

# KẾT QUẢ MÔ HÌNH HOÁ CÁC ĐẶC TRƯNG THÍ NGHIỆM CẮT MẪU ĐẤT VỚI ĐỘ ẨM KHÔNG ĐỔI TRÊN MÁY NÉN 3 TRỤC BẰNG MÔ HÌNH ĐÀN - ĐÈO

TS. TRỊNH MINH THỤ  
ĐHTL

**Tóm tắt:** Bài báo này trình bày các kết quả tính toán thí nghiệm cắt với độ ẩm không đổi trên mẫu sét pha đầm nén ở dung trọng khô lớn nhất và độ ẩm tốt nhất. Lý thuyết về mô hình hoá các kết quả thí nghiệm của các mẫu đất không bão hoà cắt trên máy nén ba trục với độ ẩm không đổi được dựa trên lý thuyết đàn dẻo với việc kết hợp đường cong đặc trưng đất - nước. Cường độ chống cắt, áp lực nước lỗ rỗng dư và biến thiên thể tích trong quá trình thí nghiệm cắt mẫu đất đã được tính toán từ mô hình đàn dẻo được đề xuất bởi Thụ (2006). Kết quả so sánh giữa tính toán từ mô hình đàn dẻo cho đất không bão hoà khá sát với các kết quả thí nghiệm cắt mẫu đất trên máy nén ba trục.

**Từ khoá:** Độ hút dính, mặt chảy, đường cong đặc trưng đất - nước, mô hình đàn dẻo, đất không bão hoà, thí nghiệm nén 3 trục với độ ẩm không đổi.

## I. Giới thiệu

Đã có khá nhiều nhà nghiên cứu dùng mô hình đàn - dẻo để dự đoán các đặc trưng của đất không bão hoà trong quá trình cắt. Nhiều các mô hình dự đoán các đặc trưng của đất không bão hoà đã được kiến nghị như Alonso và nnk. (1990), Gen và Alonso (1992); Thomas và He (1994); Wheeler và Sivakumar (1995); Cui và Delage (1996); Wheeler (1996); Bolzon và nnk. (1996); Rampino và nnk. (1999); Simoni và Schrefler (2001); Tang và Graham (2002); Chiu và Ng (2003). Các mô hình trên được xây dựng dựa trên nền của các biến trạng thái độc lập. Phương pháp xây dựng và phát triển các mô hình cho đất không bão hoà là được mở rộng từ các mô hình tính cho đất ở trạng thái bão hoà (Alonso và nnk. 1990; Thomas và He 1994; Wheeler và Sivakumar 1995; Cui và Delage 1996; Wheeler 1996; Bolzon nnk. 1996; Simoni và Schrefler 2001). Tuy nhiên các mô hình khác nhau ở chỗ là đã sử dụng các giả thiết và các quan hệ cơ bản khác nhau.

Trong mấy chục năm qua, nhiều tác giả đã nghiên cứu vai trò của độ hút dính hay độ bão hoà trong các đặc tính của đất không bão hoà. Ảnh hưởng của độ hút dính đến cường độ chống cắt, biến thiên thể tích và áp lực nước lỗ rỗng dư

đã được nhiều tác giả nghiên cứu (Bishop và Donald 1961; Fredlund và Morgenstern 1977; Fredlund và nnk. 1978; Alonso và nnk. 1987; Fredlund và Rahardjo 1993; Wheeler và Karube 1995; Graham và nnk. 1995; Delage và Graham 1995; Wheeler 1996; Cui và Delage 1996; Wheeler và Sivakumar 1993; Rampino và nnk. 1999, Tang và Graham 2002; Chiu và Ng 2003).

Mục tiêu chính của bài báo này là tính toán cường độ chống cắt, áp lực nước lỗ rỗng dư và biến thiên thể tích của đất không bão hoà trong khi thí nghiệm cắt trên máy nén ba trục dựa trên mô hình đàn dẻo của đất cho đất không bão hoà với việc kết hợp đường cong đặc trưng đất nước. Các kết quả tính toán từ mô hình đã được so sánh với các kết quả thí nghiệm cắt trên máy nén 3 trục.

