

# NGHIÊN CỨU CÁC ĐẶC TRƯNG VỀ TRẠNG THÁI TỚI HẠN CỦA ĐẤT KHÔNG BẢO HOÀ

**TS. TRỊNH MINH THỤ**

*Trường Đại học Thủy lợi*

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này đã tiến hành thí nghiệm tập hợp mẫu đất sét pha đầm nén trên máy nén 3 trục với độ ẩm không đổi (thí nghiệm CW). Kết quả từ nghiên cứu này cho thấy đường trạng thái tới hạn trên mặt phẳng ( $q - p$ ) song song với nhau và có độ dốc là 1,28 tại các độ hút dính khác nhau, điều đó chứng tỏ sự đồng nhất về quan hệ giữa ứng suất lệch và ứng suất trung bình. Kết quả thí nghiệm đồng thời cho thấy sự đồng nhất về quan hệ giữa thể tích riêng  $v$  và ứng suất trung bình  $q$  trên mặt phẳng ( $v-p$ ) từ thí nghiệm cắt CW. Độ dốc của đường trạng thái tới hạn trên mặt phẳng ( $v - p$ ) giảm khi độ hút dính tăng từ thí nghiệm CW.

## 1. Giới thiệu chung

Áp lực nước lỗ rỗng dư gia tăng trong quá trình gia tải là một thông số quan trọng có thể gây nên nhiều sự cố trong địa kỹ thuật như trượt mái dốc. Tuy nhiên, các thông số dùng trong các bài toán địa kỹ thuật (như tính toán thiết kế móng công trình, ổn định mái dốc...) thường lấy từ các thí nghiệm cắt cố kết thoát nước (CD) hoặc cắt cố kết không thoát nước (CU). Tuy nhiên trên thực tế, có khá nhiều trường hợp gia tải trên vùng đất không bão hoà trong điều kiện áp lực khí lỗ rỗng thoát tự do nhưng pha nước không thoát. Như vậy cần thiết phải mô phỏng bài toán trong điều kiện này theo sơ đồ cắt với độ ẩm không đổi.

Alonso nnk. (1990), Toll (1990), Sivakumar (1993), Maatouk và nnk. (1995), Wheeler (1996), Cui và Delage (1996), Bolzon và nnk. (1996), Adam và Wulfsohn (1998), Rampino nnk. (2000), Sun và Matsuoka (2000), Tang và Graham (2002), Chiu và Ng (2003) đã nghiên cứu trạng thái tới hạn của đất không bão hoà trên mặt ( $q - p$ ) (trong đó  $q =$  độ lệch ứng suất  $= (\sigma_1 - \sigma_3)$  và  $p =$  ứng suất trung bình  $= \left[ \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right) - u_a \right]$ ). Tuy nhiên, kết quả thí nghiệm biểu thị trên mặt không gian ( $q - s - p$ ) và mặt phẳng ( $v - p$ ) chưa có nhiều nhà nghiên cứu khảo sát (trong đó,  $s =$  độ hút dính và  $v = 1 + e =$  thể tích riêng). Mục tiêu chính của bài báo là nghiên cứu các thông số tại trạng thái tới hạn của đất không bão hoà trong điều kiện thí nghiệm cắt với độ ẩm không đổi.

Các mẫu đất đầm nén với giá trị dung trọng khô lớn nhất ( $1.35 \text{ Mg/m}^3$ ) và độ ẩm tối ưu (22%) đã được chuẩn bị cho thí nghiệm ba trục. Mẫu đất được đầm nén tĩnh từ 10 lớp với chiều dày mỗi lớp là 10mm. Chiều cao và đường kính mẫu tương ứng là 100mm và 50mm. Trong quá trình thí nghiệm nguyên lý về chuyển trục (Hilf, 1956) đã được áp dụng để không chế độ hút dính trong mẫu.

## 2. Các đặc trưng của đất thí nghiệm

Kaolin hạt thô đã được chọn để chuẩn bị các mẫu thí nghiệm trong nghiên cứu này. Giới hạn chảy, thành phần hạt, tỷ trọng và hệ số thấm cũng đã được thí nghiệm để xác định các chỉ số của đất kaolin đầm nén. Các thông số chính của mẫu đất Kaolin được trình bày trong bảng 1.

