

MÔ PHỎNG ỨNG XỬ CHỊU NÉN CỦA BÊ TÔNG BẰNG PHẦN MỀM PHẦN TỬ RỜI RẠC PFC2D

Nguyễn Quang Tuấn¹

Tóm tắt: Mô phỏng ứng xử cơ học của vật liệu là một trong những vấn đề khi nghiên cứu bê tông hay bất cứ vật liệu xây dựng nào. Bài báo này trình bày việc áp dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng ứng xử của mẫu bê tông khi chịu nén. Vật liệu bê tông được mô phỏng bằng tập hợp hạt có gắn kết với nhau. Mô hình liên kết tại vị trí tiếp xúc giữa các hạt được sử dụng. Để mô phỏng sự có mặt của các thành phần của bê tông gồm vữa xi măng và cốt liệu, vật liệu bê tông được mô phỏng bằng các nhóm hạt có tính chất riêng. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp mô phỏng rời rạc có khả năng tái tạo tốt ứng xử của vật liệu bê tông, đồng thời cho phép nghiên cứu ứng xử của vật liệu một cách chi tiết, cho phép xem xét ảnh hưởng của các yếu tố về bản chất bên trong vật liệu tới ứng xử cơ học của vật liệu.

Từ khóa: Mô phỏng, phần tử rời rạc, PFC2D, bê tông

1. GIỚI THIỆU

Bê tông là vật liệu được sử dụng rộng rãi trong xây dựng và việc nghiên cứu vật liệu bê tông luôn là một chủ đề quan trọng. Trong đó, việc nghiên cứu về ảnh hưởng của các thành phần vật liệu tới tính chất cơ học cùng cơ chế phá hủy của bê tông luôn là chủ đề nóng trong khoa học xây dựng. Thông thường, bê tông được xem là một vật liệu composite không đồng nhất bao gồm cốt liệu thô và vữa xi măng cát. Thực tế, tính chất cơ học của bê tông luôn phụ thuộc vào tính chất cơ học của 2 nhóm vật liệu này. Đồng thời, tính chất cơ học phụ thuộc cả vào tương quan giữa 2 nhóm vật liệu, đó là cấu trúc vi mô của bê tông. Do đó, việc nghiên cứu từ góc độ vi cấu trúc sẽ rất hữu ích để hiểu rõ hơn về cơ chế ứng xử của vật liệu từ bản chất bên trong của vật liệu bê tông.

Rất nhiều thực nghiệm đã được làm để nghiên cứu cơ chế phá hủy của bê tông. Các nghiên cứu cho thấy sự hình thành và phát triển các vết nứt trong phần vữa xi măng và phần tiếp xúc giữa vữa xi măng và cốt liệu khi bê tông chịu nén, vai trò của từng thành phần tới đặc điểm đường cong nén và sự phá hủy mẫu. Tuy nhiên, để thực hiện các thí nghiệm này cần có thiết bị, tốn nhiều công sức

thực hiện và chi phí thí nghiệm lớn. Việc sử dụng phương pháp số để mô phỏng là một lựa chọn nhằm hỗ trợ công tác nghiên cứu này. Đã có nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) để nghiên cứu vấn đề này. Sử dụng phương pháp PTHH có khả năng mô phỏng rất tốt sự phân bố ứng suất bên trong vật liệu và khả năng mô tả quan hệ ứng suất biến dạng khi dùng mô hình vật liệu phù hợp. Tuy nhiên, phương pháp PTHH có hạn chế về khả năng mô phỏng sự hình thành và phát triển các vết nứt trong vật liệu khi tải trọng tác dụng. Đặc biệt phương pháp PTHH khó có thể mô tả sự phá hủy tách rời mẫu vật liệu. Khi nghiên cứu ở góc độ chi tiết, phương pháp này khó có thể đi sâu vào bản chất cơ chế phá hủy vật liệu. Gần đây, phương pháp phần tử rời rạc (PTRR) đã bắt đầu được áp dụng để hỗ trợ nghiên cứu vấn đề này. So với phương pháp PTHH, phương pháp PTRR có thể mạnh vượt trội ở khả năng mô phỏng sự hình thành khe nứt và chuyển động tách rời vật liệu khi phá hủy.

2. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC

Phương pháp PTRR (Discrete element method hoặc viết tắt là DEM) là một phương pháp số được đề xuất phát triển bởi Cundall (1971) với mục đích ban đầu là mô phỏng ứng xử của vật liệu địa kỹ thuật không liên tục. Phương pháp này xét

¹ Bộ môn Địa kỹ thuật - Trường Đại học Thủy lợi

miền nghiên cứu là tập hợp các phần tử riêng rẽ, có thể tiếp xúc hoặc không tiếp xúc với nhau. Lý thuyết về phương pháp được mô tả chi tiết trong các báo cáo (Cundall and Strack 1979) và đã được công bố trên tạp chí nổi tiếng *Géotechnique* (Cundall and Strack 1979). Ưu điểm của việc sử dụng phương pháp này là xét được các dạng chuyển động của mỗi phần tử riêng lẻ và phân tích được tương tác giữa các phần tử trong tập hợp một cách rõ ràng.

Sử dụng DEM để mô phỏng thường cần công tính toán lớn. Các phần tử thường được đơn giản hóa để giảm sự phức tạp trong tính toán. Các phần tử hình tròn (2D) hoặc cầu (3D) là một lựa chọn tối ưu cho tính toán.

Khi thí nghiệm thực tế có thể yêu cầu cơ cấu thiết bị rất phức tạp. Còn khi mô phỏng một thí nghiệm cơ học, DEM giống như các phương pháp số khác, có thể dễ dàng gia tải với các hình thức khác nhau. Ngoài ra, ở thí nghiệm thực trong phòng thí nghiệm, việc truy cập tất cả thông tin và dữ liệu cũng rất khó khăn. Khi dùng DEM, các ứng xử của từng phần tử có thể được theo dõi và phân tích một cách hiệu quả. Mô hình DEM cho phép chúng ta hiểu ứng xử của vật liệu dưới góc nhìn chi tiết từ các thành phần của mô hình như lực tiếp xúc giữa các phần tử, sự định hướng các phần tử, sự chuyển động và tương tác giữa các phần tử bên trong vật liệu.

3. PHẦN MỀM PFC2D VÀ MÔ HÌNH LIÊN KẾT GIỮA CÁC PHẦN TỬ

3.1. Phần mềm PFC2D

PFC (particle flow code) là phần mềm dựa trên cơ sở lý thuyết DEM của (Cundall and Strack 1979). PFC sử dụng các phần tử tròn (2D) hoặc các phần tử cầu (3D) không biến dạng và sử dụng các định luật Newton để tính toán chuyển động của các phần tử, nên có khả năng mô phỏng biến dạng lớn và chuyển động riêng rẽ của các phần tử. Bằng việc áp dụng các liên kết giữa các hạt, PFC coi các vật liệu liên tục là tập hợp các hạt có gắn kết với nhau (Potyondy and Cundall 2004). Bằng cách này, PFC có thể mô phỏng quá trình thay đổi của vật liệu liên tục khi chịu tác dụng của tải trọng.

Tương tác giữa các hạt được biểu diễn bằng mô

hình tiếp xúc giữa các hạt. Các hạt có thể chuyển động ở các dạng khác nhau gồm chuyển động tịnh tiến và chuyển động xoay và tuân theo các định luật Newton về chuyển động. Khi sử dụng PFC, không cần phải sử dụng mô hình vật liệu (constitutive model) như đối với phương pháp phần tử hữu hạn. Ứng xử của tập hợp phần tử sẽ do mô hình làm việc tại các điểm tiếp xúc giữa các phần tử. Trong PFC có tích hợp một số mô hình tiếp xúc có thể sử dụng để mô phỏng các bài toán kỹ thuật. Trong đó, mô hình liên kết kép, hay còn gọi là mô hình liên kết song song (linear parallel bond model), thường được sử dụng để mô phỏng vật liệu liên tục như đá và bê tông.

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phần mềm PFC2D kết hợp mô hình liên kết kép để mô phỏng thí nghiệm nén vật liệu bê tông. Vật liệu bê tông được mô tả bằng tập hợp rất nhiều hạt nhỏ hình tròn, trong đó có các nhóm hạt được gắn kết với nhau để mô tả các hạt cốt liệu, và phần còn lại mô tả vật liệu xi măng. Liên kết kép được đặt vào vị trí tiếp xúc giữa các hạt để tạo liên kết mô tả vật liệu bê tông. Kết quả thí nghiệm mô hình có thể so sánh đối chứng với kết quả thí nghiệm thực tế.

