

MÔ PHÒNG ỨNG XỬ PHỤ THUỘC TỐC ĐỘ BIẾN DẠNG CỦA ĐẤT CỐ KẾT THƯỜNG VÀ ĐẤT QUÁ CỐ KẾT

Mạc Thị Ngọc¹

Tóm tắt: Trong quá trình tiến hành thí nghiệm tốc độ biến dạng không đổi (CRS Tests), tốc độ tổng biến dạng được duy trì không đổi dưới tác dụng thay đổi của ứng suất. Tốc độ biến dạng tăng trong suốt quá trình nén của đất làm tăng sức chịu tải của đất, hay nói cách khác khi tốc độ biến dạng lớn hơn thì đất cứng hơn. Nghiên cứu này chứng minh khả năng của mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt đề xuất và phát triển bởi Mac (2020) trong mô phỏng ứng xử phụ thuộc tốc độ biến dạng của đất. Ví dụ và kết quả mô hình số mô phỏng ứng xử phụ thuộc tốc độ biến dạng của đất được kiểm chứng cho đất sét cố kết thường và đất sét quá cố kết trong các thí nghiệm ba trục với điều kiện không thoát nước.

Từ khóa: Mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt, ứng xử phụ thuộc tốc độ biến dạng, đất sét cố kết thường, đất sét quá cố kết.

1. GIỚI THIỆU

Ứng xử biến đổi theo thời gian (*time-dependent behaviour*) của đất, đặc biệt của đất dính đã được ghi nhận rộng rãi qua thực nghiệm và trong các thí nghiệm thực tế của Cơ học đất (Casagrande and Wilson, 1951) (Vaid et al., 1979) (Leroueil et al., 1985) (Mesri et al., 1978) (Lefebvre and LeBoeuf, 1987). Tuy nhiên, nghiên cứu về các hiện tượng biến đổi theo thời gian của vật liệu, đặc biệt là hiện tượng phụ thuộc tốc độ biến dạng của đất còn chưa rõ ràng và đầy đủ. Nguyên nhân sự phức tạp của ứng xử biến đổi theo thời gian của vật liệu là do có sự kết hợp của ứng xử phi tuyến của đất; sự phụ thuộc vào thời gian và tốc độ biến dạng của cốt đất; và cả sự tương tác giữa chất rắn (hạt đất) với chất lỏng và khí trong lỗ rỗng (Mitchell and James Kenneth, 2005).

Một trong những ứng xử biến đổi theo thời gian quan trọng của đất là ảnh hưởng của tốc độ biến dạng (*strain rate effects*) tới trạng thái ứng suất – biến dạng của đất, đặc biệt là đất yếu. Có hai phương pháp thí nghiệm tốc độ biến dạng thường được tiến hành là thí nghiệm tốc độ biến

dạng không đổi (*constant rate of strain, CRS Tests*) và thí nghiệm tốc độ biến dạng thay đổi (*change of rate of strain Tests*) (Augustesen et al., 2004). Bài báo này đề cập tới thí nghiệm thứ nhất là thí nghiệm tốc độ biến dạng không đổi (CRS Tests).

Trong quá trình tiến hành thí nghiệm tốc độ biến dạng không đổi (CRS Tests), tốc độ tổng biến dạng được duy trì không đổi dưới tác dụng thay đổi của ứng suất. Ứng suất được đo và ghi lại trong suốt quá trình thí nghiệm và được thể hiện qua đường quan hệ ứng suất – biến dạng như trên hình 1, tương ứng với các tốc độ biến dạng khác nhau ($\dot{\epsilon}_1 < \dot{\epsilon}_2 < \dot{\epsilon}_3$). Dưới tác động của tốc độ biến dạng lớn hơn thì ứng suất tác dụng tại biến dạng đó sẽ lớn hơn. Hay nói cách khác, trong thí nghiệm tốc độ biến dạng không đổi (CRS Tests), khi tốc độ biến dạng lớn hơn thì đất cứng hơn, hoặc sức chịu tải của đất tốt hơn.

