

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA BỀ RỘNG LIÊN KẾT ĐẾN ỨNG XỬ CHỊU CẮT CỦA ĐẤT RỜI RẠC MÔ PHỎNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC

Nguyễn Trung Kiên,^{a,*}, Võ Thành Trung^b

^a*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

^b*Khoa Cầu Đường, Đại học Kiến trúc Đà Nẵng, 566 Núi Thành, quận Hải Châu, TP. Đà Nẵng, Việt Nam*

Nhận ngày 02/6/2023, Sửa xong 28/6/2023, Chấp nhận đăng 04/7/2023

Tóm tắt

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng ứng xử chịu cắt của đất rời rạc. Đất rời rạc được lý tưởng hóa thành một tập hợp các hạt hình tròn, với kích thước các phần tử được tuân theo một quy luật cho trước. Khác với các nghiên cứu cổ điển khi bỏ qua bề rộng liên kết giữa các phần tử, trong nghiên cứu này, bề rộng liên kết được kể đến thông qua sức kháng lăn giữa các hạt có tương tác với nhau. Tiếp đó một chuỗi các thí nghiệm nén hai trục đã được tiến hành. Kết quả cho thấy rằng bề rộng vùng liên kết làm gia tăng đáng kể sức bền khác cắt của mẫu đất rời rạc. Ngoài ra, các đặc trưng cơ học khác như góc giãn nở (dilatancy angle), sự xoay của các phần tử đều bị ảnh hưởng bởi bề rộng vùng liên kết trong khi đó mô đun đàn hồi ban đầu hay hệ số poisson lại ít bị ảnh hưởng bởi giá trị này.

Từ khóa: phương pháp phần tử rời rạc; DEM; đất rời rạc; nén hai trục; bề rộng liên kết.

EFFECTS OF CONTACT LENGTH ON THE SHEAR STRENGTH OF COHESIONLESS GRANULAR SOILS SIMULATED BY DISCRETE ELEMENT MODELING

Abstract

In this paper, 2D Discrete Element Modeling (DEM) based on molecular dynamics was used to model idealized granular materials. The granular materials were made up of idealized circular particles. Unlike conventional model by DEM in which the contact region between particles is assumed to be small compared to particles' radius, in this current research we employ a rolling resistance (RR) model to describe the interaction between particles in contact. As a result, the region with a non-negligible contact length is thus considered. By varying the value of contact length within biaxial test, we show that the contact length has a significant impact on the shear resistance of granular media. Moreover, other macroscopic parameters such as dilatancy angle, microscopic parameters notably grains rotation are greatly affected by this artificial-like-reality coefficient. In contrast, the influence of RR on the initial elastic modulus or Poisson coefficient seems negligible.

Keywords: discrete element method; DEM; cohesionless granular soils; biaxial test; contact length.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(4V\)-10](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4V)-10) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu chung

Nhiều phương pháp số khác nhau có thể được sử dụng khi mô phỏng địa vật liệu có cấu trúc rời rạc (như đất, đá...), có thể kể đến phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phương pháp điểm vật chất (MPM), phương pháp không lưới (SPH) hay phương pháp phần tử rời rạc (DEM). So với các phương pháp, mô phỏng bằng DEM cho phép kể đến sự tương tác giữa các phần tử, phản ánh được ứng xử cơ học thông qua ứng xử ở tỷ lệ nhỏ hơn. Vì vậy kể từ khi xuất hiện, phương pháp DEM đã được sử dụng rộng rãi khi nghiên cứu ứng xử của vật liệu rời rạc nói chung, địa vật liệu nói riêng ở tỷ lệ nhỏ.

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: kiennt3@huce.edu.vn (Kiên, N. T.)

Khi tiến hành mô phỏng bằng phương pháp phần tử rời rạc (DEM), phần lớn các nghiên cứu đều sử dụng giả thiết các hạt có cấu trúc hình tròn (2D) hoặc hình cầu (3D). Việc sử dụng các hạt có hình dạng này đôi khi không phản ánh được bản chất ứng xử của vật liệu có cấu tạo từ các hạt có hình dạng không đều đặn. Để khắc phục nhược điểm đó, hai giải pháp có thể được sử dụng như sau: nhóm thứ nhất cố gắng mô tả chính xác nhất có thể hình dạng của các hạt vật liệu [1–4]; nhóm thứ hai kể đến sức kháng lăn (rolling resistance) đối với các hạt có dạng hình tròn hoặc hình cầu [5–9]. Ưu điểm của nhóm thứ nhất là kể đến được hình dạng thực tế của các hạt nhưng việc sử dụng này cũng gặp một số khó khăn đó là: việc mô tả hình dạng thực tế của hạt không hề đơn giản, không dễ xấp xỉ bởi các hàm toán học; xử lý tương tác giữa các hạt có hình dạng bất kỳ dẫn đến nhiều khó khăn cũng như làm tăng rất nhiều về thời gian tính toán [10]. Trong khi đó nhóm thứ hai được sử dụng phổ biến hơn do chỉ ảnh hưởng chủ yếu đến việc thay đổi quy luật tương tác giữa các hạt hình tròn, thời gian tính toán hợp lý, và đã được chứng minh có hiệu quả như là một tham số kể đến sự ảnh hưởng của hình dạng hạt. Khi sử dụng sức kháng lăn để thay thế cho hình dạng hạt sẽ làm xuất hiện một thông số quan trọng, gọi là bề rộng vùng liên kết. Khi không có sức kháng lăn, vùng liên kết này xem như rất nhỏ, bỏ qua so với kích thước hạt.