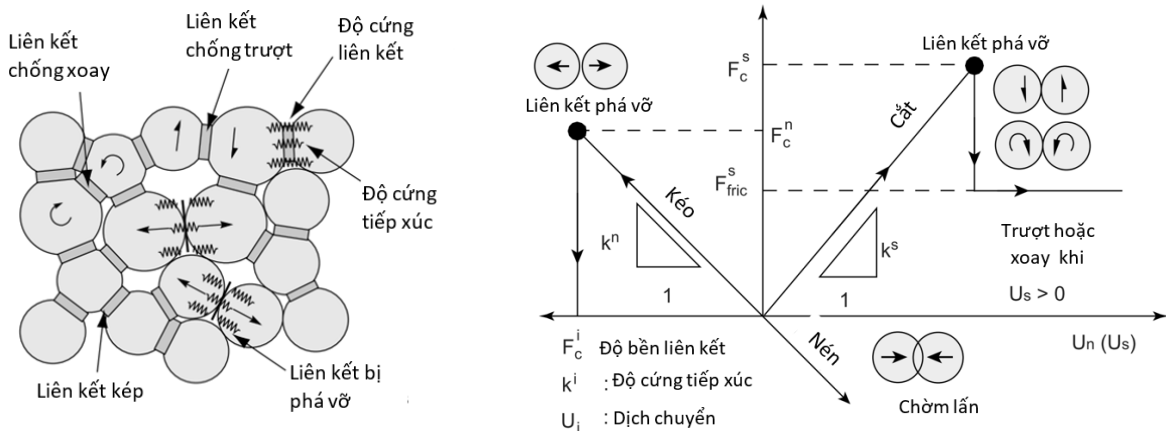
3.2. Mô hình liên kết giữa các phần tử

Mô hình liên kết kép được Potyondy và Cundall giới thiệu với mục đích mô phỏng gắn kết giữa các hạt khoáng vật trong đá (Potyondy and Cundall 2004). Mô hình liên kết kép có thể coi như phần xi măng liên kết giữa các hạt tại vị trí tiếp xúc trên một diện tích nhất định. Liên kết này ngoài khả năng chống kéo, chống cắt còn có thể chống cả mô men do chuyển động xoay các hạt gây ra (*Hình 1*).

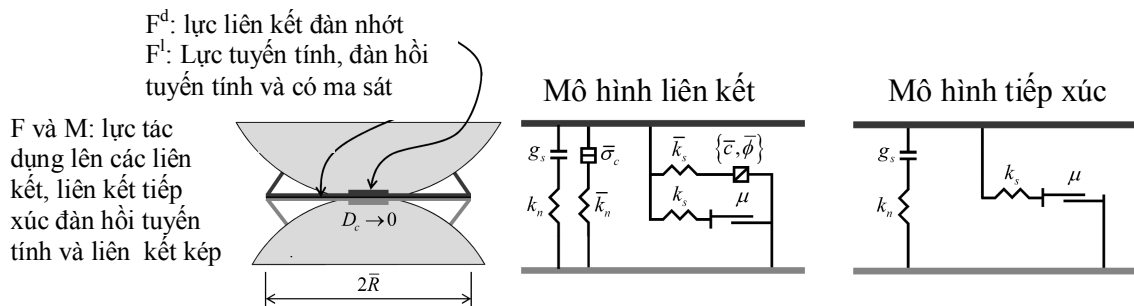
Về mặt cơ học, liên kết kép được mô hình hóa bằng một liên kết đàn hồi tuyến tính được đặc trưng bởi độ cứng pháp tuyến và độ cứng tiếp tuyến, phân bố đều trên tiết diện ngang nằm trên mặt tiếp xúc và tâm là ở tại điểm tiếp xúc giữa 2 phần tử. Có thể hình dung mô hình liên kết kép là một cặp lò xo đàn hồi phân bố trên một diện tích có độ cứng theo phương pháp tuyến và tiếp tuyến đối với mặt tiếp xúc. Các liên kết đàn hồi của mô hình liên kết kép làm việc cùng liên kết đàn hồi của mô hình tiếp xúc tuyến tính. Chuyển động tương đối tại tiếp xúc, xảy ra sau khi liên kết kép

được thiết lập, tạo ra lực và mô men phát triển trong liên kết. Lực và mô men này tác dụng lên 2 mảnh và có thể liên quan tới ứng suất pháp tuyến và tiếp tuyến lớn nhất tác dụng trong vật liệu liên kết ở biên liên kết. Nếu các ứng suất lớn nhất đó

vượt quá độ bền liên kết tương ứng, liên kết kép sẽ bị phá vỡ và vật liệu liên kết bị loại khỏi mô hình cùng với lực, mô men và độ cứng. Mô hình liên kết kép gồm có các thành phần được biểu diễn như Hình 2.



