



พื้นผิวครากสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

สมใจ ยุบลชิต^{1*} และ อวีรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์²

บทคัดย่อ

บทความนี้จะนำเสนอพื้นผิวครากของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำบนระนาบของหน่วยแรงสุทธิต่อหน่วยแรงดึงน้ำภายใต้สภาวะการอัดตัวที่เท่ากันทุกทิศทาง โดยใช้การพิจารณาโครงสร้างดินร่วมกับ ทฤษฎีอิลาสโต-พลาสติก โดยโครงสร้างดินจะใช้เส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินนิยามสภาวะเริ่มต้นของพื้นผิวคราก และใช้ทฤษฎีอิลาสโต-พลาสติก สำหรับนิยามพื้นผิวครากต่อเนื่อง ซึ่งพื้นผิวครากที่ได้จะแบ่งออกเป็นสองช่วงอย่างชัดเจน คือ ช่วงดินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยช่วงนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากสุทธิเกิดขึ้น ในขณะที่หน่วยแรงครากสุทธิของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากพื้นผิวครากที่ได้เมื่อนำไปทำนายเส้นการอัดตัวของดินจะได้รูปแบบการผายออกจากกันในช่วงการอัดตัวปกติ แสดงถึงการเพิ่มของความแกร่งของดินที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมที่แท้จริงของดิน

คำสำคัญ: แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด, พื้นผิวคราก, ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

^{1*} นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-4422-4421, E-mail:somjai_civil@windowslive.com



A Novel Yield Surface for Unsaturated Soils

Somjai Yubonchit^{1*} and Avirut Chinkulkijniwat²

Abstract

This paper presents yield surface of unsaturated soils on a net stress - suction plane. A proposed model was developed based on a combination of soil structure and elasto-plastic theory. The soil structure is employed to establish an initial yield surface. The soil structure is normally represented via the soil water characteristics curve (SWCC). Hence, the initial yield surface could be derived by mathematic manipulating with the SWCC. A subsequence yield surface was derived by equality of plastic volumetric strain between two stress paths traveling along the same yield surfaces. For a given yield surface, yield stresses provided from the derived yield surface remain constant if a soil suction does not reach an air entry suction. Once, the soil suction develops beyond the air entry suction, the magnitude of yield stress increases with suction.

KEY WORDS: constitutive model, yield surface, unsaturated soils

¹ Master Degree Graduate, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

² Assistant Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel. 0-4422-4420, E-mail: somjai_civil@windowslive.com



1. บทนำ

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะทางธรรมชาติที่แตกต่างกันจะแสดงพฤติกรรมที่ต่างกันออกไป ซึ่งสามารถจำแนกตามสถานะได้เป็นสองชนิดด้วยกันคือ ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) และดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) พฤติกรรมทางกลต่าง ๆ ของดินเหล่านี้สามารถทำนายได้โดยใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดิน (Constitutive soil model) สำหรับในดินอิ่มตัวด้วยน้ำแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างเป็นระบบนับตั้งแต่ Roscoe and Burland [1] ได้เสนอ CAM clay model ซึ่งมีพื้นฐานจากสมมติฐานที่ว่าพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการเสียรูปของดินเหนียว มาจากการเอาชนะความเสียดทานของดิน หลังจาก CAM clay model ได้เสนอขึ้น ได้มีการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดมาอีกมากมาย

สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เป็นทราบกันดีว่าในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดึงน้ำ (Suction, $s = u_a - u_w$) จะมีส่วนสำคัญต่อพฤติกรรมของดิน แต่ยังไม่มีการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด จนกระทั่ง Alonso et al. [2] ได้เสนอแบบจำลองซึ่งต่อมารู้จักกันในชื่อ Barcelona Basic Model (BBM) ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวใช้ตัวแปรหน่วยแรงสองตัว (Two stress variables) ได้แก่ หน่วยแรงสุทธิ (Net stress, $\bar{p} = p - u_a$) และแรงดึงน้ำในการอธิบายพฤติกรรมของดิน หลังจากงานวิจัยดังกล่าวได้รับการเผยแพร่ ได้มีการเสนอแบบจำลองสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้นอีกหลายแบบจำลอง เช่น [3] [4] [5] [6] [7] และ [8] เป็นต้น

