

Phát triển một mô hình vật liệu đất có thể mô phỏng ứng xử của đất dưới tải một chiều

Huỳnh Nhật Minh^{1,2*}

¹ Bộ môn Thi công và Quản lý Xây dựng, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa (HCMUT) - 268 Lý Thường Kiệt, Phường 14, Quận 10, TP.HCM

² Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh (VNU-HCM), Phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. HCM

TỪ KHÓA

Mô hình vật liệu đất
Mô phỏng ứng xử đất
Nén cố kết
Tải một chiều
Kết quả thí nghiệm

TÓM TẮT

Phát triển mô hình vật liệu đất ngày càng trở nên phổ biến hiện nay, bởi đất là một vật liệu dạng hạt có ứng xử khác nhau với mỗi điều kiện tải khác nhau. Đã có nhiều nghiên cứu về mô hình vật liệu đất hiện nay. Tuy nhiên, hầu hết các mô hình vật liệu đất này có những nhược điểm đặc thù như là các mô hình đất này chỉ mô phỏng tốt một số trường hợp tải nhất định hoặc những thông số đầu vào của mô hình đó phải bị điều chỉnh thì kết quả mới gần với kết quả thí nghiệm của mẫu đất. Trong nghiên cứu này, một mô hình vật liệu đất được phát triển dựa trên một mô hình vật liệu đất hiệu quả và phổ biến hiện nay, và chú trọng vào việc khắc phục tình trạng hệ số Poisson bị điều chỉnh khác với các thí nghiệm thực tế. Mô hình cải tiến này sẽ dùng hệ số Poisson thực tế của mẫu đất để làm giá trị cho hệ số Poisson nhập vào mô hình vật liệu và phương trình về độ tăng cứng và phương trình về độ giãn nở sẽ được điều chỉnh. Thông qua việc so sánh kết quả mô phỏng của hai mô hình gốc và mô hình cải tiến với kết quả thí nghiệm, tác giả quan sát được mô hình vật liệu cải tiến này có thể khắc phục tình trạng mô phỏng thái quá và tình trạng đánh giá thấp về độ trương nở cũng như độ cứng của đất trong mô hình gốc khi sử dụng đúng giá trị hệ số Poisson của đất trong thí nghiệm. Kết quả này đóng vai trò quan trọng trong việc phát triển mô hình vật liệu đất, giúp các nhà nghiên cứu có thể phát triển tiếp tục mô hình vật liệu này để có thể mô phỏng được các ứng xử khác của đất.

KEYWORDS

Constitutive model
Soil behaviour
Consolidation shearing
Monotonic loading
Experiment result

ABSTRACT

Nowadays, developing a constitutive model for soil has been popular as soil reacts differently with various loading conditions. There have been many studies that are conducted to develop a constitutive model for soil. However, these models are only able to describe the behaviours of soils under certain loading conditions, and the input parameters for soils have to be modified that are different from the data collected from the experiment to fit the simulation results to the experiment results. In this study, a constitutive model is developed based on a well-known and effective constitutive model in the literature and emphasizes the unreal input of Poisson's ratio issue. The developed model employs the real Poisson's ratio as the input parameter and the hardening and dilatancy formulations will be improved. By comparing the simulation results of the original and developed model with the experimental data, the developed model can overcome the problems of overreacting and underestimating the hardening and dilatancy parameters when inputting the real value of Poisson's ratio. This result plays a significant role in developing a constitutive model and contributes to the research field a developed model so that researchers can continue to develop this model to describe soil behaviours.

1. Giới thiệu

Mô hình vật liệu đất ngày càng phổ biến hiện nay bởi một mô hình vật liệu đất tốt đóng vai trò chủ chốt trong việc mô phỏng những bài toán lớn về những thảm họa về đất như sạt lở đất. Việc mô phỏng những hiện tượng thảm họa này có thể ngăn chặn cũng như giảm thiểu

các tác động do các thảm họa đó gây ra cho tính mạng con người cũng như là cơ sở hạ tầng như công trình dân dụng, đường xá và đê đập.

Nhận thức được tầm quan trọng của mô hình vật liệu đất, rất nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để xây dựng và phát triển các mô hình vật liệu đất [1-14]. Tuy nhiên hầu hết các mô hình vật liệu đất này được xây dựng dựa trên lý thuyết trạng thái tới hạn mà không kể đến khoảng cách hệ số rỗng giữa trạng thái hiện tại và trạng thái tới

*Liên hệ tác giả: huynhnhatminh@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 01/09/2022, sửa xong ngày 15/09/2022, chấp nhận đăng 10/01/2023

