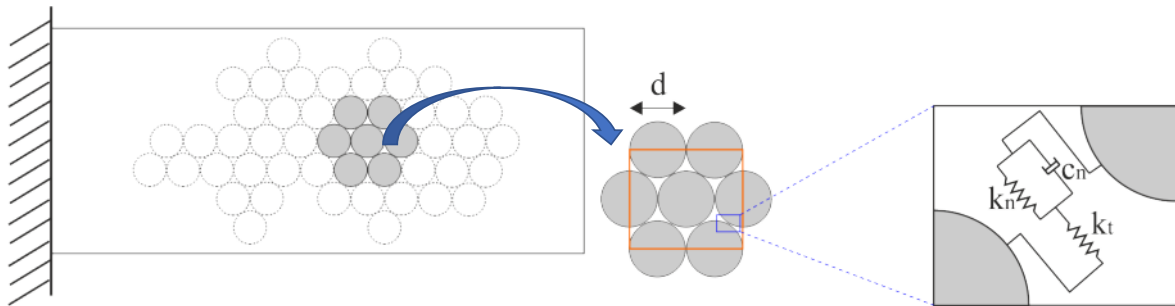
Bài báo này bắt đầu với các khái niệm chung về phương pháp phần tử rời rạc. Tiếp theo, là quá trình mô hình hóa hình học và mô hình hóa cơ học của mẫu bê tông bằng DEM. Nghiên cứu sử dụng thí nghiệm kéo giãn đơn trên mẫu bê tông để mô phỏng ứng xử đàn hồi và phá hủy thông qua định lý ứng suất chính. Mục kết luận và kiến nghị sẽ kết thúc bài báo.

2. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC – GRANOO

DEM là một phương pháp số được sử dụng để mô phỏng ứng xử cơ học của vật liệu rời rạc, dạng hạt [9], [10]. Phương pháp này có nguồn gốc được phát triển bởi Cundall và Strack năm 1979 [11]. Hiện nay, DEM đang được phát triển để nghiên cứu ứng xử cơ học của vật liệu liên tục, vật liệu rắn, như bê tông [12]–[14], vật liệu giòn [15], [16], vật liệu composite [17], [18],... vì nó có nhiều ưu điểm so với phương pháp liên tục như phương pháp phần tử hữu hạn. Trong DEM, vật liệu được rời rạc hóa và cấu tạo bằng một số lượng lớn các phần tử tương tác với nhau (Discrete Elements - DEs). Các phần tử này có thể có dạng hình cầu (3D),

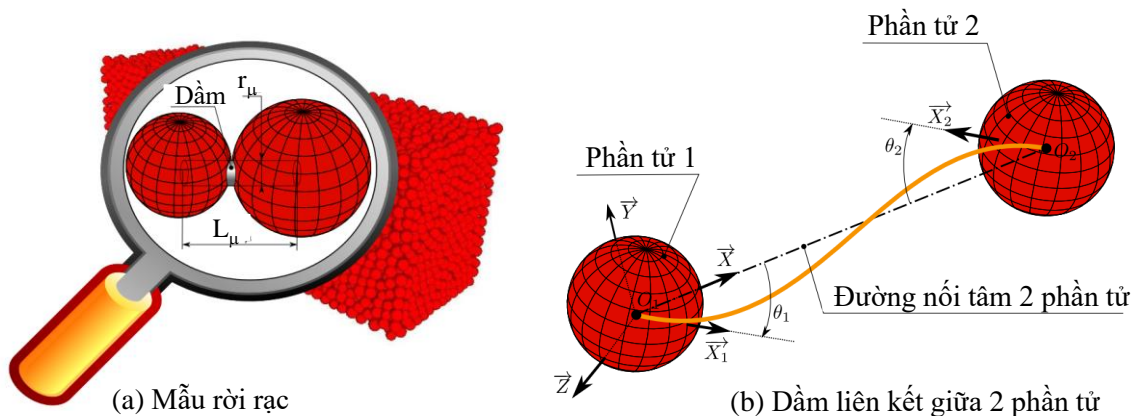
hình tròn (2D) hoặc hình đa diện.