บทความนี้จะนำเสนอแบบจำลองสำหรับทำนายการเสียรูปของดินเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic load) ผ่านเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว (Loading collapse curve) โดยพัฒนาขึ้นจากพื้นฐานของโครงสร้างดินเอง ร่วมกับทฤษฎีอีลาสโต-พลาสติก

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัวหรือ LC curve ถูกนิยามครั้งแรกโดย Alonso et al. [2] เพื่อกำหนดพื้นผิวคราก (Yield surface) บนระนาบ (\bar{p}) และ ($u_a - u_w$) ภายใต้กรอบแนวคิดแบบ อีลาสโต-พลาสติก กล่าวคือ ดินจะแสดงพฤติกรรมแบบอีลาสติก (Elastic behavior) เมื่อสถานะของหน่วยแรงอยู่ภายใน LC curve แต่เมื่อสถานะของหน่วยแรงอยู่บน LC curve ดินจะแสดงพฤติกรรมแบบพลาสติก (Plastic behavior) ซึ่ง Alonso et al. [2] ได้นำเสนอ LC curve จากรูปแบบการอัดตัวภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่ และได้ตั้งสมมติฐานสำหรับแบบจำลอง โดยการกำหนดหน่วยแรงสุทธิอ้างอิง เมื่อหน่วยแรงครากสุทธิของดินอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเท่ากับหน่วยแรงสุทธิอ้างอิงนี้ LC curve จะเป็นเส้นตรงในแนวตั้ง เปรียบเสมือนเป็นเส้นอ้างอิงในการนิยามหาหน่วยแรงครากสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ โดยหลักการแล้ว การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติก ($d\varepsilon_{vp}^p$) ของดิน และการเปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดิน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความชันของ LC curve จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติกับแรงดึงน้ำ และในแบบจำลอง Barcelona Basic Model ค่าความชันนี้จะลดลงตามการเพิ่มของแรงดึงน้ำ หลังจากนิยาม LC curve แล้ว Alonso et al. [2] ได้ใช้พื้นผิวครากรูปวงรีมากำหนดขอบเขตครากบนระนาบหน่วยแรงสุทธิและหน่วยแรงเฉือน ($\bar{p} - q$) โดยกำหนดให้เส้นการวิกฤติ (Critical state line, CSL) ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขนานกับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ทำให้ได้พื้นผิวครากบนห้วงเทศะ (Stress space) $\bar{p} - q - s$ แต่แบบจำลองนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการเลือกค่าหน่วยแรงสุทธิอ้างอิงเพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานของแบบจำลองซึ่งเป็นค่าที่หายากจากการทดสอบ

หลังจากแบบจำลอง Barcelona Basic Model ถูกเสนอขึ้นได้มีแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำถูกเสนอขึ้นมาอีกมากมาย ซึ่งล้วนแล้วแต่ใช้ Barcelona Basic Model เป็นต้นแบบ Wheeler and Sivakumar [9] เสนอแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเริ่ม