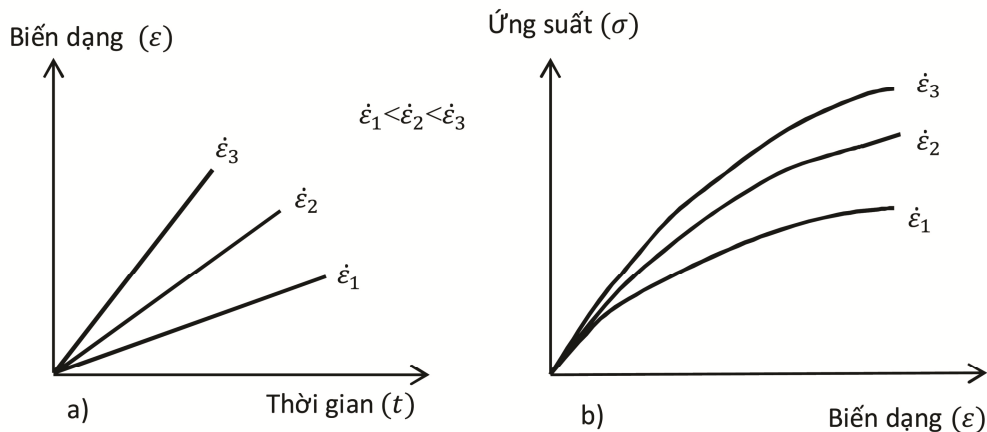
Theo Liingaard et al. (2004), các mô hình mô phỏng mối quan hệ ứng suất – biến dạng phụ thuộc vào tốc độ biến dạng của đất được chia làm ba nhóm chính là: 1) mô hình thực nghiệm (*empirical models*), 2) mô hình lưu biến (*rheological models*) và 3) mô hình toán cơ đàn-

¹ Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi

dẻo-nhớt (*elasto-viscoplastic models*). So với hai nhóm mô hình đầu tiên thì nhóm mô hình thứ ba (mô hình toán cơ đàn-dẻo-nhớt) được phát triển mạnh do có ưu điểm mô phỏng được ứng xử phi tuyến đồng thời với ứng xử biến đổi theo thời gian của vật liệu đất. Ngoài ra, loại mô hình toán cơ đàn-dẻo-nhớt này dễ dàng triển khai trong các bài toán mô hình số, phục vụ cho các bài toán tổng hợp thực tế.

Mục đích của bài báo là giới thiệu mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt được phát triển bởi Mac (2020) để mô phỏng ứng xử biến đổi theo thời gian của vật liệu đất. Đây là mô hình được kết hợp bởi mô hình mặt bao dẻo Khalili et al. (2008) và nguyên lý nhất quán của cơ học (Wang et al., 1997) và (Carosio et al., 2000). Điểm nổi bật của mô hình này là khả năng mô phỏng được

ứng xử phi tuyến của vật liệu đất, đồng thời mô phỏng được sự chuyển tiếp trong ứng xử của vật liệu từ trạng thái dẻo không phụ thuộc tốc độ biến dạng sang trạng thái dẻo-nhớt phụ thuộc tốc độ biến dạng. Điểm khác biệt quan trọng của mô hình tạo nên sự vượt trội so với các mô hình truyền thống theo lý thuyết dẻo, vì các mô hình truyền thống không có khả năng mô phỏng các ứng xử biến đổi theo thời gian của vật liệu đất. Phần 2 của bài báo giới thiệu các điểm chính của mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt được đề xuất bởi Mac (2020). Phần 3 đưa ra các ví dụ thí nghiệm ba trục trong điều kiện không thoát nước cho đất sét cổ kết thường và đất sét quá cổ kết, minh chứng cho khả năng của mô hình trong mô phỏng ứng xử phụ thuộc tốc độ biến dạng của đất.



Hình 1. Thí nghiệm tốc độ biến dạng không đổi (CRS Tests):
a) Quan hệ biến dạng – thời gian; b) Quan hệ ứng suất – biến dạng