Để mô phỏng ứng xử cơ học của vật liệu liên tục, các mô hình liên kết giữa các phần tử rời rạc đã được đưa vào trong DEM. Các đặc tính cơ học của vật liệu như đàn hồi, phá hủy, dẻo, nhớt, . . . được mô phỏng thông qua các mô hình liên kết này. Hai mô hình liên kết thường được sử dụng hiện nay trong các nghiên cứu DEM là: mô hình lò xo và giảm chấn [19] (Hình 1), mô hình dầm liên kết [20]. Các thông số của các mô hình này thường được xác định thông qua quá trình hiệu chỉnh so sánh với các thông số thực của vật liệu.



Hình 1. Minh họa mẫu rời rạc và dầm liên kết trong GranOO [19]

Nghiên cứu này sử dụng mã nguồn mở Granular Object Oriented (GranOO) để mô phỏng DEM [21]. Trong GranOO, vật liệu liên tục được coi là một tập hợp gồm các phần tử có hình cầu liên kết với nhau (Hình 2a). Ứng xử cơ học của vật liệu được mô phỏng thông qua các dầm nối giữa các phần tử tiếp xúc (Hình 2b). Các dầm liên kết này có dạng hình trụ và nằm ở tâm của hai phần tử. Chúng được đặc trưng bởi bốn tham số: hai tham số hình học là chiều dài L_μ , bán kính R_μ và hai tham số cơ học là mô đun Young E_μ và hệ số Poisson ν_μ . Biểu tượng μ biểu thị các giá trị vi mô. Khi có lực tác dụng, vị trí của các phần tử thay đổi, dẫn đến xuất hiện nội lực trong các dầm (Hình 2b). Ứng xử cơ học của vật liệu được mô phỏng thông qua các nội lực này.



Hình 2. Minh họa mẫu rời rạc và dầm liên kết trong GranOO

Như vậy, quá trình tính toán trong DEM thực chất là việc xác định các vị trí mới của các phần tử tại các bước thời gian tính toán khi có tác dụng của ngoại lực. Từ đó sẽ tính toán được nội lực trong các dầm liên kết, chuyển vị của các phần tử, làm cơ sở để mô phỏng được sự làm việc của vật liệu. Trong GranOO, vị trí mới các phần tử được xác định thông qua gia tốc

của chúng và việc áp dụng thuật toán Verlet Veclocity [22]. Thuật toán này cho phép tính toán vị trí và vận tốc của các phần tử sau các bước thời gian thông qua gia tốc ở bước thời gian trước đó. Các gia tốc này (gia tốc tuyến tính và gia tốc góc) được tính thông qua tổng hợp lực và mô men tác dụng lên các phần tử. Với mỗi phần tử, thuật toán Verlet Veclocity được áp dụng như sau:

$$\dot{\vec{p}}(t+dt) = \dot{\vec{p}}(t) + \beta_1 \frac{dt}{2} (\ddot{\vec{p}}(t) + \ddot{\vec{p}}(t+dt)) \quad (1)$$

$$\vec{p}(t+dt) = \vec{p}(t) + \dot{\vec{p}}(t)dt + \frac{\ddot{\vec{p}}(t)}{2} dt^2 \quad (2)$$

$$\dot{\vec{q}}(t+dt) = \dot{\vec{q}}(t) + \beta_2 \frac{dt}{2} (\ddot{\vec{q}}(t) + \ddot{\vec{q}}(t+dt)) \quad (3)$$

$$\vec{q}(t+dt) = \vec{q}(t) + \dot{\vec{q}}(t)dt + \frac{\ddot{\vec{q}}(t)}{2} dt^2 \quad (4)$$

Trong đó:

- t là thời gian và dt là bước thời gian lặp của mô hình số
- $\vec{p}(t), \dot{\vec{p}}(t), \ddot{\vec{p}}(t)$ là véc tơ vị trí, vận tốc và gia tốc của phần tử tại thời điểm t .
- $\vec{q}(t), \dot{\vec{q}}(t), \ddot{\vec{q}}(t)$ là véc tơ góc xoay, vận tốc và gia tốc góc của phần tử tại thời điểm t .
- β_1, β_2 là các hệ số cân chỉnh, được đưa vào để ổn định kết quả số tính toán.