*Bảng 1. Các chỉ tiêu chính của mẫu đất sét pha đầm nén*

Các đặc trưng của đất	Giá trị
Tỷ trọng, $G_s$	2,65
Giới hạn chảy, LL (%)	51,0
Giới hạn dẻo, PL (%)	36,5
Chỉ số dẻo, PI (%)	15,4
Sét Clay (%)	15,0
Bụi Silt (%)	85,0
Hệ thống phân loại đất theo hệ thống (USCS)	MH
Dung trọng khô lớn nhất, $\rho_{d \max}$ ( $\text{Mg} / \text{m}^3$ )	1,35
Độ ẩm tối ưu, $w_{opt}$ (%)	22,0
Hệ số thấm bão hoà, $k_s$ , (m/s)	$6.4 \times 10^{-8}$

### 3. Quy trình và chương trình thí nghiệm

Thiết bị thí nghiệm nén 3 trục cải tiến (tương tự với thiết bị thí nghiệm của Fredlund và Rahardjo (1993)) đã được dùng trong nghiên cứu này. Thiết bị thí nghiệm nén 3 trục cải tiến cho phép khống chế cả áp lực khí,  $u_a$ , và nước lỗ rỗng,  $u_w$ , bằng việc áp dụng nguyên lý chuyên trục, do đó độ hút dính,  $(u_a - u_w)$  sẽ được khống chế theo yêu cầu. Hình 1 trình bày sơ đồ lắp đặt thí nghiệm nén 3 trục mẫu đất không bão hoà.



Hình 1. Sơ đồ lắp đặt thí nghiệm nén 3 trục cải tiến cho đất không bão hoà

#### Quy trình thí nghiệm cắt với độ ẩm không đổi

Quy trình thí nghiệm cắt 3 trục cho mẫu đất bão hoà được giới thiệu bởi Head (1986) đã được áp dụng. Đồng thời áp dụng quy trình thí nghiệm nén 3 trục cho đất không bão hoà được mô tả bởi Fredlund và Rahardjo (1993). Lực hút dính ban đầu đã được thiết lập dựa trên việc sử dụng kỹ thuật chuyên trục.

##### ▪ Giai đoạn bão hoà mẫu

Tất cả các mẫu đất dùng trong chương trình thí nghiệm này đầu tiên được bão hoà nhằm tạo nên sự đồng nhất về độ ẩm và độ bão hoà ban đầu. Trong giai đoạn này, đường áp lực nước lỗ rỗng nối với thiết bị số khống chế áp lực và thể tích nước (digital pressure and volume controller (DPVC)) và bơm nước vào trong mẫu từ đỉnh. Trong giai đoạn này, mẫu đất được bão hoà bởi quá trình tăng dần từng

cấp áp lực buồng,  $\sigma_3$ , và áp lực ngược,  $u_w$ , dưới áp lực hiệu quả bằng 10 kPa cho đến khi hệ số áp lực nước lỗ rỗng,  $B$  đạt giá trị gần 1. Mẫu đất được coi là bão hoà hoàn toàn khi áp lực nước lỗ rỗng đạt giá trị lớn hơn hoặc bằng 0,95 (Head, 1986). Quá trình bão hoà mẫu thường kéo dài khoảng 4 ngày.

##### ▪ Giai đoạn cố kết

Sau khi giai đoạn bão hoà kết thúc, mẫu đất được cố kết dưới áp lực đẳng hướng,  $\sigma_3$ , và áp lực nước lỗ rỗng,  $u_w$ , hay nói cách khác mẫu đất được cố kết đẳng hướng bằng các áp lực hiệu quả yêu cầu,  $(\sigma_3 - u_w)$ . Giá trị độ lớn của áp lực cố kết được chọn cho giai đoạn dựa trên cơ sở các giá trị áp lực thực  $(\sigma_3 - u_a)$  theo yêu cầu của giai đoạn cân bằng độ hút dính và giai đoạn cắt. Trong giai đoạn cố kết, van nước đã được mở và áp lực buồng được khống chế tại giá trị yêu cầu. Lượng nước thoát ra ngoài từ mẫu thí nghiệm trong quá trình cố kết đẳng hướng được ghi lại bằng thiết bị số khống chế áp lực và thể tích nước (DPVC). Thiết bị này cho phép ghi nhận lượng nước thoát ra hoặc đi vào mẫu thí nghiệm 3 trục. Giai đoạn cố kết được coi là kết thúc khi thể tích nước thoát ra khỏi mẫu không thay đổi và áp lực nước lỗ rỗng dư đã hoàn toàn tiêu tán. Thời gian cho giai đoạn cố kết khoảng 1 giờ. Khi giai đoạn cố kết hoàn thành thì giai đoạn tạo độ hút dính trong mẫu được bắt đầu.

