

การพัฒนาสมการทำนายเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว
สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**DEVELOPMENT OF MATHEMATIC MODEL
FOR LOADING COLLAPSE CURVE
IN UNSATURATED SOILS**

Tanakorn Rakkob



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การพัฒนาสมการทำนายเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว
สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชนากรณ์ รัศคอบ : การพัฒนาสมการทำนายเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว
สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (DEVELOPMENT OF MATHEMATIC MODEL FOR
LOADING COLLAPSE CURVE IN UNSATURATED SOILS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 78 หน้า.

เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว (Loading collapse curve, LC curve) คือ
พื้นผิวครากของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่อยู่บนระนาบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และแรงดึงน้ำ
ดังนั้น เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญ ของแบบจำลอง
ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ภายใต้ทฤษฎีอิลาสโต –
พลาสติก ซึ่งมีสองส่วนสำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดพื้นผิวคราก นั่นก็คือ สภาวะเริ่มต้นของพื้นผิว
คราก และวิวัฒนาการการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวครากเมื่อเกิดการครากของดิน ในงานวิจัยนี้ได้
นำเสนอหลักการวิธีการสำหรับประมาณ สภาวะเริ่มต้นของพื้นผิวคราก สำหรับดินที่ไม่มีเชื่อมแน่น
ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากเส้นทางด้านแห้งของเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำ ที่เป็นคุณสมบัติทาง
กายภาพของดิน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นด้วยการแสดงให้เห็นถึงแหล่งที่มา สำหรับหน่วยแรง
ประสิทธิผลเฉลี่ยของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้แนวคิดจากการพิจารณาปริมาตรในโพรงดิน ที่
สอดคล้องกับแรงดึงน้ำที่เกิดขึ้นในโพรง หลังจากนั้น จากแนวคิดดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้สำหรับทำ
การคำนวณหาหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) ซึ่งการคำนวณค่าหน่วย
แรงประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ จะมีทั้งดินที่มีการอัดตัวคายน้ำแบบปกติ และอัดตัวคาย
น้ำแบบมากกว่าปกติ ที่อยู่ภายใต้การเพิ่มแรงดึงน้ำจากสภาวะเริ่มต้นอิมตัวด้วยน้ำ จากนั้นผลที่
แสดงถึงสภาวะเริ่มต้นของพื้นผิวคราก โดยสมการที่นำเสนอ จะใช้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะการ
อัดตัวของดิน และทฤษฎีพฤติกรรมกรการแข็งด้วยความเครียด (strain hardening) ร่วมกัน และจะ
แสดงอยู่บนระนาบของหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย กับแรงดึงน้ำ ซึ่งลักษณะสภาวะเริ่มต้นของ
พื้นผิวครากในช่วงแรก หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยจะมีค่าคงที่ตลอดการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ
จนกระทั่งถึงแรงดึงน้ำที่อากาศเข้า จากนั้นหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้น
โค้ง ตามการเพิ่มของแรงดึงน้ำ การประมาณนี้จะเหมาะสมสำหรับดินเม็ดใหญ่ ที่อนุภาคของดินไม่
มีพันธะเชื่อมติดกัน (cohesionless soil) จะมีโครงสร้างของดินเป็นลักษณะของอนุภาคโดดๆ และ
ทำหน้าที่อย่างอิสระ เป็นรูปแบบที่เรียกว่า “โครงสร้างของดินแบบเดี่ยว” (single grain structure)
ดังนั้นในโครงสร้างที่เป็นดินเหนียวที่มีความซับซ้อนสูง การประมาณด้วยวิธีนี้จะไม่สามารถใช้ได้
จากนั้นจะใช้การวัดผลจากการทดสอบของพื้นผิวครากในงานวิจัยของ Uchaipichat and Khalili

(2009) มาทำการตรวจสอบและยืนยันผลกับสมการที่คำนวณได้ ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการวัด และการคำนวณทั้งคู่ มีความสอดคล้องและตรงกันดีมาก



สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

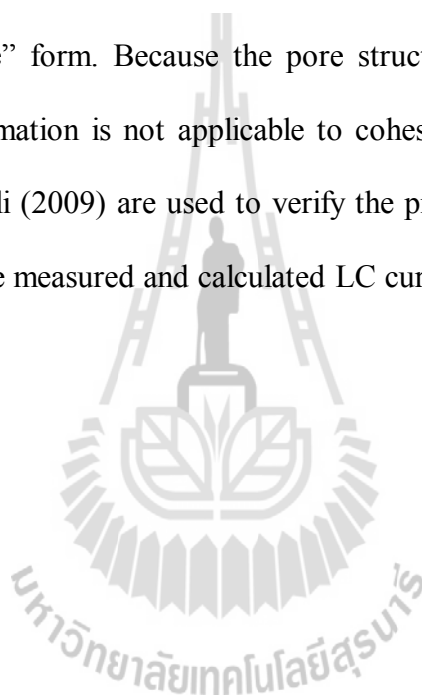
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

TANAKORN RAKKOB : DEVELOPMENT OF MATHEMATIC MODEL
FOR LOADING COLLAPSE CURVE IN UNSATURATED SOILS. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D., 78 PP.

CONSTITUTIVE MODEL/UNSATURATED SOILS/EFFECTIVE MEAN STRESS

A very important feature of unsaturated soils included in the elasto-plastic models is a shift in preconsolidation pressure or yield limit with suction, referred to as the loading collapse (LC) curve. The LC curve is typically defined in the matric suction versus mean stress plane to account for the effects of matric suction. The main advantage of the models including LC curve is that they can reproduce some basic features in unsaturated soils such as collapse and swelling upon wetting. There are two important aspects in determining an LC curve: the initial LC curve and its evolution with yielding. This report presents a rational method to approximate the initial LC curve of an unsaturated cohesionless soil from its water retention characteristic curve (WRC) along the drying path. The report begins with a derivation of an expression for the effective mean stress of an unsaturated soil by considering its pore volumes and the corresponding air entry suctions. Subsequently, the same consideration is further used to calculate the maximum effective mean stresses experienced by a soil (p'_{\max}) for a soil subjected to drying to a certain magnitude of applied suctions. The calculated p'_{\max} values are derived for both normally consolidated and overconsolidated soils that are subjected to being dried from their initially saturated state. The WRC along the drying path is incorporated into the proposed equation by considering the pore volumes and their corresponding air entry

suction. Bearing in mind that the soil is subjected to a change in its volume while being dried, the calculated p'_{\max} values do not represent stress values at a specific soil volume. The calculated p'_{\max} values and information on the compression characteristics of the soil are combined through strain hardening to determine the p'_{\max} values along a specific soil volume and, hence, the LC curve. The approximation is applicable for cohesionless soil, whose soil fabric has a so-called “single grain structure” form. Because the pore structure of cohesive soil is highly complex, this approximation is not applicable to cohesive soil. The test results from Uchaipichat and Khalili (2009) are used to verify the proposed methodology. A good agreement between the measured and calculated LC curves is found.