Vòng lặp số trong chương trình tính toán của GranOO sử dụng thuật toán Verlet Veclocity trong nghiên cứu này được minh họa trong Bảng 1:

Bảng 1. Thuật toán Verlet Veclocity trong GranOO

Đầu vào: $\vec{p}(0), \dot{\vec{p}}(0), \ddot{\vec{p}}(0), \vec{q}(0), \dot{\vec{q}}(0), \ddot{\vec{q}}(0)$

$t \leftarrow 0$

for all iteration n **do**

for all phần tử i **do**

$\vec{p}_i(t+dt) \leftarrow$ Sử dụng thuật toán Verlet Veclocity (công thức (2))

$\vec{f}_i(t+dt) \leftarrow$ Tổng hợp lực tác dụng lên phần tử i

$\ddot{\vec{p}}_i(t+dt) \leftarrow$ Gia tốc của phần tử i

$\dot{\vec{p}}_i(t+dt) \leftarrow$ Sử dụng thuật toán Verlet Veclocity (công thức (1))

$\vec{q}_i(t+dt) \leftarrow$ Sử dụng thuật toán Verlet Veclocity (công thức (4))

$\vec{M}_i(t+dt) \leftarrow$ Tổng mô men tác dụng lên phần tử i

$\ddot{\vec{q}}_i(t+dt) \leftarrow$ Gia tốc góc của phần tử i

$\dot{\vec{q}}_i(t+dt) \leftarrow$ Sử dụng thuật toán Verlet Veclocity (công thức (3))

end for

$t \leftarrow t + dt$

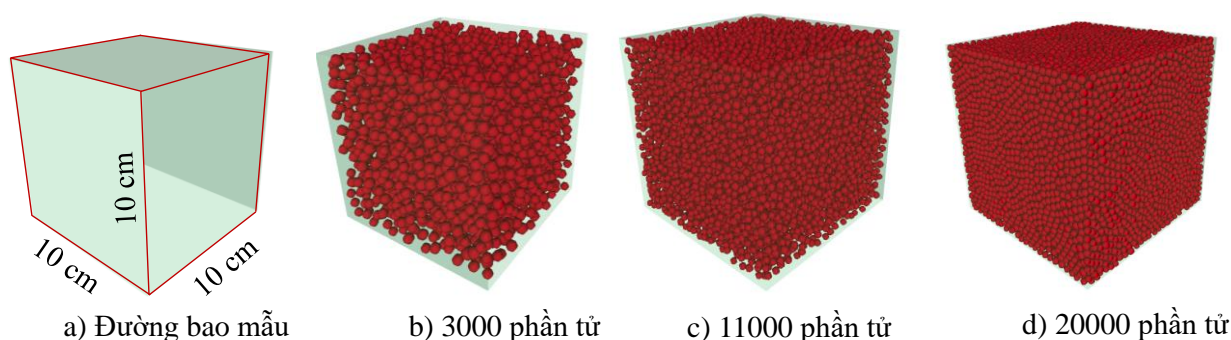
end for

3. MÔ HÌNH HÓA HÌNH HỌC DEM

Quá trình mô hình hóa hình học nhằm mục đích tạo mẫu vật liệu và các liên kết giữa các phần tử trong DEM. Nghiên cứu này sử dụng mẫu bê tông hình lập phương có kích thước cạnh 10 cm.

Để tạo mẫu trong GranOO, trước hết phải tạo được đường bao hao ngoài của mẫu. Quá trình sau đó được thực hiện qua 3 giai đoạn: i) tạo các phần tử và đặt ngẫu nhiên trong đường bao của mẫu, ii) kích hoạt lực tương tác giữa các phần tử kết hợp tạo và đặt ngẫu nhiên các phần tử mới, iii) giãn khoảng cách giữa các phần tử. Trong giai đoạn 1, các phần tử rời rạc sẽ được tạo và đặt ngẫu nhiên trong đường bao của mẫu. Mỗi phần tử rời rạc sẽ được định nghĩa bởi tọa độ tâm theo 3 trục x, y, z và bán kính. Để tạo ra độ chặt tối ưu cho mẫu rời rạc, bán kính của các phần tử được lựa chọn ngẫu nhiên, trong đó sự sai khác nhau giữa bán kính nhỏ nhất và lớn nhất là 25%. Quá trình này sẽ dừng khi chương trình ko thể tìm được 1 chỗ trống để đặt vào phần tử mới mà phần tử này ko bị chồng lên các phần tử bên cạnh. Ở giai đoạn 2, tiến hành sử dụng liên kết lò xo để nối giữa các phần tử tiếp xúc với nhau. Quá trình tương tác giữa các phần tử sẽ làm xuất hiện các vị trí trống ở trong mẫu. Song song với quá trình này, tiến hành tạo và đặt các phần tử rời rạc mới vào. Giai đoạn 2 kết thúc khi mỗi phần tử có trung bình 6,2 phần tử tiếp xúc. Ở cuối giai đoạn 2, sẽ có 1 phần nhỏ chồng lên nhau giữa các phần tử tiếp xúc. Giai đoạn 3 có nhiệm vụ giảm phần chồng lên nhau này xuống tới giá trị nhỏ hơn $10^{-5}\%$.