2. MÔ HÌNH MẶT BAO ĐÀN-DEO-NHỚT MÔ PHỎNG ỨNG XỬ BIẾN ĐỔI THEO THỜI GIAN CỦA ĐẤT

Để mô phỏng mối quan hệ ứng suất – biến dạng có tính phi tuyến cao như vật liệu đất, các mô hình truyền thống theo lý thuyết dẻo (*plasticity constitutive models*) được sử dụng rộng rãi trong các mô phỏng số và phương pháp số của Cơ học đất và Địa kỹ thuật. Tuy các mô hình truyền thống đã mô phỏng được phần nào đặc tính phi tuyến của vật liệu, nhưng

lại không có khả năng mô phỏng tính chất phụ thuộc tốc độ biến dạng biến đổi theo thời gian của vật liệu đất. Do đó, Mac (2020) đề xuất và phát triển mô hình kết cấu mặt bao đàn-dẻo-nhớt (*the bounding surface viscoplasticity model*) dựa trên nền mô hình mặt bao dẻo đề xuất bởi (Khalili et al., 2008) kết hợp với lý thuyết nhất quán của cơ học (*the consistency theory*) đề xuất bởi (Wang et al., 1997) và (Carosio et al., 2000). Mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt được trình bày chi tiết trong tài liệu

(Mac, 2020). Bài báo này tóm tắt sơ bộ một vài đặc điểm chính của mô hình.

Về cơ bản, biến thiên tổng biến dạng được cấu thành bởi hai thành phần: phần biến dạng đàn hồi ($\delta \boldsymbol{\varepsilon}^e$ - elastic) và phần biến dạng dẻo-nhớt ($\delta \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$ - viscoplastic):

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \delta \boldsymbol{\varepsilon}^e + \delta \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} \quad (1)$$

Thành phần biến dạng đàn hồi được biểu diễn thông qua quan hệ ứng suất – biến dạng đàn hồi:

$$\delta \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}^e \delta \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (2)$$

trong đó $\delta \boldsymbol{\sigma}'$ là biến thiên ứng suất hiệu quả; \mathbf{D}^e là ma trận độ cứng đàn hồi.

Phương trình mặt bao dẻo-nhớt được phát triển từ phương trình mặt bao dẻo của (Khalili et al., 2008) như sau:

$$F(\bar{\sigma}', \bar{\sigma}, \bar{\sigma}') = \left(\frac{\bar{\sigma}}{M_{vis} \bar{\sigma}'} \right)^N - \frac{\ln(\bar{\sigma}'_c / \bar{\sigma}')}{\ln R} = 0 \quad (3)$$

Thành phần biến dạng dẻo-nhớt được tính toán thông qua việc áp dụng nguyên lý nhất quán cho phương trình đường mặt bao dẻo-nhớt (3):

$$\delta F = \left(\frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'} \right)^T \delta \bar{\sigma}' + \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} + \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'_c} \frac{\partial \bar{\sigma}'_c}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = 0 \quad (4)$$

Trong đó:

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = \delta \lambda \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}'}; \quad \delta \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = \delta \lambda \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \quad (5)$$

Áp dụng nguyên lý nhất quán cho phương trình đường mặt bao dẻo-nhớt, phương trình (4) được thu gọn lại thành phương trình vi phân bậc hai như sau:

$$\delta F = \mathbf{n}^T \delta \boldsymbol{\sigma}' - h_B \delta \lambda - \xi \delta \dot{\lambda} = 0 \quad (6)$$

Trong đó $\delta \lambda$ – là bội số dẻo-nhớt, là nghiệm của phương trình vi phân bậc hai (6) và được biểu diễn thông qua biểu thức phụ thuộc vào độ chênh lệch thời gian δt :

$$\delta \lambda^{t+\Delta t} = \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{D}^e \delta \boldsymbol{\varepsilon} + \xi^* \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp t}}{\left(h + \frac{\xi}{\delta t} + \mathbf{n}^T \mathbf{D}^e \mathbf{m} \right)} \quad (7)$$

h_B – là hệ số biến dạng tăng bền của mô hình mặt bao dẻo, đã được đề xuất bởi (Khalili et al., 2008); và ξ – là hệ số tốc độ biến dạng tăng bền, đề xuất bởi (Mac, 2020) được phát triển đặc trưng cho khả năng mô phỏng sự biến đổi theo thời gian của mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt:

$$h_B = - \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'_c} \frac{\partial \bar{\sigma}'_c}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}} \frac{m_p}{\| \partial F / \partial \boldsymbol{\sigma}' \|} \quad (8)$$

$$\xi = - \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}'_c} \frac{\partial \bar{\sigma}'_c}{\partial \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}} \frac{m_p}{\| \partial F / \partial \boldsymbol{\sigma}' \|} \quad (9)$$

