

MÔ PHỎNG ỨNG XỬ THAY ĐỔI THỂ TÍCH CỦA ĐẤT KHÔNG BẢO HÒA DƯỚI ÁP LỰC ĐÀM NÉN TĨNH

Kiều Minh Thế^{1,2}, Mahler András²

Tóm tắt: Sức hút dính của đất đã được sử dụng là một trong những biến trạng thái cho hầu hết các mô hình ứng xử của đất không bão hòa. Tuy nhiên, các thực nghiệm với sự kiểm soát sức hút dính là phức tạp, đòi hỏi quy trình thí nghiệm đặc biệt, các thiết bị tiên tiến, và thường là tốn nhiều thời gian. Kodikara (2012) đã đề xuất sử dụng không gian MPK với các biến là hệ số rỗng (e), ứng suất nén (p) và hệ số độ ẩm (e_w) để giải thích ứng xử của đất không bão hòa chịu tải trọng đầm nén. Ưu điểm của mô hình này là dựa vào thí nghiệm đầm nén đất ở điều kiện giữ nguyên độ ẩm, đơn giản và phổ biến hơn phương pháp kiểm soát sức hút dính không đổi. Bài báo này trình bày quá trình xây dựng mặt cong LWSBS trong không gian MPK, và kết quả mô phỏng ứng xử theo thể tích của hai loại đất theo các đường trạng thái khác nhau. Kết quả cho thấy ứng xử theo thể tích của đất trong các quá trình gia tải/làm ướt, hoặc các tổ hợp gia tải/dỡ tải/làm ướt/gia tải lại đã được mô phỏng tốt trong không gian này.

Từ khoá: Đất không bão hòa, đầm nén đất, MPK framework, LWSBS

1. GIỚI THIỆU

Đất không bão hòa được sử dụng rộng rãi trong các công trình địa kỹ thuật như đập đất, nền đường, tường chắn, nền móng và lớp phủ rác thải. Không giống như đất bão hòa, thể tích đất không bão hòa có thể thay đổi đáng kể khi thay đổi độ bão hòa của đất.

Trong những thập kỷ gần đây, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện liên quan đến ứng xử biến đổi thể tích của đất không bão hòa. Một mô hình tổng quát mô phỏng ứng xử của đất không bão hòa lần đầu tiên được đề xuất bởi Alonso, nnk (1990), sử dụng các biến trạng thái độc lập (ứng suất và sức hút dính). Phương pháp tiếp cận này được tiếp tục bổ sung và phát triển bởi nhiều nhà nghiên cứu khác (Wheeler và Sivakumar, 1995; Sivakumar và Wheeler, 2000; Wheeler và nnk, 2003; Gallipoli và nnk 2003; GS. Thụ và nnk, 2007; Tarantino và De Col, 2008; Sheng và nnk 2008). Gallipoli và nnk (2003) đã đề xuất sử dụng độ bão hòa (S_r), có

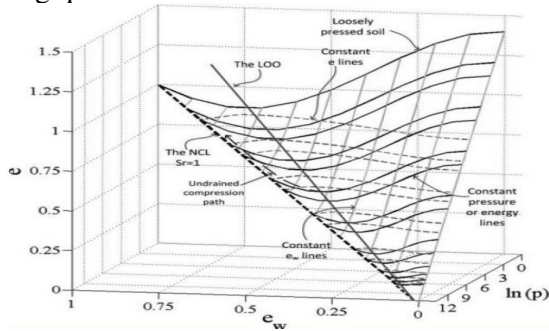
mối quan hệ trực tiếp với hệ số rỗng của đất, ứng suất, và đường cong đặc tính đất - nước (SWCC), là một trong những biến trạng thái để thể hiện các ảnh hưởng của sức hút dính của đất. Sức hút dính của đất đã được thừa nhận rộng rãi là một nhân tố có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử thể tích của đất. Sức hút dính đã được sử dụng là một biến trạng thái để mô tả ứng xử của đất không bão hòa trong hầu hết các mô hình đã công bố. Tuy nhiên, các thí nghiệm với sự kiểm soát độ hút dính thường yêu cầu quy trình đặc biệt nghiêm ngặt, yêu cầu các thiết bị tiên tiến, và thường tốn rất nhiều thời gian, khó có thể áp dụng ở hiện trường.