Hình 3 minh họa quá trình tạo mẫu bê tông nghiên cứu trong DEM với số lượng phần tử là 20000. Hình 3a thể hiện đường bao và kích thước của mẫu. Hình 3b và Hình 3c thể hiện số lượng phần tử tăng dần ở giai đoạn 1 và giai đoạn 2 của quá trình tạo mẫu. Mẫu thu được sau khi kết thúc giai đoạn 3 được minh họa trong Hình 2d với số lượng phần tử là 20000. Đây cũng chính là mẫu DEM được sử dụng để tính toán.

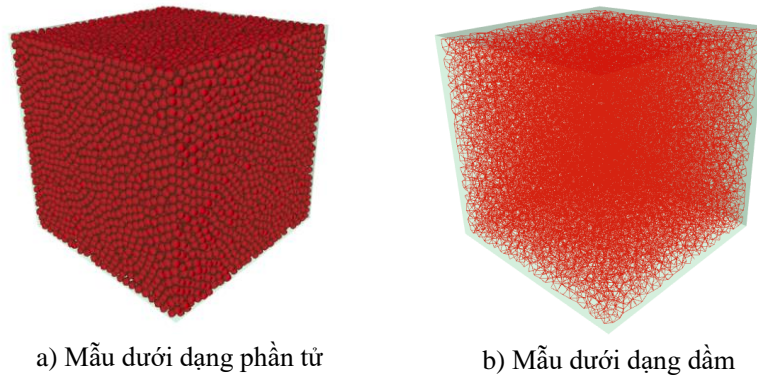


Hình 3. Quá trình tạo mẫu 20000 phần tử

4. MÔ HÌNH HÓA CƠ HỌC DEM

Sau quá trình tạo mẫu hình học, ứng xử cơ học của vật liệu cần được xét đến. Các dầm liên kết được sử dụng để kết nối giữa các phần tử rời rạc (Hình 4). Chúng được đặc trưng bởi các tham số: tham số hình học là chiều dài L_μ , bán kính R_μ và các tham số cơ học là mô đun Young E_μ và hệ số Poisson ν_μ . Biểu tượng μ biểu thị các giá trị vi mô. Các giá trị vi mô này được xác định thông qua quá trình hiệu chỉnh liên quan tới các tham số vĩ mô của vật liệu, gồm mô đun Young E_M và hệ số Poisson ν_M . Biểu tượng M biểu thị các giá trị vĩ mô.

Trong quá trình hiệu chỉnh này, chiều dài dầm liên kết L_μ là khoảng cách giữa tâm của hai phần tử rời rạc và được xác định sau quá trình tạo mẫu. Thay vì sử dụng bán kính R_μ của từng dầm liên kết, bán kính phụ $r_\mu = R_{DE} / R_\mu$ được ưu tiên sử dụng, trong đó R_{DE} là bán kính trung bình của hai phần tử rời rạc được nối bởi dầm liên kết. Quá trình hiệu chỉnh được thực hiện thông qua thí nghiệm số kéo mẫu rời rạc hình trụ. Kết quả thí nghiệm được so sánh với đường lý thuyết xây dựng từ các thông số vĩ mô của vật liệu, từ đó xác định được các thông số vi mô cần thiết [17], [18]. Quá trình này rất mất thời gian vì phải chạy rất nhiều chương trình DEM với các thông số vi mô đầu vào giả thiết. Để khắc phục nhược điểm này, nghiên cứu đã sử dụng phương pháp tối ưu hóa để tự động tính toán các thông số vi mô của dầm liên kết. Phương pháp này được phát triển bởi Thi và các cộng sự [23].



