

DOI:10.22144/ctu.jvn.2023.057

TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC (DEM) ỨNG DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU VẬT LIỆU ĐỊA KỸ THUẬT

Hồ Thị Kim Thoa^{1*} và Võ Văn Đẩu²

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Bách khoa, Trường Đại học Cần Thơ

²Khoa Kỹ thuật Công trình Giao thông, Trường Bách khoa, Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Hồ Thị Kim Thoa (email: htkthoa@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 31/10/2022

Ngày nhận bài sửa: 03/12/2022

Ngày duyệt đăng: 06/01/2023

Title:

Overview of the application of the Discrete Element Method in Geomaterials research

Từ khóa:

Phần mềm PFC, Phần tử rời rạc, thí nghiệm ba trục, thí nghiệm đơn trục, vật liệu địa kỹ thuật

Keywords:

Discrete element method, Geomaterials, PFC software, Triaxial tests, Uniaxial tests

ABSTRACT

The discrete element method (DEM) is increasingly superior to the finite element method (FEM) in current geotechnical research. This paper presents an overview of the achievements of the DEM method in recent years. The results show that DEM is very suitable for simulating the properties of materials, especially granular materials. Currently, this method is being studied on adhesive materials, which makes it difficult to simulate particle shape and interaction between particles. However, some recent studies show future potential for the application of the DEM method on adhesive materials.

TÓM TẮT

Phương pháp phần tử rời rạc (DEM) ngày càng thể hiện tính vượt trội so với phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong các nghiên cứu về địa kỹ thuật hiện nay. Bài báo giới thiệu một cách tổng quan về những thành tựu mà phương pháp DEM đã đạt được trong những năm gần đây. Các kết quả cho thấy DEM rất phù hợp trong việc mô phỏng các đặc tính của vật liệu đặc biệt là các vật liệu rời rạc. Hiện nay, phương pháp này đang được nghiên cứu trên các loại vật liệu kết dính, đây là loại vật liệu gây khó khăn trong việc mô phỏng hình dạng hạt và sự tương tác giữa các hạt. Tuy nhiên, một số nghiên cứu gần đây cho thấy tiềm năng trong tương lai đối với việc áp dụng phương pháp DEM trên vật liệu kết dính.

1. LỜI NÓI ĐẦU

Các loại vật liệu địa kỹ thuật như đất, đá, bê tông,... đã trở nên quá quen thuộc trong lĩnh vực xây dựng nói chung. Việc phân tích đặc tính của các vật liệu bằng nhiều phương pháp mới và hiệu quả hơn đã ngày càng phổ biến. Thông qua đó, các tính chất cơ lý, các ứng xử của vật liệu ngày càng phù hợp với thực tế, từ đó các nhà nghiên cứu có thể đánh giá và lựa chọn các loại vật liệu địa kỹ thuật phù hợp với phạm vi áp dụng.

Các phương pháp mô hình số được cho là những mô hình được sử dụng đầu tiên cho các nghiên cứu về sức kháng cắt của vật liệu địa kỹ thuật (Donzé, et

al., 2009). Tuy nhiên, đất cũng như các loại vật liệu địa kỹ thuật khác mang đặc tính không liên tục và không đồng nhất nên đặc tính cơ học của chúng rất phức tạp, trong đó phải kể đến sự xuất hiện đứt gãy, hư hỏng bên trong và sự tương tác giữa các hạt thành phần (Donzé, et al., 2009). Chính vì thế việc áp dụng các mô hình số truyền thống trong việc phân tích các đặc tính của đất gặp nhiều khó khăn. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) phát triển khá sớm và phổ biến trong lĩnh vực địa kỹ thuật. FEM áp dụng mô hình mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng (constitutive model) sử dụng các thông số mô hình để xác định ứng xử của vật liệu.

Mặc dù phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) cũng đạt được một số kết quả trong nghiên cứu đặc tính của vật liệu như: Bolton (1986), Belheine et al. (2008), Golmaei and Boulon (2012), đã nghiên cứu mối tương quan giữa độ cứng, cường độ và các thông số trạng thái của vật liệu rời rạc và vật liệu kết dính. Honkanadavar and Sharma (2016), Hejazi et al. (2008), Brinkgreve et al. (2010) đã xây dựng công thức thực nghiệm và đề xuất các tham số mô hình Plaxis Hardening Soil với độ cứng biến dạng nhỏ, trên cơ sở độ chặt tương đối (Fergani et al., 2020). Ngoài ra, các phương pháp liên tục, chẳng hạn như phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và phương pháp khác biệt hữu hạn (FDM), có hiệu quả cao hơn và vẫn là phương pháp được sử dụng phổ biến cho các ứng dụng kỹ thuật cho đến nay. Tuy nhiên, phương pháp liên tục gặp khó khăn khi xử lý biến dạng lớn và đứt gãy trong vật liệu kỹ thuật (Jiang et al., 2020). DEM là một phương pháp mô phỏng phù hợp để phân tích các tương tác trong vật liệu ở cấp độ vi mô. Nhiều thử nghiệm không thể xử lý sự tương tác giữa các vật liệu ở cấp độ vi mô, nhưng DEM là một cách tốt để tìm hiểu các cơ chế ở cấp độ vi mô. Do đó, nhiều tác giả đã sử dụng DEM để nghiên cứu tính chất của vật liệu trong những năm gần đây (Yao, et al., 2022). Ngoài ra, phương pháp DEM thích hợp trong mô phỏng sự lan truyền vết nứt, sự phân mảnh và các vấn đề biến dạng lớn trong nghiên cứu địa kỹ thuật (Ho & Weng, 2021).

2. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC (DEM)

Phương pháp phần tử rời rạc DEM được Cundall (1971) giới thiệu để phân tích các vấn đề cơ học đá và sau đó được Cundall (1979) áp dụng vào nghiên cứu các đặc tính cơ học của đất. Từ những kết quả đạt được ban đầu, đến nay phương pháp DEM đã được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau: vật liệu địa kỹ thuật, kết cấu, mặt đường và ngay cả lĩnh vực cơ khí.

Phương pháp DEM giả định vật liệu có thể được biểu diễn bằng một tập hợp các hạt cứng hoàn toàn và tương tác với nhau tại điểm tiếp xúc (contact) và tuân theo định luật liên kết (contact law) cổ kết / ma sát. Các liên kết trong DEM có thể bị phá vỡ, điều này cho phép mô phỏng được sự đứt gãy phát sinh từ bên trong vật liệu cũng như sự lan truyền các vết nứt trong suốt quá trình mô phỏng (Labra et al., 2012).

Trong DEM, tương tác của các hạt được coi như một quá trình động lực học với các trạng thái cân bằng phát triển bất cứ khi nào nội lực cân bằng. Lực

tiếp xúc và chuyển vị của một tập hợp các hạt chịu áp lực được xác định thông qua việc xác định chuyển động của các hạt riêng lẻ. Chuyển vị thu được từ mô hình nhờ vào chuyển động của các hạt hoặc do lực khối gây ra. Tính chất động trong mô hình DEM được thể hiện thông qua bước thời gian (timestep), trong đó vận tốc và gia tốc được giả định không đổi qua các bước thời gian. Trong phương pháp DEM, vật liệu dạng hạt được mô phỏng với các hạt riêng lẻ và tương tác của chúng được mô tả rõ ràng. Do đó, một số đặc tính vi mô của mẫu thí nghiệm không thể kiểm soát hoặc quan sát bằng mắt thường, sẽ được quan sát dễ dàng và phân tích hiệu quả thông qua phương pháp DEM (Potyondy & Cundall, 2004).