## II. Cơ sở lý thuyết của mô hình đàn dẻo cho đất không bão hoà

Đặc trưng của đất không bão hoà có thể mô tả bởi việc dùng 5 thông số trạng thái, đó là: ứng suất thực trung bình,  $p$ , ứng suất lệch,  $q$ , độ hút dính,  $s$ , thể tích riêng,  $v$  và thể tích riêng của nước,  $v_w$  được định nghĩa như sau:

$$p = \left( \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3} \right) - u_a \quad (1)$$

$$q = \sigma_a - \sigma_r \quad (2)$$

$$s = u_a - u_w \quad (3)$$

$$v = 1 + e \quad (4)$$

$$v_w = 1 + Se \quad (5)$$

Trong đó:

$p$  = ứng suất thực trung bình,

$\sigma_a, \sigma_r$  = ứng suất tổng dọc trục và

buồng tương ứng,

$u_a$  = áp lực khí lỗ rỗng,

$q$  = ứng suất lệch,

$s$  = độ hút dính của đất,

$u_w$  = áp lực nước lỗ rỗng,

$v$  = thể tích riêng,

$e$  = hệ số rỗng,

$v_w$  = thể tích riêng của nước, và

$S$  = độ bão hoà

Lý thuyết chi tiết về mô hình đàn dẻo đối với đất không bão hoà khi kết hợp với đường cong đặc trưng đất nước được trình bày bởi Thụ (2006).

### III. Chuẩn bị mẫu và tiến hành thí nghiệm mẫu trên máy nén 3 trục

Các mẫu đất thí nghiệm được đầm nén tĩnh tại dung trọng khô lớn nhất là  $1.35 \text{ Mg/m}^3$  và độ ẩm tốt nhất là 22%. Mẫu đất được đầm nén tĩnh từ 10 lớp đất mỏng mỗi lớp dày 10mm. Chiều cao và đường kính mẫu tương ứng là 100mm và 50mm. Quy trình đầm nén mẫu đất thí nghiệm được trình bày bởi Thụ (2008).

#### 1. Thí nghiệm cắt mẫu đất với độ ẩm không đổi

Thí nghiệm cắt mẫu đất không bão hoà đã được tiến hành trên máy nén 3 trục cải tiến. Thiết bị thí nghiệm nén 3 trục cải tiến đã được mô tả bởi Fredlund và Rahardjo (1993). Thiết bị này cho phép khống chế cả áp lực khí và nước lỗ rỗng bằng sử dụng kỹ thuật chuyển trục.

#### 2. Giai đoạn bão hoà mẫu

Tất cả các mẫu đất đầu tiên được bão hoà nhằm đưa mẫu đất đồng nhất về độ ẩm và độ bão hoà. Quá trình bão hoà được tiến hành bằng áp lực ngược với áp lực buồng  $\sigma_r$ , và áp lực nước lỗ rỗng,  $u_w$ , đến khi hệ số áp lực nước lỗ rỗng đạt giá trị gần bằng 1. Mẫu đất được coi là bão hoà hoàn toàn khi hệ số áp lực nước lỗ rỗng

đạt giá trị bằng hoặc lớn hơn 0,97. Quá trình bão hoà cho mỗi mẫu đất trong thí nghiệm này thường kéo dài khoảng 4 ngày.

#### 3. Quá trình cố kết và tạo độ hút dính trong mẫu

Trong quá trình cố kết, mẫu đất được cố kết bằng áp lực hông thực ( $\sigma_r - u_w$ ). Lượng nước thoát ra từ mẫu đất trong quá trình cố kết được đo bằng thiết bị số tự động điều khiển về áp lực và thể tích (digital pressure and volume controller-DPVC). Quá trình cố kết được coi là kết thúc khi nước trong mẫu hầu như không thoát ra nữa hoặc quá trình tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng dư kết thúc. Thời gian để quá trình cố kết kéo dài khoảng 1 giờ.