School of Civil Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา คอยชี้แนะ ดูแลในด้านการศึกษาวิจัย เป็นอย่างดีตลอดมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ แนวทางในการวางแผนการศึกษาเป็นอย่างดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง กรรมการที่กรุณาให้การแนะนำ และคำปรึกษาในการเขียน และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์

เจ้าหน้าที่ศูนย์บรรณาสาร เจ้าหน้าที่สถานวิจัย และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยดูแลและอำนวยความสะดวก ในเรื่องเอกสารต่างๆ และผู้ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

และสุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ชีวิต คอยเลี้ยงดู และอบรมสั่งสอนสิ่งดีๆ เสมอมา ตลอดจนคอยเป็นกำลังใจเพื่อให้ผู้วิจัยบรรลุเป้าหมายอย่างที่ตั้งใจไว้ จนกระทั่งประสบความสำเร็จในชีวิต

ธนาภรณ์ รักคอบ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรีทรรสน์วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 หน่วยแรงประสิทธิผล.....	6
2.3 พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล (χ).....	7
2.4 เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว.....	14
3 หน่วยแรงของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ.....	42
3.1 บทนำ.....	42
3.2 หน่วยแรงเฉลี่ยของดินเม็ดหยาบอัดตัวคายน้ำแบบปกติ.....	42
3.3 หน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ.....	47
3.3.1 ดินอัดตัวคายน้ำแบบปกติ.....	47
3.3.2 ดินอัดตัวคายน้ำแบบมากกว่าปกติ.....	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 พื้นผิวครากสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ.....	56
4.1 บทนำ.....	56
4.2 พื้นผิวครากบนระนาบหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยกับแรงค้ำน้ำ.....	56
5 ยืนยันและสรุปผลการศึกษา.....	63
5.1 การตรวจสอบและยืนยันผล.....	63
5.2 สรุปผลการศึกษา.....	66
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	78



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	รายละเอียดชนิดของดินและคุณสมบัติพื้นฐาน
	ในบทความของ Khalili and Khabbaz (1998).....10
2.2	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ ISC.....23
2.3	ค่าอัตราส่วน โพรงที่สถานะเริ่มต้นของการทดสอบที่ต่างกัน.....31
5.1	คุณสมบัติของดินตะกอนเมืองบอร์ก (Brouke silt).....67



สารบัญรูป

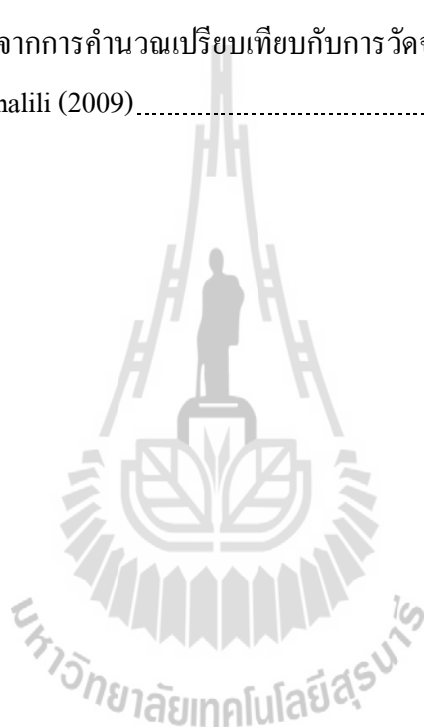
รูปที่	หน้า
2.1	ภาพร่างองค์ประกอบในมวลดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Gens A, 2010).....4
2.2	ส่วนโค้งเว้าของน้ำระหว่างดินสองอนุภาค (Gili, 1988).....4
2.3	ภาพร่างแสดงคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน.....5
2.4	ภาพร่างความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินต่างๆ.....7
2.5	ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างกำลังรับแรงเฉือน กับแรงดึงน้ำ (Gen et. al., 1988).....12
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง χ กับแรงดึงน้ำ ($u_a - u_w$) (Khalili and Khabbaz, 1998).....12
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล กับอัตราส่วนแรงดึงน้ำ (Khalili and Khabbaz, 1998).....13
2.8	ภาพร่างรูปแบบการอัดตัวของดินสองสถานะ (Alonso et al., 1990).....15
2.9	ภาพร่าง LC curve (Alonso et al., 1990).....15
2.10	เส้นโค้งการอัดตัวของดิน (a) 25°C, (b) 40°C, (c) 60°C (A.Uchaipichat and Khalili, 2009).....19
2.11	LC curve ที่อุณหภูมิต่างกัน (A.Uchaipichat and Khalili, 2009).....20
2.12	ภาพร่างเส้นทางเดินหน่วยแรงของการทดสอบ ISC และ SWCC (Zhang et al., 2011).....21
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน โพรงกับหน่วยแรงสุทธิต่อระดับแรงดึงน้ำต่างๆของการทดสอบ ISC (Zhang et al., 2011).....21
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน โพรงกับแรงดึงน้ำที่ระดับหน่วยแรงสุทธิต่างๆของการทดสอบSWCC (Zhang et al., 2011).....21
2.15	ภาพร่างวิธีการกำหนดรูปร่างของ LC curve (Delage and Graham, 1996).....22
2.16	ภาพร่าง LC curve และ SI yield curve ของ Wang et al., 2008.....24
2.17	ภาพร่างวิธีการกำหนดตำแหน่งของ SI yield curve ของ Thu et al., 2007.....25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 ภาพร่างเส้นทางเดินหน่วยแรงที่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดกับการคำนวณ LC curve (Zhang et al., 2010).....	28
2.19 ภาพร่างแสดงหลักการของแนวคิด MSSA (Zhang et al., 2010).....	30
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore – size distribution curve กับ WRC.....	32
2.21 ภาพร่าง WRC ของดินโดยใช้สมการ Brook and Corey (1964).....	34
2.22 การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ Stager G. (2010).....	36
2.23 หน่วยแรงครากสุทธิจากผลการทดสอบการอัดตัวของ Stager G. (2010).....	37
2.24 ผลกระทบของ LC curve จากการเตรียมตัวอย่างของ Stager G. (2010).....	37
2.25 LC curve ภายใต้ระดับแรงดึงน้ำต่างๆ (สมใจ ยุกลชิต, 2554).....	39
2.26 หน่วยแรงสุทธิสมมูลบนระนาบ $\ln v - \ln \bar{p}$ (สมใจ ยุกลชิต, 2554).....	39
2.27 LC curve เริ่มต้น ที่ Normalization ด้วยค่า $\bar{p}_{e,s}$ (สมใจ ยุกลชิต, 2554).....	40
3.1 ภาพร่างการพัฒนาการของแรงดันน้ำในดินภายใต้ขนาดของแรงดึงน้ำต่างๆ.....	45
3.2 ภาพร่างสถานะที่เป็นไปได้สำหรับกรณี I ตามหน่วยแรงที่กระทำเท่ากับ $s + p_{net}$	50
3.3 ภาพร่างแสดงส่วนแห้งและเปียกบน SWCC สำหรับสถานะที่ I.3(ai), I.3(aii), I.3(bi) และ I.3(bii).....	53
3.4 ภาพร่างแสดงสถานะที่เป็นไปได้สำหรับกรณี (II) ตามหน่วยแรงที่กระทำเท่ากับ $s + p_{net}$	54
3.5 ภาพร่างแสดงส่วนแห้งและเปียกบนเส้นโค้งลักษณะการอุ้มน้ำของดินสำหรับสถานะที่ II.3(a).....	55
4.1 ภาพร่างแสดงตำแหน่งของ p'_{max} ที่เกี่ยวข้องกับ LC curve.....	57
4.2 (a) ภาพร่างแสดงวิวัฒนาการการเปลี่ยนแปลงของ LC curve ระหว่างการเพิ่มแรงภายใต้แรงดึงน้ำคงที่,	61
4.2 (b) ภาพร่างแสดงขั้นตอนที่จะได้ มาของ LC_{req}	61
4.3 ภาพร่างที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ P'_{oLCref}	62
5.1 (a) เส้นโค้งการอัดตัวของดิน.....	68