Các tính toán số được thực hiện với phần mềm thương mại PFC (Particle Flow Code: PFC2D và PFC3D). Trong những năm gần đây, PFC đã được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng thành công để giải quyết nhiều bài toán kỹ thuật (Miao et al., 2017). PFC là một công cụ mô phỏng dựa trên phương pháp phần tử rời rạc và có thể mô hình hóa chuyển động động và tương tác của các tập hợp các hạt hình cầu có kích thước tùy ý. Các phần tử riêng biệt, được gọi là các quả bóng (ball), tương tác với nhau dựa trên định luật lực-chuyển vị và định luật chuyển động thứ hai của Newton. Tính chất vật liệu của các phần tử rời rạc (bóng và tường – ball và wall) được đặc trưng bởi độ cứng và ma sát. Ngoài ra, các quả bóng được đặc trưng bởi bán kính bóng và khối lượng riêng (Teufelsbauer et al., 2009). Việc tính toán trong DEM tuân theo định luật thứ hai Newton (áp dụng cho thành phần hạt) và định luật lực-chuyển vị (tại các điểm tiếp xúc). Định luật thứ hai Newton được sử dụng để xác định chuyển động của mỗi hạt phát sinh từ lực tiếp xúc và lực khối tác động lên nó, trong khi định luật lực-chuyển vị được sử dụng để cập nhật các lực tiếp xúc phát sinh từ chuyển động tương đối tại mỗi lần tiếp xúc (Itasca Consulting Group Inc, 2016).

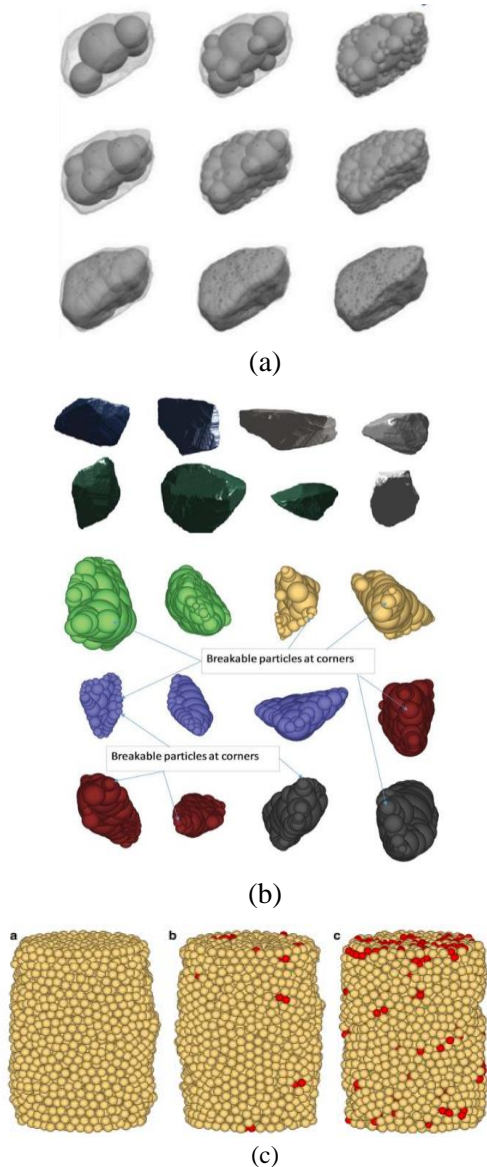
3. MỘT SỐ MÔ HÌNH DEM CHO VẬT LIỆU ĐỊA KỸ THUẬT

3.1. Hình dạng hạt (ball) trong mô hình DEM

Hầu hết các mô hình DEM đều sử dụng dạng hạt tròn trong mô hình 2D (Potyondy & Cundall, 2004; de Bono & McDowell, 2014; Ho & Weng, 2021) và hình cầu trong mô hình 3D (Belheinea et al., 2009; Nosewicz et al., 2017; Hazzar et al., 2020) vì các phần tử chỉ có một giá trị là bán kính, và dễ dàng xác định kích thước hình học cũng như dạng tiếp xúc giữa các hạt. Tuy nhiên, các hình dạng hạt này

không thể hiện chính xác đặc tính thực của vật liệu, dẫn đến kết quả có sự sai khác so với thực nghiệm.

Vì vậy, các nghiên cứu gần đây đã cải tiến các mô hình và tạo mẫu hạt có hình dạng gần đúng với hình dạng hạt vật liệu: đá tảng (Zhang et al., 2020); vật liệu đá vỡ (Ngo & Indraratna, 2020). Hình 1 thể hiện một số hình dạng hạt trong nghiên cứu phần tử rời rạc.



Hình 1. Hình dạng hạt trong mô phỏng một số loại vật liệu rời rạc: (a) Đá nghiền (Ngo & Indraratna, 2020), (b) Đá tảng (Zhang et al., 2020); (c) Cát nghiền (de Bono & McDowell, 2014)

3.2. Mô hình DEM đối với vật liệu rời rạc

Các mô hình DEM phát triển từ mô hình đơn giản (linear) đến phức tạp ngày càng phù hợp với đặc tính cơ học của vật liệu. Bảng 1 tóm tắt các mô hình DEM phổ biến trong nghiên cứu vật liệu địa kỹ thuật.

Bảng 1. Tóm tắt tính chất một số mô hình phổ biến trong DEM (Itasca Consulting Group Inc, 2016)

Tên mô hình	Tóm tắt tính chất
Linear contact	Mô hình đàn hồi tuyến tính, ma sát và nhớt cho vật liệu rời rạc
Linear contact bond	Mô hình tuyến tính và liên kết tiếp xúc cho vật liệu kết dính
Linear parallel bond	Mô hình tuyến tính và liên kết song song cho vật liệu kết dính
Smooth joint	Tạo một liên kết dạng vết nứt trong vật liệu kết dính
Hertz	Mô hình đàn hồi, ma sát và nhớt phi tuyến tính cho các vật liệu rời rạc liên quan đến chuyển động và đập.

3.2.1. Mô hình tuyến tính (Linear Contact model)

Mô hình tuyến tính (LCM) là mô hình không liên kết phổ biến của mô hình hạt liên kết (BPM) theo phương pháp DEM. Trong tập hợp hạt, do khoảng cách bề mặt giữa hai hạt dương (lớn hơn 0), nên không tồn tại liên kết tiếp xúc giữa chúng. Tuy nhiên, trong quá trình thực hiện mô hình, khoảng cách bề mặt của chúng có thể trở thành 0 (hoặc âm khi các hạt chồng lấp lên nhau) và xuất hiện một liên kết tiếp xúc mới giữa chúng. Liên hệ mới này cũng là một LCM. LCM tạo nên ứng xử đàn hồi tuyến tính theo phương pháp tuyến và phương tiếp tuyến thông qua độ cứng pháp tuyến (k_n) và tiếp tuyến (k_s) tại điểm tiếp xúc. Tuy nhiên, đối với phương tiếp tuyến, lực cắt tối đa được giới hạn bằng cách áp đặt hệ số ma sát (μ). Hơn nữa, LCM không thể chịu lực kéo. Điều này có nghĩa là khi khoảng cách bề mặt trở nên dương thì tiếp điểm bị vô hiệu hóa. Ngoài ra, LCM giả định một tiếp điểm là một giao diện vô cùng nhỏ, nên nó không thể chống lại sự quay tương đối (Mehrnpour & Kulatilake, 2017). Mô hình tuyến tính phù hợp với hầu hết các loại vật liệu địa kỹ thuật rời rạc như đất rời (Cil & Alshibli, 2014; Ho & Weng, 2021), đá (Ngo et al., 2017; Zhang et al., 2020), cát (Yang et al., 2009; Wu et al., 2022), hạt thủy tinh (Hazzara et al., 2020; Wu et al., 2021), ...