Link DOI: <http://ojs.jomc.vn/index.php/vn/article/view/441>

hạn của đất trong khi khoảng cách đó là một yếu tố quan trọng để đánh giá được độ chặt của mẫu đất cũng như quyết định ứng xử đặc thù của mỗi trạng thái đất. Chính vì thế nên các mô hình này không mô phỏng được ứng xử của vật liệu đất dưới nhiều trạng thái khác nhau, như là đất chặt, đất vừa và đất yếu, dưới một bộ thông số cố định, mà mỗi trạng thái khác nhau của đất được mô phỏng dưới mỗi bộ thông số khác nhau, tức xem mỗi mẫu đất với mỗi trạng thái khác nhau là một vật liệu khác nhau. Điều này không đúng với những gì quan sát được từ thực nghiệm, cụ thể hơn là khi một mẫu đất bị tác dụng dưới tải một chiều hoặc xoay chiều, trạng thái của mẫu đất sẽ thay đổi liên tục xuyên suốt quá trình chịu tải. Vì vậy nếu muốn mô phỏng những bài toán lớn cho vật liệu đất, cần có một mô hình đất có thể mô phỏng ứng xử của đất xuyên suốt quá trình mô phỏng với một bộ thông số đầu vào duy nhất. Để khắc phục tình trạng này, một số nghiên cứu về mô hình vật liệu đất khác đã kể đến khoảng cách hệ số rỗng giữa trạng thái hiện tại và trạng thái tới hạn của đất trong khung cấu trúc mô hình, tiêu biểu là mô hình vật liệu sử dụng bề mặt siêu tải trọng và tải trọng phụ do Asaoka và cộng sự [6] và mô hình vật liệu tính đến hiệu ứng thay đổi khung hạt đất đề xuất bởi Dafalias và Manzari [2]. Mặc dù mô hình Asaoka và cộng sự [6] có thể mô phỏng được ứng xử của vật liệu đất với nhiều trạng thái khác nhau với một bộ thông số đầu vào, nhưng với việc sử dụng quá nhiều các bề mặt tải trọng cùng với các phương trình phức tạp cấu thành nên mô hình, làm cho mô hình vật liệu đất này trở nên phức tạp và khó thực hiện mô phỏng. Còn đối với mô hình đề xuất bởi Dafalias và Manzari [2], mô hình này được cấu thành bởi các khái niệm và phương trình đơn giản mà hiệu quả, có thể mô phỏng được ứng xử của vật liệu đất dưới nhiều trạng thái khác nhau với một bộ thông số đầu vào. Tuy nhiên, để mô hình này có kết quả mô phỏng gần với kết quả thu được từ thí nghiệm các mẫu đất thì giá trị hệ số Poisson nhập vào mô hình phải bị giảm xuống còn rất nhỏ. Lúc này giá trị hệ số Poisson được nhập vào mô hình không còn là giá trị thực nữa mà là có thể xem như là một giá trị nhập tay vào. Điều này làm cho mô hình không phản ánh được vai trò của hệ số Poisson trong khung cấu trúc cấu thành mô hình. Một nghiên cứu khác cũng phát triển mô hình vật liệu đất dựa trên mô hình đề xuất bởi Dafalias và Manzari [2] và mô phỏng ứng xử đất với giá trị hệ số Poisson nhập vào mô hình là giá trị thực, đó là nghiên cứu đề xuất bởi Taiebat và Dafalias [15]. Dù nghiên cứu này khắc phục được vấn đề về giá trị của hệ số Poisson nhập vào mô hình nhưng mô hình này được mô phỏng với mặt dẻo rất phức tạp.

Trong nghiên cứu này, một mô hình vật liệu đất sẽ được cải tiến dựa trên mô hình vật liệu đất đề xuất bởi Dafalias và Manzari [2] để mô phỏng ứng xử của đất dưới tác dụng của tải một chiều. Lý do mô hình này được lựa chọn làm mô hình vật liệu đất gốc để phát triển là vì mô hình này có khung mô hình đơn giản nhưng hiệu quả và có thể mô phỏng được ứng xử của đất với nhiều trạng thái khác nhau sử dụng một bộ thông số đầu vào. Tuy nhiên, như đã đề cập ở trên, kết quả mô phỏng của mô hình này, tức kết quả đã được công bố trên bài báo gốc [2] là kết quả mô phỏng đã được hiệu chỉnh hệ số Poisson xuống còn rất nhỏ [15] để kết quả có thể gần với kết quả thực nghiệm nhất có thể. Trong bài báo này, giá trị của hệ số Poisson được nhập vào mô hình sẽ

là hệ số Poisson thực của đất, và các phương trình của hệ số tăng bền và hệ số giãn nở sẽ được hiệu chỉnh để có thể mô phỏng các ứng xử của đất dưới tác dụng của tải một chiều. Để thực hiện được mục tiêu này, đầu tiên mô hình gốc sẽ được mô phỏng với hệ số Poisson nhập vào mô hình là hệ số Poisson thực của đất, đồng thời các hệ số nhập tay, tức các hệ số được tìm ra bằng cách sử dụng phương pháp thử, được thử tuần tự sao cho kết quả mô phỏng của mô hình gốc gần với kết quả thí nghiệm nhất có thể. Từ ưu khuyết điểm của kết quả mô phỏng, tác giả tiến hành cải tiến các phương trình của hệ số tăng bền và hệ số giãn nở trong khung mô hình để có thể khắc phục được những nhược điểm của mô hình gốc nhưng vẫn giữ lại các ưu điểm của mô hình gốc. Trong những phần tiếp theo, bài báo này sẽ trình bày khung cấu trúc cấu thành mô hình vật liệu đất cải tiến ở phần thứ 2, đã bao gồm phương trình được tác giả hiệu chỉnh trong mô hình vật liệu gốc. Phần thứ 3 sẽ trình bày kết quả mô phỏng của cả hai mô hình, mô hình vật liệu gốc và mô hình vật liệu sau khi được cải tiến, từ đó có thể so sánh kết quả mô phỏng của hai mô hình vật liệu này. Phần thứ 4 là phần kết luận.

2. Mô hình vật liệu đất cải tiến

Mô hình được chọn để phát triển là mô hình vật liệu được công bố bởi Dafalias và Manzari [2]. Mô hình này là một mô hình được phát triển lên từ mô hình đề xuất bởi Manzari và Dafalias [16]. Mô hình sử dụng lý thuyết đàn hồi dẻo, lý thuyết đường tới hạn và khái niệm mặt bao. Mô hình này cũng có tích hợp sự phát triển của cấu trúc khung hạt đất vào hệ số giãn nở để mô phỏng ứng xử của đất dưới tác dụng của tải xoay chiều. Trong phần này, phương trình phát triển của cấu trúc khung hạt đất vẫn được trình bày để giữ được khả năng mô phỏng ứng xử của đất dưới tác dụng của tải xoay chiều, nhưng trọng tâm của nghiên cứu thì đặt ở khả năng mô phỏng ứng xử của đất dưới tải một chiều.