Hình 1. Minh họa mô hình liên kết kép trong PFC2D (trái) và quá trình phá hủy liên kết (phải) (Cho, Martin et al. 2007)



Hình 2. Minh họa mô hình liên kết kép và các thành phần trong mô hình liên kết kép

Khi sử dụng mô hình liên kết để mô phỏng, các thông số mô hình gồm các thông số của các phần

tử và các thông số của liên kết. Các thông số mô hình được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số chi tiết (micro parameters) sử dụng trong mô hình PFC

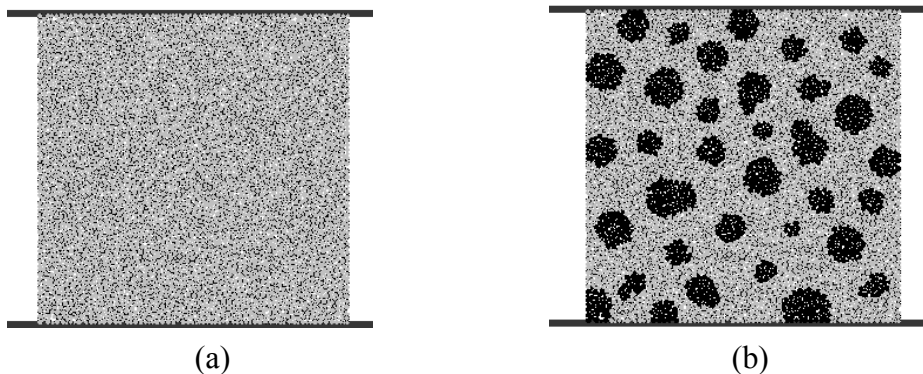
Các thông số của hạt		Các thông số của liên kết	
ρ	Khối lượng riêng (kg/m ³)	$\bar{\lambda}$	Hệ số bán kính liên kết.
$R_{\min}$	Bán kính hạt nhỏ nhất	$\bar{R}$	Bán kính liên kết $\bar{R} = \bar{\lambda} * \min(\bar{R}_A, \bar{R}_B)$
$R_{\max}/R_{\min}$	Tỷ số giữa bán kính $R_{\max}/R_{\min}$		$\bar{R}_A, \bar{R}_B$ bán kính của 2 hạt có liên kết
E_c	Mô đun đàn hồi của hạt	$\bar{E}_c$	Mô đun đàn hồi của liên kết bond
k_n/k_s	Tỷ số giữa độ cứng pháp tuyến và độ cứng cắt của hạt	$\bar{k}_n, \bar{k}_s$	Tỷ số giữa độ cứng pháp tuyến và độ cứng cắt của liên kết kép
μ	Hệ số ma sát của hạt	$\bar{\sigma}_c$	Độ bền kháng kéo của liên kết kép
		$\bar{\tau}_c$	Độ bền kháng cắt của liên kết kép

Cần lưu ý rằng, các thông số mô hình PFC là các thông số của các mối liên kết, gồm thông số của các hạt và liên kết giữa các hạt, không phải là thông số của mẫu vật liệu bê tông. Các thông số này được xác định qua mô phỏng và hiệu chỉnh mô hình theo thí nghiệm thực tế.

4. MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM NÉN MẪU BÊ TÔNG SỬ DỤNG PFC2D

Trong mô hình PFC2D của nghiên cứu này, mẫu thí nghiệm được tạo ra với kích thước bằng đúng kích thước mẫu bê tông thí nghiệm theo tiêu chuẩn (20x20cm) theo các bước sau: (1) Tạo không gian hình vuông giới hạn bởi bởi các biên không ma sát là các phần tử wall (vách phẳng); (2) Tạo các tập hợp hạt trong không gian hình vuông giới hạn bởi các vách, số hạt được tính để tạo ra tập hợp có độ lỗ rỗng cần thiết. Đường kính từ 1mm đến 2mm được đặt ngẫu nhiên trong không

gian, phân bố theo quy luật Gauss; (3) Một số vùng trong tập hợp được chọn ngẫu nhiên và xếp vào nhóm cốt liệu để mô tả các hạt cốt liệu có kích thước khác nhau, phần các hạt còn lại thuộc vào nhóm xi măng; (4) Gán các liên kết kép vào vị trí tiếp xúc giữa các hạt của mỗi nhóm; nhóm cốt liệu sẽ có giá trị các thông số liên kết khác về độ cứng và độ bền so với nhóm xi măng; (5) Xóa 2 vách bên, để lại 2 vách trên và dưới mẫu dùng để gia tải nén. Mô hình PFC2D của mẫu thí nghiệm được trình bày ở Hình 3. Trong Hình 3 là mô hình của 2 trường hợp: (a) Mô hình dùng để mô phỏng vật liệu có thành phần đồng nhất và (b) Mô hình có “thể vùi” dùng để mô phỏng mẫu vật liệu có các hạt cốt liệu như bê tông hay vật liệu tương tự đá trầm tích vụn cơ học hay các đá kết tinh có cấu tạo kiểu hạnh nhân.