Khi quá trình cố kết hoàn thành, thì giai đoạn tạo độ hút dính trong mẫu được bắt đầu tiến hành. Để tạo nên độ hút dính trong mẫu, đường áp lực nước nối vào mũ trên đầu mẫu được ngắt và thay vào đó là đường áp lực khí. Đường áp lực nước được nối với buồng nhỏ chứa nước dưới đáy mẫu. Như vậy trong quá trình tạo độ hút dính, mẫu đất sẽ được cố kết bởi áp lực hông thực ( $\sigma_r - u_a$ ) và độ hút dính ( $u_a - u_w$ ). Lượng nước thoát ra từ mẫu trong quá trình cân bằng độ hút dính được ghi lại bằng thiết bị DPVC. Quá trình cân bằng về độ hút dính trong mẫu được coi là kết thúc khi lượng nước thoát ra hầu như bằng không. Thời gian cho quá trình cân bằng độ hút dính thường kéo dài khoảng 3 đến 5 ngày.

#### 4. Tốc độ cắt và điều kiện kết thúc quá trình cắt

Trong thí nghiệm cắt, dùng tốc độ gia tải dọc trục là 0,009mm/phút. Quá trình cắt kết thúc khi độ lệch ứng suất  $q = (\sigma_a - \sigma_r)$  đã vượt qua điểm đỉnh và đạt giá trị không đổi hoặc mặt phá hoại trên mẫu quan sát rõ ràng hay biến dạng dọc trục lớn hơn 20%

#### 5. Cắt với độ ẩm không đổi

Trong sơ đồ thí nghiệm này các mẫu được cắt trong điều kiện pha khí thoát tự do, nhưng không cho pha nước thoát ra ngoài. Trường hợp này, van của áp lực khí được mở và giữ tại giá

trị nhất định trong khi đó van của pha nước được đóng lại. Trong quá trình cắt, áp lực khí,  $u_a$ , được giữ tại giá trị bằng với áp lực khí ở giai đoạn tạo cân bằng về độ hút dính. Áp lực nước lỗ rỗng  $u_w$ , tăng lên hay giảm đi phụ thuộc vào sự tăng hay giảm của thể tích mẫu trong đất trong quá trình cắt. Hay nói cách khác độ hút dính trong mẫu biến đổi trong quá trình cắt. Chi tiết về quy trình thí nghiệm và kết quả thí nghiệm được trình bày trong Thu (2007).

#### IV. Kết quả tính toán từ mô hình và so sánh với kết quả thí nghiệm

Mô hình đàn dẻo cho đất không bão hoà với sự kết hợp đường cong đặc trưng đất nước đã kiến nghị bởi Thu (2006) được dùng để dự đoán cường độ chống cắt, biến thiên áp lực nước lỗ rỗng và biến thiên thể tích trong quá trình cắt dưới điều kiện độ ẩm không thay đổi.

Việc tính toán cường độ kháng cắt, biến thiên áp lực nước lỗ rỗng và biến dạng thể tích trong quá trình cắt với độ ẩm không đổi bằng mô hình lý thuyết đàn dẻo được tiến hành trên bảng tính trong excel. Các hằng số ban đầu được dùng trong tính toán của mô hình đàn dẻo này được trình bày trên bảng 1 và 2. Lý thuyết và các phương trình dùng để tính toán cường độ chống cắt, biến thiên áp lực nước lỗ rỗng và biến thiên thể tích được trình bày bởi Thu (2006). Sự biến thiên của các tham số trong mô hình đàn dẻo ứng với mỗi cấp áp lực hút dính được trình bày bởi Thu (2008).

Bảng 1 Bảng tổng hợp các thông số ban đầu của mẫu đất từ kết quả thí nghiệm cố kết đẳng hướng trên máy nén 3 trục

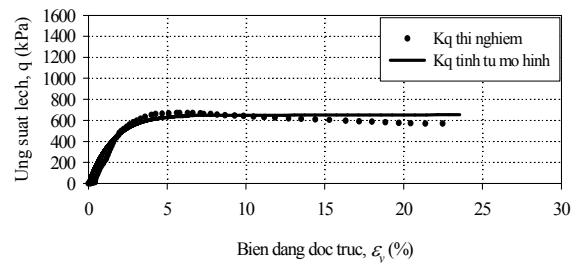
Mẫu đất	$\lambda(s)$	$\kappa(s)$	$N(s)$	$p_c(kPa)$
ISC - 0	0.063	0.027	2.100	22
ISC - 50	0.057	0.024	2.090	72
ISC - 100	0.047	0.015	2.075	160
ISC - 150	0.043	0.013	2.070	210
ISC - 200	0.040	0.011	2.067	235

Bảng 2 Bảng tổng hợp các thông số trạng thái tới hạn của đất từ thí nghiệm cắt với độ ẩm không đổi dưới các áp lực bùong và áp lực hút dính khác nhau.