จากการศึกษาการอัดตัวของดินเหนียวเคลโอลินบดอัด (Compacted speswhite kaolin clay) ภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่ ซึ่งรูปแบบการอัดตัวของดินที่ได้จะมีความชื้นของเส้นการอัดตัวปกติของดินไม่อิมตัวด้วยน้ำสูงกว่าดินอิมตัวด้วยน้ำ รูปแบบการอัดตัวนี้ได้ใช้เป็นเป็นจุดเริ่มต้นของการนิยาม LC curve โดยใช้แนวทางตามแบบจำลอง Barcelona Basic Model และได้มีการเสนอให้เลือกใช้หน่วยแรงสุทธิอ้างอิงมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ (p_{at}) เนื่องจากภายใต้หน่วยแรงนี้ง่ายต่อการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง โดยไม่มีการตั้งสมมุติฐานและลดข้อจำกัดที่เห็นจาก Barcelona Basic Model หลังจาก Wheeler and Sivakumar [9] นิยาม LC curve แล้ว ได้เลือกใช้พื้นผิวครากรูปวงรีมา กำหนดขอบเขตครากบนระนาบ $\bar{p}-q$ เช่นเดียวกับ Barcelona Basic Model แต่กำหนดให้ค่าความชื้นของเส้นการวิกฤติของดินขึ้นอยู่กับระดับแรงดึงน้ำ จึงสรุปได้ว่า Wheeler and Sivakumar [9] ได้ใช้แนวทางในการนิยาม LC curve เดียวกับ Barcelona Basic Model แตกต่างกันเพียงรายละเอียดบางอย่างในแบบจำลองเท่านั้น เช่นเดียวกับแบบจำลองอื่นที่เสนอขึ้นในภายหลัง เช่น [10] [11] [12] และ [13] เป็นต้น

Sheng et al. [7] และ Sheng et al. [8] ได้เสนอ SFG Model โดยแยกการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินออกเป็นสองส่วนตามทางเดินหน่วยแรง คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเพิ่มแรงดึงน้ำ (Drying path) ซึ่งค่าความชื้นในช่วงการอัดตัวปกติจะขึ้นอยู่กับแรงดึงน้ำ และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการอัดตัว (Loading path) ภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่ ได้กำหนดให้ค่าความชื้นของเส้นการอัดตัวปกติของกระบวนการนี้เป็นอิสระกับแรงดึงน้ำ SFG Model ได้เริ่มจากการนิยาม LC curve เริ่มต้น (Initial LC curve) ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า ผลรวมของความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อสถานะของหน่วยแรงอยู่บน LC curve เริ่มต้น ซึ่งคือผลรวมความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกระหว่างกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยสุทธิคงที่และการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากสุทธิ การนิยาม LC curve เริ่มต้นนี้ ใช้เป็นเส้นอ้างอิงถึงสถานะเริ่มต้นของ

ดินเช่นเดียวกับจุดบรรจบกันของ Sun et al.[3] เพื่อใช้นิยาม LC curve ที่สัมพันธ์กับเส้นทางเดินของหน่วยแรงลำดับถัดไป หลังจากนั้นได้เลือกพื้นผิวครากรูปวงรีมา กำหนดขอบเขตครากบนระนาบ $\bar{p}-q$ โดยกำหนดให้ค่าความชื้นของเส้นการวิกฤติเป็นอิสระกับแรงดึงน้ำ ทำให้ได้พื้นผิวครากบนห้วงเทศะ $\bar{p}-q-s$

3. การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายการเสื่อยรูปของดินภายใต้หน่วยแรงเท่ากันทุกทิศทาง

ในการนิยาม LC curve ของดิน จะเริ่มจากการนิยามเส้นอ้างอิง หรือ LC curve เริ่มต้นของดิน เพื่อใช้ในการนิยาม LC curve ที่สัมพันธ์กับเส้นทาง การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงจากรูปแบบการอัดตัวของแต่ละแบบจำลอง งานวิจัยนี้จะนิยาม LC curve เริ่มต้นภายใต้เส้นทางเดินของหน่วยแรงที่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ (Drying path) เมื่อระดับหน่วยแรงสุทธิคงที่เท่ากับศูนย์ โดยเริ่มจากดินสถานะอิมตัวด้วยน้ำ โดยมีสมมุติฐานคือ

- 1) สำหรับโพรงที่ยังมีน้ำเต็มอยู่ ขนาดของหน่วยแรงประสิทธิผล ($\bar{p} + \chi s, p'$) ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ โพรงจะมีค่าเท่ากับขนาดของแรงดึงน้ำ
- 2) เมื่อแรงดึงน้ำในโพรงมีค่าเกินกว่าค่าแรงดึงน้ำที่อากาศเข้า (Air entry suction, s_{ae}) ของโพรง น้ำในโพรงจะถูกแทนที่ด้วยอากาศ ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของดินรอบ ๆ โพรงจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่กระทำต่อโครงสร้างดินรอบโพรงหรือหน่วยแรงครากประสิทธิผลจะมีค่าเท่ากับ s_{ae}