Quan hệ giữa ξ và h_B được đề xuất và công bố bởi (Mac et al., 2014) (Mac et al., 2017) (Shahbodagh et al., 2020) (Mac et al., 2020) như sau:

$$\xi = \frac{c_B (\lambda - \kappa)}{v \left(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{p,thr}^{vp} \right)} |h_B| \quad (10)$$

trong đó $c_B = C_\alpha / (\lambda - \kappa) \ln(10)$,

C_α là chỉ số nén thứ cấp và $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{p,thr}^{vp}$ là tốc độ biến dạng giới hạn của đất, được xác định khi vật liệu đất ở trạng thái không bị ảnh hưởng bởi tốc độ biến dạng.

Kết hợp lời giải và nghiệm của phương trình vi phân biến đổi theo độ chênh lệch thời gian δt , phương trình ứng suất – biến dạng của mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt phát triển bởi (Mac, 2020) được viết lại dưới dạng tổng quát như sau:

$$\delta \boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D}^{sup} \delta \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\sigma}'^{sup} \quad (11)$$

trong đó:

$$\mathbf{D}^{sup} = \mathbf{D}^e - \frac{\mathbf{D}^e \mathbf{m} \mathbf{n}^T \mathbf{D}^e}{h + \frac{\xi}{\delta t} + \mathbf{n}^T \mathbf{D}^e \mathbf{m}} \quad (12)$$

$$\sigma^{VP} = \frac{D^e m \frac{\xi}{\delta t} \delta \lambda^e}{n^T D^e m + h + \frac{\xi}{\delta t}} \quad (13)$$

3. MÔ PHÒNG ỨNG XỬ PHỤ THUỘC TỐC ĐỘ BIẾN DẠNG CỦA ĐẤT CÓ HỆ SỐ QUÁ CỐ KẾT KHÁC NHAU

Trong phần này, ứng xử phụ thuộc tốc độ biến dạng của đất sét Cardiff Kaolin được mô phỏng khi sử dụng mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt đã giới thiệu ở phần 2. Các mô phỏng số được tiến hành lập trình trên phần mềm MATLAB. Dữ liệu sử dụng trong mô phỏng số được thu thập từ thí nghiệm ba trục trong điều kiện không thoát nước cho đất dính dưới tác dụng của tải trọng tĩnh được (Banerjee and Stipho, 1978) tiến hành tại trường Đại học Cardiff, xứ Wales, Vương quốc Anh trên các mẫu đất sét Cardiff Kaolin có các độ cố kết khác nhau. Chi tiết của thí nghiệm, bao gồm quá trình chuẩn bị mẫu đất, quá trình thí nghiệm và các

chỉ tiêu thông số của mẫu đất đã được công bố trong tài liệu (Banerjee and Stipho, 1978). Các mẫu thí nghiệm với đất sét cố kết thường (OCR = 1) và đất sét quá cố kết nhẹ (OCR = 2) và đất sét quá cố kết nặng (OCR = 5) được lựa chọn để tiến hành mô phỏng bằng mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt đã đề xuất ở phần 2.

3.1. Các thông số của mô hình

Các thông số về điều kiện ban đầu của mẫu thí nghiệm đất sét Cardiff Kaolin được thống kê trong bảng 1. Các thông số của mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt phát triển bởi (Mac, 2020) cho đất sét Cardiff Kaolin được xác định như sau: hệ số $\kappa = 0,05$ và hệ số $\lambda = 0,14$ được xác định thông qua kết quả thí nghiệm cố kết và thí nghiệm trương nở. Các hệ số $\nu = 0,15$; $M_{cs} = 1,05$; và $\Gamma_0 = 2,676$ được xác định thông qua kết quả thí nghiệm nén ba trục. Các hệ số của mô hình mặt bao đàn-dẻo-nhớt được xác định như sau: $N = 1,44$; $R = 2,9$; $k = 2,0$; $A = 0,4$; và $k_{ml} = 1,0$.