Kodikara (2012) đã đề xuất không gian MPK (MPK framework) với các biến truyền thống là hệ số rỗng (e) - ứng suất nén (p) - hệ số độ ẩm (e_w) để giải thích ứng xử của đất không bão hòa chịu tải trọng đầm nén. Theo Kodikara (2012), việc sử dụng hệ số độ ẩm ($e_w = wG_s$, trong đó w là độ ẩm và G_s là tỷ trọng của đất) cùng với hệ số rỗng sẽ làm giảm ảnh hưởng của hiện tượng trễ của sức hút dính trong quá trình làm ướt và làm khô mẫu bởi vì cả hai thông số đều có hiện tượng trễ cùng với sức hút dính và hiệu ứng này

¹Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi.

²Khoa Công trình, Trường Đại học Bách Khoa Budapest, Hungary.

có thể được loại bỏ khi cả hai thông số được sử dụng đồng thời trong tính toán. Theo đó, độ hút dính của đất được xem như biến thứ tư và có quan hệ trực tiếp với hệ số rỗng và hệ số độ ẩm thông qua SWCC.



Hình 1. Mặt LWSBS trong không gian $e - p - e_w$ (Theo Kodikara, 2012)

Khái niệm cơ bản của không gian MPK là sự mô phỏng một mặt cong gọi là “Mặt giới hạn chịu nén và chịu ướt” (Loading Wetting Boundary Surface - LWSBS) trong không gian 3 chiều $e - e_w - p$. Hình 1 minh họa ba chiều của mặt LWSBS trong không gian $e - e_w - p$, được giới thiệu bởi Kodikara (2012). Mặt LWSBS được thiết lập bằng cách kết hợp các đường cong đầm nén được xây dựng bằng cách đầm nén đất ở các công đầm nén khác nhau. Như thể hiện trên Hình 1, đường tối ưu (LOO) được xác định trên LWSBS bằng cách kết nối các điểm độ ẩm tối ưu (W_{opt}) của các đường cong đầm nén ở các công đầm nén khác nhau. Đường LOO chia mặt LWSBS thành hai khu vực bao gồm phía khô của đường LOO, nơi mà pha khí được xem là liên tục và khí được tự do thoát ra khỏi mẫu đất trong quá trình chịu đầm nén (hoặc chịu ướt), và phía có độ ẩm cao hơn đường LOO - được xây dựng bởi các phần đường cong đầm nén trong điều kiện thoát nước giữa LOO và đường cố kết bình thường của đất bão hòa (NCL).

Không gian MPK đã được Kodikara (2012) kiểm chứng bằng cách sử dụng một số dữ liệu đã được công bố của các tác giả khác trên thế giới. Không gian này cũng đã được Islam và Kodikara (2015) sử dụng để giải thích ứng xử của đất không bão hòa đầm chặt. Ưu điểm rõ ràng là mô hình này dựa trên đường cong đầm

nén (đường quan hệ giữa dung trọng khô và độ ẩm của đất) vốn phổ biến hơn và đơn giản hơn so với các mô hình sử dụng độ hút dính. Bài báo này trình bày quá trình xây dựng mặt LWSBS trong không gian MPK và kiểm chứng khả năng sử dụng các biến e , e_w và p để mô phỏng ứng xử thay đổi thể tích của hai loại đất sét khác nhau dưới tác dụng của các quá trình nén và làm ướt mẫu khác nhau.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Hai mẫu đất có tên 830 và 908 được lấy từ dự án xây dựng Đường cao tốc M0 ở ngoại ô thủ đô Budapest, Hungary. Đất tự nhiên được làm nhỏ và lấy dưới sàng 425 μm với giới hạn chảy lần lượt là 42,6 và 52,2% cho đất 830 và 908. Các tính chất của đất đã sử dụng được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1 Tính chất của đất sử dụng

Chỉ tiêu	Đất 830	Đất 908
Giới hạn chảy, W_l (%)	42.6	52.2
Giới hạn dẻo, W_p (%)	21.8	24.0
Chỉ số dẻo, I_p (%)	20.8	28.1
Tỉ trọng, G_s	2.82	2.72
Hàm lượng sét (<0.002 mm, %)	25	24
Nhóm khoáng vật Smectite (%)	10	16
Kaolinite (%)	12	2
Illite (%)	3	6
Hàm lượng bụi (%)	66	71
Hàm lượng cát mịn (%)	9	5