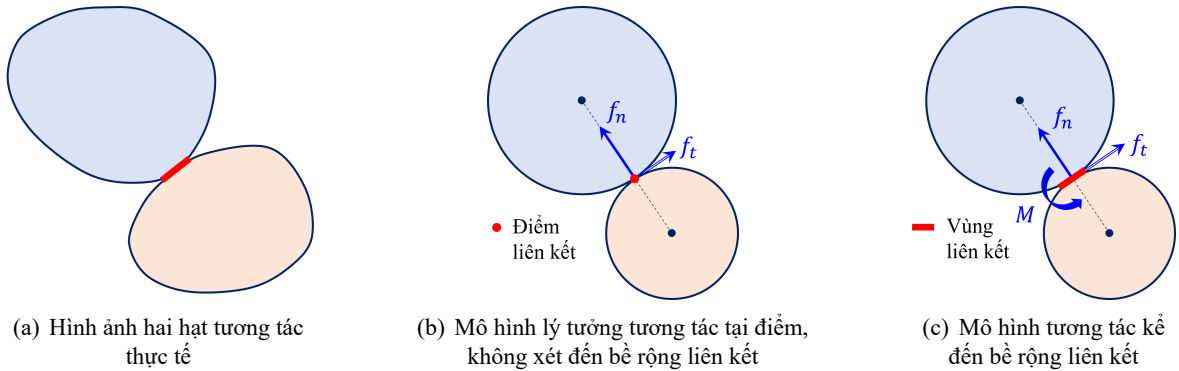
Mặc dù đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều nghiên cứu, bề rộng vùng liên kết có thể được lựa chọn một cách tùy ý khi xem như một tham số để nghiên cứu cơ chế, hoặc được hiệu chỉnh tùy theo vật liệu mô phỏng [4, 6]. Tuy nhiên lại chưa có một nghiên cứu đầy đủ ảnh hưởng của bề rộng vùng liên kết đến ứng xử chịu tải cũng như các tham số tương đương hay được sử dụng của vật liệu được mô phỏng. Vì vậy trong nghiên cứu này, tác giả tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của bề rộng vùng liên kết đến các tham số đặc trưng về cơ học của địa vật liệu như mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, góc giãn nở, và sức kháng cắt. Bài báo cấu trúc tiếp theo gồm các phần như sau: phần 2 tóm tắt về phương pháp phần tử rời rạc cũng như quy luật tương tác có kể đến sức kháng lăn. Phần 3 giới thiệu về các tham số mục tiêu nghiên cứu. Phần 4 là ảnh hưởng của sức kháng lăn đến các tham số thông qua phân tích kết quả mô phỏng bằng phương pháp DEM. Một số kết luận, kiến nghị được trình bày tại phần 5.

2. Phương pháp phần tử rời rạc (DEM) và mô hình tương tác kể đến bề rộng vùng liên kết

Phương pháp phần tử rời rạc (DEM) là một phương pháp phổ biến được sử dụng để mô phỏng ứng xử của vật liệu rời rạc có kể đến ứng xử tại tỷ lệ tương tác giữa các phần tử. Phương pháp DEM được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt lĩnh vực xây dựng hoặc nghiên cứu ứng xử của địa vật liệu (geomaterials). Khi mô phỏng vật liệu bằng phương pháp DEM, vật liệu rời rạc được xem như là một tập hợp các hạt. Các hạt tương tác với nhau dựa trên các đặc trưng vật lý, ví dụ như hình dạng, kích thước, độ chặt cũng như lực tương tác giữa chúng. Các bước chính của phương pháp DEM có thể tóm tắt như sau [11–13]: (i) vật liệu được rời rạc hóa thành các phần tử rời rạc; (ii) gán các đặc trưng cơ lý cho phần tử như khối lượng, kích thước, hình dạng. Đồng thời có thể tiến hành các kỹ thuật cần thiết để mẫu đạt độ chặt mong muốn, ví dụ như hiệu chỉnh hệ số ma sát giữa các hạt, như trình bày trong [14]; (iii) gán các điều kiện biên; (iv) tính toán lực tương tác giữa các phần tử dựa trên tương tác giữa chúng và do ảnh hưởng của điều kiện biên. Sau mỗi bước tính toán, vị trí các phần tử cũng như lực tương tác giữa chúng sẽ được cập nhật lại. Quá trình này được tiến hành cho đến khi đạt đến điều kiện chịu tải mong muốn. Với cách tiếp cận này, phương pháp DEM có thể mô phỏng hầu hết các dạng thí nghiệm thường gặp cũng như các điều kiện thực tế như ứng xử khi chịu nén, chịu cắt, tải trọng lặp hoặc chịu tải trọng động. Phương pháp DEM được sử dụng rất phổ biến khi đánh giá sức bền, biến dạng, quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu rời rạc.