##### ▪ Giai đoạn cân bằng độ hút dính trong mẫu

Khi giai đoạn cố kết đã kết thúc, đường áp lực nước nối với đỉnh của mẫu thí nghiệm sẽ được ngắt từ thiết bị DPVC và thay vào đó bằng đường áp lực khí,  $u_a$ . Thiết bị DPVC khác được nối với đường áp lực nước lỗ rỗng ở đáy mẫu (tức là  $u_w$ ). Sự khác nhau giữa áp lực khí lỗ rỗng,  $u_a$  và áp lực nước lỗ rỗng,  $u_w$ , chính là độ hút dính  $(u_a - u_w)$ .

Trong giai đoạn làm khô mẫu, độ hút dính được tăng dần bằng việc giảm dần áp lực nước lỗ rỗng dưới đáy mẫu trong khi đó giữ nguyên áp lực khí và áp lực buồng. Ngược lại, trong giai đoạn làm ướt mẫu, lực hút dính được

giảm dần bằng quá trình tăng dần áp lực nước lỗ rỗng dưới đáy mẫu. Lượng nước thoát ra từ mẫu đất và tổng thể tích mẫu đất thay đổi trong quá trình làm khô và ướt mẫu đã được ghi lại bởi các thiết bị DPVC (tức là DPVC cho buồng, PDVC cho áp lực ngược) và tất cả các số liệu được ghi lại bởi hệ thống máy tính. Giai đoạn cân bằng được coi là kết thúc khi áp lực nước lỗ rỗng dư tiêu tán hoàn toàn và thể tích thay đổi giảm dần tới 0,04% trong 1 ngày như theo đề nghị bởi Sivakumar (1993).

▪ **Giai đoạn cắt mẫu**

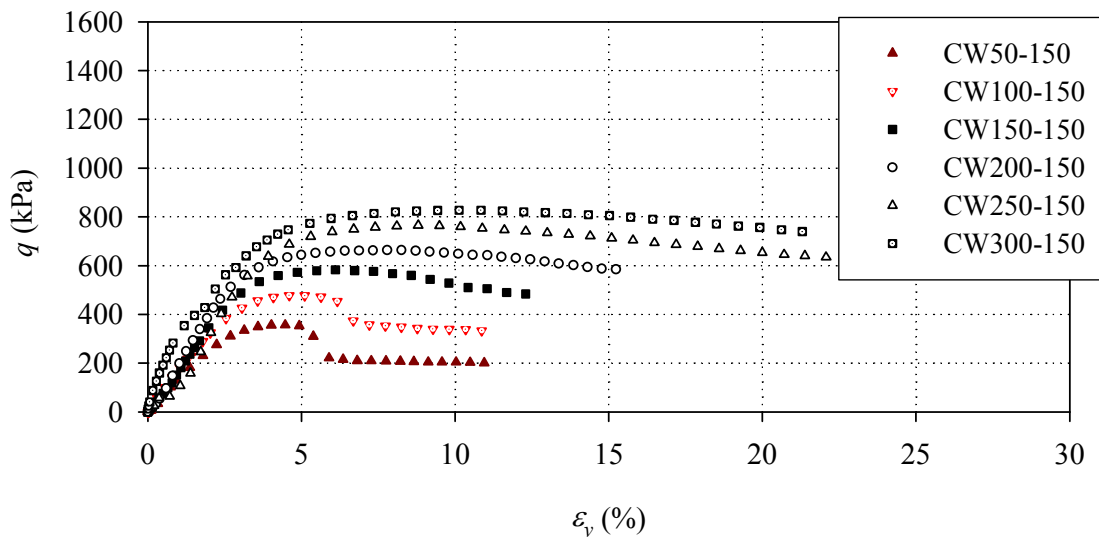
Khi điều kiện cân bằng độ hút dính trong mẫu đã đạt được dưới áp lực thực,  $(\sigma_3 - u_a)$ , và độ hút dính,  $s = (u_a - u_w)$ , mẫu đất được cắt bằng lực dọc trục với một vận tốc bằng hằng số. Ong (1999) đã tiến hành nghiên cứu thử nghiệm về ảnh hưởng của tốc độ cắt đối với thí nghiệm CW. Ong (1999) đã cắt với các tốc độ khác nhau biến đổi từ 0,0009 đến 0,081 mm/phút. Kết quả cho thấy khi tốc độ cắt nhỏ hơn hoặc bằng 0,009 thì tốc độ cắt không ảnh hưởng tới kết quả thí nghiệm. Rahardjo và nnk (2004) đã sử dụng tốc độ cắt là 0,009 mm/phút đối với mẫu đất sét pha tàn tích. Trong nghiên cứu này cũng đã chọn tốc độ cắt là 0,009mm/phút vì đất sét pha có hệ số thấm và các thông số khác gần giống với mẫu sét pha tàn tích đã được nghiên cứu bởi Rahardjo