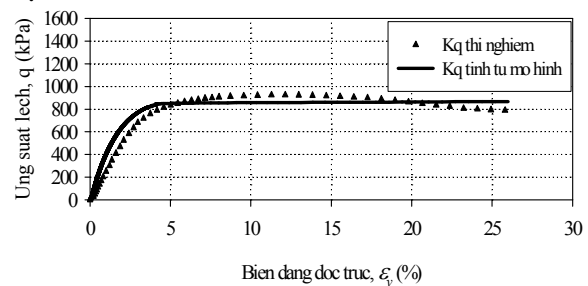
Độ hút dính (kPa)	$\Gamma(s)$	$\mu(s)$ (kPa)	$\omega(s)$	$\lambda_s$	$\kappa_s$	- $p_s$ (kPa)
0	2.018	0.0	0.113	0.013	0.002	0.0
80	1.981	66.7	0.074	0.013	0.002	49.6
115	1.970	75.1	0.064	0.013	0.002	57.6
150	1.964	83.6	0.059	0.013	0.002	64.9
245	1.948	99.6	0.047	0.013	0.002	77.1

Sự so sánh giữa kết quả tính toán từ mô hình kiến nghị và kết quả thí nghiệm cắt mẫu trực tiếp được tiến hành trên các mẫu CW250-100 và CW350-100. Trong phần này mẫu ký hiệu CWx-y nghĩa là: x là giá trị áp lực bùong thực trong quá trình cắt và y là độ hút dính ban đầu của mẫu.

Hình 1 và 2 trình bày sự so sánh về đường cường độ chống cắt của đất trong quá trình cắt với độ ẩm không đổi từ kết quả của thí nghiệm và kết quả đường tính từ lý thuyết đàn dẻo tương ứng cho mẫu CW250-100 và CW350-100. Kết quả dự đoán từ mô hình tính toán từ lý thuyết đàn dẻo bởi Thu, 2006 khá gần với kết quả từ thí nghiệm nén ba trục.

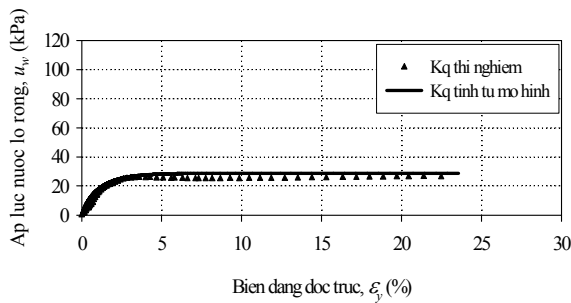


Hình 1 So sánh kết quả tính toán từ mô hình lý thuyết đàn dẻo và kết quả thí nghiệm mẫu về quan hệ giữa ứng suất lệch và biến dạng dọc trục cho mẫu đất CW250-100

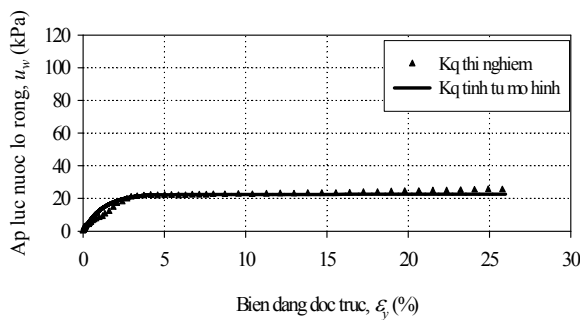


Hình 2 So sánh kết quả tính toán từ mô hình lý thuyết đàn dẻo và kết quả thí nghiệm mẫu về quan hệ giữa ứng suất lệch và biến dạng dọc trục cho mẫu đất CW350-100

Hình 3 và 4 trình bày sự so sánh giữa kết quả tính toán và kết quả thí nghiệm về sự biến thiên áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình cắt trên máy nén 3 trục trong điều kiện độ ẩm không đổi tương ứng cho các mẫu đất CW250-100 và CW350-100. Kết quả tính toán sự thay đổi áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình cắt sử dụng mô hình lý thuyết đàn dẻo được kiến nghị bởi Thu (2006) khá phù hợp với kết quả đo từ thí nghiệm nén mẫu đất trên máy nén 3 trục.