Khi xử lý tương tác giữa các phần tử trong phương pháp DEM, giữa chúng có thể xảy ra sự trượt hoặc lăn tại vị trí tiếp xúc. Sự trượt và lăn giữa các phần tử với nhau có sự ảnh hưởng rất lớn đến cường độ cũng như sự giãn nở của đất [15]. Không những vậy theo [7, 16], thì ảnh hưởng của sự lăn

và sức kháng lãn giữa các phần tử sẽ lớn hơn nhiều, đặc biệt với các vật liệu có cấu tạo từ các phần tử có hình dạng không đều đặn.



Hình 1. Mô hình tương tác giữa các phần tử trong phương pháp DEM

Khi mô phỏng đất rời rạc hoặc cá dạng vật liệu rời rạc nói chung, các hạt có hình dạng thực tế (Hình 1(a)) thường được lý tưởng hóa thành các hạt hình tròn. Khi tương tác giữa hai hạt lý tưởng được giả thiết dưới dạng điểm liên kết (không có bề rộng liên kết - Hình 1(b)), sự lãn có thể diễn ra một cách tự do, khác với thực tế tồn tại một sức kháng lãn của liên kết dưới ảnh hưởng của vùng liên kết có bề rộng hữu hạn (Hình 1(c)). Việc kể đến vùng liên kết này phù hợp với tương tác giữa các hạt trong thực tế khi các phần tử này thường có hình dạng gồ ghề (rough surface). Khi đó hai phần tử sẽ tương tác với nhau qua một vùng liên kết có bề rộng, và sức kháng lãn sẽ ảnh hưởng đến tương tác giữa các phần tử với nhau. Chính vì vậy, việc kể đến sức kháng lãn trong mô hình tương tác thông qua bề rộng liên kết, là một bước để phản ánh tốt hơn tương tác giữa các phần tử cấu thành vật liệu.

Khi xét đến bề rộng liên kết, tại vị trí tương tác giữa các phần tử sẽ tồn tại ba thành phần bao gồm lực pháp tuyến f_n , lực tiếp tuyến f_t và mô men M do kể đến sức kháng lãn. Ba giá trị này được xác định lần lượt như sau [4, 7, 17, 18]:

$$f_n = k_n \times \delta \quad (1)$$

$$f_t = \min(f_t^{it-1} + k_t \times \delta u_t, \mu \times f_n) \quad (2)$$

$$M = \min(M^{it-1} + k_r \times \delta \theta, \mu_r \times f_n) \quad (3)$$

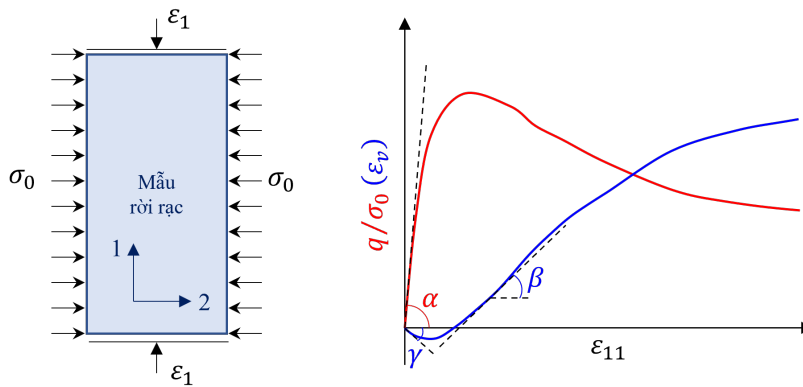
trong đó k_n, k_t, μ lần lượt là độ cứng pháp tuyến, tiếp tuyến và hệ số ma sát của liên kết. δu_t là chuyển vị tương đối giữa hai hạt có tiếp xúc với nhau; $\delta = (r_i + r_j) - l_{ij}$ với r_i, r_j là bán kính của cặp phần tử có tương tác với nhau, l_{ij} là khoảng cách giữa chúng. k_r, μ_r là độ cứng chống xoay và hệ số ma sát lãn của liên kết và $\delta \theta$ là góc xoay tương đối giữa hai bước tính toán của hai phần tử có tiếp xúc với nhau. Trong nghiên cứu này, độ cứng chống xoay và hệ số ma sát lãn được liên hệ với độ cứng pháp tuyến và hệ số ma sát thông qua bề rộng vùng liên kết l [6]: $k_r = k_n \times l^2$ và $\mu_r = \mu \times l$.

3. Thí nghiệm nén hai trục và thông số đánh giá

Trong các thí nghiệm để đánh giá sức kháng cắt của đất rời rạc, cùng với thí nghiệm nén ba trục, thí nghiệm cắt đơn giản... thì thí nghiệm nén hai trục là một dạng thí nghiệm được sử dụng khá phổ biến [19–21]. Trong thí nghiệm nén hai trục mẫu đất rời, trước tiên mẫu được nén đến trạng thái ứng suất đẳng hướng σ_0 . Sau đó tiến hành gia tải theo phương thẳng đứng (phương 1) trong khi áp lực hông được giữ không đổi theo phương 2, $\sigma_2 = \sigma_0$ (Hình 2(a)). Trong khuôn khổ bài báo này, chỉ đến ứng xử của mẫu đất rời rạc ở trạng thái chặt. Thí nghiệm nén hai trục bằng phương pháp phần