Hình 3. Mô hình mẫu vật liệu PFC2D: (a) Vật liệu đồng nhất; (b) Bê tông có cốt liệu

Quá trình gia tải nén mẫu được thực hiện bằng cách cho dịch chuyển 2 tấm vách ở 2 đầu mẫu với tốc độ không đổi là 0,01m/giây. Lưu ý đây là giá trị tốc độ nén trong mô hình số. Tốc độ này đã được lựa chọn dựa trên khảo sát sơ bộ ảnh hưởng của tốc độ nén tới kết quả mô phỏng. Giá trị chọn đảm bảo vừa không ảnh hưởng tới kết quả vừa tiết kiệm thời gian chạy mô hình. Trong quá trình nén, ứng suất nén và biến dạng của mẫu được ghi nhận trong suốt quá trình nén. Do vậy, đường quan hệ ứng suất biến dạng được thể hiện. Thí nghiệm được dừng lại sau khi ứng suất nén đạt giá trị đỉnh và giảm về bằng 70% ứng suất đỉnh.

Thử nghiệm mô hình được thực hiện với 3

trường hợp: 2 trường hợp mẫu có thành phần được coi là đồng nhất gồm mẫu vữa xi măng cát và mẫu vật liệu đá sử dụng làm cốt liệu. Trường hợp thứ 3 là mẫu bê tông (khi mẫu gồm cả xi măng và cốt liệu). Thông số mô hình cho vật liệu xi măng và cốt liệu đá như trong Bảng 2.

Các giá trị thông số của liên kết trong Bảng 2 thực tế là các giá trị đã được hiệu chỉnh sơ bộ để cho ra kết quả về độ bền kháng nén và mô đun đàn hồi của vật liệu tương ứng: theo các giá trị mô đun đàn hồi và độ bền kháng nén trung bình của vữa xi măng cát và đá vôi. Các thông số cơ học của vật liệu xác định được từ mô hình được trình bày trong phần kết quả.

Bảng 2. Các thông số mô hình PFC2D

Các thông số của hạt		
Khối lượng riêng, ρ (kg/m ³)	2500	
Bán kính hạt nhỏ nhất, $R_{\min}$ (mm)	1	
Tỷ số giữa bán kính $R_{\max}/R_{\min}$	2	
Mô đun đàn hồi của hạt, E_c (GPa)	20,0	
Tỷ số giữa độ cứng pháp tuyến và độ cứng cắt, k_n/k_s	1	
Hệ số ma sát của hạt, μ	0.5	
Các thông số của liên kết	Xi măng	Đá cốt liệu
Hệ số bán kính liên kết $\bar{A}^*$	1	1
Mô đun đàn hồi của liên kết, $\bar{E}_c$ (GPa)	8,0	20,0
Tỷ số giữa độ cứng pháp tuyến và độ cứng cắt $\bar{K}_n, \bar{K}_s$	1,0	1,0
Độ bền kháng kéo của liên kết, $\bar{\sigma}_t$ (Mpa)	4,0	20,0
Độ bền dính $\bar{\tau}_c$ (Mpa)	4,0	20,0

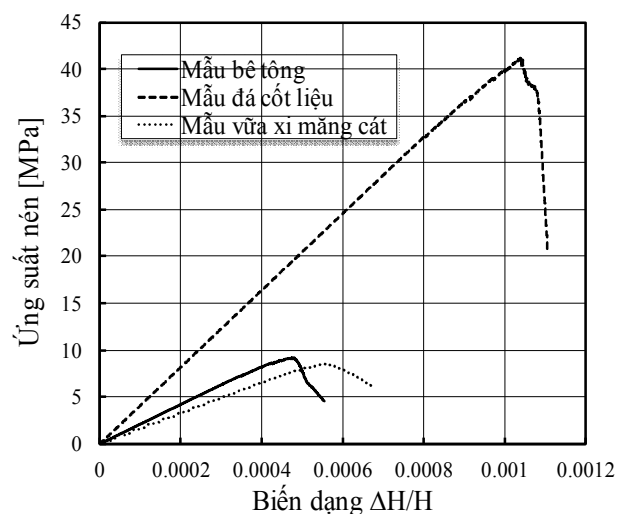
* với bán kính liên kết $\bar{R} = \bar{A}^* \cdot \min(\bar{R}_A, \bar{R}_B)$, $\bar{R}_A, \bar{R}_B$ bán kính của 2 hạt có liên kết

5. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM MÔ HÌNH

Thông qua chạy mô hình đã lập với các thông số đầu vào đã được hiệu chỉnh, kết quả quan trọng thu được là đường quan hệ ứng suất – biến dạng và số liệu về sự phát triển các vết nứt trong mẫu suốt quá trình nén. Bên cạnh đó, phần mềm PFC2D cho phép truy suất nhiều thông tin liên quan khác trong quá trình nén, sự phân bố nội lực bên trong mẫu, sự phân bố của các vết nứt, sự phân mảnh của mẫu sau khi phá hoại. Thông qua đó, chúng ta có thể đánh giá một cách chi tiết về cơ chế và hình thức phá hủy mẫu khi nén.