Bảng 1. Điều kiện ban đầu các mẫu thí nghiệm đất sét Cardiff Kaolin

Tên loại đất	Hệ số quá cố kết, OCR	Ứng suất hiệu quả ban đầu, p'_0	Hệ số rỗng ban đầu, e_0
Đất sét Cardiff Kaolin cố kết thường	1	414 kPa	0,93
Đất sét Cardiff Kaolin quá cố kết nhẹ	2	193 kPa	0,97
Đất sét Cardiff Kaolin quá cố kết nặng	5	76 kPa	0,94

Hệ số đặc trưng cho tốc độ biến dạng phụ thuộc theo thời gian được sử dụng là $c_\beta = 0,1$; tốc độ biến dạng chuẩn là $\dot{\epsilon}_{p,r}^{VP} = 10^{-6} / \text{min}$ và tốc độ biến dạng giới hạn là $\dot{\epsilon}_{p,th}^{VP} = 10^{-10} / \text{min}$. Các tốc độ biến dạng khác nhau được mô phỏng trên các mẫu đất dính trong thí nghiệm ba trục trong

điều kiện không thoát nước như sau: Mẫu đất sét cố kết thường (OCR = 1) chịu tác dụng của các tốc độ biến dạng 0,002%/s; 0,004%/s và 0,01%/s. Mẫu đất sét quá cố kết nhẹ (OCR = 2) chịu tác dụng của các tốc độ biến dạng 0,002%/s; 0,01%/s và 0,02%/s. Mẫu sét đất quá cố kết nặng (OCR = 5) chịu

tác dụng của các tốc độ biến dạng 0,002%/s; 0,01%/s và 0,02%/s.

3.2. Kết quả mô phỏng số

Kết quả mô phỏng ứng xử phụ thuộc tốc độ biến dạng của đất sét Cardiff Kaolin với các hệ số quá cố kết OCR khác nhau (OCR = 1, 2 và 5) được trình bày trên hình 2 tới hình 7. Mô phỏng số thể hiện kết quả thí nghiệm nén ba trục không phụ thuộc tốc độ biến dạng và các kết quả phụ thuộc tốc độ biến dạng khác nhau. Các kết quả mô phỏng cho thấy:

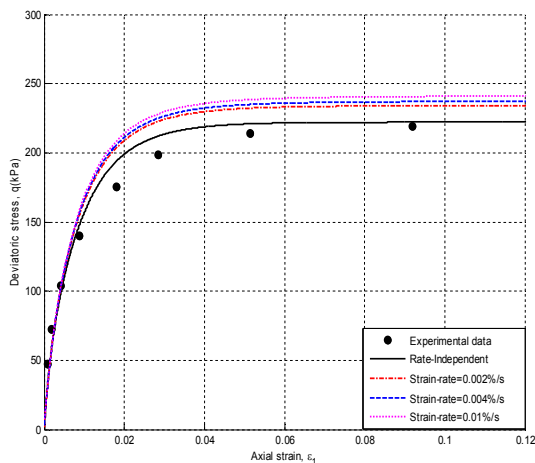
- Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng trên đất sét quá cố kết thường (OCR = 1) (hình 2 và hình 3) rất rõ rệt. Quan hệ ứng suất – biến dạng của đất quá cố kết thường thay đổi ngay cả khi tốc độ biến dạng nhỏ và đất có xu hướng cứng hơn khi tốc độ biến dạng tăng lên.

- Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng trên đất sét quá cố kết nhẹ (OCR = 2) (hình 4 và hình 5) giảm hơn so với đất sét quá cố kết thường (OCR = 1). Quan hệ ứng suất – biến dạng của đất quá cố kết nhẹ ít bị ảnh hưởng bởi tốc độ biến dạng

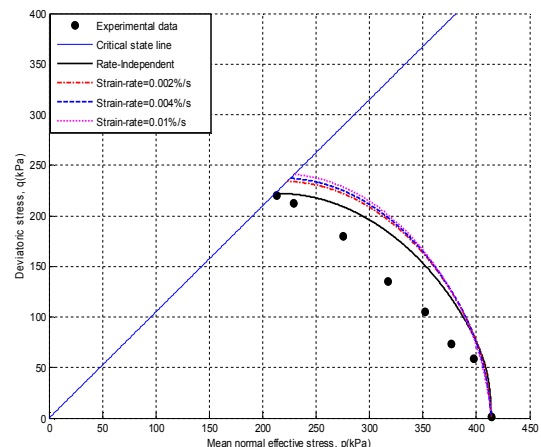
nhỏ, mà sẽ bị ảnh hưởng bởi tốc độ biến dạng lớn hơn.

- Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng trên đất sét quá cố kết nặng (OCR = 5) (hình 6 và hình 7) thì gần như không đáng kể.

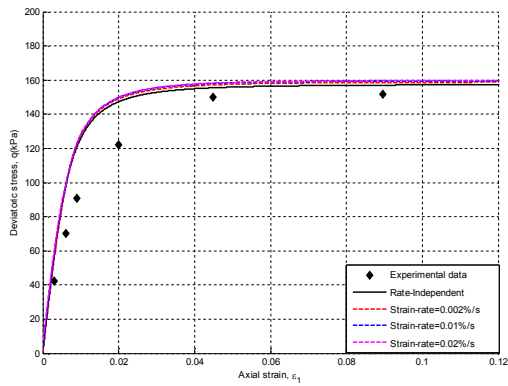
Từ các kết quả trên có thể đưa ra kết luận là ảnh hưởng của tốc độ biến dạng trong điều kiện không thoát nước tỷ lệ nghịch với hệ số quá cố kết của đất dính. Ngoài ra, cũng có thể thấy đất sét quá cố kết nặng hầu như không bị ảnh hưởng bởi tốc độ biến dạng. Hay nói cách khác, đất có hệ số quá cố kết (OCR) càng nhỏ thì quan hệ ứng suất – biến dạng của mẫu đất càng bị ảnh hưởng nhiều bởi tốc độ biến dạng. Các kết quả mô phỏng này trên đất sét Cardiff Kaolin cũng đồng nhất với các kết quả thí nghiệm sự phụ thuộc tốc độ biến dạng của đất được công bố bởi các tác giả khác đã được đề cập trong tài liệu (Mitchell and James Kenneth, 2005). Điều đó cho thấy, mô phỏng số trong ứng xử biến đổi theo thời gian của đất dính có hệ số quá cố kết khác nhau là rất quan trọng và cần thiết trong cơ học đất và xây dựng công trình.



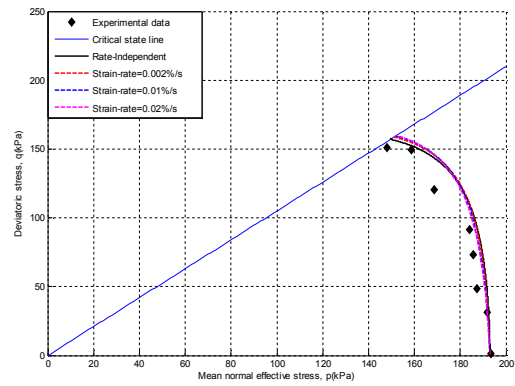
Hình 2. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng lên quan hệ ứng suất – biến dạng của đất sét Cardiff Kaolin quá cố kết thường (OCR = 1, $p'_0 = 414$ kPa, $e_0 = 0.93$): Quan hệ giữa độ lệch ứng suất q và biến dạng trục ε_1



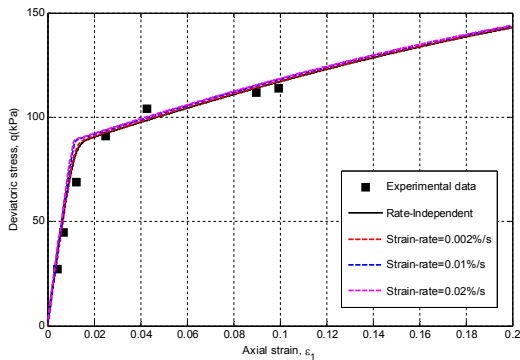
Hình 3. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng lên quan hệ ứng suất – biến dạng của đất sét Cardiff Kaolin quá cố kết thường (OCR = 1, $p'_0 = 414$ kPa, $e_0 = 0.93$): Quan hệ giữa độ lệch ứng suất q và ứng suất hiệu quả p