Hình 4. Mẫu vật liệu trong DEM dưới dạng phân tử và dầm liên kết

Các thông số vĩ mô của vật liệu bê tông sử dụng trong nghiên cứu: mô đun Young $E_M = 30$ (GPa), hệ số Poisson $\nu_M = 0,2$, cường độ chịu kéo $\sigma_M = 3$ (MPa). Các thông số vi mô của mô hình DEM thu được qua quá trình hiệu chỉnh được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Tham số vi mô xác định qua quá trình hiệu chỉnh

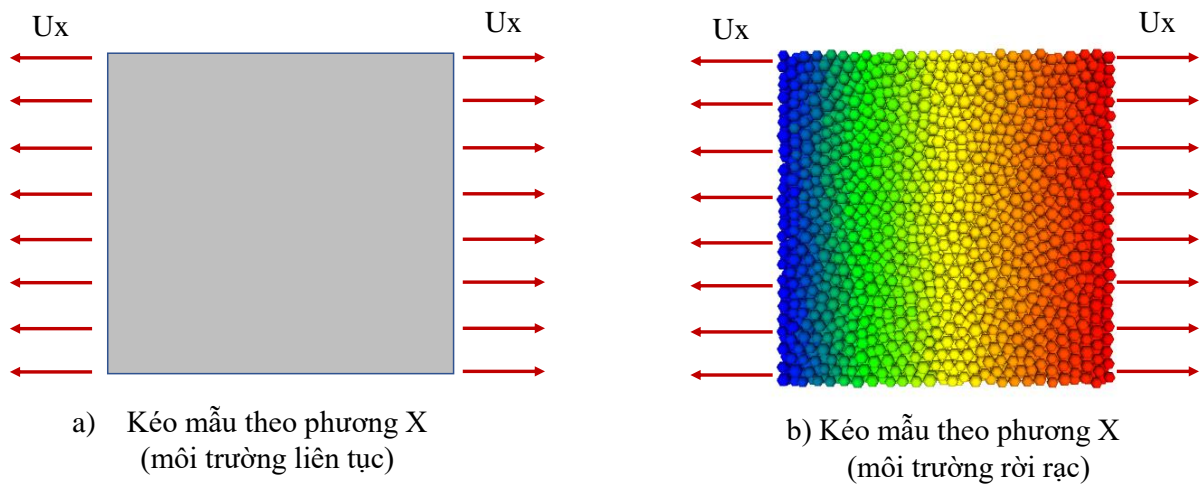
Vật liệu bê tông	E (GPa)	ν	σ (MPa)	r_μ
Thông số vĩ mô	30	0,2	3	
Thông số vi mô	42,6	0,2	3	0,96

4. VÍ DỤ MÔ PHỎNG SỐ

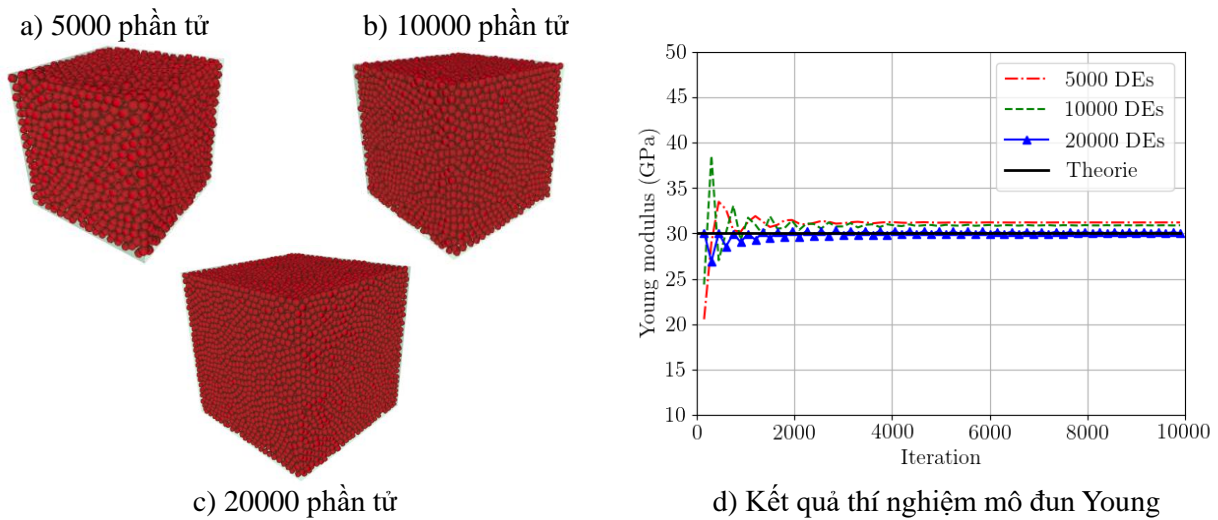
Sau khi hoàn thành quá trình mô hình hóa hình học và cơ học, tiến hành chạy chương trình DEM với các thông số đầu vào trên. Nghiên cứu này sử dụng thí nghiệm số kéo trên mẫu bê tông hình lập phương đã được thiết lập ở Mục 3. Mẫu được kéo theo phương ngang (phương X). Các chuyển vị được đặt vào các phần tử rời rạc nằm ở hai mặt ngoài đối xứng của mẫu theo phương X (Hình 5). Thí nghiệm số này được viết bằng các chương trình con trên ngôn ngữ C++.