3.2.2. Mô hình liên kết tiếp xúc tiếp tuyến (Linear Contact Bond model)

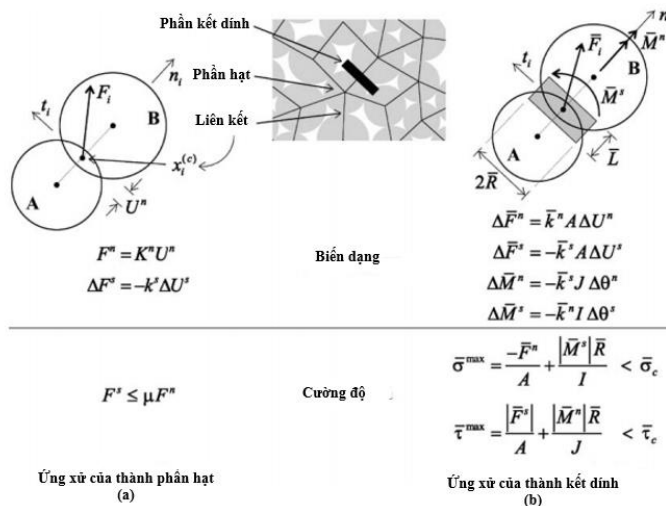
Mô hình liên kết tiếp xúc tuyến tính với thành phần xóc được bỏ qua và khoảng cách tiếp xúc giữa các hạt bằng không. Liên kết tiếp xúc có thể được hình dung như một cặp lò xo đàn hồi có độ cứng pháp tuyến và độ cứng tiếp tuyến không đổi tác động tại điểm tiếp xúc. Hai lò xo này có độ bền kéo và lực cắt xác định. Sự tồn tại của liên kết tiếp xúc loại trừ khả năng trượt theo đó lực cắt bị giới hạn bởi tích của hệ số ma sát và lực pháp tuyến. Liên kết tiếp xúc cho phép lực kéo phát triển tại điểm tiếp xúc có khoảng cách giữa các hạt. Lực kéo bị giới hạn bởi độ bền kéo, lực cắt bị giới hạn bởi cường độ cắt. Nếu lực pháp tuyến vượt quá độ bền kéo, liên kết sẽ bị đứt và cả lực pháp tuyến và lực cắt được đặt bằng không. Nếu lực cắt vượt quá cường độ cắt, liên kết sẽ bị phá vỡ, nhưng lực tiếp xúc không bị thay đổi, với điều kiện là lực cắt không vượt quá tích của hệ số ma sát và lực pháp tuyến. Mô hình liên kết tiếp xúc phù hợp với các loại vật liệu địa kỹ thuật: cát (Shen et al., 2019); đá (Jiang et al., 2015); vật liệu có tính chất xi măng (Brown et al., 2014);...

3.2.3. Mô hình liên kết song song (Linear Parallel bond model)

Liên kết song song tạo nên ứng xử của vật liệu giống như xi măng tại vị trí tiếp xúc có kích thước hữu hạn. Liên kết gồm thành phần liên kết song song hoạt động cùng với thành phần tuyến tính và thiết lập tương tác đàn hồi giữa các hạt. Các liên kết song song có thể tạo ra cả lực và mômen giữa các phần tử. Một liên kết song song có thể được hình dung như một tập hợp các lò xo đàn hồi có độ cứng pháp

tuyến và độ cứng tiếp tuyến không đổi, phân bố đều trên một (hình chữ nhật trong 2D; hình tròn trong không gian 3D) nằm trên mặt phẳng tiếp xúc và có tâm tại điểm tiếp xúc. Các lò xo này hoạt động song song với các lò xo của thành phần tuyến tính. Chuyển động tương đối tại điểm tiếp xúc, xảy ra sau khi liên kết song song được tạo ra, gây ra lực và mômen phát triển bên trong vật liệu liên kết. Lực và mômen này tác dụng lên các hạt tiếp xúc và có thể liên quan đến ứng suất pháp tuyến và lực tiếp tuyến cực đại tác dụng trong vật liệu liên kết ở ngoại vi liên kết. Nếu một trong hai ứng suất tối đa này vượt quá cường độ liên kết tương ứng của nó, liên kết song song sẽ bị phá vỡ và vật liệu liên kết bị loại bỏ khỏi mô hình cùng với lực, mômen và độ cứng đi kèm của nó.

Hình 2 mô tả mối quan hệ giữa lực và chuyển vị trong mô hình vật liệu có tính kết dính (grain-cement system) thông qua mô hình liên kết song song trong DEM. Khi đó vật liệu được chia thành hai thành phần: thành phần hạt (grain) và thành phần kết dính (cement) hình thành do hai hạt chồng lên nhau tạo thành liên kết tiếp xúc (contact bond) (Hình 1b). Mối tương quan giữa lực và chuyển vị của mỗi thành phần được xác định thông qua những thông số như độ cứng (độ cứng pháp và tiếp tuyến), hệ số ma sát giữa bề mặt các hạt. Đối với thành phần hạt, tương tác được giả định là tuyến tính (linear) chỉ có chuyển vị tịnh tiến, trong khi thành phần kết dính sinh ra giá trị moment trong quá trình chuyển động. Khi độ bền kéo và độ bền cắt trong liên kết tiếp xúc vượt quá giới hạn độ bền của vật liệu, liên kết này sẽ bị phá vỡ và trở lại liên kết tuyến tính (linear). Khi đó cường độ của vật liệu sẽ bị giảm dần.



Hình 2. Mối quan hệ giữa lực và chuyển vị trong mô hình song song: (a) Thành phần hạt, (b) Thành phần kết dính (Potyondy & Cundall, 2004)

Mô hình liên kết song song được áp dụng rộng rãi cho các loại vật liệu địa kỹ thuật có tính kết dính (cemented) như: đất sỏi có tính kết dính (Ho & Weng, 2021), sa thạch kết dính yếu (Heo et al, 2022), cát kết dính (Shen et al., 2016), đá (Potyondy & Cundall, 2004), bê tông (Suchorzewski et al., 2017),...

3.2.4. Mô hình Hertz (Hertz contact model)

Mô hình liên kết Hertz bao gồm một công thức phi tuyến tính dựa trên phép tính gần đúng của lý thuyết Mindlin và Deresiewicz. Mô hình tiếp xúc Hertz tạo ra cả lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến dựa trên phân tích lý thuyết về sự biến dạng của các hạt, đàn hồi khi tiếp xúc ma sát. Độ cứng của mô hình tiếp xúc tuyến tính có thể liên quan đến ứng suất Hertzian bằng cách xem xét sau. Khi hai quả bóng va chạm, diện tích tiếp xúc tăng lên khi sự chông chéo của các hạt tăng lên. Độ cứng của mô hình tuyến tính không phụ thuộc vào sự chông lấp của hạt (Teufelsbauer et al., 2009). Mô hình tiếp xúc Hertz sử dụng các thuộc tính vật liệu như hệ số Poisson và mô đun cắt hữu hiệu để xác định ứng xử tại tiếp điểm. Mô hình tiếp xúc Hertz tương tự mô hình tuyến tính, kích thước của các hạt được tính toán lại trong quá trình tính toán lực – chuyển vị (Dong et al., 2018). Mô hình liên kết Hertz được áp dụng trong nghiên cứu một số loại vật liệu địa kỹ thuật như cát nghiền (de Bono & McDowell, 2014); đá vỡ (Tolomeo & McDowell, 2022);...