Phân tích nhiễu xạ tia X của hai loại đất cho thấy sự tồn tại của nhóm smectite, cho thấy đất có khả năng hấp thụ nước và trương nở. Phân tích TG /DTA đã xác định hàm lượng một số khoáng vật chính được trình bày trong Bảng 1.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Đất sử dụng được hong khô ở điều kiện phòng tới độ ẩm ban đầu lần lượt là 0.93 và 1.56% đối với đất 830 và 908. Đất thí nghiệm được chuẩn bị bằng cách trộn đất khô với lượng

nước định trước để có độ ẩm từ 0.93 đến 35% đối với đất 830, và từ 1.56 đến 44% cho đất 908. Các hỗn hợp sau khi trộn được giữ kín trong túi nhựa ít nhất 3 ngày để đảm bảo sự đồng nhất.

Đất được đầm nén tĩnh trong khuôn oedometer có đường kính bên trong 75 mm và chiều cao 40 mm. Hai tấm giấy lọc được đặt ở đáy khuôn và ở giữa đất và tấm gia tải cho phép nước và không khí thoát ra tự do từ mẫu đất trong quá trình gia tải. Để giảm ảnh hưởng của ma sát giữa đất và khuôn, mỡ bôi trơn đã được sử dụng ở mặt trong của thành khuôn. Tại mỗi giá trị độ ẩm, 6 mẫu đất giống nhau được nén tĩnh đến các cấp tải xác định (100, 200, 300, 600, 1200 và 1800 kPa) với tốc độ gia tải từ 20 đến 50 kPa / phút (tốc độ gia tải sẽ tăng lên khi giá trị tải trọng tăng lên) khi nén mẫu ở phía khô của đường tối ưu (LOO). Mỗi cấp tải trọng được duy trì không đổi trong 10 phút nhằm để cho đất có thời gian thoát nước và đạt tới trạng thái cân bằng, sau đó một mẫu được dỡ tải để xác định độ ẩm và dung trọng khô. Một mẫu đất khác được áp dụng các chu kỳ gia tải và dỡ tải (đến 15 kPa).

Các kết quả từ quá trình đầm nén ở các công đầm nén khác nhau và độ ẩm khác nhau được sử dụng để tạo ra mặt LWSBS của hai loại đất nghiên cứu. Để kiểm chứng khả năng mô phỏng trong không gian MPK, 3 thử nghiệm được tiến hành theo các đường trạng thái sau:

i) đường trạng thái gia tải/làm ướt được tiến hành trên hai mẫu đất được chuẩn bị với độ ẩm ban đầu lần lượt là 13.40% và 18.22% tương ứng với đất 830 và 908. Các mẫu được nén đến tải trọng 600 kPa và được làm ướt để tăng độ ẩm của mẫu trong khi tải trọng được duy trì ở giá trị 600 kPa.

ii) đường trạng thái gia tải/dỡ tải/làm ướt/gia tải được thực hiện với mẫu đất 830 ở điều kiện độ ẩm ban đầu 11.78%. Đầu tiên mẫu được nén đến tải trọng 300 kPa, dỡ tải về 100 kPa và duy trì ở mức tải này đồng thời với quá trình làm ướt

tăng độ ẩm của mẫu, và cuối cùng gia tải trở lại đến giá trị 300 kPa.

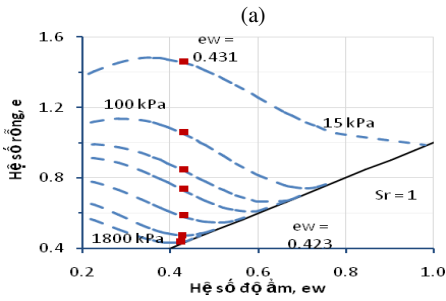
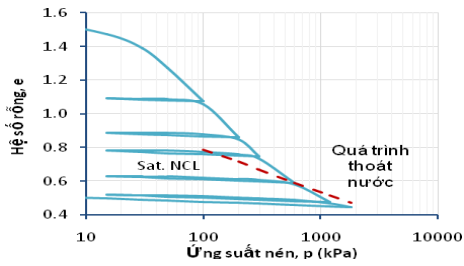
iii) đường trạng thái gia tải/dỡ tải/làm ướt được áp dụng với mẫu đất 908 được chuẩn bị ở độ ẩm 13.16% được gia tải đến 1200 kPa, dỡ tải về 300 kPa và sau đó làm ướt mẫu trong khi duy trì mức tải ở 300 kPa.