Thí nghiệm số đầu tiên thực hiện trong miền đàn hồi. Để nghiên cứu về độ hội tụ của kết

quả theo số lượng phần tử, ba mẫu DEM với số lượng phần tử rời rạc lần lượt là 5000 (Hình 6a), 10000 (Hình 6b), 20000 (Hình 6c) đã được khởi tạo và sử dụng. Trong mô phỏng này, các sensor số đã được sử dụng để xác định các giá trị về lực, chuyển vị, tọa độ phần tử tại các mặt gia tải. Dựa vào các giá trị thu được từ các sensor này có thể xác định được các giá trị vĩ mô của vật liệu. Kết quả xác định mô đun Young vĩ mô của vật liệu bê tông từ các thí nghiệm số được thể hiện trong Hình 6d. Giá trị thu được hội tụ về giá trị thực tế khi số lượng phần tử rời rạc của mẫu tăng lên. Với 20000 phần tử, giá trị mô đun Young thu được hội tụ rất tốt với giá trị thực tế của vật liệu là 30 GPa.



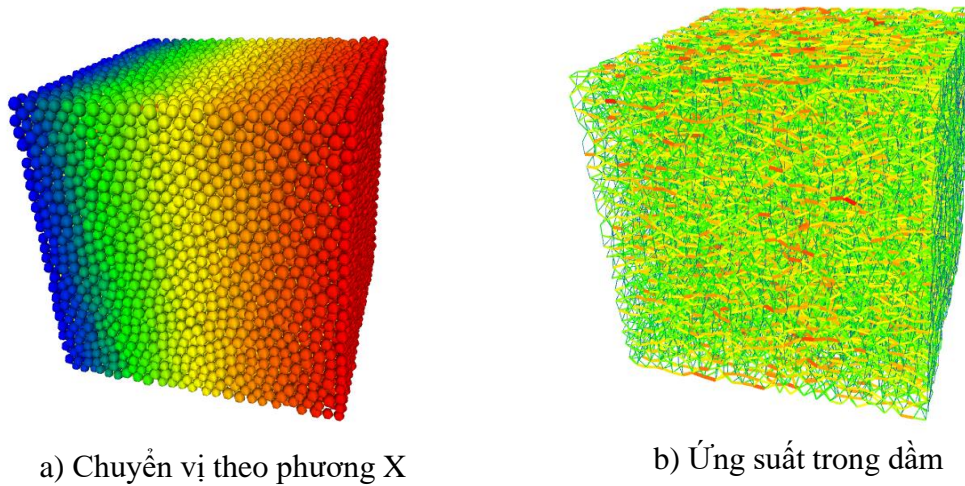
Hình 5. Thí nghiệm số kéo mẫu



Hình 6. Trạng thái chuyển vị và ứng suất trong mẫu

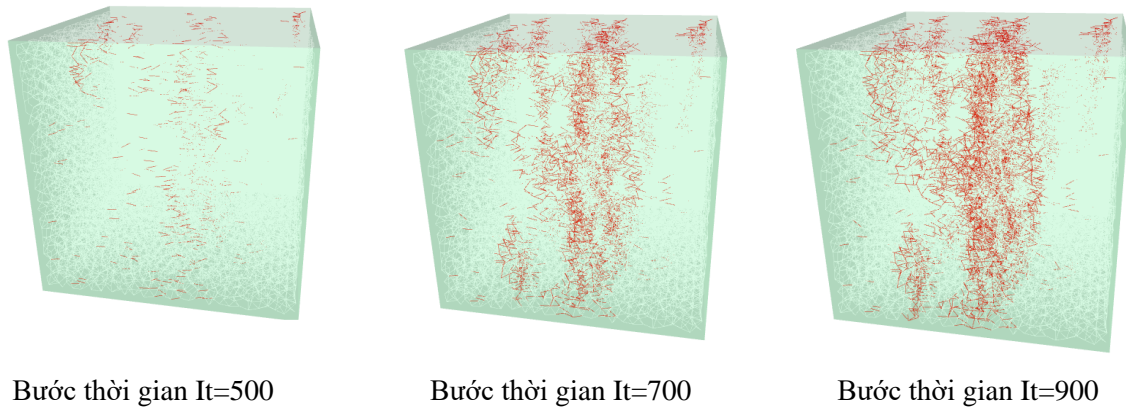
Ở nội dung thứ 2 của mô phỏng số, nghiên cứu sử dụng định lý ứng suất chính để mô phỏng sự xuất hiện và phát triển của vết nứt khi ứng suất trong bê tông vượt quá ứng suất cho phép. Các giá trị ứng suất chính trong DEM được xác định tại từng phần tử thông qua tổ hợp các lực tác dụng lên phần tử đó. Các lực này chính là các nội lực trong các dầm liên kết nối giữa phần tử đó với các phần tử tiếp xúc ở xung quanh [18].

Trong nội dung này, mẫu DEM với 20000 phần tử sẽ được sử dụng. Hình 7 thể hiện trạng thái chuyển vị của các phần tử và trạng thái ứng suất trong các dầm liên kết trong quá trình thí nghiệm.



Hình 7. Trạng thái chuyển vị và ứng suất trong mẫu