3.2.5. Mô hình Smooth joint (Smooth joint contact model)

Mô hình smooth joint mô phỏng hành vi của giao diện phẳng với sự giãn nở bất kể hướng tiếp xúc của hạt cục bộ dọc theo giao diện. Ứng xử của một joint ma sát hoặc liên kết có thể được mô hình hóa bằng cách gán các mô hình smooth joint cho tất cả các tiếp xúc giữa các hạt nằm ở các phía đối diện của joint. Mô hình smooth joint tạo nên ứng xử vĩ mô của một giao diện đàn hồi tuyến tính và liên kết hoặc ma sát với sự giãn nở. Ứng xử của giao diện liên kết là đàn hồi tuyến tính cho đến khi vượt quá giới hạn cường độ và liên kết bị phá vỡ, làm cho giao diện không bị ràng buộc; ứng xử của một giao diện không liên kết là đàn hồi tuyến tính và ma sát với sự giãn nở, với độ trượt được cung cấp bằng cách áp đặt giới hạn lên lực cắt.

Mô hình smooth joint được áp dụng khá phổ biến trong nghiên cứu về cơ học đá, đặc biệt là đá khối (Lambert and Coll, 2014; Huang et al., 2015; Le et al., 2022).

Bảng 2 tóm tắt một số mô hình liên kết áp dụng phương pháp DEM cho một số loại vật liệu địa kỹ thuật.

Bảng 2 tóm tắt một số mô hình liên kết áp dụng phương pháp DEM cho một số loại vật liệu địa kỹ thuật.

Bảng 2. Một số mô hình DEM điển hình cho một số loại vật liệu địa kỹ thuật

Loại vật liệu	Kích thước hạt trung bình (mm)	Tên mô hình tiếp xúc	Tác giả
Đá Granite	1,53	Linear parallel bond model	Potyondy and Cundall (2004)
Cát nghiền	4,0	Hertz–Mindlin model	de Bono and McDowell (2014)
Đất sỏi (không kết dính)	0,25 – 50,8	Linear contact model	Ho and Weng (2021)
Đất sỏi (có kết dính)	4,74 – 50,8	Linear parallel bond model	Ho and Weng (2021)
Hạt thủy tinh	1,25 – 2,0	Linear contact model	Hazzar et al. (2020)
Vật liệu đá vỡ (có tạp chất)	0,5	Linear parallel bond model	Ngo et al. (2020)
Đất cát pha	0,5	Linear model	Nandanwar and Chen (2017)
Cát kết dính	0,1 – 0,3	Linear parallel bond model	Shen et al. (2016)
Đá khối	1,0 – 3,0	Smooth joint contact model	Huang et al. (2015)
Vật liệu có tính xi măng	1,15 – 2,71	Linear bond contact model	Brown et al. (2014)

3.3. Một số kết quả ứng dụng mô hình DEM đối với vật liệu rời rạc

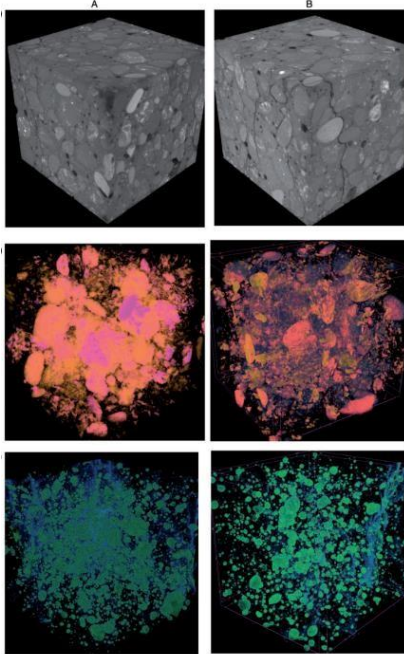
3.3.1. Mô phỏng thí nghiệm nén đơn trục

Mô phỏng thí nghiệm nén đơn trục thường được áp dụng cho các mẫu thí nghiệm bê tông. Khi nghiên cứu về vật liệu bê tông, hiện tượng "nứt gãy" (quá trình nứt) là một hiện tượng cơ bản trong các vật liệu gần như giòn và dễ gãy, nghĩa là trong các vật liệu bị vỡ mà không có biến dạng đáng kể khi chịu ứng

suất. Đó là một lý do chính của hư hỏng cơ học khi chịu tải, góp phần làm giảm đáng kể độ bền của vật liệu (Nitka & Tejchmen, 2015).

Suchorzewski et al. (2017) đã mô phỏng hóa quá trình nứt gãy của bê tông bằng phương pháp DEM qua thí nghiệm nén đơn trục, vật liệu bê tông được mô phỏng hóa bằng vật liệu bốn pha bởi các hạt cốt liệu, thành phần mịn xi măng, thành phần vùng chuyển tiếp và lỗ rỗng thông qua các hình ảnh thực tế (Hình 3).

Coré et al. (2017) đã mô phỏng quá trình nứt gãy động của vật liệu composite cấu trúc hình cầu rỗng (HSS) bằng phương pháp DEM (Hình 4). Kết quả cho thấy đây là một cách thú vị để mô phỏng hành vi cơ học của vật liệu giòn. Nó cho phép chuyển vị và biến dạng lớn và sự đứt gãy của vật liệu.



Hình 3. Mô hình hóa nứt của bê tông

(Suchorzewski et al., 2017)

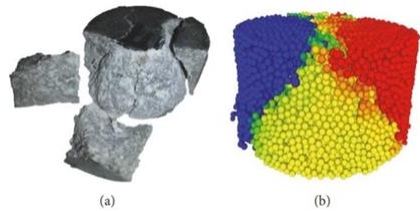
Li1 and Tang (2020) phát triển một phương pháp mới để xây dựng các mô hình số của vật liệu RCC (bê tông đầm lăn) bằng cách sử dụng PFC ba chiều dựa trên các mẫu RCC thu được trong các điều kiện xây dựng điển hình. Các hình dạng hạt cốt liệu được thu thập từ thực tế, sau đó được mô phỏng dưới dạng hình học 3D và được mô phỏng bằng các phần tử hạt trong PFC (Hình 5). Phương pháp được đề xuất có thể tránh được những nhược điểm và tiêu tốn thời gian của các thuật toán thí nghiệm thông thường và

tạo điều kiện tiên quyết cho các nghiên cứu tiếp theo về các đặc tính đầm nén của RCC với thời gian lắp đặt khác nhau.

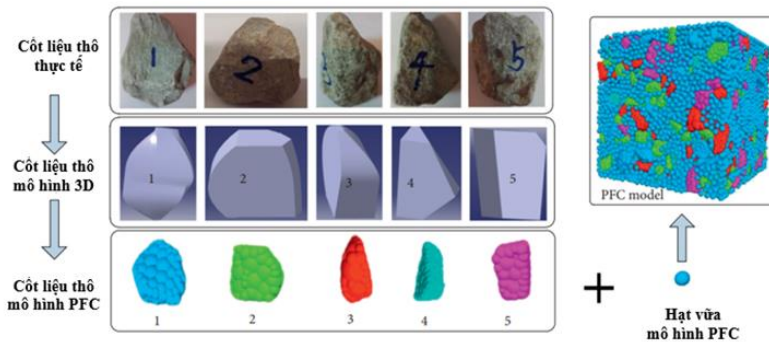
3.3.2. Mô phỏng thí nghiệm ba trục

Thí nghiệm ba trục là một loại thí nghiệm cắt đối với vật liệu rắn được thực hiện trong khi mẫu thử chịu áp lực hông giới hạn ở tất cả các mặt. Áp lực hông được tạo ra trong một buồng chất lỏng để mô phỏng ứng suất xung quanh vật liệu. Thí nghiệm ba trục là thí nghiệm phổ biến trong phòng thí nghiệm nhằm xác định sức kháng cắt của vật liệu rời rạc (Hazzar et al., 2020).