Quá trình làm ướt được thực hiện bằng cách sử dụng một ống xi-lanh để bơm lượng nước đã xác định trước vào các mẫu đất thông qua các lỗ trên tấm gia tải. Giấy lọc ở đáy khuôn đã được thay thế bằng một màng cao su để ngăn nước thoát ra khỏi mẫu từ phía dưới. Sau khi bổ sung nước, toàn bộ khuôn cùng với mẫu đất được bọc kín bằng màng cao su và giữ trong 24 giờ để đảm bảo nước trong đất đạt trạng thái cân bằng. Chuyển vị thẳng đứng của mẫu đất đã được ghi lại trong suốt quá trình thí nghiệm; độ ẩm được tính toán dựa trên khối lượng nước thêm vào, độ ẩm ban đầu và độ ẩm cuối cùng. Dung trọng khô (và sau đó là hệ số rỗng) của mẫu chỉ được xác định ở trạng thái cuối cùng, giá trị tại mỗi bước gia tải (hoặc bước thay đổi độ ẩm) được tính dựa trên đường cong nén thu được.

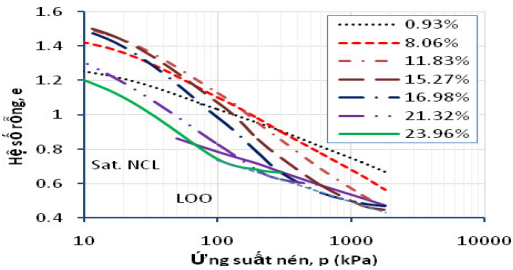
3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Xây dựng mặt LWSBS

Thí nghiệm đầm nén được tiến hành ở 12 giá trị độ ẩm khác nhau cho đất 830 và 13 giá trị độ ẩm cho đất 908. Độ ẩm và dung trọng khô của mẫu đất được xác định ở các cấp tải 100, 200, 300, 600, 1200 và 1800 kPa. Bằng cách sử dụng phương pháp này, các thông số độ ẩm và hệ số rỗng của đất đã được xác định trong quá trình mẫu chịu nén thoát nước. Đường cong nén theo quan hệ truyền thống giữa hệ số rỗng (e) và ứng suất thẳng đứng (p) đối với đất 830 tại độ ẩm ban đầu là 15.27% ($e_w = 0,431$) được thể hiện trong Hình 2a; mối quan hệ giữa hệ số rỗng và độ ẩm được biểu diễn trong Hình 2b. Hình 3 trình bày đường cong nén cho đất 830 ở một số độ ẩm khác nhau trên mặt phẳng $e - \log(p)$.



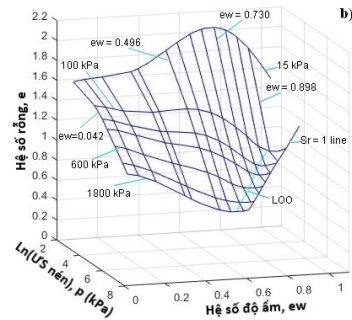
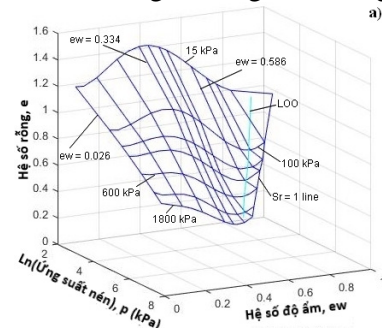
Hình 2. Đường cong nén của mẫu đất 830 ở độ ẩm ban đầu 15.27% ($e_w = 0.431$): (a) Gia tải - dỡ tải theo các chu kỳ trên mặt phẳng $e - \ln(p)$; (b) Đường trạng thái của mẫu đất tại các giá trị đo được ở mỗi cấp tải khác nhau trên mặt phẳng $e - e_w$.