ในมวลดินมีโพรงหลายขนาด หน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นจึงต้องเป็นค่าเฉลี่ยต่อปริมาตรโพรงอากาศทั้งหมดในมวลดิน โดยสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและขนาดของโพรงอากาศในมวลดิน (Pore - size distribution curve) หรือการปริพันธ์ จากเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะการอุม้ น้ำของดิน (Soil-water characteristic curve, SWCC) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำและระดับความอิมตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation, S_r) งานวิจัยนี้จึง



นิยามการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากประสิทธิผลโดยการหาปริพันธ์ของความสัมพันธ์นี้ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่หาได้ง่ายกว่าจากการทดสอบ และจะเลือกความสัมพันธ์ตาม Brook and Corey [14] ดังสมการต่อไปนี้

$$S_r = 1.0 \quad \text{เมื่อ } s < s_{ae} \quad (1)$$

$$S_r = \left(\frac{s_{ae}}{s} \right)^n \quad \text{เมื่อ } s \geq s_{ae} \quad (2)$$

s_{ae} เป็น Air entry suction ของโพรงอากาศขนาดใหญ่ที่สุด

n เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องรูปร่างของการกระจายปริมาตรโพรงอากาศในมวลดิน (Pore-shape parameter)

สมการ (1) และ (2) เป็นสมการทำนาย SWCC ของดินดังภาพร่างในรูปที่ 1 จากรูปเมื่อหาปริพันธ์ที่สัมพันธ์กับการเพิ่มแรงดึงน้ำของความสัมพันธ์นี้จะได้การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากประสิทธิผล ($\Delta p'_0$) ดังนี้

$$\Delta p'_0 = \int_{S_r}^{1.0} s dS_r + s S_r \quad (3)$$

$$\Delta p'_0 = \int_{S_r}^{1.0} \frac{s_{ae}}{S_r^{1/n}} dS_r + s S_r \quad (4)$$

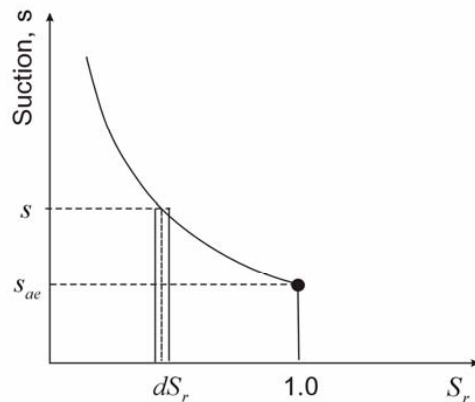
$$\Delta p'_0 = \frac{n s_{ae}}{n-1} \left(1 - S_r^{\frac{n-1}{n}} \right) + s S_r \quad (5)$$

สมการ (5) เป็นสมการทำนายการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากประสิทธิผล จากการเพิ่มแรงดึงน้ำในดินบนระนาบหน่วยประสิทธิผลกับแรงดึงน้ำ เนื่องจากแบบจำลองที่ต้องการนำเสนอในบทความนี้จะเป็นแบบจำลองบนพื้นฐานของหน่วยสุทธิตั้งนั้นจึงต้องทำการแปลงหน่วยแรงครากประสิทธิผลที่

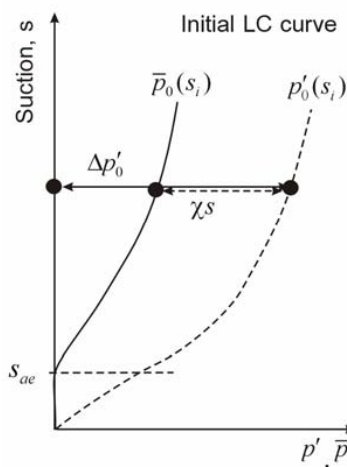
เพิ่มขึ้นให้เป็นหน่วยแรงครากสุทธิ ทั้งนี้หน่วยแรงสุทธิจะมีความสัมพันธ์กับหน่วยแรงประสิทธิผลตาม Bishop [15] ทำให้ได้หน่วยแรงสุทธิครากบน LC curve เริ่มต้นดังรูปที่ 2 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\bar{p}_0(s_i) = \Delta p'_0 - \chi s \quad (6)$$