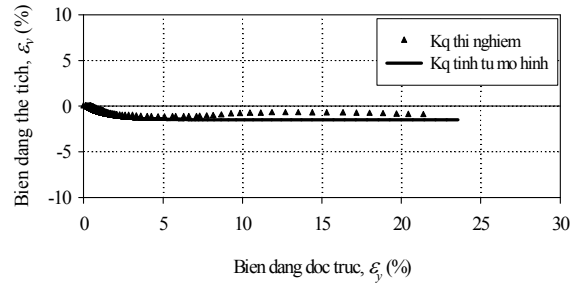
Hình 3 So sánh giữa kết quả tính toán từ mô hình và kết quả thí nghiệm về sự thay đổi áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình cắt mẫu đất CW250-100 trên máy nén 3 trục



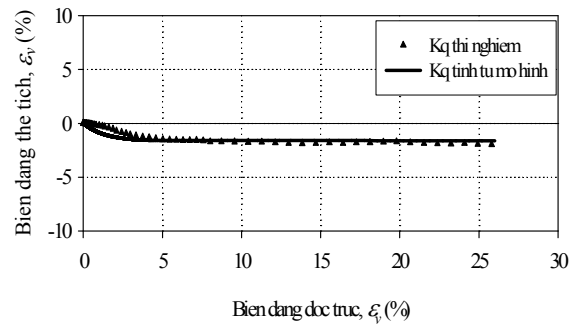
Hình 4 So sánh giữa kết quả tính toán từ mô hình và kết quả thí nghiệm về sự thay đổi áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình cắt mẫu đất CW350-100 trên máy nén 3 trục

Hình 5 và 6 trình bày sự so sánh giữa kết quả tính toán từ mô hình lý thuyết đàn dẻo và kết quả thí nghiệm về biến dạng thể tích trong quá

trình cắt mẫu đất dưới điều kiện cắt với độ ẩm không đổi tương ứng cho mẫu đất CW250-100 và CW350-100. Kết quả từ hình vẽ cho thấy sự phù hợp giữa kết quả tính toán và kết quả thí nghiệm từ mẫu cắt trên máy nén 3 trục.



Hình 5 So sánh giữa kết quả tính toán từ mô hình và kết quả thí nghiệm về biến dạng thể tích của mẫu đất CW250-100 trong quá trình cắt trên máy nén 3 trục



Hình 6 So sánh giữa kết quả tính toán từ mô hình và kết quả thí nghiệm về biến dạng thể tích của mẫu đất CW350-100 trong quá trình cắt trên máy nén 3 trục

## V. Kết luận

- Các kết quả từ nghiên cứu này đã cho thấy sự phù hợp giữa kết quả tính toán từ mô hình lý thuyết đàn dẻo và các kết quả thí nghiệm về cường độ chống cắt, biến thiên áp lực nước lỗ rỗng và biến thiên thể tích trong điều kiện cắt với độ ẩm không đổi.

- Từ kết quả nghiên cứu cho thấy rằng hoàn toàn có thể dùng lý thuyết đàn dẻo của đất bão hòa nước để phát triển cho mô hình tính toán

cho đất không bão hoà.

- Mô hình lý thuyết đàn dẻo trong nghiên cứu này kết hợp với đường cong đặc trưng đất nước và phương pháp thí nghiệm độ ẩm không đổi đã góp phần mở rộng lý thuyết cơ học đất không bão hoà. Đồng thời trong quá trình tính mô hình đã xét đến sự biến thiên của góc dốc nhánh đỡ tải khi độ hút dính thay đổi mà những

mô hình trước đây chưa xét tới.

- Kết hợp với thuyết Mohr-Coulomb, có thể dùng mô hình lý thuyết đàn dẻo này để tính toán cường độ chống cắt, biến thiên áp lực nước lỗ rỗng và biến thiên thể tích trong quá trình cắt mẫu đất với độ ẩm không đổi trên máy nén 3 trục.