Hình 3. Đường cong nén của đất 830 với nhiều giá trị độ ẩm ban đầu khác nhau

Có thể thấy rõ trong Hình 2, độ ẩm đo được của các điểm ở phía khô của đường tới ưu (LOO) là giống nhau và bằng với giá trị độ ẩm ban đầu, có nghĩa là lượng nước được duy trì không đổi trong mẫu tại các điểm đó. Như phát biểu của Tarantino và De Col (2008), có thể giả thiết rằng pha khí được duy trì liên tục và được giải phóng tự do ra khỏi các mẫu, và ứng suất nén bằng với ứng suất thẳng đứng (ứng suất khí bằng đúng áp suất khí quyển). Đối với các điểm ở phía ướt của đường LOO, độ ẩm của mẫu đo được giảm dần khi tải trọng thẳng đứng tăng dần, cho thấy nước đã được thoát ra trước khi đường cong chạm tới đường bão hòa. Trong quá trình nén thoát nước,

các đường cong nén hướng tới đường NCL. Tốc độ gia tải đã được giảm xuống khi mẫu đất tiếp cận gần tới đường LOO, và ở mỗi cấp tải được duy trì trong 10 phút cho phép pha khí và nước trong mẫu thoát ra và sau đó đạt được trạng thái cân bằng. Vì vậy ở điều kiện này cũng có thể xem ứng suất nén bằng với ứng suất thẳng đứng.

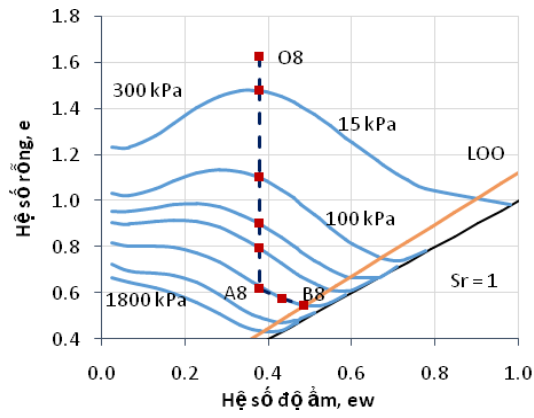


Hình 4. Mặt LWSBS trong không gian 3 chiều: (a) đất 830; (b) đất 908

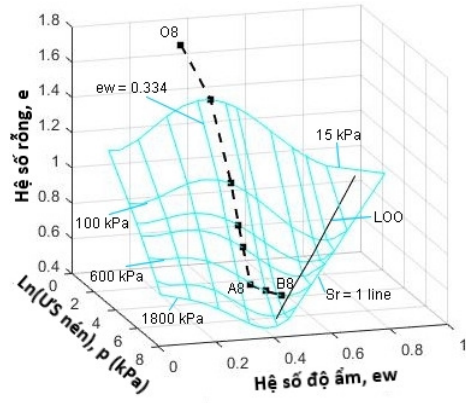
Hình 4 biểu diễn mặt LWSBS của hai loại đất được xây dựng bởi sự tổ hợp các đường đẳng ứng suất trong không gian 3 trục $e - e_w - p$.

3.2. Mô phỏng ứng xử của đất trong không gian MPK

Hình 5a và 5b mô tả ứng xử của mẫu đất 830 ở độ ẩm ban đầu 13.40% ($e_w = 0.378$) được nén tới 600 kPa và sau đó được làm ướt đến độ ẩm 17.16% ($e_w = 0.484$), trong khi Hình 6a và 6b thể hiện ứng xử của mẫu đất 908 ở độ ẩm ban đầu là 18.22% ($e_w = 0.496$) được nén đến 600 kPa và sau đó được làm ướt đến độ ẩm 23.56% ($e_w = 0.641$). Đường “đẳng hệ số độ ẩm” trong quá trình gia tải (đường O8 đến A8 và O9 đến A9 lần lượt đối với đất 803 và 908). Trong quá trình làm ướt, thể tích của đất thay đổi theo “đẳng ứng suất” trên mặt LWSBSs (đường A8-B8 và A9-B9).