(2004). Mẫu đất được cắt dưới điều kiện thoát khí và không nước thoát. Điều này có nghĩa là trong quá trình cắt van của pha khí được mở và van của pha nước được đóng lại. Trong quá trình cắt, áp lực khí lỗ rỗng,  $u_a$ , đã được giữ tại giá trị bằng giá trị cuối cùng của giai đoạn cân bằng độ hút dính. Như vậy trong giai đoạn cắt thì giá trị áp lực khí lỗ rỗng,  $u_a$ , không đổi, nhưng giá trị áp lực nước lỗ rỗng  $u_w$  tăng lên. Do đó có thể xác định được độ hút dính  $(u_a - u_w)$  trong quá trình cắt. Giai đoạn cắt được coi là kết thúc khi độ lệch ứng suất,  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$  đạt tới giá trị không đổi hoặc đã quan sát được mặt phá hoại rõ ràng trên mẫu đất hay biến dạng dọc trục lớn nhất đạt 20%. Giai đoạn cắt thường kéo dài từ một đến ba ngày.

4. **Kết quả thí nghiệm và thảo luận**

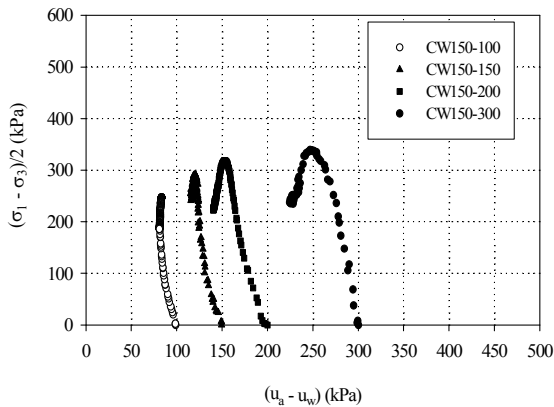
Tên thông thường đã được dùng để ký hiệu cho mẫu thí nghiệm cắt là CWx-y. Các ký hiệu x-y trong CWx-y nghĩa là thí nghiệm được tiến hành với áp lực buồng thực là x kPa và độ hút dính ban đầu là y kPa.

Hình 2 trình bày các kết quả từ thí nghiệm cắt 3 trục với độ ẩm không đổi dưới các ứng suất thực khác nhau nhưng với cùng độ hút dính ban đầu là 150 kPa. Các đồ thị trên hình 2 cho thấy hầu hết các đường ứng suất-biến dạng xuất hiện điểm đỉnh và sau đó cường độ chống cắt giảm dần.



Hình 2. Quan hệ giữa ứng suất lệch và biến dạng từ thí nghiệm CW dưới các ứng suất thực khác nhau nhưng với cùng độ hút dính ban đầu là 150 kPa.