#### References

- Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A. 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, 40: 405-430.
- Alonso, E. E., Gens, A. and Hight, D.W. A. 1987. Special problem soils. *In Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Dublin, Vol. 3, pp.1087-1146.
- Bishop, A.W. and Donald, LB. (1961), "The Experimental Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus", *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference of Soil Mechanics Foundation Engineering*, France, Vol. 01, pp. 13-21.
- Bolzon, G., Schrefler, B.A. and Zienkiewicz, O.C. 1996. Elasto-plastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states. *Geotechnique* 46: 279-289.
- Chiu, C. F and Ng, C. W. W. 2003. A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils. *Geotechnique*. 53: 809-829.
- Cui, Y. J., and Delage, P. 1996. Yielding and plastic behaviour of unsaturated compacted silt. *Geotechnique*. 46 (2): 291-311.
- Delage, P., and Graham, J. 1995. Understanding the behaviour of unsaturated soils requires reliable conceptual models. State-of-art report, section 1, soil properties. *In Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Unsaturated Soils*, Paris. *Edited by* E.E. Alonso and P. Delage. A.A. Balkema, Rotterdam, Vol.3, pp. 1223-1256.
- Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. 1977. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE.*, 103 (GT5): 447-466.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 15: 313-321.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Graham, J., Wiebe, B., Tang, X., and Onofrei, C. 1995. Strength and stiffness of unsaturated sand-bentonite "buffer". *In Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Unsaturated Soils*, Paris. *Edited by* E.E. Alonso and P. Delage. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 89-94.
- Rampino, C., Macuso, C., and Vinale, F. 1999. Mechanical behavior of an unsaturated dynamically compacted silty sand. *Italian Geotechnical Journal*, 33(2): 26-39.
- Simoni, L. and Schrefler, B.A. 2001. Parameter identification for a suction-dependent plasticity model. *International Journal of Numerical and Analysis in Mechanics and Geomechanics*, 25: 273-288.
- Tang, G.X. and Graham, J. 2002. A possible elasto-plastic framework for unsaturated soils with high-plasticity. *Canadian Geotechnical Journal*, 39: 894-907.
- Thomas, H. R. and He, Y. 1994. Analysis of couple heat and moisture and air transfer in a deformable unsaturated soil. *Geotechnique* 44, (5): 677-689.

Thụ, T.M. 2006. Mô hình đàn dẻo cho đất không bão hoà. Tạp chí Địa kỹ thuật, số 3-2006, trang: 8-14.

Thụ, T.M. 2008. Nghiên cứu các đặc trưng về trạng thái tới hạn của đất không bão hoà. Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường số 22 tháng 9 năm 2008, trang 93-98.

Wheeler, S. J. 1996. Inclusion of specific water volume within an elasto-plastic model for unsaturated soil. Canadian Geotechnical Journal, 33: 42-57.

Wheeler, S. J. and Karube, D. 1995. State of the art report: Constitutive modeling. In Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, Vol.3, pp. 1323-1356.

Wheeler, S. J. and Sivakumar, V. 1993. Development and application of a critical state model for unsaturated soil. Predictive soil mechanics. Thomas Telford, London.

Wheeler, S. J. and Sivakumar, V. 1995. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. Geotechnique, 45: 35-53.

**Abstract:**

**SIMULATION OF THE CONSTANT WATER CONTENT TRIAXIAL SHEARING TESTS USING ELASTO-PLASTIC MODEL**

This paper presents the simulation results of the triaxial tests under the CW condition on compacted silt specimens at the maximum dry density and optimum water content. The theoretical framework for simulating of the triaxial tests under the CW condition was based on the elasto-plastic model with the incorporation of soil-water characteristic curve (SWCC). The shear strength, excess pore-water pressure and volume change during shearing under the constant water content conditions were simulated using the proposed elasto-plastic model. The simulation results show the good agreement between the simulated using proposed equations and the experimental results.

**Keywords:** *Matric suction, yield surface, soil-water characteristic curve, elasto-plastic model, unsaturated soil, constant water content triaxial tests.*