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 (b) เส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน.....	68
5.2 (a) รูปแบบของ N_s และ λ_s กับแรงดึงน้ำ จากการหาค่าบนเส้นโค้งการอัดตัวของดิน.....	69
5.2 (b) LC curves ที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟจากการทดสอบของ Uchaipichat and Khalili (2009).....	69



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ดินไม่อึมตัวด้วยน้ำพบได้อย่างกว้างขวางในธรรมชาติ และมีความสำคัญมากทางด้านการปฏิบัติงานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการวิบัติและการเสีรूपของดินไม่อึมตัวด้วยน้ำ จึงกลายมาเป็นสิ่งที่จำเป็นมากขึ้นในการใช้งานในสนาม ซึ่งแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ที่ใช้พื้นฐานของทฤษฎีอิลาสโต - พลาสติก สำหรับแบบจำลองของดินไม่อึมตัวด้วยน้ำ ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Alonso et al. (1990) ต่อมากลายมาเป็นที่ยึดกันในเรื่อง Barcelona Basic Model (BBM) ซึ่งสร้างขึ้นอย่างเต็มรูปแบบในอธิบายพฤติกรรมทางกลของดิน โดยได้มีการนำเสนอพื้นผิวครากบนระนาบของหน่วยแรงสุทธิ (\bar{p}) และแรงดึงน้ำ (s) และได้ถูกเรียกว่า เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว (Loading collapse curve, LC curve) ซึ่งหลายๆคุณลักษณะพื้นฐานของดินไม่อึมตัวด้วยน้ำ เช่น การพังตัว หรือการบวมตัวเมื่อเปียก และการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเหมือนกับแรงดึงน้ำ ได้รับความสนใจเพื่อที่จะหาค่าอธิบายพฤติกรรมเหล่านี้มากขึ้น ตั้งแต่นั้นมามีการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ของดินไม่อึมตัวด้วยน้ำ ภายใต้กรอบการทำงานของทฤษฎีอิลาสโต - พลาสติก ขึ้นมาอีกหลายแบบจำลอง เช่น Gens and Alonso, 1992; Wheeler and Sivakumar, 1995; Loret and Khalili, 2002; Gallipoli et al., 2003; Wheeler et al., 2003; Russell and Khalili, 2006; Sheng et al., 2008; A. Uchaipichat, 2010). เป็นต้น ในทุกวันนี้ พื้นผิวครากบนระนาบระหว่างหน่วยแรงและ แรงดึงน้ำ ได้เป็นส่วนประกอบพื้นฐาน ของแบบจำลองภายใต้ทฤษฎีอิลาสโต - พลาสติก ของดินไม่อึมตัวด้วยน้ำ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการวิธีการสำหรับประมาณ สภาวะเริ่มต้นของพื้นผิวคราก ของดินไม่อึมตัวด้วยน้ำ จากเส้นทางด้านข้าง ของเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Water retention characteristics, WRC) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพ โดยเริ่มต้นจากการนิยามหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยของดินไม่อึมตัวด้วยน้ำ จากการพิจารณากระจายปริมาตรของโพรงดิน และพิจารณาแรงดึงน้ำที่กระทำต่อโพรงดิน จนทำให้โพรงดินถูกแทนที่ด้วยอากาศ จากนั้นแสดงวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับหน่วยแรงสูงสุดของดินภายใต้การเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ โดยใช้การคำนวณหน่วยแรงสูงสุด จากคุณลักษณะการอัดตัวของดิน ในส่วนของสภาวะเริ่มต้น

ของพื้นผิวครากของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำบนระนาบหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยและแรงดึงน้ำ จะมีการพูดถึงในลำดับต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อนำเสนอพัฒนาสมการทำนายสถานะเริ่มต้นของเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว หรือ LC curve ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้คุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) ซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการศึกษาถึงแนวคิด และข้อจำกัด สำหรับการนำมาใช้เพื่อทำนายเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้ ทฤษฎีอิลาสโต - พลาสติก

1.3.2 นำเสนอพัฒนาสมการทำนายเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้คุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบการเปลี่ยนแปลงแรงดึงในโพรงของดิน ที่มีผลต่อหน่วยแรงประสิทธิผล และหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต

1.4.2 ได้สมการที่ใช้ทำนายเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมหลักของดิน เช่น การพังตัวเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำมาแล้ว เป็นต้น

1.4.3 ทราบถึงข้อจำกัดของสมการที่ได้เสนอ ในการใช้ทำนายเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดินไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำ มีองค์ประกอบในมวลดินสามส่วนประกอบหลัก ๆ ได้แก่ ของแข็ง (เม็ดดิน) ของเหลว (น้ำ) และก๊าซ (อากาศ) รูปที่ 2.1 แสดงโพรงอากาศเกิดขึ้นในช่องว่างเม็ดดิน ซึ่งโพรงอากาศเหล่านี้ส่งผลทำให้ดินไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำมีพฤติกรรมแตกต่างจากดินอุ้มน้ำด้วยน้ำอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ในมวลดินไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำโพรงอากาศจะแทรกอยู่ในช่องว่างเม็ดดินจะทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างเม็ดดินขึ้นซึ่งแรงที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า แรงดึงน้ำ (Suction)