ค่า χ ในสมการ (6) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ S_r Brook and Corey [14] ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ (1) และ (2)



รูปที่ 1 ภาพร่าง SWCC ของดินโดยใช้สมการ Brook and Corey [14]



รูปที่ 2 ภาพร่างแสดง LC curve เริ่มต้นของดิน

สำหรับผลทดสอบการอัดตัวของดินจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไปจะนิยมนำเสนอบนความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะกับหน่วยแรงประสิทธิผลแบบลอกกาลิทึม ($v - \ln \sigma'$) และมีการนิยามค่าความชันของเส้นการอัดปกติ (λ) จากความสัมพันธ์แบบเส้นตรงบนระนาบดังกล่าวเพื่อใช้ประมาณความเครียดเครียดเชิงปริมาตรของดิน แต่ในขณะที่ Butfield [16] และ Hashiguchi [17] ได้ศึกษาผลทดสอบการอัดตัวของดินอิมิตัวด้วยน้ำหลายชนิดพบว่า การนิยามค่า λ บนความสัมพันธ์ของ $v - \ln \sigma'$ จะเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความเครียดเชิงปริมาตร เนื่องจากภายใต้หน่วยแรงประสิทธิผลที่สูงๆ ผลทดสอบการอัดตัวของดินจะไม่เป็นเส้นตรงบนระนาบ $v - \ln \sigma'$ แต่จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงบนระนาบ $\ln v - \ln \sigma'$ ซึ่งภายหลังได้มีหลายแบบจำลองที่เลือกใช้ความสัมพันธ์นี้ในการอธิบายพฤติกรรมของดิน เช่น [7] [8] [18] [19] และ [20] เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเลือกนิยาม λ บนความสัมพันธ์ของ $\ln v - \ln \sigma'$

การเปลี่ยนแปลง LC curve ภายใต้การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสุทธิจะนิยามโดยกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกของดินไม่อิมิตัวเท่ากับดินอิมิตัวด้วยน้ำระหว่าง LC curve เริ่มต้นและ LC curve ถัดไป ดังรูปที่ 3 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{p}_0(s) = \bar{p}_0(s_i) \left(\frac{\bar{p}_0(0)}{\bar{p}_0(0_i)} \right)^{\frac{\lambda_p(0) - \kappa}{\lambda_p(s) - \kappa}} \quad (7)$$

$\bar{p}_0(s)$ เป็นหน่วยแรงครากสุทธิแบบเท่ากันทุกทิศทางที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ

$\bar{p}_0(s_i)$ เป็นหน่วยแรงครากสุทธิแบบเท่ากันทุกทิศทางที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ บน LC curve เริ่มต้น

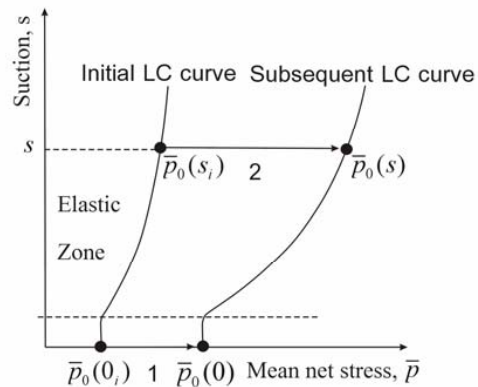
$\bar{p}_0(0)$ เป็นหน่วยแรงครากสุทธิแบบเท่ากันทุกทิศทางของดินอิมิตัวด้วยน้ำ