Khi giá trị ứng suất kéo trong mẫu DEM lớn hơn giá trị cho phép của vật liệu (3 MPa), các vết nứt bắt đầu xuất hiện. Vết nứt hình thành trong DEM thực chất là quá trình xóa bỏ nội lực trong các dầm liên kết với phần tử khi ứng suất kéo ở phần tử đó vượt quá giới hạn. Trong mô hình nứt này, vật liệu bê tông được coi là vật liệu giòn. Hình 8 mô tả sự phát triển của vết nứt theo thời gian trong quá trình thí nghiệm. Các dầm liên kết màu đỏ trong hình chính là các dầm đã bị xóa bỏ toàn bộ nội lực, đó cũng chính là hình ảnh minh họa cho sự phát triển của vết nứt. Kết quả cho thấy các vết nứt xuất hiện và phát triển vuông góc với lực tác dụng (mode I) là hoàn toàn phù hợp với lý thuyết.



Hình 8. Sự phát triển của vết nứt trong mẫu

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo này đã giới thiệu về quá trình mô phỏng số cho vật liệu bê tông sử dụng phương pháp phần tử rời rạc. Đây là một phương pháp số khá mới để mô phỏng ứng xử cơ học của vật liệu liên tục với một số ưu điểm vượt trội so với các phương pháp truyền thống như phương

pháp phần tử hữu hạn, đặc biệt là quá trình mô phỏng liên quan đến sự xuất hiện và phát triển của vết nứt trong vật liệu.

Nghiên cứu đã giới thiệu về quá trình mô hình hóa hình học và cơ học để khởi tạo mẫu DEM và xác định các giá trị vi mô của mô hình. Qua đó đã thực hiện các mô phỏng số trong miền đàn hồi và phá hủy với thí nghiệm kéo giãn đơn mẫu bê tông hình lập phương cạnh 10 cm. Kết quả cho thấy, kết quả hội tụ khi số lượng phần tử trong mẫu DEM tăng lên. Với 20000 phần tử, giá trị mô đun Young thu được qua thí nghiệm số hội tụ rất tốt với giá trị thực tế của vật liệu. Bên cạnh đó, định lý ứng suất chính cũng đã được sử dụng để mô phỏng sự xuất hiện và phát triển vết nứt trong DEM. Kết quả thu được rất sát với lý thuyết (mode I).