แรงดึงน้ำในมวลดินเป็นแรงที่มีความสำคัญที่ทำให้พฤติกรรมทางกลแตกต่างไปจากดินอุ้มน้ำด้วยน้ำ Aitchison (1965) ได้อธิบายถึงแรงดึงน้ำว่าประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ และสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

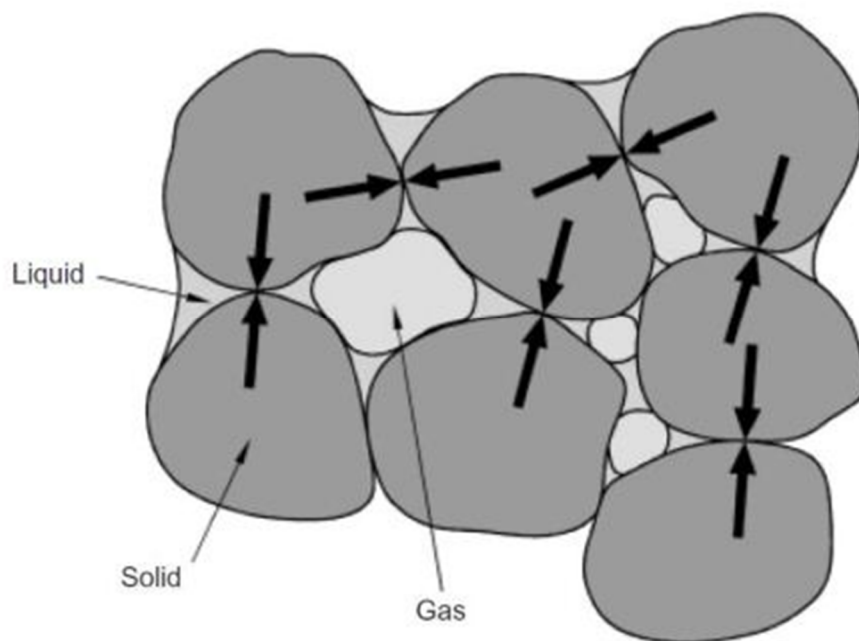
$$s_t = s + s_0 \quad (2.1)$$

โดยที่ s_t คือ แรงดึงน้ำรวม (Total suction)

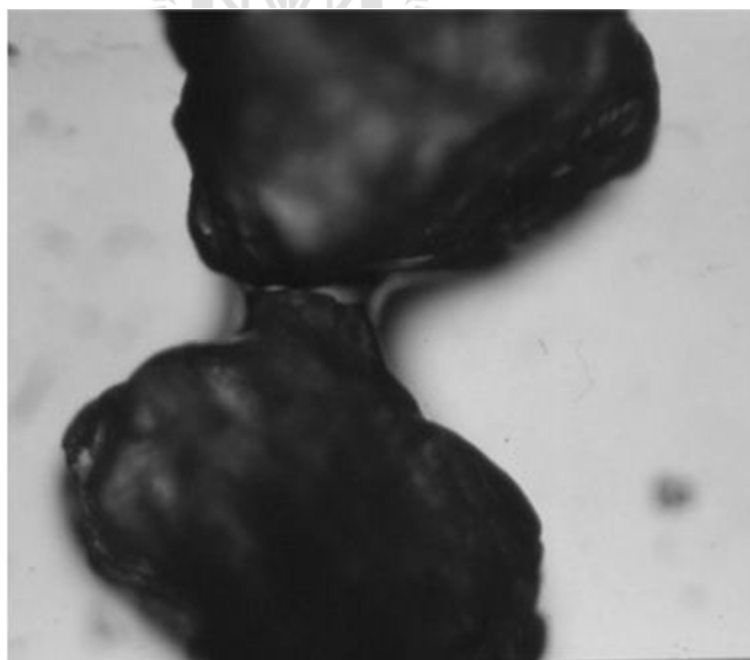
s คือ แรงดึงน้ำแบบเมตริก (Metric Suction)

s_0 คือ แรงดึงน้ำแบบออสโมติก (Osmotic suction)

ทั้งนี้แรงดึงน้ำแบบเมตริกเป็นแรงดึงน้ำที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์คาพิลลารี (Capillary phenomena) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แรงตึงผิวของน้ำทำให้เกิดการโค้งเว้า (Menisci water) เข้าหากัน ณ จุดเชื่อมต่อระหว่างเม็ดดินสองอนุภาค และเกิดเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเม็ดดินขึ้น รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงส่วนโค้งเว้าของน้ำระหว่างเม็ดดินสองอนุภาค (Gili, 1988) ซึ่งแรงดึงน้ำแบบเมตริกนี้เกิดขึ้นจากความแตกต่างระหว่างความดันของความดันอากาศ (Air pressure) ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ($s = u_a - u_w$) ในขณะที่ Mitchell (1991) ได้อธิบายแรงดึงน้ำแบบออสโมติกว่าเป็นแรงดึงน้ำที่เกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งมีการดูดผ่านช่องเล็ก ๆ ของตัวกลาง (Semi-permeable membrane) และ



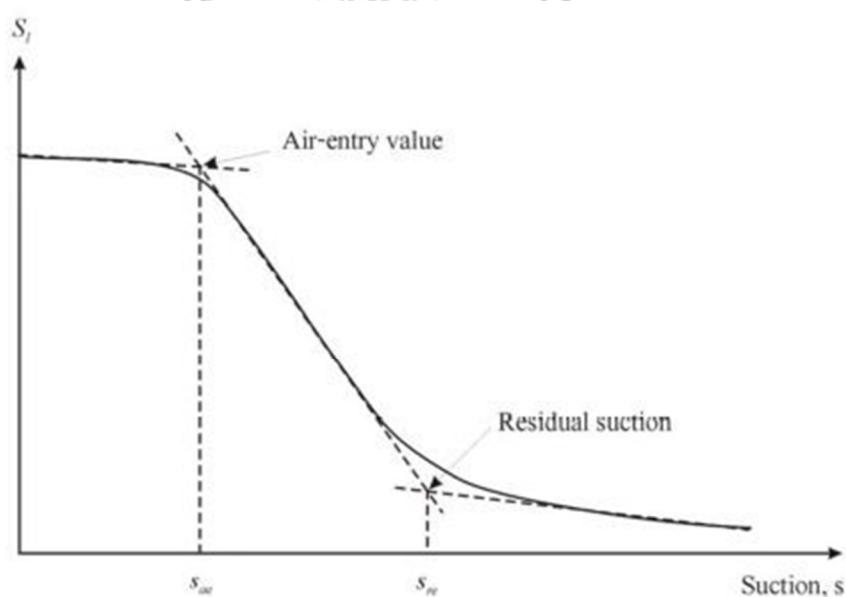
รูปที่ 2.1 ภาพร่างองค์ประกอบในมวลดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Gens A, 2010)