từ ròi rạc được tiến hành trên mẫu bao gồm tập hợp các hạt hình tròn, tương tác với nhau theo quy luật như mô tả tại Mục 2. Bán kính của các hạt phân bố ngẫu nhiên theo quy luật phân bố đều, quy trình này được giới thiệu chi tiết trong [22]. Điều kiện biên chu kỳ được sử dụng. Việc sử dụng điều kiện biên dạng chu kỳ giúp cho phép mẫu ổn định hơn khi sử dụng số lượng hạt hạn chế. Gia tải theo phương đứng (phương 1) được kiểm soát thông qua chuyển vị của biên trên và biên dưới của mẫu, phù hợp với các thí nghiệm nén hai trục trong thực nghiệm. Áp lực hông được kiểm soát không đổi theo phương 2 thông qua cân bằng giữa ứng suất xác định từ lực tương tác giữa các phần tử và áp lực hông mong muốn. Chi tiết về các điều kiện biên của mô hình được mô tả trong [18, 23].

Kết quả của thí nghiệm nén hai trục thường được thể hiện trong không gian hai chiều, liên hệ giữa biến dạng theo phương dọc trục ε_{11} và ứng suất lệch chuẩn hóa $q/\sigma_0 = (\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_0$, cũng như giữa ε_{11} và biến dạng thể tích ε_v của mẫu (Hình 2(b)). Từ kết quả thí nghiệm cho phép xác định mô đun đàn hồi $E = tg(\alpha)$, hệ số Poisson $\nu = 1 - tg(\gamma)$, góc giãn nở $\psi = \arcsin\left(\frac{tg(\beta)}{2 + tg(\beta)}\right)$ cũng như sức kháng cắt q của mẫu. Đây cũng là những thông số quan trọng để đánh giá tính chất của mẫu đất cũng như được sử dụng trong hầu hết các mô hình ứng xử vật liệu tiên tiến [24, 25].



Hình 2. Đường cong cơ sở của thí nghiệm nén hai trục mẫu đất chặt

4. Ảnh hưởng của bề rộng liên kết đến ứng xử chịu cắt

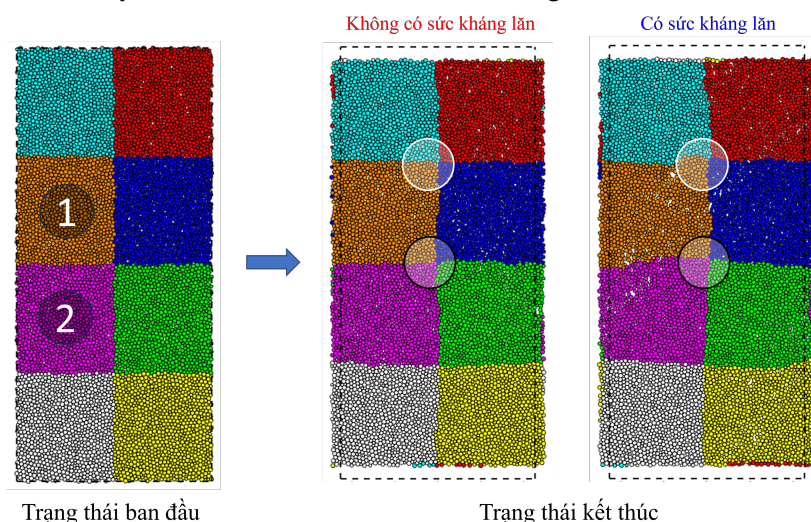
Trong phần này, bài báo sẽ tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của bề rộng liên kết đến các thông số quan trọng đã nêu ở phần 4. Ngoài trừ thay đổi bề rộng liên kết l , các tham số khác trong mô hình được giữ không đổi với các giá trị như trình bày tại Bảng 1. Các thông số này được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu sử dụng DEM. Bề rộng của liên kết l được khảo sát thông qua hệ số bề rộng liên kết, cụ thể như sau: $l = \lambda_R \times \langle 2r \rangle$ với hệ số bề rộng liên kết $\lambda_R = [0,0; 2,5E - 2; 5,0E - 2; 1,0E - 1; 1,5E - 1; 2,0E - 1; 2,5E - 1]$, trong đó $\langle 2r \rangle$ là đường kính trung bình của các hạt trong mẫu. Nghiên cứu này sử dụng code phần tử ròi rạc có tên PBC2D, được phát triển bởi tác giả và các cộng sự. Code tính toán có độ tin cậy, đã có nhiều bài báo công bố trên tạp chí quốc tế và trong nước sử dụng PBC2D [4, 26, 27].