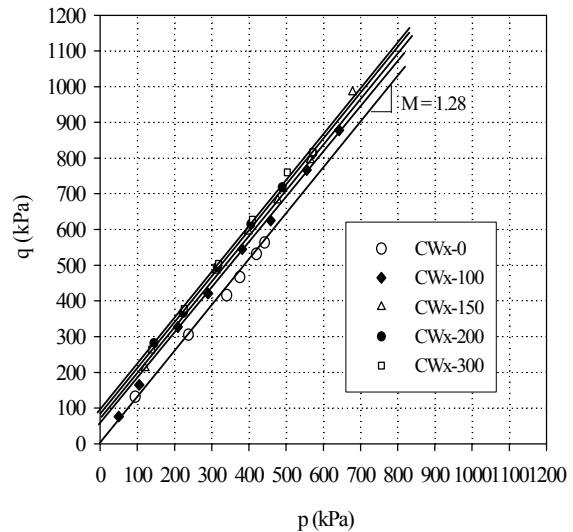
Hình 3 trình bày các đường ứng suất của thí nghiệm nén 3 trục dưới các độ hút dính ban đầu khác nhau (tức là độ hút dính là 100kPa, 150kPa, 200kPa và 300kPa) nhưng với cùng 1 ứng suất thực là 150kPa. Kết quả đã chỉ ra rằng độ hút dính giảm với sự tăng về ứng suất lệch. Điều này có thể thấy rằng độ hút dính giảm trong suốt quá trình thí nghiệm cắt 3 trục. Nhìn chung, xu thế của các đường ứng suất trên mặt phẳng ( $q-s$ ) trong quá trình cắt có dạng giống nhau.



Hình 3. Các đường ứng suất trên mặt ( $q-s$ ) đối với thí nghiệm 3 trục CW dưới các độ hút dính ban đầu khác nhau nhưng tại cùng giá trị áp lực bùong thực là 150kPa

Hình 4 biểu thị trạng thái tới hạn của các thí nghiệm cắt 3 trục CW dưới các áp lực bùong thực và các giá trị độ hút dính ban đầu khác nhau (tức là 0 kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa và 300kPa) trên mặt phẳng ( $q-p$ ). Hình 4 cho thấy các đường trạng thái tới hạn tại các độ hút dính

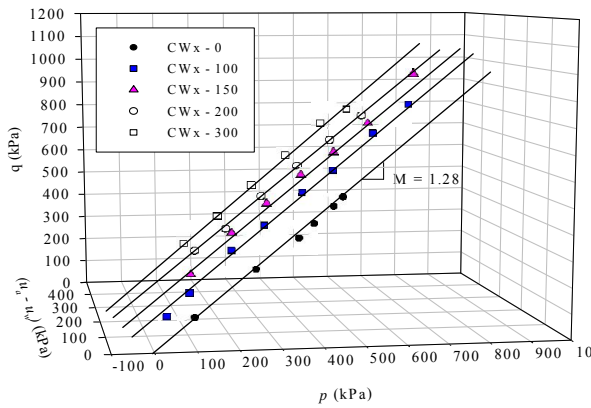
khác nhau song song với nhau trên mặt ( $q-p$ ). Độ dốc của các đường trạng thái tới hạn từ kết quả thí nghiệm cắt 3 trục CW có cùng giá trị là 1,28. Nói cách khác, độ dốc của các đường trạng thái tới hạn trên mặt phẳng ( $q-p$ ) là đồng nhất đối với đất sét pha đầm nén từ thí nghiệm cắt 3 trục CW. Các ứng suất tại trạng thái tới hạn từ các thí nghiệm cắt 3 trục trình bày trong bảng 2. Hình 5 biểu diễn trạng thái tới hạn của các thí nghiệm cắt 3 trục CW dưới các áp lực bùong thực và các độ hút dính khác nhau trên mặt không gian ( $q-s-p$ ).



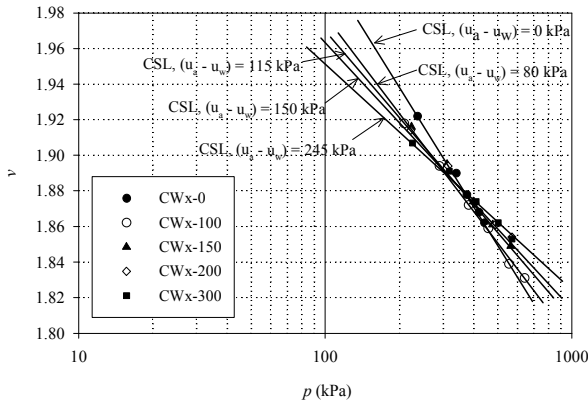
Hình 4. Các đường trạng thái tới hạn trên mặt phẳng ( $q-p$ ) từ thí nghiệm cắt 3 trục CW