รูปที่ 2.2 ส่วนโค้งเว้าของน้ำระหว่างดินสองอนุภาค (Gili, 1988)

จะเกิดขึ้นกับดินเหนียวที่มีความไวตัว (Active clays) เนื่องจากดินเหนียวมีโพรงขนาดเล็กและมีประจุลบล้อมรอบแผ่นดินเหนียว เมื่อสารละลาย ที่มีประจุบวกแทรกกระหว่างช่องว่าง ของแผ่นดินเหนียวจะเกิดการดึงประจุเข้าหาตัวเองซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น และในบางกรณีดินเหนียวจะแสดงพฤติกรรมเป็นกลางในการดูดผ่านเอง โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเข้าหาบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงกว่า โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดเป็นแรงดึงแบบออสโมติก แต่สำหรับดินที่มีความไวต่ำ (Non-active soils) ปรากฏการณ์ออสโมติกจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางกลของดิน ดังนั้น โดยทั่วไปจึงพิจารณาเฉพาะแรงดึงน้ำแบบเมตริกเท่านั้น ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า แรงดึงน้ำ (Suction, s)

แรงดึงน้ำจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (Water content, w) หรือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในมวลดิน (Degree of saturation, S_r) โดยความสัมพันธ์นี้ได้นำเสนอในรูปแบบเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Water retention characteristics, WRC) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในมวลดิน จะทำให้ค่าแรงดึงน้ำเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่าง WRC ของดิน เมื่อระดับแรงดึงน้ำมีค่าไม่เกินระดับ แรงดึงจุดที่อากาศเข้า (Air entry value, s_{ae}) ความชื้นในดินจะมีค่าคงที่ โดยพฤติกรรมของดินในช่วงนี้จะมีลักษณะเป็นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อแรงดึงน้ำเกินจุดนี้ไปความชื้นในดินจะลดลงอย่างชัดเจน จนกระทั่งถึงค่าแรงดึงน้ำค่าหนึ่งที่ไม่เปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ จะเรียกว่า แรงดึงน้ำคงค้าง (Residual suction, s_{re})



รูปที่ 2.3 ภาพร่างแสดงคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน

WRC เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินแต่ละชนิดซึ่งเกี่ยวข้องกับหน่วยแรงในดิน การจะอธิบายถึงพฤติกรรมต่างๆของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจึงสัมพันธ์กับ WRC ทั้งนั้น

2.2 หน่วยแรงประสิทธิผล

การศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุนั้นจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ซึ่งหน่วยแรงประสิทธิผล ถือเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาสมการในการทำนายขอบเขตครากของดิน สำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ปี ค.ศ. 1936 Terzaghi ได้นิยามสมการสำหรับทำนายหน่วยแรงประสิทธิผลขึ้น ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมลักษณะทางวิศวกรรมของดิน เช่น กำลังต้านทานแรงเฉือนและการเสยุรูปเป็นดิน โดยนิยามหน่วยแรงประสิทธิผลนี้มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างหน่วยแรงรวม (Total stress) กับ ความดันน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน (Pore water pressure) ซึ่งสามารถใช้ได้กับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ดินเหนียว ดินตะกอน และดินทราย เป็นต้น

สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การนิยามของหน่วยแรงประสิทธิผล มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากมีผลกระทบของแรงดึงน้ำซึ่งแรงดึงน้ำขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินด้วย ในปี ค.ศ. 1959 Bishop ได้นำเสนอ สมการหน่วยแรงประสิทธิผลของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้น ดังสมการที่ 2.2

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2.2)$$

โดยที่ σ' คือ หน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop

σ คือ หน่วยแรงรวม

u_a คือ ความดันอากาศในช่องว่างของเม็ดดิน

u_w คือ ความดันน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน

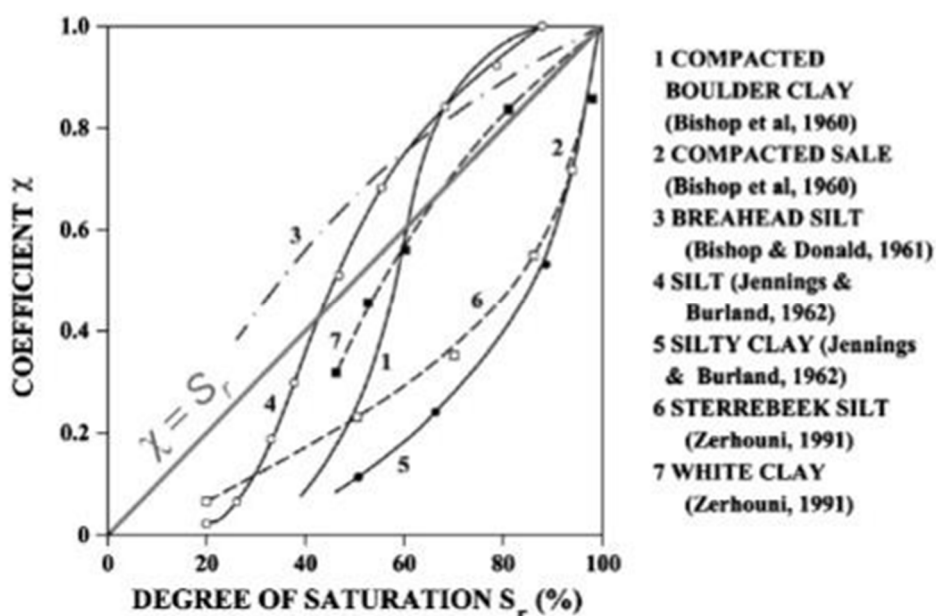
χ คือ ค่าคงที่ของ Bishop

ซึ่งค่าคงตัวของ Bishop จะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งจะสัมพันธ์กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในมวลดิน กล่าวคือเมื่อ $\chi = 0$ ดินจะอยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยอากาศ (Full air saturation) ในขณะที่ $\chi = 1$ ดินจะอยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Full water saturation) และทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop จะกลายเป็นหน่วยแรงประสิทธิผลของ Terzaghi ($\sigma - u_w$) ต่อมามีการศึกษาเกี่ยวกับ

หน่วยแรงประสิทธิผลของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมากขึ้น จึงพบว่าค่าคงที่ของ Bishop, χ หรือ พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล จะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของดิน และแรงดึงน้ำด้วย

2.3 พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล (χ)

จากสมการที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล (χ) จะมีค่าอยู่ในช่วงความกว้างของสถานะความอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งในงานวิจัยของ Mathieu Nuth and Lyesse Laloui (2007) ได้อ้างอิงถึงหลักฐานที่ดูเหมือนแนวโน้มของ χ ที่เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของระดับของความอิ่มตัวของดินหลายๆชนิด จากการทดสอบที่ผ่านๆมา ได้ผลตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพร่างความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินต่างๆ

ดังนั้นแล้วจึงทำให้เกิดคำถามขึ้นมาว่า เอกลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง χ และ S_r จะเป็นเช่นใด

ในปี ค.ศ. 1960 Atchison GD. ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพารามิเตอร์หน่วยแรง
ประสิทธิผล (χ) กับ ค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S_l) และแรงดึงน้ำ (s) เป็นดังต่อไปนี้

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ } S_l = 1 \\ (\alpha/s)s_e & S_l < 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

โดยที่ s_e คือ แรงดึงน้ำที่อากาศเข้าของโพรง

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งอยู่ระหว่าง 0.3 - 0.35

ปี ค.ศ. 1998 Khalili and Khabbaz ได้รวบรวมผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินไม่
อิ่มตัวด้วยน้ำจากบทความที่ผ่านๆมา ทั้งหมด 13 ตัวอย่าง มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 โดยการหาค่า
ของ χ นั้น จะเป็นการพิจารณาหน่วยเล็ก ๆ ของดิน ภายใต้หน่วยแรงทั้งหมด ($\sigma - u_a$) และแรง
ดึงน้ำ ($u_a - u_w$) ตามแนวคิดของหน่วยแรงประสิทธิผล โดยสมการกำลังรับแรงเฉือนของดินจะ
เท่ากับ

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (2.4)$$

แต่ในอีกทางหนึ่ง กำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำของดิน ที่สภาวะอิ่มตัว (τ_o) ก็จะสามารถแสดงได้เป็น
ดังนี้

$$\tau_o = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad \text{เมื่อ } u_a = u_w \quad (2.5)$$

จากนั้นเมื่อผลที่เกิดจากแรงดึงน้ำ คือความแตกต่างระหว่างสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5 ดังนี้

$$\tau - \tau_o = \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2.6)$$

$$\chi = \frac{\tau - \tau_o}{(u_a - u_w) \tan \phi'} \quad (2.7)$$

จากนั้นนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ เช่น ข้อมูลของ Gen *et. al.* (1988) จะได้ผลดังรูปที่ 2.5
และสำหรับรูปที่ 2.6 จะเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ในดินแต่ละชนิดในบทความที่ถูกรวบรวมมา

ตามตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นการแสดงในเทอมของลอการิทึมของ χ กับลอการิทึมของ s โดยที่ค่าความชันของแต่ละเส้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 ถึง 0.65 ส่วนในรูปที่ 2.7 เป็นการแสดงค่าในเทอมของ χ กับค่าของแรงดึงน้ำที่ทำการ Normalized ด้วยค่าของแรงดึงน้ำจุดที่อากาศเข้า (Air entry suction, s_{ae}) จากนั้นจึงทำการหาเส้นโค้งโดยการใส่เส้นแนวโน้มเพื่อจะได้เส้นโค้งที่ดีที่สุดที่ได้จากข้อมูลแล้วจึงนำเสนอสมการสำหรับ χ ขึ้น ซึ่งเป็นไปดังสมการต่อไปนี้

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ } s < s_e \\ \left(\frac{s}{s_e}\right)^{-\gamma} & \text{เมื่อ } s \geq s_e \end{cases} \quad (2.8)$$

โดยที่ γ คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการฟิตข้อมูลเส้นแนวโน้มของการทดสอบในรูปที่ 2.5 มีค่าเท่ากับ 0.55

s_e คือ ค่าแรงดึงน้ำที่เปลี่ยนแปลงสถานะระหว่าง อิ่มตัวด้วยน้ำ และไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับกระบวนการลดแรงดึงน้ำ s_e จะเท่ากับค่าแรงดึงน้ำที่น้ำเข้าโพรง (s_{ex}) และกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำ s_e จะเท่ากับค่าแรงดึงน้ำที่อากาศเข้าโพรง (s_{ae})

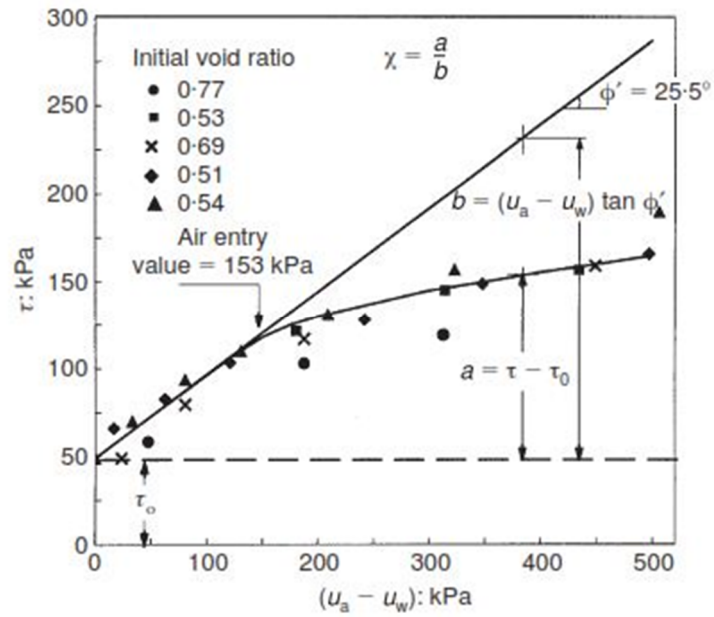
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดชนิดของดินและคุณสมบัติพื้นฐาน