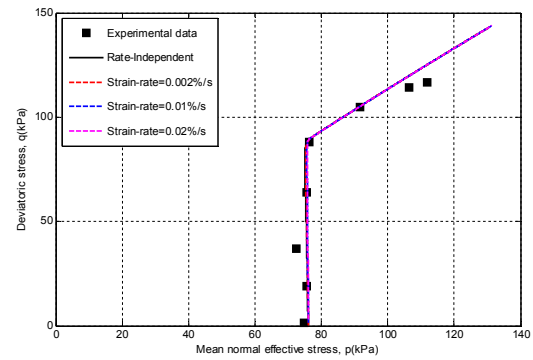
Hình 4. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng lên quan hệ ứng suất – biến dạng của đất sét Cardiff Kaolin quá cố kết nhẹ ($OCR = 2, p'_0 = 193 \text{ kPa}, e_0 = 0.97$): Quan hệ giữa độ lệch ứng suất q và biến dạng trục ε_1



Hình 5. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng lên quan hệ ứng suất – biến dạng của đất sét Cardiff Kaolin quá cố kết nhẹ ($OCR = 2, p'_0 = 193 \text{ kPa}, e_0 = 0.97$): Quan hệ giữa độ lệch ứng suất q và ứng suất hiệu quả p



Hình 6. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng lên quan hệ ứng suất – biến dạng của đất sét Cardiff Kaolin quá cố kết nặng ($OCR = 5, p'_0 = 76 \text{ kPa}, e_0 = 0.94$): Quan hệ giữa độ lệch ứng suất q và biến dạng trục ε_1



Hình 7. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng lên quan hệ ứng suất – biến dạng của đất sét Cardiff Kaolin quá cố kết nặng ($OCR = 5, p'_0 = 76 \text{ kPa}, e_0 = 0.94$): Quan hệ giữa độ lệch ứng suất q và ứng suất hiệu quả p

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày ảnh hưởng của tốc độ biến dạng tới trạng thái ứng suất – biến dạng của vật liệu đất. Dưới tác động của biến dạng lớn hơn thì ứng suất tác dụng tại biến dạng đó lớn hơn, do đó đất cứng hơn và có sức chịu tải lớn hơn. Bài báo cũng giới thiệu mô hình mật bao đàn-dẻo-nhớt được phát triển bởi (Mac, 2020) mô phỏng ứng xử biến đổi theo thời gian của vật liệu đất. Điểm nổi bật của mô hình này là khả năng mô phỏng

được ứng xử phi tuyến của vật liệu đất kết hợp với sự chuyển tiếp trong ứng xử của vật liệu từ trạng thái dẻo không phụ thuộc tốc độ biến dạng sang trạng thái dẻo-nhớt phụ thuộc tốc độ biến dạng. Đây cũng là điểm còn thiếu trong các mô hình truyền thống theo lý thuyết dẻo hiện đang được sử dụng phổ biến trong mô phỏng số trong Cơ học đất và Địa kỹ thuật. Để minh chứng cho khả năng của mô hình, bài báo đưa ra ví dụ mô phỏng ứng xử phụ thuộc tốc độ biến dạng của đất

dính có hệ số quá cố kết (OCR) khác nhau. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng trong điều kiện thí nghiệm ba trục không thoát nước tỷ lệ nghịch với hệ số quá cố kết (OCR) của đất dính. Đất cố kết thường chịu ảnh hưởng lớn bởi tốc độ biến dạng, trong khi đất quá cố kết nặng hầu như không chịu ảnh hưởng của tốc độ biến dạng. Nghiên cứu này là cơ sở quan trọng cho lý thuyết, thực nghiệm và mô phỏng số khi xét tới các bài toán có sự ảnh hưởng của tốc độ biến