Trong những nghiên cứu tiếp theo, tác giả sẽ tiếp tục phát triển DEM để mô phỏng các kết cấu gồm nhiều vật liệu khác nhau, như bê tông cốt thép, composite..., đưa vào các định luật để mô phỏng các mặt tiếp xúc giữa các vật liệu này. Mặt khác, tác giả cũng sẽ phát triển các mô hình về vật liệu đàn dẻo, nhớt... để hoàn thiện dần các mô hình trong GranOO.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) cho đề tài mã số 107.02-2017.13.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Elices, G. V Guinea, J. Gomez, J. Planas, The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges, *Eng. Fract. Mech.*, 69 (2002) 137–163.
- [2]. Z.-H. Jin, C. T. Sun, Cohesive fracture model based on necking, *Int. J. Fract.*, 134 (2005) 91–108.
- [3]. A. Portela, M. H. Aliabadi, D. P. Rooke, The dual boundary element method: effective implementation for crack problems, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 33 (1992) 1269–1287.
- [4]. E. L. Albuquerque, P. Sollero, M. H. Aliabadi, Dual boundary element method for anisotropic dynamic fracture mechanics, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 59 (2004) 1187–1205.
- [5]. D. Givoli, R. Zusman, An adaptive finite element framework for fatigue crack propagation, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 54 (2002) 111–135.
- [6]. M. Schöllmann, M. Fulland, H. A. Richard, Development of a new software for adaptive crack growth simulations in 3D structures, *Eng. Fract. Mech.*, 70 (2003) 249–268.
- [7]. Y. Abdelaziz, A. Hamouine, A survey of the extended finite element, *Comput. Struct.*, 86 (2008) 1141–1151.
- [8]. T. Belytschko, R. Gracie, G. Ventura, A review of extended/generalized finite element methods for material modeling, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 17 (2009) 43001.
- [9]. F. Calvetti, C. Tamagnini, G. Viggiani, On the incremental behaviour of granular soils, *Numer. Model. Geomech.*, 8 (2002) 3–9.
- [10]. R. P. Jensen, M. E. Plesha, T. B. Edil, P. J. Bosscher, N. B. Kahla, DEM Simulation of Particle Damage in Granular Media - Structure Interfaces, *Int. J. Geomech.*, 2001. [https://doi: 10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2001\)1:1\(21\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2001)1:1(21))
- [11]. P. A. Cundall, O. D. L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 1979. [https://doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47](https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47)
- [12]. F. V Donze, S. A. Magnier, L. Daudeville, C. Mariotti, L. Davenne, Study of the behavior of concrete at high strain rate compressions by a discrete element method, *ASCE J. Eng. Mech.*, 125 (1999) 1154–1163.

- [13]. S. Hentz, Modélisation d'une structure en béton armé soumise à un choc par la méthode des éléments discrets, Grenoble 1, 2003.
- [14]. K. Meguro, M. Hakuno, Fracture analyses of concrete structures by the modified distinct element method, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1989 (1989) 113–124.
- [15]. B. D. Le, G. Koval, C. Chazallon, Discrete element model for crack propagation in brittle materials, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 40 (2016) 583–595.
- [16]. B. D. Le, G. Koval, C. Chazallon, Discrete element approach in brittle fracture mechanics, 2013. <https://doi: 10.1108/02644401311304881>
- [17]. B. D. LE, F. Dau, D. H. Pham, T. D. Tran, Discrete element modeling of interface debonding behavior in composite material: Application to a fragmentation test, *Compos. Struct.*, 272 (2021) 114170.
- [18]. B. D. Le, F. Dau, J. L. Charles, I. Iordanoff, Modeling damages and cracks growth in composite with a 3D discrete element method, *Compos. Part B Eng.*, 2016. <https://doi: 10.1016/j.compositesb.2016.01.021>
- [19]. B. D. Le, Modélisation discrète en mécanique de la rupture des matériaux fragiles, 2013.
- [20]. E. Schlangen , J. G. M. Van Mier, Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures, *Mater. Struct.*, 25 (1992) 534–542.
- [21]. D. André, J. L. Charles, I. Iordanoff, J. Neauport, The GranOO workbench, a new tool for developing discrete element simulations, and its application to tribological problems, *Adv. Eng. Softw.*, 74 (2014) 40–48. <https://doi: 10.1016/j.advengsoft.2014.04.003>
- [22]. D. H. Eberly, *Game physics*. 2nd, Amsterdam, Boston: Morgan Kaufmann, 2010.
- [23]. T. Nguyen, D. Andre, N. Tessier-Doyen, M. Huger, Discrete element modelling: a promising way to account effects of damages generated by local thermal expansion mismatches on macroscopic behaviour of refractory materials, 2017.