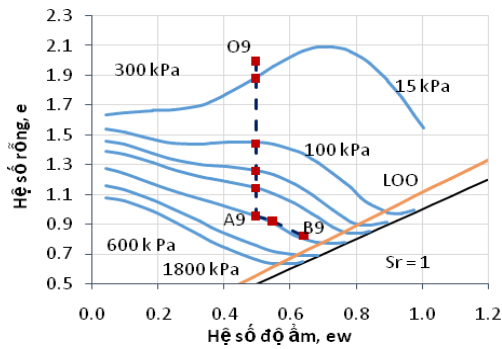


(a)

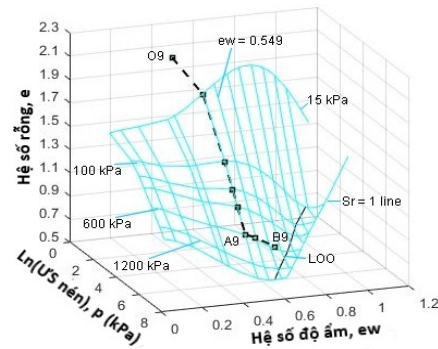


(b)

Hình 5. Đường trạng thái gia tải/làm ướt cho đất 830: (a) trên mặt phẳng $e - e_w$; (b) trong không gian 3 chiều

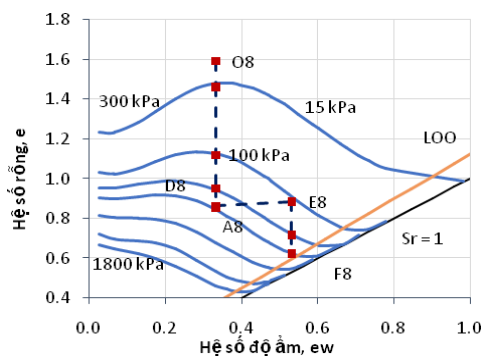


(a)

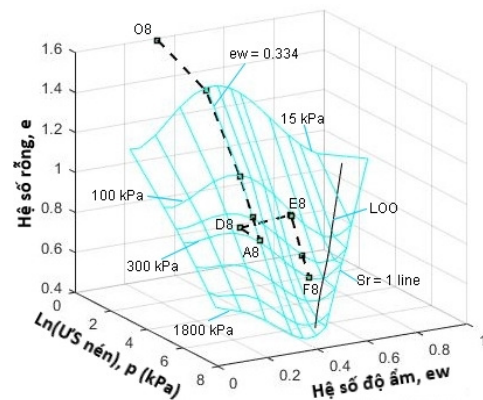


(b)

Hình 6. Đường trạng thái gia tải/làm ướt cho đất 908: (a) trên mặt phẳng $e - e_w$; (b) trong không gian 3 chiều

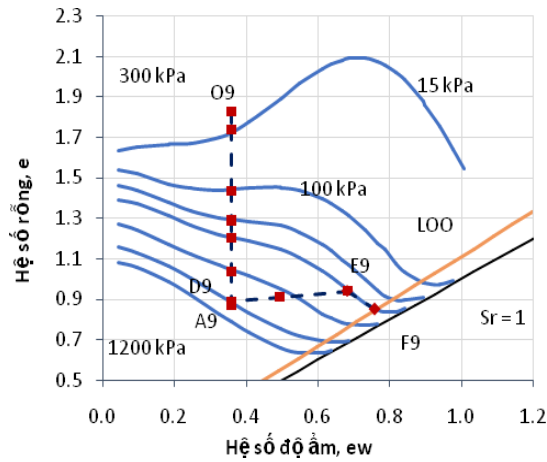


(a)

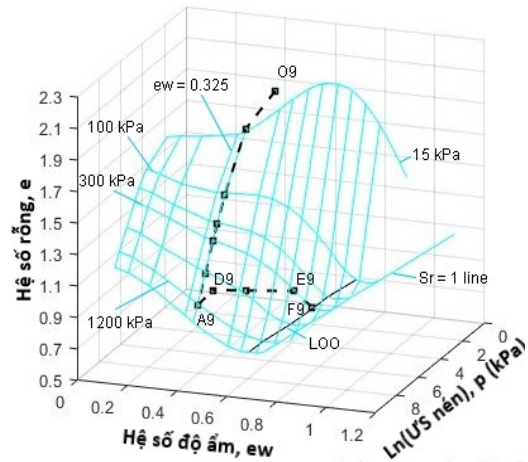


(b)

Hình 7. Đường trạng thái gia tải/dỡ tải/làm ướt/gia tải lại cho đất 830: (a) trên mặt phẳng $e - e_w$; (b) trong không gian 3 chiều $e - e_w - \ln(p)$



(a)



(b)

Hình 8. Đường trạng thái gia tải/dỡ tải/làm ướt cho đất 908: (a) trên mặt phẳng $e - e_w$; (b) trong không gian 3 chiều $e - e_w - \ln(p)$