Mô hình này sử dụng lý thuyết đàn hồi dẻo nên biến dạng toàn phần của đất sẽ từ hai thành phần biến dạng, đó là thành phần biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo:

$$d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^p \quad (1)$$

trong đó $d\epsilon^e$ là thành phần biến dạng đàn hồi và $d\epsilon^p$ là thành phần biến dạng dẻo.

2.1. Ứng xử đàn hồi

Trong thành phần biến dạng đàn hồi $d\epsilon^e$, được cấu thành từ biến dạng thể tích và dạng lệch:

$$d\epsilon^e = d\epsilon^v I + d\epsilon^q \quad (2)$$

trong đó, biến dạng $d\epsilon^v$ là thành phần biến dạng thể tích và biến dạng $d\epsilon^q$ là thành phần biến dạng lệch và I là tensor đơn vị 2 chiều. Các thành phần biến dạng này được tính toán như sau:

$$d\epsilon^v = \frac{dp'}{K}, \quad d\epsilon^q = \frac{ds}{2G}, \quad (3)$$

trong đó, p' là ứng suất hữu hiệu trung bình, $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$, s là ten-xơ ứng suất lệch, $s' = \sigma' - p'I$, K và G lần lượt là mô-đun thể tích

và mô-đun cắt, được tính toán theo nghiên cứu bởi Richart và cộng sự [17] và nghiên cứu bởi Li và Dafalias [18] với công thức như sau:

$$G = G_0 p_{at} \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p'}{p_{at}}\right)^{1/2}, \quad K = \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} G \quad (4)$$

trong đó G_0 là một hằng số tùy theo mỗi loại đất, ν là hệ số Poisson, p_{at} là áp suất khí quyển, và e là hệ số rỗng.

2.2. Mặt dẻo

Mặt dẻo là một bề mặt mà tại đó ứng xử của đất là đàn hồi dẻo với biến dạng gồm hai thành phần biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo, còn nếu trạng thái của đất nằm phía trong mặt dẻo thì ứng xử của đất là ứng xử đàn hồi với sự xuất hiện của duy nhất thành phần biến dạng đàn hồi. Trong mô hình này, mặt dẻo là một hình nón với đỉnh của nó tại gốc tọa độ như Hình 1. Hình nón này có phương trình như sau:

$$f = [(s - p'\alpha) : (s - p'\alpha)]^{1/2} - \sqrt{\frac{2}{3}} m p' \quad (5)$$

trong đó, α là một ten-xơ hệ số ứng suất lệch thể hiện vị trí của tâm hình nón, m là một hằng số thể hiện bán kính của hình nón. Trong hệ tọa độ nén 3 trục thì mặt dẻo là một hình nêm với α là đường phân giác của hình nêm đó và $2m$ là bề rộng nêm như Hình 1.

2.3. Mặt tới hạn

Mô hình này cũng sử dụng lý thuyết trạng thái tới hạn, tức khi đất bị phá hoại thì trạng thái của đất nằm trên mặt tới hạn. Để tích hợp lý thuyết này vào mô hình, khoảng cách hệ số rỗng giữa trạng thái hiện tại và trạng thái tới hạn, gọi là hệ số trạng thái, được sử dụng theo công thức:

$$\psi = e - e_c \quad (6)$$

trong đó e là hệ số rỗng và e_c là hệ số rỗng tại trạng thái tới hạn với cùng ứng suất trung bình, và được tính toán bằng cách sử dụng hàm mũ được đề xuất bởi Li và Wang [19] như sau:

$$e_c = e_0 - \lambda_c \left(\frac{p'}{p_{at}}\right)^\xi \quad (7)$$

trong đó, e_0 là hệ số rỗng tại trạng thái ứng suất trung bình $p' = 0$, các hệ số λ_c và ξ là hằng số.

Trong hệ tọa độ ba trục, mặt tới hạn là một đường thẳng như Hình 1. Trong hệ tọa độ đa trục, góc Lode θ được sử dụng để phản chiếu đường thẳng tới hạn này thành một mặt tới hạn, mặt tới hạn này có phương trình như sau:

$$\alpha_\theta^c = \sqrt{\frac{2}{3}} [g(\theta, c)M - m]n \quad (8)$$

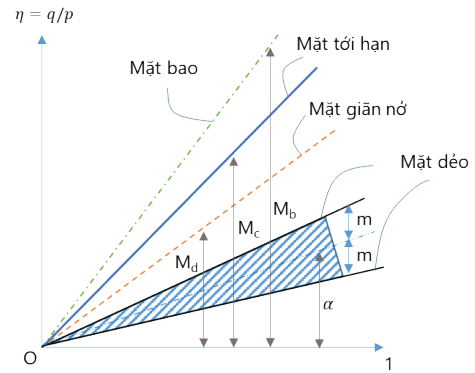
trong đó, M là giá trị tan của góc của đường thẳng tới hạn trong mặt phẳng $p - q$, n là ten-xơ đơn vị của ứng suất lệch, và $g(\theta, c)$ là một hàm của góc Lode θ và hằng số c với phương trình như sau:

$$n = \frac{(s - p'\alpha)}{[(s - p'\alpha) : (s - p'\alpha)]^{1/2}}, \quad (9)$$

$$g(\theta, c) = \frac{2c}{(1 + c) - (1 - c)\cos 3\theta} \quad (10)$$

$$\cos 3\theta = \sqrt{6}tr(n^3) \quad (11)$$

$$c = \frac{M_e}{M_c} \quad (12)$$



Hình 1. Các mặt bao, mặt tới hạn, mặt giãn nở và mặt dẻo trong mô hình đề xuất bởi Dafalias và Manzari [2].