Bảng 2. Các giá trị ứng suất tại trạng thái tới hạn từ thí nghiệm cắt 3 trục CW

Áp lực bùong thực (kPa)	Độ hút dính ban đầu (kPa)									
	0		100		150		200		300	
	$p$	$q$	$p$	$q$	$p$	$q$	$p$	$q$	$p$	$q$
50	94	132	105	165	121	212	144	282	138	264
100	178	235	209	327	224	371	222	367	226	378
150	267	351	290	421	312	486	315	495	318	504
200	352	457	382	545	398	595	405	615	409	628
250	413	532	458	625	477	682	489	718	503	760
300	437	564	556	767	565	795	571	814	572	817

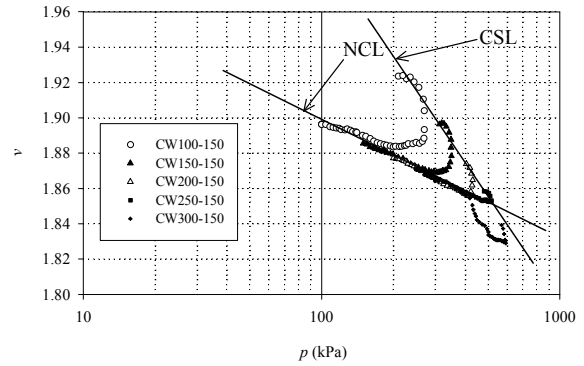


Hình 5. Các đường trạng thái tới hạn trên mặt không gian ( $q - s - p$ ) từ các thí nghiệm cắt CW



Hình 7. Các đường trạng thái tới hạn trên mặt phẳng ( $v - p$ ) từ thí nghiệm cắt 3 trục CW dưới các độ hút dính ban đầu khác nhau

Hình 6 trình bày các đường ứng suất của thí nghiệm cắt 3 trục CW tại các áp lực bùong thực khác nhau nhưng với cùng giá trị độ hút dính ban đầu là 150 kPa. Kết quả cho thấy các đường trạng thái của thí nghiệm cắt 3 trục CW cho các dạng đường cong gần giống nhau. Thể tích riêng giảm ở giai đoạn đầu của quá trình cắt và sau đó tăng dần. Áp lực bùong thực càng cao thì sự tăng về thể tích riêng càng lớn trong quá trình cắt. Điều này có thể thấy rằng, khi áp lực bùong càng cao thì mẫu đất có đặc tính nở về thể tích càng nhỏ. Hình 7 trình bày tổng hợp các đường quan hệ giữa thể tích riêng và log của ứng suất thực



Hình 6. Các đường ứng suất trên mặt phẳng ( $v - p$ ) từ kết quả thí nghiệm cắt CW dưới độ hút dính ban đầu là 150kPa

trung bình tại trạng thái tới hạn của thí nghiệm cắt 3 trục CW. Kết quả đã xuất hiện quan hệ tuyến tính giữa thể tích riêng và ứng suất thực trung bình dưới mặt không đổi về độ hút dính. Hình 7 chỉ ra rằng độ dốc của đường trạng thái tới hạn,  $\omega(s)$ , giảm khi độ hút dính tăng. Nói cách khác giá trị độ hút dính càng cao thì độ cứng của mẫu đất càng lớn.

## 5. Kết luận

Các đường trạng thái tới hạn tại các độ hút dính khác nhau trên mặt phẳng ( $q - p$ ) song song với nhau và với độ dốc là 1,28 từ thí nghiệm cắt 3 trục CW. Điều này cho thấy sự đồng nhất về quan hệ giữa độ lệch ứng suất và ứng suất thực trung bình của thí nghiệm 3 trục CW. Quan hệ tuyến tính giữa thể tích riêng và ứng suất thực trung bình của thí nghiệm 3 trục CW cũng đã thu được từ kết quả nghiên cứu này. Kết quả đồng thời cho thấy sự đồng nhất về quan hệ giữa thể tích riêng và ứng suất thực trung bình trên mặt phẳng ( $v - p$ ) của thí nghiệm cắt 3 trục CW. Độ dốc của đường trạng thái tới hạn trên mặt phẳng ( $v - p$ ) của thí nghiệm 3 trục giảm khi độ hút dính tăng lên. Sự đồng nhất về quan hệ giữa thể tích riêng và ứng suất thực trung bình của thí nghiệm cắt 3 trục CW đã đồng thời tìm được kết quả nghiên cứu này.