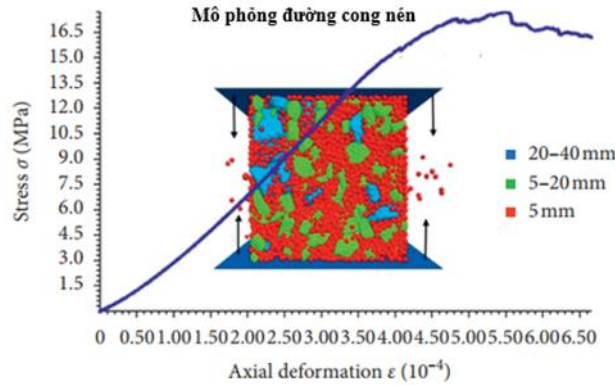
Mẫu thí nghiệm ba trục thường có dạng hình trụ, đường kính mẫu từ 38mm đến 100mm. Chiều cao mẫu có tỉ lệ xấp xỉ 2:1 so với đường kính mẫu và được giới hạn bởi màng cao su. Một số trường hợp nghiên cứu đặc biệt, thí nghiệm ba trục còn được thực hiện bởi mẫu lớn có đường kính 305mm và chiều cao 610mm như trong nghiên cứu đặc tính của đất sỏi (gravelly soil) được thực hiện bởi Chu et al. (2010) và Weng et al. (2013). Sau bước chuẩn bị ban đầu, mẫu được làm bão hòa, cô kết mẫu và quá trình cắt mẫu, cho phép quan sát được ứng xử của đất trong các điều kiện có thể gần đúng với điều kiện thực tế. Trong giai đoạn cắt, lực tác dụng lên mẫu theo phương dọc trục, thông thường dạng nén, hoặc dạng kéo. Ngoài ra, nhiều trạng thái đường ứng suất được thực hiện khi thí nghiệm ba trục để phân tích ứng xử của vật liệu, được thể hiện ở Hình 6.



Hình 4. Kết quả mô phỏng mẫu bị phá hoại thí nghiệm nén đơn trục đối với vật liệu (Coré et al., 2017)



(a)

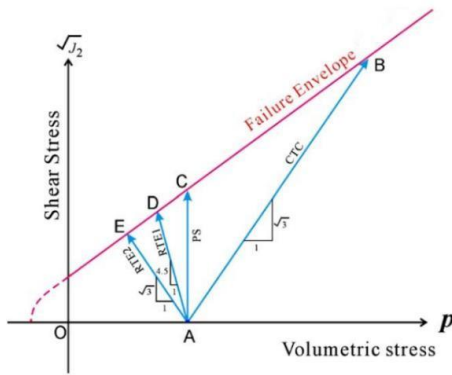


(b)

Hình 5. (a) Mô phỏng hình dạng hạt trong PFC, (b) Đường cong ứng suất và hình dạng phá hoại của mẫu RCC bằng phương pháp DEM (Lil & Tang, 2020)

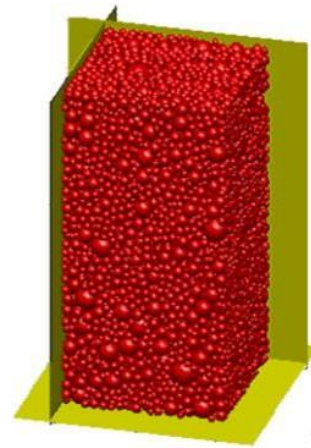
Các mẫu thử dùng trong mô phỏng ba trục được xây dựng bởi mô hình DEM ban đầu là các mẫu lập phương (Belheine et al., 2009), sau đó phát triển trên các mẫu hình trụ (de Bono & McDowell, 2014; Hazzar et al., 2020; Ngo et al., 2020) như Hình 7. Các kết quả mô phỏng thí nghiệm ba trục với nhiều cấp áp lực hông cho thấy rõ mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong mô phỏng phù hợp với kết quả thí nghiệm trong phòng (Hình 8).

các phần tử rời rạc đa diện thực tế hơn sẽ đại diện cho hình dạng các hạt tự nhiên (Hình 8b). Kết quả chứng tỏ rằng, đá nghiền bị bẩn sẽ có độ bền kém hơn.

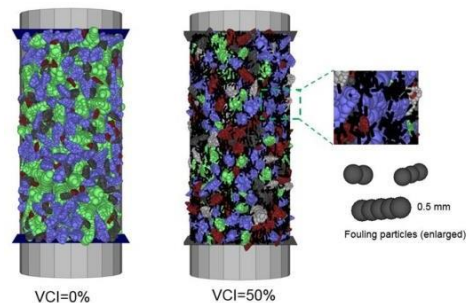


Hình 6. Sơ đồ minh họa đường ứng suất được thực hiện trong thí nghiệm ba trục: PS = cắt thuần túy, CTC = nén ba trục thông thường, RTE = kéo giảm áp lực hông (Weng et al., 2004)

Kết quả cho thấy sự biến dạng của đá nghiền bị bám bẩn đã được kiểm tra bằng các thử nghiệm ba trục mẫu lớn bằng mô hình phân tử rời rạc (DEM). Ngoài ra, mô phỏng cũng đánh giá được sự ảnh hưởng của sự bám bẩn của đất sét làm thay đổi độ bền cắt và các đặc tính cơ học của đá nghiền như thế nào. Hình dạng hạt trong mô phỏng được xây dựng trên hình dạng thực của đá nghiền bằng cách sử dụng hình ảnh tổng hợp 3D và máy quét laser để tạo ra



(a)

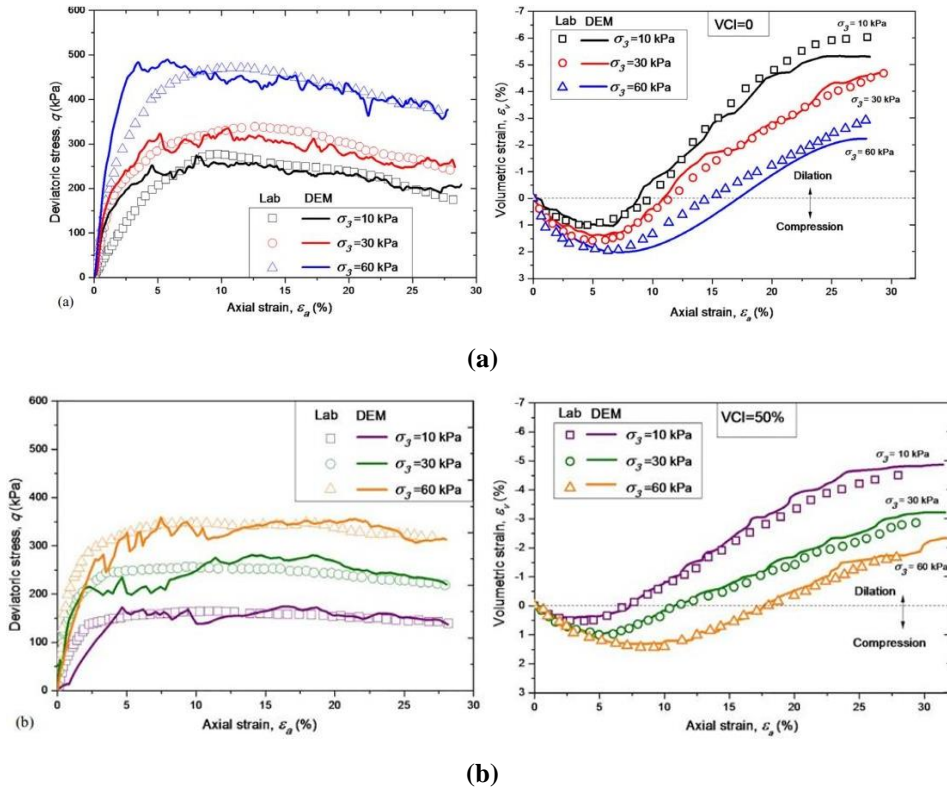


(b)