$\bar{p}_0(0_i)$ เป็นหน่วยแรงครากสุทธิแบบเท่ากันทุกทิศทางของดินอิมิตัวด้วยน้ำบน LC curve เริ่มต้น

$\lambda_p(0)$ เป็นความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดินอิมิตัวด้วยน้ำ

$\lambda_p(s)$ เป็นความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดินไม่อิมิตัวด้วยน้ำซึ่งจะมีค่าลดลงตามแรงดึงน้ำที่เพิ่มขึ้น

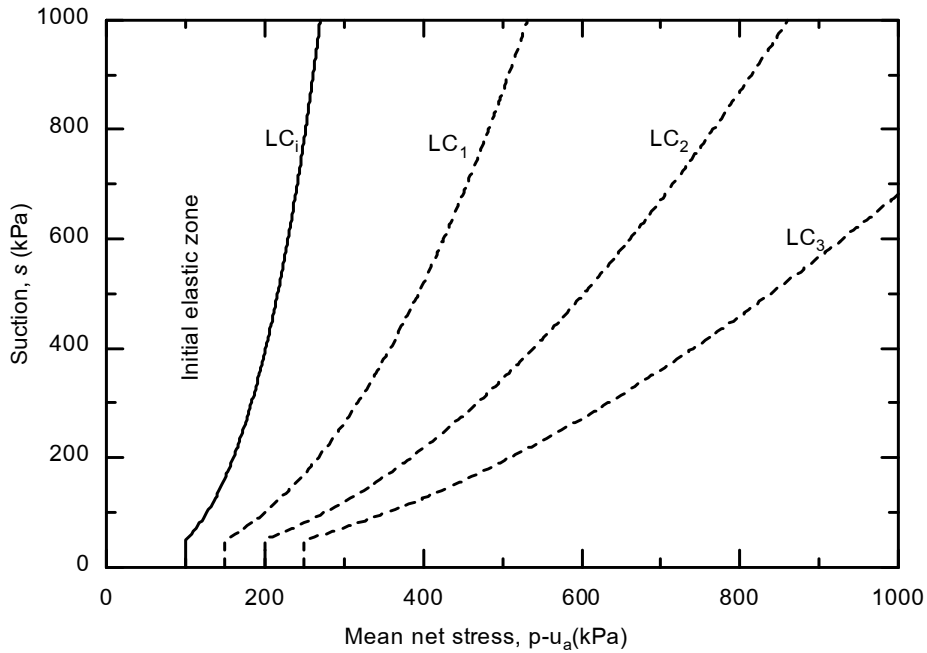
κ เป็นความชันของ Unloading - Reloading line



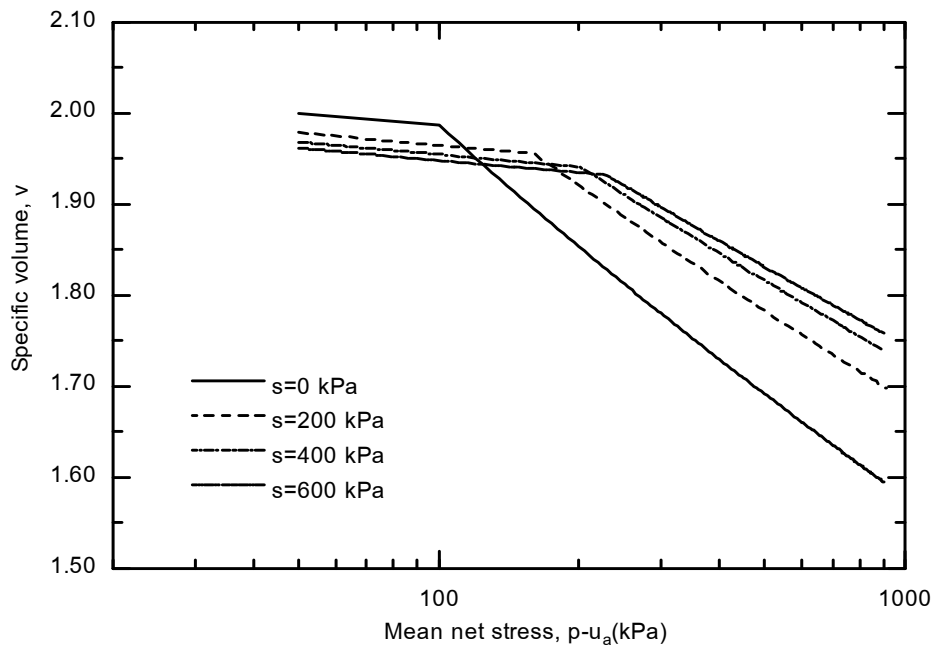
รูปที่ 3 ภาพร่าง LC curve ตามการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิ

4. ผลงานวิจัย

สมการที่ (7) เป็นสมการทำนาย LC curve ของดินแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งได้จากการกำหนด s_{ae} เท่ากับ 50 kPa เมื่อทำการอัดตัวภายใต้สภาวะอิมิตัวด้วยน้ำไปยัง 100 kPa และเพิ่มแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธินี้โดยสมมุติให้ SWCC ไม่ขึ้นกับระดับหน่วยแรงสุทธิสามารถใช้สมการที่ (6) คำนวณ LC curve เริ่มต้น (LC₁) และเมื่อเพิ่มหน่วยแรงสุทธิ โดยเพิ่ม $\bar{p}_0(0)$ จาก 100 kPa เป็น 150, 200 และ 250 kPa ใช้สมการที่ (7) คำนวณจะได้ LC curve เป็น LC₁, LC₂ และ LC₃ ตามลำดับ ซึ่งจะมีการขยายเมื่อแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่า 50 kPa ในขณะที่แรงดึงน้ำต่ำกว่า 50 kPa จะไม่มีการขยายของ LC curve เกิดขึ้น เนื่องจากดินยังแสดงพฤติกรรมอิมิตัวด้วยน้ำ รูปที่ 5 แสดงเส้นการอัด



รูปที่ 4 LC curve ของดินที่ใช้เป็นตัวอย่างในบทความนี้



รูปที่ 5 เส้นการอัดตัวของดินภายใต้ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ 0 200 400 และ 600 kPa ตามลำดับ

ตัวของดินที่ทำนายได้จากแบบจำลองที่เสนอ ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเท่ากันทุกทิศทาง และระดับแรงดึงน้ำ คงที่ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง v และ $\ln \bar{p}$ ภายใต้แรงดึงน้ำเท่ากับ 0 200 400 และ 600 kPa ตามลำดับ พบว่า ช่วงการอัดตัวปกติของดินจะเกิด รูปแบบการผายออกจากกัน โดยความชันของเส้นการ อัดตัวปกติที่ระดับแรงดึงน้ำเท่า 0 kPa จะมีค่าสูงที่สุด และจะลดลงเมื่อแรงดึงน้ำเพิ่มเป็น 200 และ 400 kPa จนกระทั่งต่ำสุดเมื่อแรงดึงน้ำเท่ากับ 600 kPa