## Tài liệu tham khảo

1. Adam, B. A. and Wulfsohn, D. 1998. "Critical-state Behavior of an Agricultural Soil". Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 70, pp. 345-354.
2. Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A. 1990. "A constitutive model for partially saturated soils". Geotechnique, 40, pp. 405-430.
3. ASTM, 2003, D698-91, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort" (12,400 ft-lb/ft (600 kN-m/m<sup>3</sup>)).

4. Bolzon, G. Schrefler, B.A. and Zienkiewicz, O.C. 1996. "Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states". *Geotechnique*, Vol. 46, pp. 279-289.
5. Chiu, C. F and Ng, C. W. W. 2003. "A State-dependent Elasto-plastic Model for Saturated and Unsaturated Soils". *Geotechnique*. Vol. 53, No. 9, pp. 809-829.
6. Cui, Y. J., and Delage, P. 1996. "Yielding and plastic behaviour of unsaturated compacted silt". *Geotechnique*. 46 (2), pp. 291-311.
7. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. 1993. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils". John Wiley and Sons Inc., New York.
8. Head, K.H. 1986. "Manual of Soil Laboratory Testing". John Wiley and Sons, Inc., Vol. 3, pp. 942-945.
9. Hilf, J.W. 1956. "An Investigation of Pore-water Pressure in Compacted Cohesive Soils". Ph.D. Dissertation. Tech. Memo. No. 654, U.S. Dep. of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Div., Denver, C.O.
10. Maatouk, A., Leroueil, S. and Rochelle, P. LA. 1995. "Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil". *Geotechnique*, Vol. 45, pp. 465-477.
11. Ong, B.H. (1999), "Shear Strength and Volume Change of Unsaturated Residual Soil", Master of Engineering Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
12. Rahardjo, H., Ong, B.H. and Leong, E.C. 2004. "Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and the constant water content triaxial tests". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, pp. 1-16.
13. Rampino, C., Macuso, C., and Vinale, F. 1999. "Mechanical Behavior of an Unsaturated Dynamically Compacted Silty Sand". *Italian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.02, pp. 26-39.
14. Rampino, C., Macuso, C., and Vinale, F. 2000. "Experimental behavior and modeling of an unsaturated compacted soil". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, pp. 748-763.
15. Sivakumar, V. 1993. "A critical state framework for unsaturated soil". PhD. Thesis, University of Sheffield, Sheffield, U.K.
16. Sun, D.A. and Matsuoka, H. 2000. "Three-dimensional elasto-plastic model for unsaturated soils". In *Proceeding of the Asian Conference on Unsaturated Soils*, Edited by Rahardjo, H., Toll, D.G., and Leong E.C. pp153–158.
17. Tang, G.X. and Graham, J. 2002. "A possible elasto-plastic framework for unsaturated soils with high-plasticity". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39 pp. 894-907.
18. Toll, D.G. 1990. A framework for Unsaturated Soils Behaviour. *Geotechnique*, Vol. 40, pp. 31-44.
19. Wheeler, S. J. 1996. "Inclusion of Specific Water Volume within an Elasto-plastic Model for Unsaturated Soil". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp. 42-57.

**Abstract:**

**A STUDY OF CHARACTERISTIC OF CRITICAL STATE ON UNSATURATED SOIL**

*A series of CW triaxial tests was carried out on statically compacted silt. The results from this study show that the critical state lines at different matric suctions on the  $(q - p)$  plane were parallel with a slope of 1.28 for the CW triaxial tests, indicating the unique relationship between deviator stress and mean net stress. The results also indicate the unique relationship between the specific volume,  $v$ , and mean net stress,  $p$ , on the  $(v - p)$  plane for both the CW triaxial tests. The slope of the critical state lines on the  $(v - p)$  plane for the CW triaxial tests decreased with the increase in matric suction.*