dạng và các hiện tượng khác liên quan tới biến dạng biến đổi theo thời gian của cốt đất như lún từ biến và trùng ứng suất.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được thực hiện tại Trường Đại học New South Wales, Australia. Tác giả xin chân thành cảm ơn sự hướng dẫn và hỗ trợ của các giáo sư tại Khoa Kỹ Thuật Xây dựng và Môi trường, Trường Đại học New South Wales, Australia.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- AUGUSTESEN, A., LIINGAARD, M. & LADE, P. V. 2004. *Evaluation of time-dependent behavior of soils*. International Journal of Geomechanics, 4, 137-156.
- BANERJEE, P. K. & STIPHO, A. S. 1978. *Associated and non-associated constitutive relations for undrained behaviour of isotropic soft clays*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2, 35-56.
- CAROSIO, A., WILLAM, K. & ETSE, G. 2000. *On the consistency of viscoplastic formulations*. International Journal of Solids and Structures, 37, 7349-7369.
- CASAGRANDE, A. & WILSON, S. D. 1951. *Effect of rate of loading on the strength of clays and shales at constant water content*. Geotechnique, 2, 251-263.
- KHALILI, N., HABTE, M. A. & ZARGARBASHI, S. 2008. *A fully coupled flow deformation model for cyclic analysis of unsaturated soils including hydraulic and mechanical hysteresees*. Computers and Geotechnics, 35, 872-889.
- LEFEBVRE, G. & LEBOEUF, D. 1987. *Rate effects and cyclic loading of sensitive clays*. Journal of Geotechnical Engineering, 113, 476-489.
- LEROUEIL, S., KABBAJ, M., TAVENAS, F. & BOUCHARD, R. 1985. *Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays*. Geotechnique, 35, 159-180.
- LIINGAARD, M., AUGUSTESEN, A. & LADE, P. V. 2004. *Characterization of models for time-dependent behavior of soils*. International Journal of Geomechanics, 4, 157-177.
- MAC, T. N. 2020. *A Bounding Surface Viscoplasticity Model for Time dependent Behaviour of Saturated and Unsaturated Soils including Tertiary Creep*. Ph.D Thesis, The University of New South Wales.
- MAC, T. N., SHAHBODAGH, B. & KHALILI, N. *A Bounding Surface Viscoplastic Constitutive Model for Unsaturated Soils*. 6th Biot Conference on Poromechanics, Poromechanics 2017, July 9, 2017 - July 13, 2017, 2017 Paris, France. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1045-1052.
- MAC, T. N., SHAHBODAGH, B. & KHALILI, N. 2020. *Modelling of Creep Rupture in Clay using the Bounding Surface Viscoplasticity Theory*. Journal of Materials and Engineering Structures «JMES», 7, 677-684.
- MAC, T. N., SHAHBODAGHKHAN, B. & KHALILI, N. 2014. *A Constitutive Model for Time-Dependent Behavior of Clay*. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 8, 596-601.

- MESRI, G., CHOI, Y. K. & ULLRICH, C. R. 1978. *The Rate of Swelling of Overconsolidated Clays Subjected to Unloading*. Geotechnique, 28, 281-307.
- MITCHELL, J. K. & JAMES KENNETH, M. 2005. *Fundamentals of soil behavior*, Hoboken, NJ, Hoboken, NJ : John Wiley & Sons.
- SHAHBODAGH, B., MAC, T. N., ESGANDANI, G. A. & KHALILI, N. 2020. *A Bounding Surface Viscoplasticity Model for Time-Dependent Behavior of Soils Including Primary and Tertiary Creep*. International Journal of Geomechanics, 20, 04020143.
- VAID, Y. P., ROBERTSON, P. K. & CAMPANELLA, R. G. 1979. *Strain rate behaviour of Saint-Jean-Vianney clay*. Canadian Geotechnical Journal = Revue Canadienne de Geotechnique, 16, 34-42.
- WANG, W. M., SLUYS, L. J. & DE BORST, R. 1997. *Viscoplasticity for instabilities due to strain softening and strain-rate softening*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 40, 3839-3864.

Abstract:

SIMULATION OF RATE-DEPENDENT BEHAVIOUR OF NORMALLY CONSOLIDATED AND OVERCONSOLIDATED SOILS

In a constant strain rate test, a total strain rate is enforced and kept constant throughout the experiment while the stress response is measured. An increase in strain rate during soil compression is manifested by increase in soil stiffness, i.e. the larger the strain rate, the stiffer the soil. In this study, the capability of the proposed bounding surface viscoplasticity model to capture the strain rate-dependent behaviour of soils is demonstrated. Several numerical examples are also presented to show the application of the model to simulate the rate-dependent behaviour of normally consolidated as well as overconsolidated cohesive soils under undrained loading conditions.

Keywords: Bounding surface viscoplasticity model, rate-dependent behaviour, normally consolidated cohesive soils, overconsolidated cohesive soils.

Ngày nhận bài: 17/02/2022

Ngày chấp nhận đăng: 17/3/2022