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาข้างต้น พบว่า แบบจำลองที่นำเสนอ จะแสดงการเปลี่ยนแปลง LC curve ซึ่งจะพบว่า LC curve สามารถแบ่งออกเป็นสองช่วงอย่างชัดเจนคือ ช่วงที่ดินยังแสดงพฤติกรรมอ้อมตัวด้วยน้ำอยู่ จะมีหน่วย แรงครากสุทธิของดินคงที่ ในขณะที่ช่วงดินไม่อ้อมตัว ด้วยน้ำจะมีการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากสุทธิตามแรง ดึงน้ำ จะทำให้ LC curve ในช่วงนี้มีการขยายขึ้นตาม แรงดึงน้ำที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำ LC curve ไปทำนายการ อัดตัวของดินไม่อ้อมตัวด้วยน้ำจะทำให้ได้รูปแบบของเส้น การอัดตัวปกติที่ผายออกจากกัน ซึ่งรูปแบบดังกล่าว สอดคล้องกับพฤติกรรมที่แท้จริงของดิน กล่าวคือ เมื่อ ดินมีแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้นความแกร่ง (Stiffness) ของดินจะ เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามรูปแบบการอัดตัวที่ได้นี้ยังขัดแย้ง กับพฤติกรรมที่แท้จริงของดินอยู่ คือ ระดับการพังตัว ของดินจะเพิ่มเมื่อหน่วยสุทธิเพิ่มขึ้น ซึ่งในความเป็น จริงแล้ว ระดับการพังตัวของดินควรมีค่าลดลงเมื่อ หน่วยแรงสุทธิเพิ่มขึ้น ดังนั้น เพื่อขจัดข้อสงสัยนี้จึงควร มีการศึกษาต่อไปเพื่อให้สามารถอธิบายถึงพฤติกรรม ของดินไม่อ้อมตัวด้วยน้ำให้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุน เงินทุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Roscoe K.H., and Burland J.B. 1968. On the generalized stress-strain behavior of wet clay. In: Heyman J, Leckie F, editors. Engineering plasticity. Cambridge: Cambridge University Press. p. 535-560.
- [2] Alonso E.E., Gen A., and Josa A. 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*. 40(3):405-430.
- [3] Sun D.A., Matsuoka H., Yao Y.P., Xu Y.F., and Ichihara W. 2000. An elastoplastic model for unsaturated soil in three-dimensional stresses. *Soils and Foundations*. 40(3):17-28.
- [4] Gallipoli D., Gens A., Sharma R., and Vaunat J. 2003. An elasto – plastic for unsaturated soil incorporating the effect of suction and degree of saturation on mechanical behavior. *Geotechnique*. 53(1):123-135.
- [5] Sun D.A., Matsuoka H., Cui H.B., and Xu Y.F. 2003. Three-Dimensional elasto-plastic model for unsaturated compacted soils with different initial densities. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech*. 27(12):1079-1098.
- [6] Sun D.A., Sheng D., Cui H.B., and Sloan S.W. 2007a. A density dependent elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated compacted soils. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech*. 31(11):1257-1279.
- [7] Sheng D., Sloan S.W., and Gens A. 2008a. A new modeling approach to unsaturated soils using independent stress variables. *Canad Geotech J*. 45(4):511-534.
- [8] Sheng D., Sloan S.W., and Gens A. 2008. A new modeling approach to unsaturated soils using independent stress variables. *Canad Geotech J*. 45(4):511-534.



- [9] Wheeler S.J., and Sivakumar V. 1995. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soils. *Geotechnique*. 45(1):35-53.
- [10] Cui Y.J., and Delage P. 1996. Yielding and plastic behaviour of unsaturated compacted silt. *Geotechnique*. 46(2):291-311.
- [11] Rampino C., Mancuso C., and Vinale F. 2000. Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil. *Canad Geotech J.* 37(4):748-763.
- [12] Chiu C.F., and Ng C.W.W. 2003. A state dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils. *Geotechnique*. 53(9):809-829.
- [13] Thu T.M., Rahardjo H., and Leong E.C. 2007. Soil-water characteristic curve and consolidation behavior for compacted silt. *Canad Geotech J.* 44(3):266-275.
- [14] Brooks R.H., and Corey A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3. Colorado State University, Fort Collins, Colo.
- [15] Bishop A. W. 1959. The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknisk Oslo Norway*. 39: 859-863. [
- [15] Bishop A.W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad*; 106(39):859-863.
- [16] Butterfield R.A. 1979. Natural compression law of soils (an advance on $e - \ln p'$). *Geotechnique*. 29:469-480.
- [17] Hashiguchi K. 1995. On the linear relations of $v - \ln p$ and $\ln v - \ln p$ for isotropic consolidation of soils. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 19(3):367-376.
- [18] Rouainia M., and Muir Wood D. 2000. A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure. *Geotechnique*. 50(2):153-164.
- [19] Sheng D., Sloan S.W., and Gens A. 2004. A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects. *Comput. Mech.* 33(6):453-465.
- [20] Masin D. 2005. A hypoplastic constitutive model for clay. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 29(4):311-336.