2.4. Sự phát triển của cấu trúc khung hạt đất

Cấu trúc khung hạt đất được mô tả bằng một biến được tích lũy từ biến dạng thể tích dẻo như sau:

$$df = -c_z (-d\varepsilon_v^p) (f_{max} n + f) \quad (13)$$

với f là hệ số cấu trúc khung hạt đất, ε_v^p là biến dạng thể tích dẻo, c_z và f_{max} là hằng số cho mỗi loại vật liệu đất, n là ten-xơ lệch của ten-xơ vuông góc với mặt dẻo.

2.5. Mặt bao và hệ số tăng bền

Mặt bao là mặt mà khi hệ số ứng suất $\eta = p/q$ chạm đến mặt bao thì hệ số ứng suất đó là hệ số ứng suất lớn nhất khi mẫu đất dưới tải một chiều. Dafalias và Popov [20] và Dafalias [21] đã đề xuất rằng hệ số tăng bền phụ thuộc vào khoảng cách giữa trạng thái ứng suất hiện tại và vị trí của mặt bao. Trong mô hình này, mô-đun tăng bền được thể hiện bằng phương trình như sau:

$$K_p = \frac{2}{3} p' h (\alpha_b - \alpha) n \quad (14)$$

trong đó α_b là mặt bao trong hệ tọa độ đa trục, được thể hiện như sau:

$$\alpha_b^b = \sqrt{\frac{2}{3}} [g(\theta, c) M \exp(-n^b \psi) - m] n \quad (15)$$

với n^b là hằng số cho mỗi loại vật liệu đất, và h là hệ số tăng bền được thể hiện ở mô hình gốc dưới công thức $h = b_0 / |\eta - \eta_{in}|$. Tuy nhiên, trong mô hình cải tiến này, tác giả đã nhận thấy mối liên hệ giữa ứng suất trung bình hữu hiệu ban đầu của mỗi mẫu đất và độ tăng bền, nên tác giả cải tiến hệ số tăng bền h có kể đến ứng suất trung bình hữu hiệu ban đầu với công thức được thể hiện như sau:

$$h = \left(\frac{p'_0 + p'_{ref}}{p_{at}}\right) \frac{b_0}{|\eta - \eta_{in}|}, \quad b_0 = G_0 h_0 (1 - c_h e) \left(\frac{p'}{p_{at}}\right)^{-1/2} \quad (16)$$

trong đó, h_0 và c_h là hằng số cho mỗi loại vật liệu đất, p'_0 là ứng suất trung bình hữu hiệu ban đầu, p'_{ref} là ứng suất tham khảo tùy vào mỗi vật liệu đất và tùy vào giá trị của p'_0 .

2.6. Mặt giãn nở và hệ số giãn nở

Mặt giãn nở là mặt mà khi trạng thái ứng suất của mẫu đất dưới tải một chiều đi qua mặt giãn nở thì xu hướng thay đổi thể tích của mẫu đất sẽ từ nén sang nở. Thuyết giãn nở của Rowe [22] đề xuất rằng hệ số giãn nở D tỉ lệ với khoảng cách giữa trạng thái ứng suất hiện tại và mặt giãn nở. Phương trình của hệ số giãn nở được thể hiện như sau:

$$D = A_d(\alpha_\theta^d - \alpha): n \tag{17}$$

trong đó, α_θ^d là mặt giãn nở trong hệ tọa độ đa trục với công thức bên dưới:

$$\alpha_\theta^d = \sqrt{\frac{2}{3}} [g(\theta, c) M \exp(n^d \psi) - m] n \tag{18}$$

trong đó:

n^d là hằng số cho mỗi loại vật liệu đất.

A_d là hệ số của thành phần giãn nở phụ thuộc vào cấu trúc khung hạt đất. Mô hình vật liệu đất gốc có công thức của A_d là $A_d = A_0(1 + \langle n: f \rangle)$.

Tuy nhiên, tác giả nhận thấy mối liên hệ giữa độ giãn nở của đất và hệ số lỗ rỗng, nên tác giả cải tiến hệ số của thành phần giãn nở như sau:

$$A_d = e A_0(1 + \langle n: f \rangle) \tag{19}$$

trong đó, A_0 là hằng số cho mỗi vật liệu đất và e là hệ số lỗ rỗng. Dấu ngoặc trong $\langle n: f \rangle$ có ý nghĩa rằng nếu $n: f \geq 0$ thì $\langle n: f \rangle = n: f$, còn nếu $n: f < 0$ thì $\langle n: f \rangle = 0$.