Hình ảnh mẫu trước và sau khi thí nghiệm nén hai trục (trường hợp sử dụng mô hình không có sức kháng lăn - Hình 1(b) và có sức kháng lăn Hình 1(c)) được thể hiện trên Hình 3. So sánh mẫu ở trạng thái ban đầu và trạng thái sau khi kết thúc có thể thấy các hạt không chỉ dịch chuyển đơn thuần theo hướng tải trọng tác dụng chính (hướng 1 hoặc 2) mà còn có xu hướng đan xen vào nhau, thể hiện thông qua sự biến dạng không đều đặn của các khối có cùng màu sắc. Không những vậy, trường hợp có kể đến bề rộng liên kết (có sức kháng lăn) sự biến dạng của các khối này nhiều hơn so với trường hợp không có kháng lăn, đặc biệt tại các vị trí được khoanh tròn trên Hình 3. Điều này là do khi kể

Bảng 1. Các tham số của mô hình

TT	Tham số	Ký hiệu	Giá trị
1	Tỷ lệ kích thước mẫu (cao/rộng)	h/b	2
2	Số lượng hạt	n_{pa}	8100
3	Kích thước hạt	r_{max}/r_{min}	0,5/0,3
4	Hệ số độ cứng	$\kappa = \frac{k_n}{\sigma_0 \cdot \langle 2r \rangle}$	1000
5	Tỷ số độ cứng	k_n/k_t	1
6	Hệ số ma sát	μ	0,5

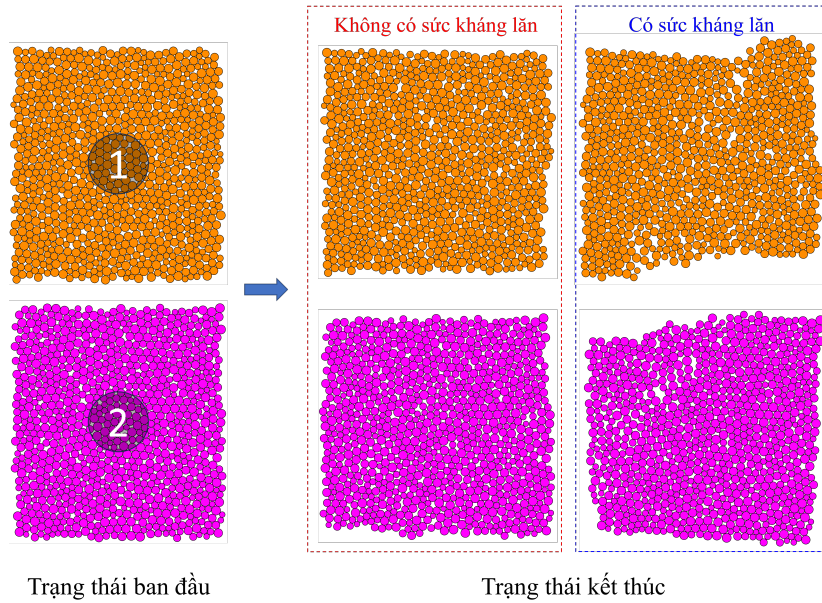
đến bề rộng liên kết, các liên kết giữa các phần tử sẽ có sức kháng lăn, hạn chế việc xoay tự do, dẫn đến sự khác biệt lớn về chuyển vị, góc xoay giữa các phần tử. Với sự xuất hiện của sức kháng lăn, các phần tử bị cản trở sự xoay/lăn tự do, dẫn đến mẫu có xu hướng xuất hiện nhiều lỗ rỗng hơn.



Hình 3. Mẫu trước và sau khi thí nghiệm. Các hạt được tô màu sắc khác nhau để dễ nhận biết sự dịch chuyển của chúng. Nét bao màu đen không liên tục chỉ hình dạng mẫu tại thời điểm bắt đầu thí nghiệm

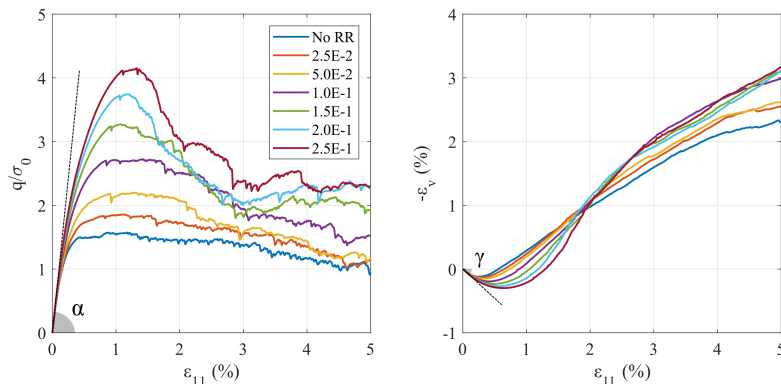
Để thể hiện rõ hơn về sự ảnh hưởng của sức kháng lăn lên biến dạng của mẫu, các khối màu da cam (số 1) và hồng (số 2) được trích xuất và so sánh ở Hình 4. Nếu như trường hợp không có sức kháng lăn, biến dạng của các khối khá tương đồng với biến dạng tổng thể của mẫu thì đối với trường hợp có sức kháng lăn, biến dạng của mẫu không đều đặn. Hình dạng của các khối bị ảnh hưởng lớn bởi biến dạng nén và cắt đồng thời. Cũng do ảnh hưởng của sức kháng lăn, các khu vực với độ rỗng lớn có xu hướng xuất hiện (được khoanh tròn). Việc hình thành các vị trí có độ rỗng lớn và biến dạng như trong trường hợp có sức kháng lăn có liên hệ chặt chẽ với việc hình thành các dải trượt khi ứng suất cục bộ tập trung [28–31]. Tuy nhiên vấn đề này nằm ngoài mục tiêu của bài báo và sẽ được đề cập trong một nghiên cứu khác.