บทความอ้างอิง	ชนิดดินและคุณสมบัติต่างๆ	พารามิเตอร์ ϕ' และ c'	เครื่องมือและวิธี ทดสอบ
Satija (1978), taken from Fredlund <i>et al.</i> (1987)	Compacted Dhnauri clay at low density ; air entry = 62kPa, $\rho_d=1.48\text{g/cm}^3$, OWC = 22.2%,	$\phi' = 28.5^\circ$ $c' = 7.8 \text{ kPa}$	Modified triaxial apparatus
Vanapalli <i>et al.</i> (1996)	Glacial till compacted at dry side of OWC; LL=35.5%, PI=18.7%, air entry = 37.5kPa, MDD =1.8g/cm ³ , OWC = 16.3%, clay friction = 42%	$\phi' = 23^\circ$ $c' = 0$	Modified direct shear box, multistage testing procedure compacted at dry side of OWC (water content = 13%)
Krahn <i>et al.</i> (1989)	Tappen Notch Hill silt; LL=57%, PI=32%(for clay friction), air entry = 94kPa, MDD =1.56g/cm ³ , OWC = 21.5%, $G_s=2.7$ clay friction = 10%, silt = 85%	$\phi' = 35^\circ$ $c' = 0$	Modified triaxial apparatus, multistage consolidated tests
Satija (1978), taken from Fredlund <i>et al.</i> (1987)	Compacted Dhnauri clay at high density ; air entry = 127kPa, $\rho_d=1.58\text{g/cm}^3$, OWC = 22.2%,	$\phi' = 29^\circ$ $c' = 7.8 \text{ kPa}$	Modified triaxial apparatus
Drumright (1989)	Compacted silty sand, copper mill tailing; air entry = 43kPa, MDD =1.89g/cm ³ , OWC = 16%, $G_s=2.72$ LL and PI = NP	$\phi' = 38.7^\circ$ $c' = 11.5 \text{ kPa}$	Modified triaxial apparatus
Cui & Delage (1993)	Jossigny silt, near Paris (low plasticity clay); LL=37%, PI=18%, air entry = 182kPa, MDD =1.7g/cm ³ , OWC = 18%, $G_s=2.7$ clay friction = 34%	$\phi' \approx 22^\circ$ $c' \approx 25 \text{ kPa}$	Osmotically controlled suction triaxial apparatus
De-Campos & Carillo (1995)	Mature residualsoil of Vista Chinese site in Rio de janeiro (high plasticity silt); LL=50.7%,PI=18.4%, air entry = 38kPa, $G_s=2.77$ clay friction = 24.4%, sand 60%	$\phi' = 28.7^\circ$ $c' = 13.7 \text{ kPa}$	Modified direct shear box

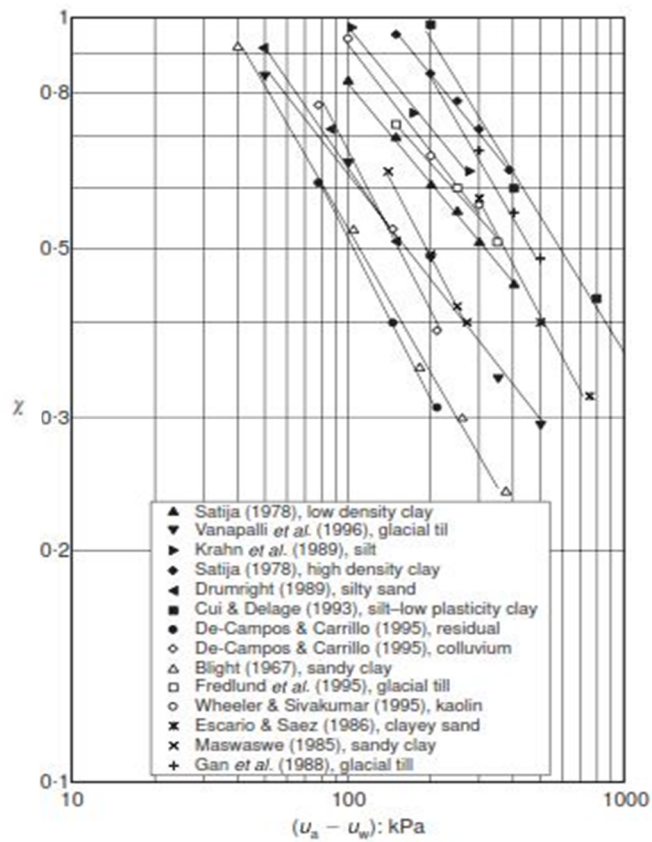
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดชนิดของดินและคุณสมบัติพื้นฐาน (ต่อ)

De-Campos & Carillo (1995)	Yellow colluvium soil of Vista Chinesa site in Rio de Janeiro (low plasticity clay); LL=45.7%, PI=22.7%, air entry = 54kPa, $G_s=2.77$ clay friction = 30%, sand 50.3%	$\phi' = 26.4^\circ$ $c' = 0$	Modified direct shear box
Blight (1967)	Compacted sand clay; air entry = 35 kPa	$\phi' \approx 37^\circ$ $c' \approx 0$	Modified triaxial apparatus constant water content test
Fredlund <i>et al.</i> (1995)	Compacted glacial till; LL=35.5%, PI=19%, $G_s = 2.73$ air entry = 70 kPa, MDD = 1.78g/cm ³ , OWC = 16%	$\phi' = 23^\circ$ $c' = 0$	Modified direct shear box, multistage testing procedure
Wheeler & Sivakumar (1995)	Compacted speswhite kaoline; air entry = 86 kPa, MDD = 1.2g/cm ³ , OWC = 29%	$\phi' = 25^\circ$ $c' = 0$	Triaxial tests, compacted dry side of OWC; $S_r=54%$, water content = 25%
Escario & Saez (1986)	Madrid clayey sand; LL=32%, PI=15%, air entry = 127 kPa, MDD = 1.91 g/cm ³ OWC = 11.5%, $G_s=2.7$ fine friction = 17%	$\phi' = 38^\circ$ $c' = 0$	Modified direct shear box, consolidated drained tests
Maswaswe (1985)	Snady clay; air entry = 70 kPa	$\phi' = 30^\circ$ $c' \approx 0$	Modified triaxial apparatus
Gan <i>et al.</i> (1988)	Compacted glacial till; LL=35.5%, PI=18.7%, air entry = 153kPa, MDD = 1.815g/cm ³ , OWC = 16%, $G_s=2.73$ clay friction = 30%	$\phi' = 25.5^\circ$ $c' = 10$ kPa	Modified direct shear box, multistage consolidated drained tests