2.7. Biến dạng dẻo và hệ số tải

Biến dạng dẻo được hình thành với phương trình sau:

$$d\varepsilon^p = d\lambda R \tag{20}$$

$$R = Bn - C \left(n^2 - \frac{1}{3} I \right) + \frac{1}{3} DI \tag{21}$$

$$B = 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{1-c}{c} \right) g \cos 3\theta \tag{22}$$

$$d\lambda = 3 \sqrt{\frac{3}{2}} \left(\frac{1-c}{c} \right) g \tag{23}$$

trong đó, $d\lambda$ là hệ số tải trong hệ tọa độ đa chiều, R là hướng của ten-xơ biến dạng dẻo $d\varepsilon^p$. Cũng như thành phần biến dạng đàn hồi, thành phần biến dạng dẻo bao gồm thành phần biến dạng lệch và thành phần biến dạng thể tích. Vì thế, R cũng được cấu thành từ hai thành phần, phần lệch $Bn - C(n^2 - 1/3I)$ và phần thể tích $DI/3$. Hệ số tải trọng $d\lambda$ được tính toán được từ phương trình vi phân của mặt dẻo $df = 0$, với công thức như sau:

$$\langle L \rangle^M = \frac{2Gd\varepsilon_q: n - KNd\varepsilon_v}{K_p + 2G \left[B - C \left(n^2 - \frac{1}{3} I \right): n \right] - KDN} \tag{24}$$

$$N = \alpha: n + \sqrt{2/3} m \tag{25}$$

3. Đánh giá kết quả mô phỏng của mô hình vật liệu đất sau khi cải tiến

Trong phần này, thông số đầu vào của hai mô hình, mô hình cải tiến và mô hình gốc, sẽ được trình bày, và kết quả của hai mô hình sẽ được so sánh với kết quả thí nghiệm của các mẫu đất.

3.1. Thông số đầu vào của mô hình

Hai mô hình vật liệu đất gốc và mô hình vật liệu đất cải tiến đều có 15 thông số đầu vào được thể hiện trong Bảng 1. Nếu tính cả p'_{ref} thì mô hình vật liệu cải tiến có 16 thông số đầu vào. Tuy nhiên, tác giả cho rằng p'_{ref} không phải là thông số đầu vào của mô hình mà là một giá trị tham khảo để kết quả mô phỏng có thể mô phỏng ứng xử của vật liệu đất với các giá trị p'_0 cần mô phỏng. Trong nghiên cứu này p'_{ref} được lấy là 3000 kPa. Thông số đầu vào mô-đun đàn hồi có thể được xác định từ thí nghiệm cắt trực tiếp hoặc thí nghiệm cột đất cộng hưởng. Đối với hệ số Poisson, hệ số Poisson được lấy bằng 0,25 từ thí nghiệm [3, 14], chứ không được coi như là một thông số dùng để hiệu chỉnh để mô phỏng ứng xử của đất gần với kết quả thí nghiệm và bị giảm đến giá trị rất nhỏ là 0,05 như trong mô hình gốc.

Những thông số trạng thái tới hạn được lấy từ các thí nghiệm nén cố kết thoát nước và không thoát nước với những giá trị hệ số rỗng ban đầu và ứng suất trung bình ban đầu khác nhau. Những thông số λ_c , e_0 và ξ được lấy từ thí nghiệm nén cố kết thoát nước, và các thông số M_c và M_e được tính toán từ góc nội ma sát của đất. Còn đối với các thông số n^b và n^d được xác định từ công thức sau đây:

$$n^b = \frac{1}{\psi^b} \ln \left(\frac{M}{M^b} \right), n^d = \frac{1}{\psi^d} \ln \left(\frac{M^d}{M} \right) \tag{26}$$

trong đó M^b và ψ^b là hệ số ứng suất và hệ số trạng thái của tại trạng thái đất đạt hệ số ứng suất lớn nhất, M^d và ψ^d là hệ số ứng suất và hệ số trạng thái tại trạng thái mà xu hướng thay đổi thể tích chuyển từ co sang giãn nở. Giá trị của thông số n^b và n^d là giá trị trung bình của các mẫu đất kết hợp với việc làm sao cho kết quả mô phỏng gần với kết quả thí nghiệm nhất. Đối với thông số mặt dẻo m thì được lấy từ 0,01 M đến 0,05 M [2, 3, 14]. Còn những thông số khác như h_0 , c_h và A_0 thì được xác định bằng phương pháp thử, tức thử giá trị sao cho kết quả mô phỏng gần với kết quả thí nghiệm nhất. Đối với các thông số kết cấu khung hạt đất, f_{max} và c_z , thì cũng sử dụng phương pháp thử, nhưng khác ở chỗ chỉ thử sao cho kết quả mô phỏng đất dưới tải xoay chiều sao cho gần với giá trị thí nghiệm nhất. Loại đất trong nghiên cứu này dùng để lấy kết quả thí nghiệm là cát Toyoura với hầu hết các thông số giống với nghiên cứu của Dafalias và Manzari [2].

3.2. Kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng của hai mô hình vật liệu đất gốc và mô hình vật liệu đất cải tiến sẽ được trình bày trong phần này. Kết quả sẽ bao gồm kết quả mô phỏng của cát Toyoura dưới điều kiện nén cố kết thoát nước và không thoát nước với nhiều giá trị hệ số lỗ rỗng ban đầu và ứng suất hữu hạn trung bình ban đầu khác nhau. Kết quả mô phỏng được lấy từ nghiên cứu của Verdugo và Ishihara [23], dữ liệu được lấy từ Dafalias and Manzari [2]. Kết quả mô phỏng của mỗi mô hình sẽ được thể hiện chung trong một hình với kết quả thí nghiệm của mẫu đất để việc so sánh được thực hiện dễ dàng hơn.

Bảng 1. Thông số đầu vào.