Hình 7. Hình dạng mẫu trong thí nghiệm ba trục: (a) Mẫu lập phương (Belheine et al., 2009), (b) Mẫu trụ (Ngo et al., 2020)

Hơn thế nữa, thông qua việc mô phỏng thí nghiệm ba trục bằng DEM, biến dạng của mẫu thí nghiệm có thể dễ dàng quan sát được suốt quá trình

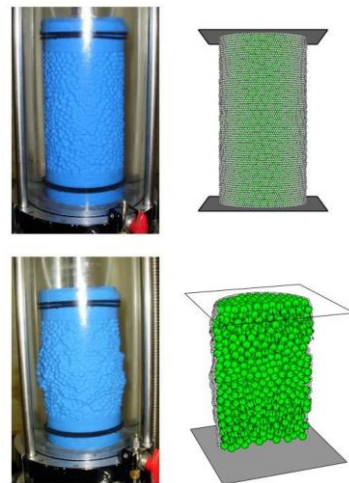
bị cắt, cũng như những tương tác, biến dạng bên trong mẫu, điều không thể quan sát được trong quá trình thực hiện thí nghiệm trong phòng (Hình 9).



Hình 8. Kết quả mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong thí nghiệm ba trục: (a) Vật liệu đá nghiền sạch, (b) Vật liệu đá nghiền có độ bền 50% (Ngo et al., 2020)

3.4. Mô hình DEM đối với vật liệu kết dính

Phương pháp phân tử rời rạc (DEM) thường ít được sử dụng trong việc mô phỏng các loại đất dính vì kích thước các hạt sét rất nhỏ gây khó khăn trong việc mô hình hóa dạng hạt của đất sét. de Bono & McDowell (2022) đã đề xuất phương pháp tiếp cận mới trong mô phỏng sét kaolinite bằng phương pháp DEM. Trong nghiên cứu này, các mẫu sét được cấu tạo từ các tấm sét mỏng hình lục giác (Hình 10). Các tấm sét có đường kính tối đa của tấm sét là 1,0 μm và chiều dày 0,04 μm, được mô phỏng từ các hạt hình cầu (được giả định là cứng hoàn toàn), mỗi tấm sét cấu tạo bởi 812 hạt có tỉ trọng 3,25 g/cm³. Trong đó có 152 hạt có kích thước nhỏ hơn (màu xanh dương) tạo nên cạnh của tấm sét.



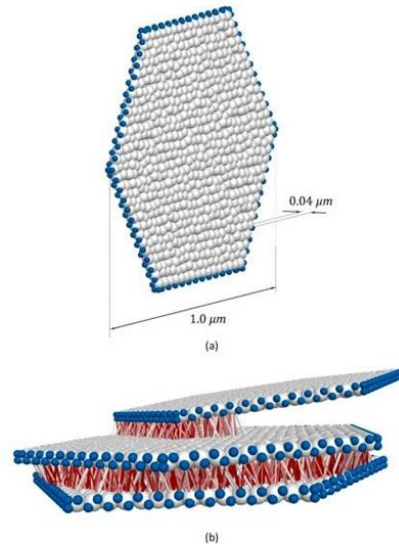
Hình 9. Mô phỏng biến dạng của vật liệu và chuyển vị bên trong (Cil & Alshibli, 2014)

Khi đó tương tác xuất hiện giữa các hạt có thể xảy ra là: (1) Tương tác giữa mặt-mặt (FF); (2) Tương tác giữa cạnh-mặt (EF); (3) Tương tác giữa cạnh-cạnh (EE). Khi đó tương tác EF và EE được xem là các tấm kết dính, và tương tác FF được xem là tấm cốt liệu (Hình 11).

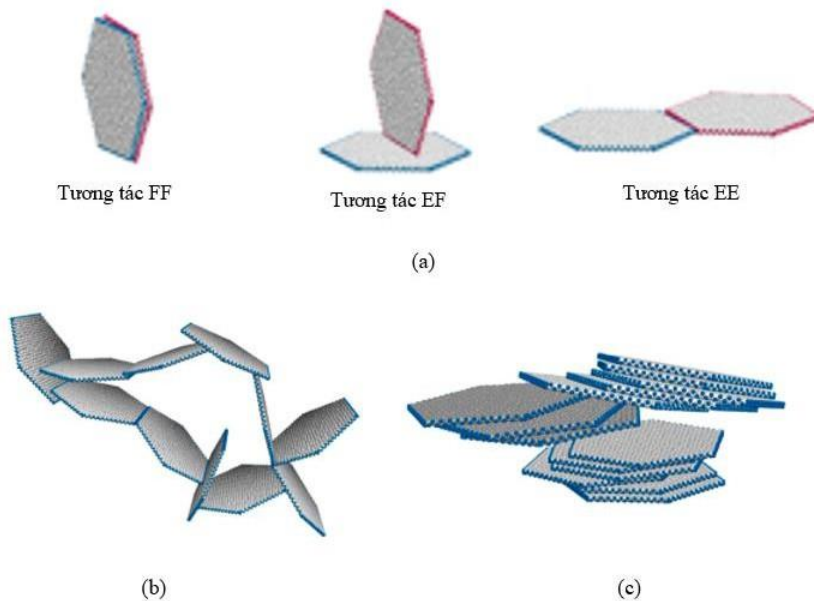
Trước khi tiến hành mô phỏng thí nghiệm nén đơn trục, các mẫu sét hình trụ có đường kính 10 μm và chiều cao 20 μm được cấu tạo từ 3628 tấm sét có cấu tạo như Hình 12 và tổng số hạt trong mô phỏng này gần 3.000.000 hạt. Các tấm sét được tạo ra ngẫu nhiên và được sắp xếp lại dưới tác động của trọng lực cho đến khi vận tốc bằng 0. Sau khi tạo mẫu, quá trình nén đơn trục được tiến hành bằng cách áp tải trọng lên biên trên và biên dưới của mẫu sử dụng “servo control”.

Để tạo điều kiện thuận lợi cho việc tiêu tán động năng trong quá trình mô phỏng, các mô phỏng này sử dụng hệ số giảm chấn rất nhỏ (0,02) để đạt trạng thái cân bằng. Nghiên cứu này tiến hành trên hai loại mẫu sét: mẫu kiềm (A) pH 9 với tỉ lệ rỗng là 3; mẫu

axit (B) pH 4 có cấu trúc kéo dài khắp khối trụ và tỉ lệ rỗng lên đến 15 (Hình 12).