Sau khi có các thông số mô hình, 3 trường hợp mô hình được chạy để so sánh và đánh giá gồm: mô phỏng nén mẫu vữa xi măng cát; mô phỏng nén mẫu đá làm cốt liệu; mô phỏng nén mẫu bê tông (bao gồm vữa xi măng cát + cốt liệu). Kết quả thí nghiệm về đường quan hệ ứng suất – biến dạng của 3 trường hợp được thể hiện ở biểu đồ trong Hình 4. Từ kết quả này, các thông số cơ học của các mẫu vật liệu được xác định và trình bày trong Bảng 3. Mẫu bê tông có mô đun đàn hồi và độ bền nén cao hơn so với mẫu vữa xi măng, tuy nhiên khác nhau về độ

bền so với vữa xi măng là không lớn. Điều này cũng hoàn toàn phù hợp bởi trường hợp thí nghiệm hàm lượng thành phần cốt liệu thấp, nằm rải rác trong mẫu bê tông. Do đó, tính chất của phần xi măng đóng vai trò quyết định tới độ bền và độ cứng của bê tông.



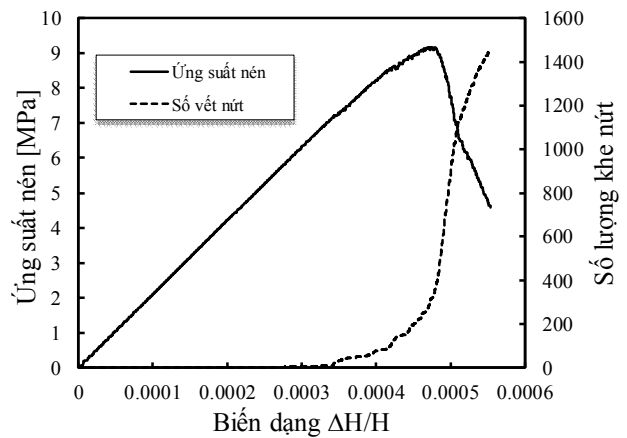
Hình 4. Biểu đồ quan hệ ứng suất – biến dạng từ kết quả thí nghiệm PFC2D cho 3 mẫu vật liệu: Vữa xi măng cát, đá cốt liệu và bê tông

Bảng 3. Các thông số cơ học của các mẫu vật liệu xác định được từ kết quả thí nghiệm mô hình nén trong PFC2D

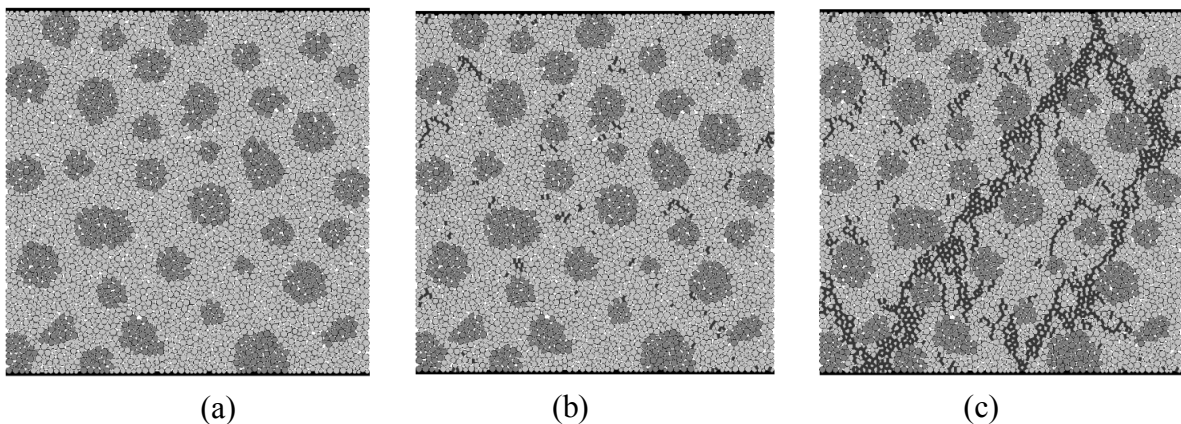
Vật liệu mô phỏng	Mô đun đàn hồi [GPa]	Độ bền nén [MPa]
Vữa xi măng cát	16,3	8,54
Đá vôi	40,8	41,1
Bê tông	21,2	9,18