Đường cong ứng suất - biến dạng dọc trục ($q/\sigma_0, \varepsilon_{11}$), biến dạng thể tích – biến dạng dọc trục ($\varepsilon_v, \varepsilon_{11}$) được thể hiện trên Hình 5. Có thể thấy ứng xử của các mẫu đất rời rạc đều không tuyến tính ngay cả ở trạng thái biến dạng rất nhỏ. Các kết quả sử dụng bề rộng vùng liên kết khác nhau được so sánh giữa chúng và so sánh với đường cong tham khảo mà trong đó mô hình không kể đến sức kháng lăn được sử dụng (Hình 1(b)). Quan sát nhanh trên Hình 5 có thể thấy tăng bề rộng liên kết làm tăng đáng kể sức kháng cắt cũng như khả năng chịu lực của mẫu. Đồng thời ở giai đoạn đầu khi gia tải,



Hình 4. Mẫu trước và sau khi thí nghiệm: Biến dạng của các khối 1 (màu da cam) và 2 (màu hồng)

mẫu cũng co ngót nhiều hơn (thể tích giảm), sau đó cũng giãn nở nhiều hơn (thể tích tăng) thể hiện qua biến dạng thể tích có xu hướng tăng khi sử dụng bề rộng liên kết lớn hơn trong mô hình.



Hình 5. Ảnh hưởng của bề rộng liên kết đến ứng xử của mẫu vật liệu rời

4.1. Ảnh hưởng của bề rộng vùng liên kết (λ_R) đến mô đun đàn hồi (E) và hệ số Poisson (ν) của mẫu

Sự thay đổi bề rộng vùng liên kết hầu như không ảnh hưởng đến mô đun đàn hồi của mẫu vật liệu. Cụ thể độ dốc của tiếp tuyến với đường cong ứng suất – biến dạng hầu như không thay đổi (góc α , Hình 5), điều này phù hợp với một số nghiên cứu trước đây của [30, 32]. Từ Hình 5(a) thu được $E/\sigma_0 \approx 1000$. Bên cạnh đó tiếp tuyến với đường cong ($\epsilon_v, \epsilon_{11}$) ở giai đoạn đầu của thí nghiệm cũng gần như nhau (góc γ trong Hình 2). Điều này cho thấy rằng giá trị của hệ số Poisson cũng hầu như không bị ảnh hưởng bởi bề rộng vùng liên kết, $\nu \approx 0,1$. Giá trị các đặc trưng trong giai đoạn đàn hồi thu được tương đồng với [33], khi sử dụng các thông số cơ học đầu vào tương tự nhau. Như vậy có thể thấy các đặc trưng của giai đoạn đàn hồi hầu như không bị ảnh hưởng nhiều bởi việc có hay không kể đến bề rộng vùng liên kết. Tuy nhiên cũng phải nói thêm rằng đối với dạng vật liệu như đất rời rạc, phạm vi ứng xử đàn hồi nằm trong một giới hạn rất nhỏ [34].

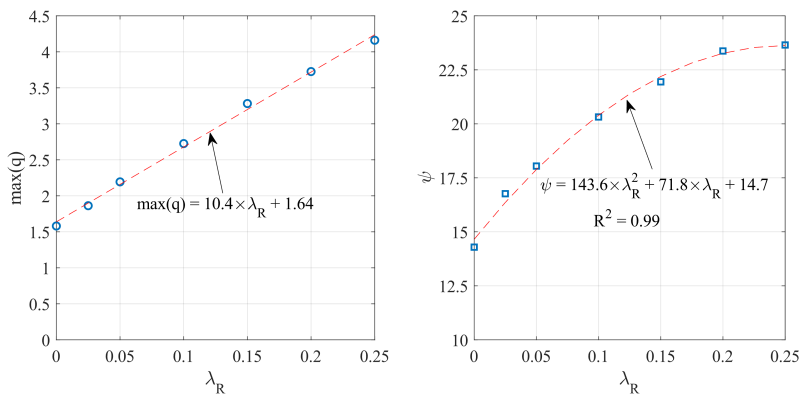
4.2. Ảnh hưởng của hệ số bề rộng vùng liên kết (λ_R) đến sức kháng cắt (q/σ_0) và hệ số giãn nở (ψ) của mẫu

Trong khi đó, tăng hệ số bề rộng vùng liên kết λ_R làm tăng đáng kể sức kháng cắt của mẫu vật liệu được mô phỏng. Hình 6(a) cho thấy mối liên hệ này gần như tuân theo quy luật tuyến tính. Tuy nhiên cũng cần lưu ý rằng việc sử dụng hệ số λ_R không chỉ làm cho sức kháng cắt q/σ_0 tăng lên mà còn khiến cho ứng xử trở nên phi tuyến hơn. Thời điểm đạt được giá trị ứng suất cực đại cũng tương ứng với giá trị biến dạng dọc trục lớn hơn. Tức là làm gia tăng rõ nét sức bền của mẫu vật liệu cả về giới hạn chịu lực cũng như khả năng chịu biến dạng. Điều này cũng có sự liên hệ rõ ràng với đường cong biến dạng tổng – biến dạng dọc trục. Với giá trị lớn hơn của bề rộng liên kết, mẫu giảm thể tích nhiều hơn khi tăng λ_R , tức là tính nén được cũng tăng lên. Sau khi đạt giá trị cực đại về cường độ, mẫu suy giảm nhanh chóng ứng suất và có xu hướng đạt đến thêm về cường độ. Giá trị ứng suất với thêm này cũng tăng nếu λ_R tăng nhưng ảnh hưởng không rõ nét bằng sức kháng cắt cực đại $\max(q/\sigma_0)$. Mối quan hệ giữa sức kháng cắt cực đại và hệ số bề rộng vùng liên kết có mối liên hệ gần như tuyến tính với nhau trong khoảng giá trị khảo sát, như sau:

$$\max(q/\sigma_0) = 10,4 \times \lambda_R + 1,64 \tag{4}$$

$$\psi = 143,6 \times \lambda_R^2 + 71,8 \times \lambda_R + 1,64 \tag{5}$$

Góc giãn nở ψ cũng có xu hướng tăng khi bề rộng liên kết tăng (Hình 6(b)). Đây là điều rất quan trọng vì nó chi phối ứng xử của đất rời rạc khi chịu biến dạng lớn. Mối quan hệ này gần như tuân theo quy luật bậc hai theo kết quả khảo sát (Phương trình (5)) Tuy nhiên cần lưu ý rằng ứng xử của mẫu với λ_R trở nên rất phi tuyến và việc xác định chính xác giá trị ψ có thể đưa đến những giá trị có sự sai lệch. Việc hiệu chỉnh thông số này cần được hiệu chỉnh cẩn thận với các kết quả thực nghiệm, khi cần thiết để phản ánh một cách chính xác nhất ứng xử của đất rời rạc sau khi đạt ứng suất cực đại.



Hình 6. Ảnh hưởng của hệ số bề rộng liên kết λ_R đến sức kháng cắt q/σ_0 và góc giãn nở ψ (tính theo độ)

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày ảnh hưởng của bề rộng vùng liên kết đến ứng xử chịu cắt của mẫu đất rời rạc được mô phỏng bằng phương pháp phần tử rời rạc (DEM). Việc kể đến bề rộng liên kết tại vị trí tiếp xúc của các phân tử làm xuất hiện sức kháng lẫn tại vị trí liên kết. Điều này phản ánh chính xác hơn sự tương tác cũng như truyền lực tại vị trí mà các phân tử tương tác với nhau. Thông qua việc mô phỏng thí nghiệm nén hai trục mẫu đất rời rạc sử dụng các hạt hình tròn và thay đổi bề rộng vùng liên kết, một số kết luận như sau được ghi nhận:

- Thay đổi bề rộng vùng liên kết hầu như không làm thay đổi mô đun đàn hồi ban đầu cũng như hệ số poisson của mẫu đất rời rạc.

- Tăng bề rộng vùng liên kết làm gia tăng đáng kể sức kháng cắt của mẫu đất. Liên hệ giữa hệ số bề rộng liên kết và sức kháng cắt gần như tuân theo quy luật tuyến tính.

- Tăng bề rộng vùng liên kết đồng thời làm tăng góc giãn nở của đất. Góc giãn nở liên hệ với hệ số bề rộng liên kết theo quan hệ bậc hai.

- Việc sử dụng mô hình có kể đến bề rộng vùng liên kết làm cản trở sự xoay tự do, dẫn đến làm gia tăng sự mất ổn định trong mô hình phần tử rời rạc, theo hướng làm gia tăng sự khác nhau trong chuyển vị, biến dạng giữa các phần của mẫu.

Như đã ghi nhận trong rất nhiều nghiên cứu, trong giai đoạn giãn nở, mẫu đất rời rạc thường xuyên xuất hiện phá hoại do tập trung ứng suất cục bộ [29]. Vì vậy trong thời gian tới, việc nghiên cứu ảnh hưởng của bề rộng liên kết đến sự hình thành, phát triển của hiện tượng này sẽ được tiến hành. Ngoài ra, ảnh hưởng của mô hình đến mẫu đất rời (độ rỗng lớn) cũng sẽ được tiến hành.