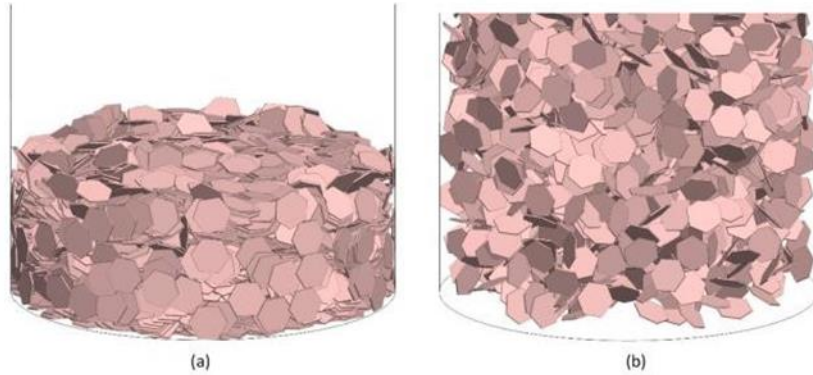
Hình 10. Mô phỏng các tấm sét từ các hạt dạng hình cầu (de Bono & McDowell, 2022)



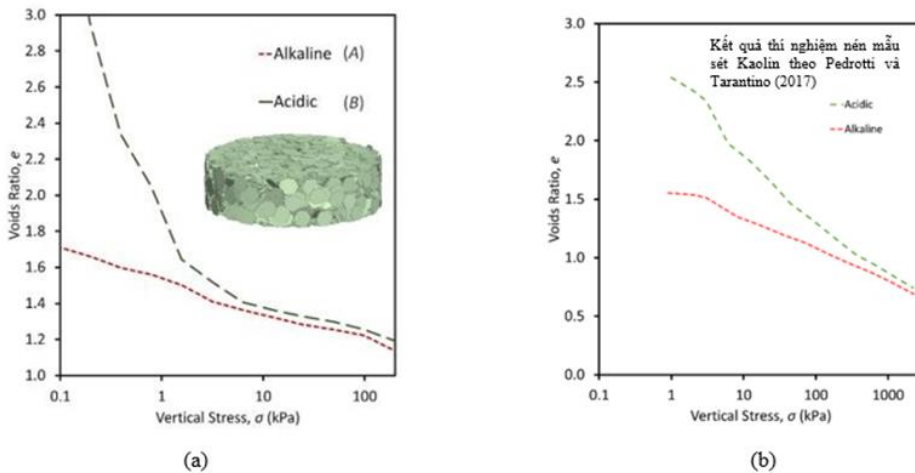
Hình 11. (a) Tương tác giữa các hạt trong mô hình, (b) cấu tạo các tấm kết dính, (c) Cấu tạo các tấm cốt liệu (de Bono & McDowell, 2022)

Kết quả thí nghiệm nén đơn trục thực hiện trên hai mẫu thử thể hiện mối quan hệ giữa tỉ số rỗng và log ứng suất (e, σ) như Hình 13. Kết quả cho thấy mẫu B do có tỉ số rỗng lớn hơn nên quá trình nén diễn ra dễ dàng hơn. Khi ứng suất dọc trục ở cả hai mẫu gần như trùng nhau khi ứng suất trên 10 kPa. Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thí

nghiệm của Pedrotti and Tarantino (2017) (Hình 13b) cho thấy sự tương thích giữa mô phỏng và thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu này cho thấy việc sử dụng phương pháp phân tử rời rạc trong mô phỏng đất sét mang lại kết quả hữu hiệu, đây cũng là cơ sở cho các nghiên cứu sâu hơn và cung cấp những hiểu biết mới về tính chất vĩ mô của đất sét.



Hình 12. (a) Mẫu sét kiềm (A), (b) Mẫu sét axit (B) (de Bono & McDowell, 2022)



Hình 13. (a) Kết quả mô phỏng, (b) Kết quả thực nghiệm (de Bono & McDowell, 2022)

4. PHƯƠNG HƯỚNG PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH DEM CHO VẬT LIỆU ĐỊA KỸ THUẬT Ở VIỆT NAM

Hầu hết các nghiên cứu về vật liệu địa kỹ thuật ở Việt Nam phần lớn ứng dụng phương pháp FEM, mặc dù phương pháp này có nhiều ưu điểm nhưng DEM sẽ cho kết quả phù hợp hơn khi nghiên cứu các đặc tính ở cấp độ vi mô đối với vật liệu địa kỹ thuật. Phương pháp DEM phù hợp với hầu hết các loại vật liệu địa kỹ thuật, đặc biệt kết quả mô phỏng đối với các loại vật liệu rời rạc. Đối với vật liệu rời rạc, mô hình DEM có thể mô phỏng hình dạng thực tế của hạt cũng như ứng xử riêng biệt của vật liệu dạng hạt. Các tham số đầu vào tương đối ít với ý nghĩa vật lý rõ ràng để xác định ứng xử của vật liệu như độ cứng của liên kết và hệ số ma sát. Tuy nhiên, các thông số đầu vào của các mô hình DEM không sử dụng các thông số vĩ mô mà sử dụng các thông số vi mô, do đó các thông số này thường phải hiệu chỉnh cho phù hợp với mô hình. DEM có hiệu quả cao khi nghiên cứu các cơ chế dựa trên hạt, cơ học

đứt gãy, động lực học, chuyển vị lớn và/hoặc các vấn đề biến dạng lớn (chẳng hạn như cơ chế sau phá hủy),... Ngoài ra, phương pháp này mang lại hiệu quả cao trong việc nhận dạng trực quan ứng xử của vật liệu thông qua các mô phỏng thí nghiệm. Phương pháp DEM chưa được dùng rộng rãi cho các loại vật liệu địa kỹ thuật có tính kết dính do gặp nhiều khó khăn trong việc mô phỏng hình dạng và tương tác giữa các hạt. Do đó khi mô phỏng vật liệu kết dính bằng phương pháp DEM, các hạt thường được mô phỏng dạng khối, dạng tâm,... nhằm giảm thiểu thời gian tính toán.

Vì vậy, trong tương lai, phương pháp DEM sẽ có tiềm năng cao trong nghiên cứu về địa kỹ thuật ở Việt Nam. Tùy vào tính chất của mỗi loại vật liệu cần có những lựa chọn mô hình phù hợp, nhằm mang lại giá trị thực tiễn cao.

5. KẾT LUẬN

Bài báo giới thiệu tổng quan về việc áp dụng phương pháp phần tử rời rạc vào việc nghiên cứu

đặc tính của một số loại vật liệu địa kỹ thuật thông dụng. Có thể thấy rằng, ưu điểm vượt trội của phương pháp DEM được thể hiện qua việc mô phỏng biến dạng, chuyển vị và phá hoại ở cấp độ vi mô, điều mà không thể quan sát được ngay cả khi thực hiện thí nghiệm trong phòng.