Các kết quả thí nghiệm gia tải/dỡ tải/làm ướt/gia tải được thể hiện trong Hình 7 cho các mẫu đất 830 và Hình 8 cho các mẫu đất 908. Mẫu đất 830 đã được chuẩn bị với hệ số độ ẩm $e_w = 0.332$, gia tải tới mức tải trọng 300 kPa, dỡ tải xuống tải trọng 100 kPa, được làm ướt đến hệ số độ ẩm $e_w = 0.532$, và sau đó được gia tải lại đến 300 kPa. Mẫu đất 908 với hệ số độ ẩm ban đầu $e_w = 0.358$ được gia tải đến 1200 kPa, dỡ tải về 300 kPa và giữ nguyên giá trị này trong quá trình làm ướt đến hệ số độ ẩm cuối cùng là $e_w = 0.758$. Trong Hình 7b, có thể thấy rằng sau khi trạng thái của đất thay đổi theo đường hệ số độ ẩm không đổi trên mặt LWSBS trong quá trình gia tải (đường O8-A8), đường trạng thái sẽ di chuyển hướng xuống dưới (hoặc có thể nói là bên trong) mặt LWSBS (đến điểm D8) khi mẫu được dỡ tải. Tại điểm D8, mẫu đã được làm ướt và trương nở, tăng thể tích theo đường D8-E8, giao cắt với mặt LWSBS tại điểm E8. Trong thực tế, kết quả cho thấy điểm E8 nằm dưới LWSBS một chút và điểm uốn (điểm mà đường trạng thái chính thức gặp trở lại mặt LWSBS) được thấy nằm trên đường đẳng ứng suất 108 kPa, cho thấy rằng điểm uốn với giá trị tải trọng nén 100 kPa có thể xảy ra ở giá trị hệ số độ ẩm cao hơn.

Sau khi gặp mặt LWSBS tại điểm E8, đường

trạng thái uốn theo mặt LWSBS đến điểm F8 khi mẫu đất được gia tải lại đến giá trị 300 kPa. Đối với đường trạng thái được áp dụng cho mẫu đất 908, có thể thấy trên Hình 8 là điểm E9 nằm trên đường đẳng ứng suất 300 kPa. Tuy nhiên, lưu ý ở đây là điểm E9 có thể là điểm uốn hoặc không. Trạng thái đất ở điểm E9 có thể nằm trên mặt LWSBS dọc theo đường 300kPa trong quá trình làm ướt và điểm uốn thực sự có thể xảy ra trước điểm E9 nhưng giá trị độ ẩm tại đó không được đo đạc vì thí nghiệm này chỉ có thể đo được các thông số của đất ở các điểm rời rạc. Vấn đề này có thể cần thêm các thí nghiệm khác để nâng cao tính chính xác trong các nghiên cứu trong tương lai.

Điều đáng chú ý là trên Hình 8a (và Hình 7a), trên mặt phẳng $e - e_w$, sau khi dỡ tải điểm D nằm rất gần với điểm A và đường cong trương nở D-E di chuyển cắt qua một số đường đẳng ứng suất trước khi đến đường cong 300 kPa (hoặc 100 kPa trên Hình 7a). Trên thực tế, các điểm D9 và E9 đều nằm trên đường đẳng ứng suất 300 kPa nhưng ở dưới mặt LWSBS. Sự minh họa trở nên rõ ràng hơn ở trên Hình 8b (và Hình 7b), có thể thấy A9--D9 là đường dỡ tải (đường nở) từ 1200 kPa đến 300 kPa. Điểm D9 nằm trên đường đẳng ứng suất 300 kPa, và sau đó mẫu đất trương nở cho đến khi bị chặn bởi

mặt LWSBS tại điểm E9. Tại điểm E9, nếu mẫu đất tiếp tục tăng độ ẩm, đất biến đổi thể tích theo mặt LWSBS hướng về đường NCL (tới điểm F9). Tương tự, các điểm D8 và E8 nằm trên đường đẳng ứng suất 100 kPa, điểm D8 nằm dưới mặt LWSBS và sau đó đường trạng thái gặp mặt LWSBS tại điểm E8. Tại điểm E8 mẫu đất được giữ nguyên độ ẩm đồng thời gia tải lại và đường trạng thái hướng theo đường đẳng hệ số độ ẩm trên mặt LWSBS tới điểm F8. Các kết quả trên cho thấy việc sử dụng các biến e , e_w và p trong không gian MPK có khả năng giải thích không chỉ hiện tượng chảy dẻo trên mặt LWSBS mà còn cả ứng xử đàn hồi của đất trong quá trình dỡ tải và cả ứng xử trương nở của mẫu khi đất hút nước.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày kết quả của quá trình xây dựng mặt LWSBS trong không gian MPK và kiểm chứng khả năng sử dụng các biến e , e_w và p để mô phỏng ứng xử thay đổi thể tích