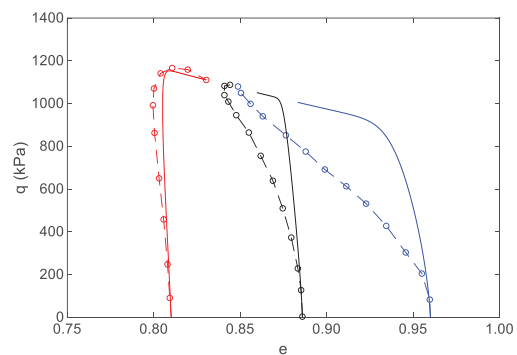
Nhóm thông số	Kí hiệu thông số	Mô hình vật liệu	
		Gốc	Cải tiến
Thông số đàn hồi	G_0	125	125
	ν	0,05	0,25
Thông số trạng thái tới hạn	M	1,25	1,25
	c	0,712	0,712
	λ_c	0,019	0,019
	e_0	0,934	0,934
	ξ	0,7	0,7
Thông số mặt dẻo	m	0,01	0,01
Thông số giãn nở	A_0	0,704	0,43
	n^d	3,5	3,5
Thông số độ tăng bền	h_0	7,05	0,125
	c_h	0,968	0,968
	n^b	1,1	1,1
Thông số khung cấu trúc khung hạt đất	f_{max}	4	4
	c_z	600	600

Hình 2 thể hiện kết quả mô phỏng của mẫu đất dưới điều kiện nén cố kết thoát nước cùng với kết quả thí nghiệm. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng mô hình vật liệu gốc có thể mô phỏng được cơ chế phát triển ứng suất của mẫu đất cũng như cơ chế thay đổi về thể tích đất dưới tác dụng của điều kiện nén cố kết thoát nước với nhiều trạng thái ban đầu khác nhau nhưng vẫn dùng một bộ giá trị thông số đầu vào. Điều này là do mô hình gốc sử dụng lý thuyết đường tới hạn cùng với việc tích hợp thông số trạng thái vào các phương trình của mặt bao và mặt giãn nở. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng của mô hình gốc vẫn còn nhiều khuyết điểm để có thể mô phỏng giá trị thí nghiệm của mẫu đất, đặc biệt là đối với mẫu không chặt và mẫu. Hình 2b cho thấy mô hình gốc đánh giá thấp độ tăng bền của mẫu đất khi đất mới bị chịu tải, thể hiện bởi đường cong ứng suất – biến dạng có xu hướng đi lệch về phía bên phải so với đường cong ứng suất – biến dạng của mẫu thí nghiệm. Đồng thời, Hình 2a cho thấy rằng mô hình gốc cho kết quả mô phỏng thái quá sự biến dạng thể tích của đất trong quá trình đất bị nén cố kết thoát nước. Những nhược điểm này được khắc phục trong mô hình cải tiến đất nhưng mô hình cải tiến vẫn giữ được những ưu điểm đã kể trên của mô hình vật liệu gốc. Biểu đồ biến dạng lệch – ứng suất lệch

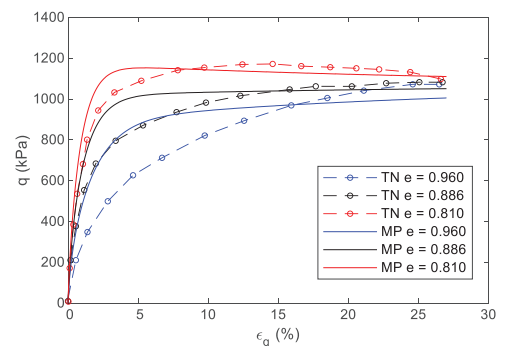
Hình 3 thể hiện kết quả mô phỏng của mô hình vật liệu cải tiến cùng với kết quả thí nghiệm của mẫu đất cho thấy rằng kết quả mô phỏng không những kế thừa những ưu điểm của mô hình vật liệu gốc về mặt thể hiện được cơ chế phát triển ứng suất và cơ chế thay đổi thể tích của mẫu đất dưới điều kiện nén cố kết thoát nước mà còn khắc phục được nhược điểm về mặt đánh giá thấp độ tăng bền của mẫu đất khi mới chịu tải và mô phỏng thái quá sự biến dạng thể tích của mẫu đất dưới điều kiện nén cố kết thoát nước.

Hình 4 thể hiện kết quả mô phỏng của mô hình vật liệu gốc và kết quả thí nghiệm của các mẫu đất dưới điều kiện nén cố kết không thoát nước với nhiều trạng thái ban đầu khác nhau. Ta thấy kết quả mô

phỏng của mô hình vật liệu gốc mô tả thái quá độ tăng bền dưới điều kiện nén cố kết không thoát nước, được nhận thấy ở Hình 4b. Đồng thời, mô hình đánh giá thấp quá trình thay đổi thể tích của mẫu đất. Dưới điều kiện nén cố kết không thoát nước thì thể tích của mẫu đất không thay đổi xuyên suốt quá trình nén mẫu, vì vậy toàn bộ quá trình thay đổi thể tích của mẫu đất không được diễn ra, thay vào đó việc không thể thay đổi thể tích làm xuất hiện áp lực nước lỗ rỗng, làm cho ứng suất hữu hiệu trung bình của mẫu đất tăng lên nếu mẫu đất có xu hướng trương nở và giảm đi nếu thể tích mẫu đất co lại. Vì vậy mà đường ứng suất ở Hình 5 chưa gần với kết quả thí nghiệm. Sau khi phát triển mô hình gốc với sự sửa đổi phương trình độ tăng bền và phương trình giãn nở, mô hình vật liệu cải tiến đã khắc phục được những nhược điểm nêu trên, thể hiện ở Hình 5. Từ kết quả mô phỏng của vật liệu cải tiến, ta thấy vật liệu cải tiến vẫn giữ được ưu điểm của mô hình vật liệu gốc ở chỗ mô hình có thể mô tả được cơ chế phát triển ứng suất và thể tích cho các mẫu đất dưới điều kiện nén cố kết không thoát nước với nhiều trạng thái ban đầu khác nhau. Đồng thời, mô hình cải tiến đã khắc phục được vấn đề về việc mô phỏng thái quá độ tăng bền và đánh giá thấp độ tăng ứng suất nước lỗ rỗng dưới điều kiện nén cố kết không thoát nước, làm cho kết quả mô phỏng của mô hình gần với kết quả thí nghiệm hơn so với mô hình vật liệu gốc.