Các kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, phương pháp DEM không chỉ hiệu quả đối với các vật liệu rời rạc theo quan điểm truyền thống, mà phương pháp này có tiềm năng rất lớn trong tương lai khi áp dụng trong nghiên cứu các loại vật liệu kết dính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Belheinea, N., Plassiard, J.P., Donzé, F. V., Darve, F., & Seridid, A. (2009). Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling. *Computers and Geotechnics*, 36(2009), 320-331. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.02.003>
- Bolton, M. B. (1986) The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, 36, 65–78.
- Brown, N. J., Chen, J. F., & Ooi, J. Y. (2014). A bond model for DEM simulation of cementitious materials and deformable structures. *Granular Matter* 16, 299–311 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0494-4>
- Cil, M. B., & Alshibli, K. A. (2014). 3D analysis of kinematic behavior of granular materials in triaxial testing using DEM with flexible membrane boundary. *Acta Geotech*, 9, 287–298. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0273-0>
- Coré, A., Kopp, J. P., Viot, P., Charles, J. L., & Dau, F. (2017). Experimental Investigation and Discrete Element Modelling of Composite Hollow Spheres Subjected to Dynamic Fracture, *International Journal of Polymer Science*, 2017, 7638482. <https://doi.org/10.1155/2017/7638482>
- Cundall, P. A. (1971). A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, In International Society for Rock Mechanics (Eds.), *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics* (pp. 2-8). Rubrecht.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- de Bono, J.P & McDowell, G.R. (2014). DEM of triaxial tests on crushable sand. *Granular Matter*, 16, 551–562. <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0500-x>
- de Bono, J. P., & McDowell, G. R. (2022). Discrete element modelling of normal compression of clay. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 162, 104847. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.104847>
- Dong, Y., Fatahi, B., Khabbaz, H., & Zhang, H. (2018). Influence of particle contact models on soil response of poorly graded sand during cavity expansion in discrete element simulation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10 (2018), 1154-1170 . <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.009>
- Donzé, F.V., Richefeu, V., & Magnier, S.A. (2009). Advances in Discrete Element Method Applied to Soil, Rock and Concrete Mechanics. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8, 1-44. <https://www.researchgate.net/publication/228670932>
- Fergani, S., Allag Ait Mokhtar, K., Djerbal, L., Pizette, P., Abriak, N.E., & Nechnech, A. (2020). FEM Simulations of Granular Matter Behaviour Under Triaxial Tests. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 991–1008. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01540-x>
- Golmaei, S.H., & Boulon, M. (2012). Comparison between experimental and finite element modeling data for triaxial undrained cyclic tests in compression on hostum sand. *Int J Civ Struct Eng* 3(2), 429–442.
- Hazzara, L., Nuth, M., & Chekired, M. (2020). DEM simulation of drained triaxial tests for glass-beads. *Powder Technology*, 364(2020), 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.095>
- Heo, J.H, Sam S. H, & Noune, M. (2022). Study of Micro-Parameters of DEM Model on the Laboratory Experiment Results Obtained from Poorly Cemented Sandstone *Geosciences* 12(10): 373. <https://doi.org/10.3390/geosciences12100373>
- Ho, T.K.T., & Weng, M.C. (2021). Effect of Microscopic Properties on the Mechanical Behavior of Gravelly Soil by Using DEM. In: Khabbaz, H., Xiao, Y., & Chang, J.R. (Eds). *Sustainable Civil Infrastructures*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79650-1_1
- Ho, T.K.T., & Weng, M.C. (2021). Evaluating Influence of Microscopic Properties on Mechanical Behavior of Gravelly Soils by Using Discrete-Element Method. *International Journal of Geomechanics*, 22(12), 04021228 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002178](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002178)
- Huang, D., Wang, J., & Liu, S. (2015). A comprehensive study on the smooth joint model in DEM simulation of jointed rock masses. *Granular Matter*, 17(6), 775–791. <https://doi.org/10.1007/s10035-015-0594-9>
- Itasca ConsultingGroup Inc. (2016). *Itasca: Particle Flow Code 6.0 Manual*. Minneapolis.

- Jiang, M., Jiang, T., Crosta, G. B., Shi, Zh., Chen, H., & Zhang, N., (2015). Modeling failure of jointed rock slope with two main joint sets using a novel DEM bond contact model. *Engineering Geology*, 193(), 79–96.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.013>
- Jiang, M., Zhang, A., & Shen, Z. (2020). Granular soils: from DEM simulation to constitutive modeling. *Acta Geotechnica*, 15(7), 1723–1744.
 doi:10.1007/s11440-020-00951-7
- Lambert, C., & Coll, C. (2014). Discrete modeling of rock joints with a smooth-joint contact model. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1), 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.12.003>
- Labra, C. A., Oñate, N., & Rojek, J. (2012). *Advances in the Development of the Discrete Element Method for Excavation Processes*. Monograph CIMNE.
- Le, H.K., Huang, W.C., Weng, M.C., & Huang, W.J. (2022). Exploring Effect of Microproperties on Shear Strength of Rock Joints through Physical and Numerical Modeling. *International Journal of Geomechanics*, 22(8), 04022112.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002432](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002432)
- Li, Y., Wu, W., Chu, X., & Zou, W. (2020). Effects of stress paths on triaxial compression mechanical properties of QH-E lunar soil simulant studied by DEM simulation. *Granular Matter*, 22, 32(2020).
<https://doi.org/10.1007/s10035-020-0999-y>
- Li, Z., & Tang, Y. (2020). Mesoscopic Simulation Method for Uniaxial Compression Test of RCC Dam Material Based on DEM. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 6686609.
<https://doi.org/10.1155/2020/6686609>
- Mehranpour, M.H., & Kulatilake, P.H. (2017). Improvements for the smooth joint contact model of the particle flow code and its applications. *Computers and Geotechnics*, 87, 163-177.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPGeo.2017.02.012>
- Miao, C.X., Zheng, J.J., Zhang, R.J., & Cui, L. (2017). DEM modeling of pullout behavior of geogrid reinforced ballast: The effect of particle shape. *Computers and Geotechnics*, 81(2017), 249–261.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.08.028>
- Nandanwar, M. & Chen, Y. (2017). Modeling and measurements of triaxial tests for a sandy loam soil. *Canadian Biosystems Engineering*, 59, 2.1-2.8.
- Ngo, N. T., Indraratna, B., & Rujikiatkamjorn, C. (2017). Micromechanics-Based Investigation of Fouled Ballast Using Large-Scale Triaxial Tests and Discrete Element Modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(2), 04016089.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001587](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001587)
- Ngo, T., & Indraratna, B. (2020). Analysis of Deformation and Degradation of Fouled Ballast: Experimental Testing and DEM Modeling. *International Journal of Geomechanics*, 20(9), 06020020.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001783](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001783)
- Nitka, M., & Tejchman, J. (2015). Modelling of concrete behaviour in uniaxial compression and tension with DEM. *Granular Matter*, 17, 145–164. <https://doi.org/10.1007/s10035-015-0546-4>
- Nosewicz, S., Rojek, J., & Chmielewski, M. (2017). Application of the Hertz formulation in the discrete element model of pressure-assisted sintering. *Granular Matter* 19, 16 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s10035-016-0699-9>
- Potyondy, D.O., & Cundall, P.A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41 (2004), 1329–1364.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>
- Shen, Z., Jiang, M., & Thornton, C. (2016). DEM simulation of bonded granular material. Part I: Contact model and application to cemented sand. *Computers and Geotechnics*, 75, 192-209.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.02.007>
- Shen, Z., Jiang, M. & Wang, S. (2019). Static and kinematic damage characterization in structured sand. *Acta Geotech.* 14, 1403–1421 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s11440-018-0730-x>
- Suchorzewski, J., Tejchman, J., & Nitka, M. (2017). Discrete element method simulations of fracture in concrete under uniaxial compression based on its real internal structure. *International Journal of Damage Mechanics*, 27(4), 1-30.
<https://doi.org/10.1177/2F1056789517690915>
- Teufelsbauer, H., Wang, Y., & Chiou, M.C (2009). Flow-obstacle interaction in rapid granular avalanches: DEM simulation and comparison with experiment. *Granular Matter* 11, 209–220 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10035-009-0142-6>
- Tolomeo, M., & McDowell, G. R. (2022). Implementation of real contact behaviour in the DEM modelling of triaxial tests on railway ballast. *Powder Technology*, 412, Article 118021.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118021>
- Wu, M., Wu, F., & Wang, J. Particle shape effect on the shear banding in DEM-simulated sands. *Granular Matter* 24, 48 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s10035-022-01210-0>

Wu, K., Sun, W., Liu, S., & Zhang, X. (2021). Study of shear behavior of granular materials by 3D DEM simulation of the triaxial test in the membrane boundary condition. *Advanced Powder Technology*, 32(4), 1145–1156. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.02.018>

Yan, G., Yu, H., & McDowell, G. (2009). Simulation of granular material behaviour using DEM. *Procedia*

Earth and Planetary Science, 1(1), 598–605.

<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.095>

Zhang, J.Q., Wang, X., Yin, Zh.Y., & Liang, Zh, Y. (2020). DEM modeling of large-scale triaxial test of rock clasts considering realistic particle shapes and flexible membrane boundary. *Engineering Geology*, 279(2020), 105871. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105871>