Tài liệu tham khảo

- [1] Li, L., Holt, R. M. (2005). Approaching real grain shape in the simulation of sandstone using DEM. *Powders and Grains 2005*, 2:1368–1373.
- [2] Zhu, F., Zhao, J. (2019). Modeling continuous grain crushing in granular media: A hybrid peridynamics and physics engine approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 348:334–355.
- [3] Saint-Cyr, B., Szarf, K., Voivret, C., Azéma, E., Richefeu, V., Delenne, J.-Y., Combe, G., Noguier-Lehon, C., Villard, P., Sornay, P., Chaze, M., Radjai, F. (2012). Particle shape dependence in 2D granular media. *EPL (Europhysics Letters)*, 98(4):44008.
- [4] Nguyen, T.-K., Desrues, J., Vo, T.-T., Combe, G. (2022). FEM×DEM multi-scale model for cemented granular materials: Inter- and intra-granular cracking induced strain localisation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 46(5):1001–1025.
- [5] Jiang, M. J., Sun, Y. G., Li, L. Q., Zhu, H. H. (2012). Contact behavior of idealized granules bonded in two different interparticle distances: An experimental investigation. *Mechanics of Materials*, 55:1–15.
- [6] Gilabert, F. A., Roux, J.-N., Castellanos, A. (2007). Computer simulation of model cohesive powders: Influence of assembling procedure and contact laws on low consolidation states. *Physical Review E*, 75(1):011303.
- [7] Iwashita, K., Oda, M. (1998). Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(3):285–292.
- [8] Tang, H., Dong, Y., Chu, X., Zhang, X. (2016). The influence of particle rolling and imperfections on the formation of shear bands in granular material. *Granular Matter*, 18(1).
- [9] Tordesillas, A., Walsh, D. C. S. (2002). Incorporating rolling resistance and contact anisotropy in micromechanical models of granular media. *Powder Technology*, 124(1-2):106–111.
- [10] Nitka, M., Tejchman, J., Kozicki, J., Leśniewska, D. (2015). DEM analysis of micro-structural events within granular shear zones under passive earth pressure conditions. *Granular Matter*, 17(3):325–343.
- [11] Cundall, P. A., Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1):47–65.
- [12] Vo, T.-T., Nguyen, C. T. (2021). Characteristics of force transmission in cohesive agglomerates impacting a rigid surface. *Mechanics Research Communications*, 117:103773.
- [13] Vo, T.-T. (2021). Scaling behavior of the tensile strength of viscohesive granular aggregates. *Physical Review E*, 103(4):042902.
- [14] Nguyen, T.-K., Vo, T.-T. (2023). Effects of intergranular friction and grain size distributions on the initial void ratio of granular sample. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE*, 17(2):110–119.
- [15] Newland, P. L., Allely, B. H. (1957). Volume changes in drained triaxial tests on granular materials. *Géotechnique*, 7(1):17–34.

- [16] Oda, M., Kazama, H. (1998). [Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils](#). *Géotechnique*, 48(4):465–481.
- [17] Delenne, J.-Y., Youssoufi, M. S. E., Cherblanc, F., Bénéat, J.-C. (2004). [Mechanical behaviour and failure of cohesive granular materials](#). *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(15):1577–1594.
- [18] Nguyen, T. K. (2013). *Modélisation multi-échelle des matériaux granulaires frottant-cohésifs*. Luận án Tiến sĩ, Université de Grenoble.
- [19] Mokni, M., Desrues, J. (1999). [Strain localization measurements in undrained plane-strain biaxial tests on Hostun RF sand](#). *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 4(4):419–441.
- [20] Vardoulakis, I., Graf, B. (1985). [Calibration of constitutive models for granular materials using data from biaxial experiments](#). *Géotechnique*, 35(3):299–317.
- [21] Zhu, H., Nicot, F., Darve, F. (2016). [Meso-structure evolution in a 2D granular material during biaxial loading](#). *Granular Matter*, 18(1).
- [22] Kiên, N. T., Thư, N. T. Q., Trung, V. T., Tân, N. N. (2023). Nghiên cứu xây dựng mẫu và kiểm soát chất lượng mẫu trong quá trình nén đẳng hướng bằng phương pháp phần tử rời rạc. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXDH*.
- [23] Nguyen, T.-K. (2021). [On the representative volume element of dense granular assemblies made of 2D circular particles](#). *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Singapore, 499–508.
- [24] François, B., Labiouse, V., Dizier, A., Marinelli, F., Charlier, R., Collin, F. (2012). [Hollow cylinder tests on boom clay: modelling of strain localization in the anisotropic excavation damaged zone](#). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1):71–86.
- [25] Lade, P. V. (2005). [Overview of constitutive models for soils](#). *Calibration of Constitutive Models*, American Society of Civil Engineers.
- [26] Nguyen, T. K., Desrues, J., Combe, G., Nguyen, D. H. (2019). [A numerical homogenized law using discrete element method for continuum modelling of boundary value problems](#). *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Singapore, 715–720.
- [27] Nguyen, T.-K., Vo, T.-T., Nguyen, N.-H. (2021). [DEM investigation on strain localization in a dense periodic granular assembly with high coordination number](#). *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(59): 188–197.
- [28] Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., Mazerolle, F. (1996). [Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography](#). *Géotechnique*, 46(3):529–546.
- [29] Desrues, J., Andò, E., Mevoli, F. A., Debove, L., Viggiani, G. (2018). [How does strain localise in standard triaxial tests on sand: Revisiting the mechanism 20 years on](#). *Mechanics Research Communications*, 92: 142–146.
- [30] Mohamed, A., Gutierrez, M. (2010). [Comprehensive study of the effects of rolling resistance on the stress–strain and strain localization behavior of granular materials](#). *Granular Matter*, 12(5):527–541.
- [31] Iwashita, K., Oda, M. (1998). [Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM](#). *Journal of Engineering Mechanics*, 124(3):285–292.
- [32] Bardet, J. P. (1994). [Observations on the effects of particle rotations on the failure of idealized granular materials](#). *Mechanics of Materials*, 18(2):159–182.
- [33] Nitka, M., Combe, G., Dascalu, C., Desrues, J. (2011). [Two-scale modeling of granular materials: a DEM-FEM approach](#). *Granular Matter*, 13(3):277–281.
- [34] Radjai, F., Dubois, F. (2011). *Discrete-element modeling of granular materials*. Wiley.