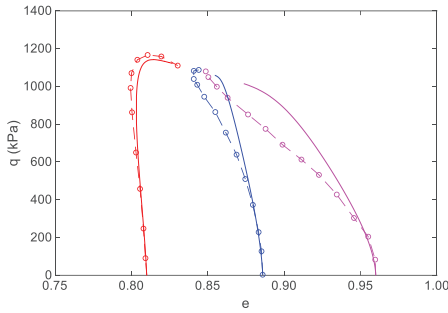


(a) Biểu đồ hệ số rỗng – ứng suất lệch

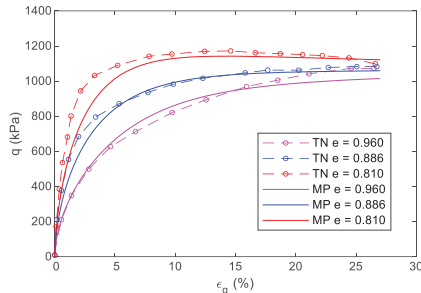


(b) Biểu đồ biến dạng lệch – ứng suất lệch

Hình 2. Kết quả mô phỏng từ mô hình vật liệu đất gốc và kết quả thí nghiệm của các mẫu đất dưới điều kiện nén cố kết thoát nước với ứng suất hữu hiệu ban đầu $p'_0 = 500$ kPa và nhiều giá trị hệ số rỗng e ban đầu khác nhau, ký hiệu “TN” và “MP” trong chú thích lần lượt là kết quả thí nghiệm và kết quả mô phỏng.

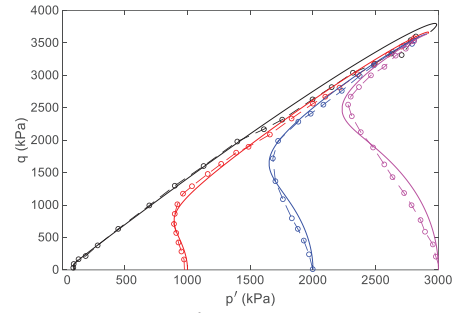


(a) Biểu đồ hệ số rỗng – ứng suất lệch

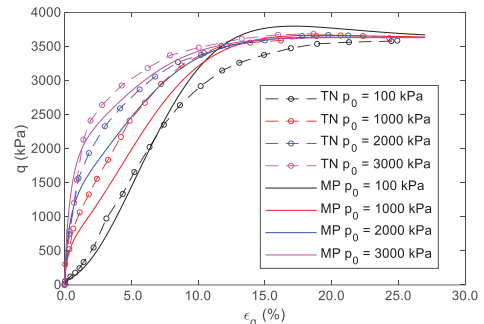


(b) Biểu đồ biến dạng lệch – ứng suất lệch

Hình 3. Kết quả mô phỏng từ mô hình vật liệu đất cải tiến và kết quả thí nghiệm của các mẫu đất dưới điều kiện nén có kết thoát nước với ứng suất hữu hiệu ban đầu $p'_0 = 500$ kPa và nhiều giá trị hệ số rỗng e ban đầu khác nhau.

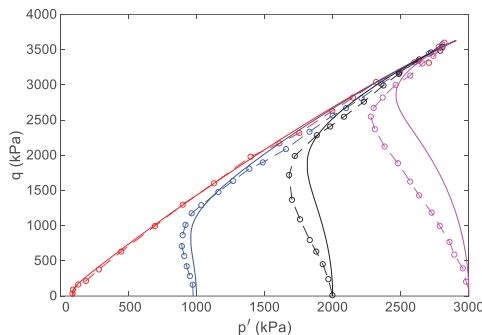


(a) Biểu đồ đường ứng suất

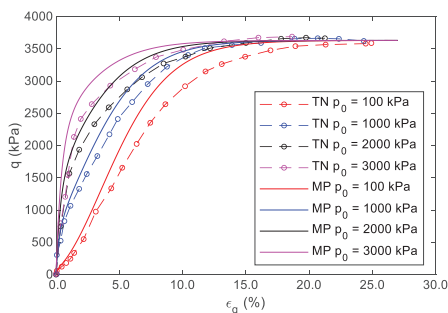


(b) Biểu đồ biến dạng lệch – ứng suất lệch

Hình 5. Kết quả mô phỏng từ mô hình vật liệu đất cải tiến và kết quả thí nghiệm của các mẫu đất dưới điều kiện nén có kết không thoát nước với hệ số rỗng ban đầu $e = 0,735$ và nhiều giá trị ứng suất hữu hiệu ban đầu p'_0 khác nhau.



(a) Biểu đồ đường ứng suất



(b) Biểu đồ biến dạng lệch – ứng suất lệch

Hình 4. Kết quả mô phỏng từ mô hình vật liệu đất gốc và kết quả thí nghiệm của các mẫu đất dưới điều kiện nén có kết không thoát nước với hệ số rỗng ban đầu $e = 0,735$ và nhiều giá trị ứng suất hữu hiệu ban đầu p'_0 khác nhau.