cho hai loại đất ở Hungary. Mặt LWSBS trong không gian MPK minh họa mối quan hệ trực tiếp giữa thể tích của đất (dung trọng khô và hệ số rỗng) với độ ẩm và tải trọng. Kết quả cho thấy rằng việc sử dụng các biến e , e_w và p có khả năng giải thích/hoặc dự đoán ứng xử thay đổi thể tích của các loại đất được nghiên cứu dưới các điều kiện chịu tải trọng đầm nén/hoặc làm ướt khác nhau trong không gian MPK. Các quá trình dỡ tải, trương nở do hút nước, chảy dẻo cũng được mô phỏng tốt trong không gian này.

Vì mặt LWSBS trong không gian 3 trục hệ số rỗng - hệ số độ ẩm - ứng suất nén được phát triển bằng cách tổ hợp các đường cong đầm nén ở các giá trị công đầm nén khác nhau (hay là đường đẳng ứng suất), phương pháp này tương đối đơn giản để áp dụng trong thực tế vì nó không yêu cầu các quy trình thí nghiệm nghiêm ngặt và các thiết bị tiên tiến như là phương pháp kiểm soát sức hút dính của đất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Alonso, E.E., Gens, A., and Josa, A., (1990). *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique, 40(3): 405–430.
- Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R., and Vaunat, J., (2003). *An elastoplastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour*. Géotechnique, 53, No. 1, 123–135
- Islam T., J. Kodikara, J., (2015). *Interpretation of the loading/wetting behaviour of compacted soils within the MPK framework: Part I Static compaction*. Can. Geotech. J.
- Kodikara, J., (2012). *New framework for volumetric constitutive behaviour of compacted unsaturated soils*. Canadian Geotechnical Journal, 49(11): 1227-1243
- Sheng, D., Fredlund, D.G., and Gens, A., (2008). *A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables*. Canadian Geotechnical Journal, 45(4): 511–534
- Sivakumar, V., and Wheeler, S., (2000). *Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 1: Wetting and isotropic compression*. Géotechnique, 50(4): 359-368.
- Tarantino, A., and De Col, E., (2008). *Compaction behaviour of clay*. Géotechnique, 58(3): 199–213
- Thu, T.M., Rahardjo, H., and Leong, E.C., (2007). *Elastoplastic model for unsaturated soil with incorporation of the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 44(1): 67–77
- Wheeler, S.J., and Sivakumar, V., (1995). *An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil*. Géotechnique, 45(1): 35–53
- Wheeler, S.J., Sharma, R.S., and Buisson, M.S.R., (2003). *Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils*. Géotechnique, 53(1): 41–54

Abstract:

**SIMULATION OF THE VOLUMETRIC BEHAVIOUR OF UNSATURATED SOILS
SUBJECTED STATIC COMPACTION**

Matric suction has been used as one of the state variables for most the constitutive models of unsaturated soils in the literature. However, suction-controlled works are complex in practice since they generally require special test procedures, advanced equipment, and usually are very time-consuming. Kodikara (2012) proposed the MPK framework to interpret the behaviour of compacted unsaturated soil in the void ratio (e) - net stress (p) – moisture ratio (e_w) space. The distinct advantage of the model is that it is based on traditional constant moisture content compaction testing which is more common and simple than constant suction loading. This paper presents the development of Loading Wetting State Boundary Surface (LWSBS) in the MPK framework, and the results of the simulation of the volumetric behaviour of two types of soils under different state paths. The results show that the volumetric behavior of both soils under loading/wetting, or combination of loading/unloading/wetting/reloading state paths have well simulated within the framework.

Keywords: Unsaturated soil, compacted soil, MPK framework, LWSBS

Ngày nhận bài: 06/2/2018

Ngày chấp nhận đăng: 26/3/2018