Kết quả thí nghiệm mô hình cho thấy, trong quá trình nén, ứng xử của bê tông trải qua 3 giai đoạn chính: (1) trong mẫu hoàn toàn chưa có vết nứt, giữa ứng suất và biến dạng có quan hệ tuyến tính, đây là giai đoạn mẫu ứng xử đàn hồi; (2) giai đoạn vết nứt bắt đầu hình thành, các vết nứt phát triển và các vùng nứt mở rộng dần, khi đó đường con ứng suất biến dạng giảm độ dốc, đồng nghĩa với mô đun đàn hồi giảm và dần dần chuyển sang dạng phi tuyến, giai đoạn này là ứng xử đàn dẻo; (3) giai đoạn phá hủy: các vết nứt tiếp tục phát triển, liên kết với nhau tạo thành mặt phá hủy liên tục, lúc này ứng suất nén đạt giá trị đỉnh rồi giảm đột ngột. Chi tiết về quan hệ ứng suất-biến dạng và số vết nứt tăng theo quá trình nén được trình bày trong biểu đồ (Hình 5). Sự phát triển các vết nứt trong quá trình nén mẫu bê tông ở các giai

đoạn khác nhau được minh họa như trong Hình 6.



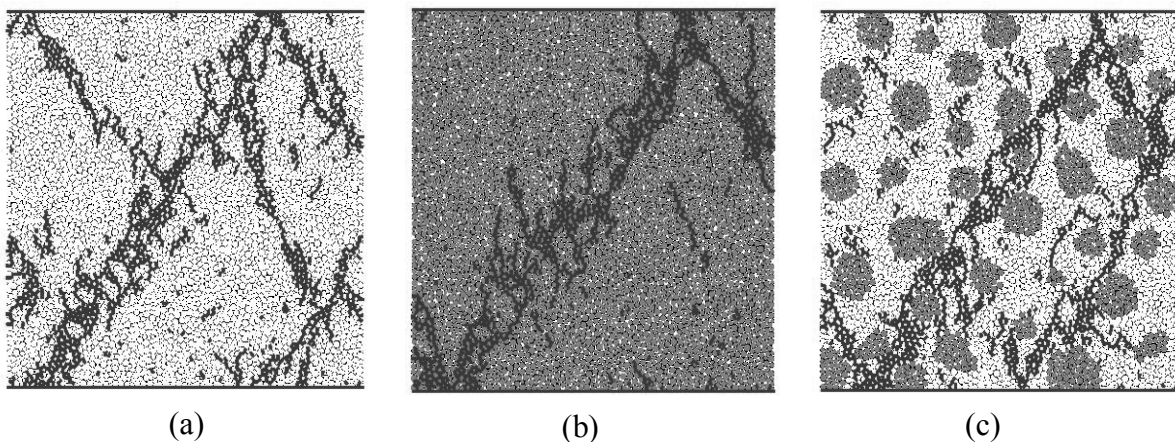
Hình 5. Biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng và sự phát triển số lượng vết nứt từ thí nghiệm nén mẫu bê tông mô hình PFC2D



Hình 6. Quá trình phát triển vết nứt trong mẫu ở các giai đoạn khi nén:
(a) Giai đoạn đàn hồi; (b) giai đoạn đàn dẻo; (c) giai đoạn phá hủy

Quan sát về sự phân bố các vết nứt sau phá hoại (Hình 7), có thể thấy đối với trường hợp thí nghiệm mẫu bê tông hầu hết các vết nứt nằm trong phần vữa xi măng cát. Hiện tượng này phù