4. Kết luận

Nghiên cứu này hướng tới một mô hình đất cải tiến có thể mô tả ứng xử của đất dưới tác dụng của tải một chiều. Mô hình đất cải tiến trong bài báo này được phát triển dựa trên mô hình vật liệu đất đề xuất bởi Dafalias và Manzari [2]. Mô hình vật liệu đất cải tiến đã khắc phục nhược điểm của mô hình gốc ở các vấn đề mô tả thái quá và đánh giá thấp ở độ tăng bền và sự thay đổi thể tích dưới điều kiện nén có kết thoát nước và không thoát nước khi sử dụng đúng thông số hệ số Poisson đầu vào nhưng vẫn giữ được những ưu điểm vốn có của mô hình gốc. Thông qua việc chỉnh sửa phương trình của độ tăng bền và độ giãn nở của mô hình gốc, mô hình vật liệu cải tiến đã có kết quả mô phỏng gần với kết quả thí nghiệm của mẫu đất hơn. Tuy nhiên, mô hình này đòi hỏi người sử dụng có kinh nghiệm về việc chọn p'_{ref} sao cho phù hợp với các trạng thái ban đầu của đất, và việc áp dụng của mô hình này rộng rãi với nhiều loại vật liệu đất khác nhau sẽ được đề xuất thực hiện ở những nghiên cứu sau.

Lời cảm ơn

Tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Trường Đại học Bách Khoa (HCMUT), Đại học Quốc Gia TP.HCM (VNU-HCM) đã hỗ trợ về thời gian và thiết bị để tác giả có thể hoàn thành nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. R. Boulanger and K. Ziotopoulou, "Formulation of a sand plasticity plane-strain model for earthquake engineering applications," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 53, pp. 254-267, 2013.
- [2]. Y. F. Dafalias and M. T. Manzari, "Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects," *Journal of Engineering mechanics*, vol. 130, no. 6, pp. 622-634, 2004.
- [3]. M. R. Abkenar, "A Critical State Two-Surface Plasticity Model for Simulation of Flow Liquefaction and Cyclic Mobility," Ph.D Thesis, Civil and Environmental Engineering, The George Washington University, 2017.
- [4]. Y. Zhang, X. Zhou, and Y. Wen, "Constitutive Theory for Sand Based on the Concept of Critical Fabric Surface," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 146, no. 4, p. 04020019, 2020.
- [5]. A. G. Papadimitriou and G. D. Bouckovalas, "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 191-204, 2002.
- [6]. A. ASAOKA, T. NODA, E. YAMADA, K. KANEDA, and M. NAKANO, "An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils," *Soils and Foundations*, vol. 42, no. 5, pp. 47-57, 2002.
- [7]. S. I. Woo and R. Salgado, "Bounding surface modeling of sand with consideration of fabric and its evolution during monotonic shearing," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 63, pp. 277-288, 2015.
- [8]. Z. Gao, J. Zhao, X. S. Li, and Y. F. Dafalias, "A critical state sand plasticity model accounting for fabric evolution," *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 38, no. 4, pp. 370-390, 2014.
- [9]. Z. Gao and J. Zhao, "A non-coaxial critical-state model for sand accounting for fabric anisotropy and fabric evolution," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 106, pp. 200-212, 2017.
- [10]. J. Zhao and Z. Gao, "Unified anisotropic elastoplastic model for sand," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 142, no. 1, p. 04015056, 2015.
- [11]. Z. Gao and J. Zhao, "Constitutive modeling of anisotropic sand behavior in monotonic and cyclic loading," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 141, no. 8, p. 04015017, 2015.
- [12]. X. S. Li and Y. F. Dafalias, "Anisotropic critical state theory: role of fabric," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 138, no. 3, pp. 263-275, 2011.
- [13]. A. G. Papadimitriou, G. D. Bouckovalas, and Y. F. Dafalias, "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, no. 11, pp. 973-983, 2001.
- [14]. K. I. Andrianopoulos, A. G. Papadimitriou, and G. D. Bouckovalas, "Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geotechnical structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 30, no. 10, pp. 895-911, 2010.
- [15]. M. Taiebat and Y. F. Dafalias, "SANISAND: Simple anisotropic sand plasticity model," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 32, no. 8, pp. 915-948, 2008.
- [16]. M. T. Manzari and Y. F. Dafalias, "A critical state two-surface plasticity model for sands," *Géotechnique*, vol. 47, no. 2, pp. 255-272, 1997.
- [17]. F. Richard, R. Woods, and J. Hall Jr, "Vibration of soils and foundations," 1970.
- [18]. X. S. Li and Y. F. Dafalias, "Dilatancy for cohesionless soils," *Geotechnique*, vol. 50, no. 4, pp. 449-460, 2000.
- [19]. X.-S. Li and Y. Wang, "Linear representation of steady-state line for sand," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 124, no. 12, pp. 1215-1217, 1998.
- [20]. Y. Dafalias and E. Popov, "A model of nonlinearly hardening materials for complex loading," *Acta mechanica*, vol. 21, no. 3, pp. 173-192, 1975.
- [21]. Y. F. Dafalias, "Bounding surface plasticity. I: Mathematical foundation and hypoplasticity," *Journal of engineering mechanics*, vol. 112, no. 9, pp. 966-987, 1986.
- [22]. P. W. Rowe, "The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 269, no. 1339, pp. 500-527, 1962.
- [23]. R. Verdugo and K. Ishihara, "The steady state of sandy soils," *Soils and foundations*, vol. 36, no. 2, pp. 81-91, 1996.