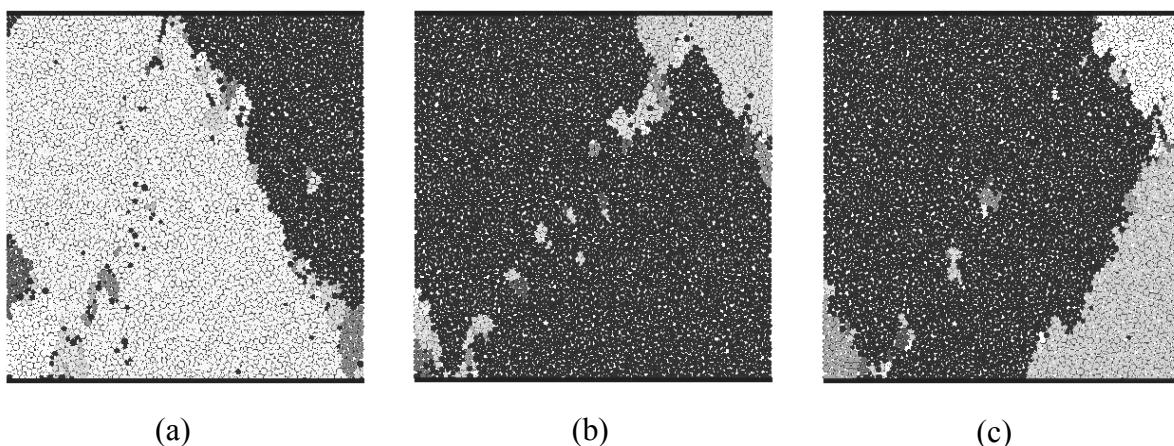
hợp với các quan sát ở thí nghiệm thực tế và cũng lý giải về vai trò quyết định của vật liệu xi măng đối với độ bền của bê tông trong trường hợp nghiên cứu.



Hình 7. So sánh vết nứt sau phá hoại của 3 trường hợp:
(a) Mẫu vữa xi măng cát; (b) Mẫu đá cốt liệu; (c) Mẫu bê tông

Hình 8 thể hiện sự phân mảnh và tách rời của mẫu sau khi phá hủy ở 3 trường hợp mô phỏng. Như vậy, nếu xác định đúng các

thông số mô hình, sử dụng mô hình số có thể dự báo hình thức vỡ của mẫu bê tông khi nén.



Hình 8. Minh họa mẫu bị phá vỡ phân mảnh sau khi nén ở các trường hợp:
(a) Mẫu vữa xi măng cát; (b) Mẫu đá làm cốt liệu; (c) Mẫu bê tông (vữa + cốt liệu)

6. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo đã trình bày việc sử dụng phương pháp PTRR vào mô phỏng ứng xử của vật liệu bê tông khi chịu nén. Bài báo chủ yếu thể hiện cách thức mô phỏng vật liệu bê tông. Mô hình mà tác giả sử dụng tuy chưa xét chi tiết các ảnh hưởng của điều kiện thí nghiệm như cách thức gia tải và tốc độ gia tải cũng như về ảnh hưởng của các thông số mô hình nhưng kết quả bước đầu cho thấy, thông qua mô hình PFC, có thể nghiên cứu

sự hình thành và phát triển các vết nứt trong quá trình nén. Việc sử dụng mô hình liên kết kép cũng rất phù hợp để mô tả vật liệu và ứng xử cơ học của vật liệu bê tông. Đây cũng là một lợi thế quan trọng của phương pháp. Bên cạnh đó, sự có mặt và vai trò của các thành phần vật liệu trong bê tông có thể mô phỏng. Qua đó, mô hình có thể sử dụng để nghiên cứu một cách chi tiết về ảnh hưởng của thành phần cũng như tính chất của từng thành phần trong bê tông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Cho, N., et al. (2007). "A clumped particle model for rock." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44(7): 997-1010.
- Cundall, P. A. (1971). A computer model for simulating progressive largescale movements in blocky rock systems. *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics*. Nancy, France.
- Cundall, P. A. and O. D. L. Strack (1979). "A discrete numerical model for granular assemblies." 29(1): 47-65.
- Cundall, P. A. and O. D. L. Strack (1979). The distinct element method as a tool for research in granular media. Report to NSF concerning grant ENG 76-20711. University of Minnesota, Department of Civil Engineering.
- Potyondy, D. O. and P. A. Cundall (2004). "A bonded-particle model for rock." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(8): 1329-1364.

Abstract:

MODELLING CONCRETE BEHAVIOUR UNDER COMPRESSION BY DISCRETE ELEMENT METHOD USING PFC2D

Modelling the mechanical behaviour of material is one of main interest in studying concrete or any other engineering material. In this paper, the discrete element method (DEM) was applied to simulate the behaviour of concrete under compression loading. An assemblage of circle particles was used to model the concrete. The particles in assemblage were binded together to create intact material. Parrallel bond model was used for the contacts between particles. The presence of aggregate and mortar in concrete was modelled by 2 different groups of particles. The results show that DEM can reproduce well the behavior of concrete. DEM enable the study the behavior of material from micro scale and allow us to study the influence of microparameters to the mechanical behavior of material.

Keywords: modelling, concrete, PFC2D, DEM

Ngày nhận bài: 19/02/2020

Ngày chấp nhận đăng: 21/3/2020