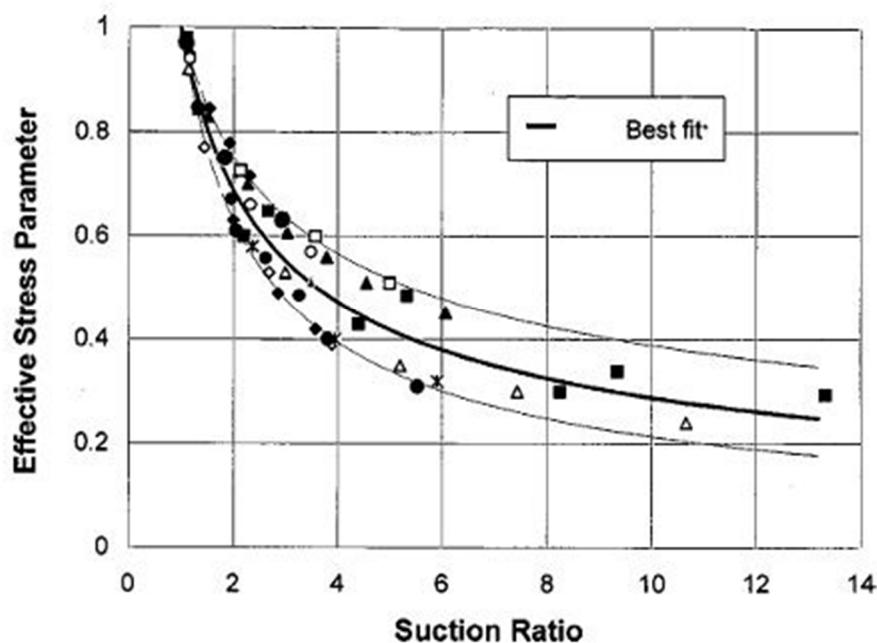
* LL, Liquid limit; MDD, maximum dry density; NP, non - plastic; OWC, optimum water content; PI, plasticity index; ρ_d , dry density.



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างกำลังรับแรงเฉือน กับแรงคิ่งน้ำ (Gen *et al.*, 1988)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง χ กับแรงคิ่งน้ำ $(u_a - u_w)$ (Khalili and Khabbaz, 1998)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล กับอัตราส่วนแรงดึงน้ำ(Khalili and Khabbaz, 1998)

จากการศึกษาวิจัยของ Khalili and Khabbaz (1998) พบว่าค่าพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (χ) จะขึ้นกับสัดส่วนแรงดึงน้ำและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน ในแต่ละชนิด ส่วนของความแตกต่างระหว่างขอบเขตบน และขอบเขตล่างในรูปที่ 2.5 นั้น ถ้าหากใช้ค่า $\gamma = 0.55$ ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการหาเส้นแนวโน้มจากข้อมูลผลการทดสอบ ซึ่งจะมีผลของความผิดพลาดน้อยกว่า 10% ซึ่งเทียบได้กับความแปรปรวนทางธรรมชาติจากข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ค่า χ โดยการวิเคราะห์จากโครงสร้างของดิน และอ้างอิงกับงานวิจัย ของ Khalili and Khabbaz (1998) โดยจะแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป

2.4 เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว

เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว (Loading collapse curve) หรือ LC curve ถูกนิยามครั้งแรกโดย Alonso et al. (1990) เพื่อกำหนดขอบเขตของการคราก (Yield surface) บนระนาบหน่วยแรง ($p - u_a$) และแรงดึงน้ำ ($u_a - u_w$) ภายใต้กรอบแนวคิดแบบอิลาสโต - พลาสติก กล่าวคือ ดินจะแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic behavior) เมื่อสถานะของหน่วยแรงอยู่ใน LC curve แต่เมื่อสถานะของหน่วยแรงอยู่บน LC curve ดินจะแสดงพฤติกรรมแบบพลาสติก (Plastic behavior)

Alonso et al. (1990) ได้เสนอ Barcelona Basic Model ขึ้นซึ่งถือเป็นแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแบบจำลองแรก ที่สร้างขึ้นอย่างเต็มรูปแบบในอธิบายพฤติกรรมทางกลของดินโดยเลือกใช้ ($\sigma - u_a$) และ ($u_a - u_w$) เป็นตัวแปรหน่วยแรงของแบบจำลอง โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v) กับหน่วยแรงสุทธิแบบไอโซโทรอปิก ($\bar{p} = p - u_a$) ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งสมมุติให้สัมพันธ์กันในรูปแบบเส้นตรง บน ระนาบของ $v, \ln \bar{p}$ ดังรูปที่ 2.8 และสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงครากกับแรงดึงน้ำของดิน เมื่อพิจารณาปริมาตรจำเพาะ ณ จุด 3 จะได้ความสัมพันธ์ของเส้นการอัดตัวปกติ และหน่วยแรงครากของดินทั้งสองสถานะ คือ

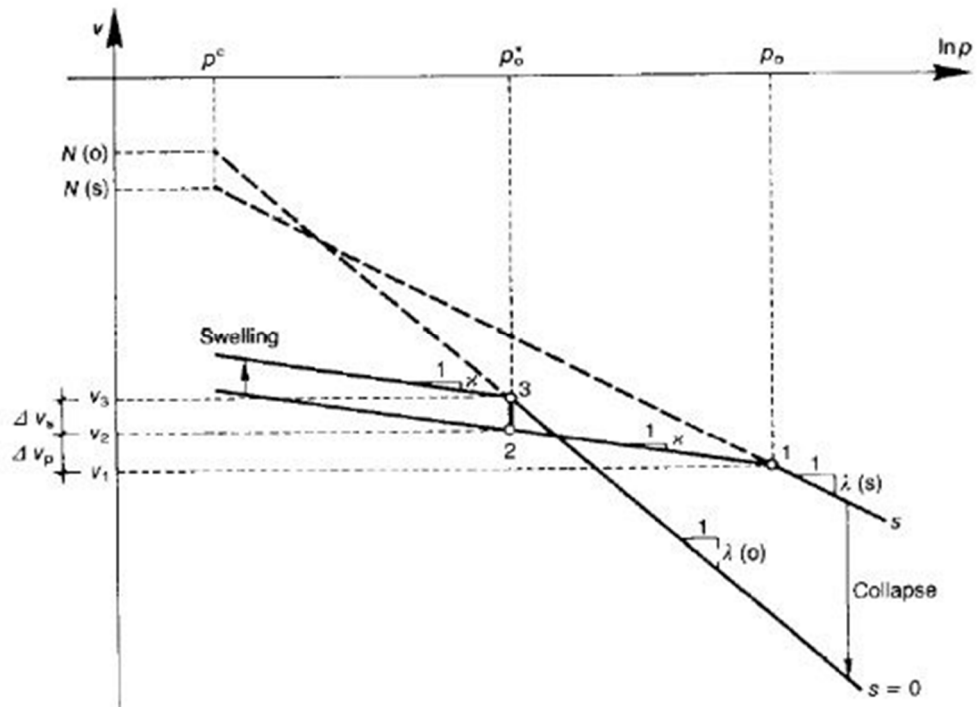
$$v_3 = v_1 + \Delta v_p + \Delta v_s \quad (2.9)$$

โดยที่ v_1 คือ ปริมาตรจำเพาะ ณ จุดครากของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

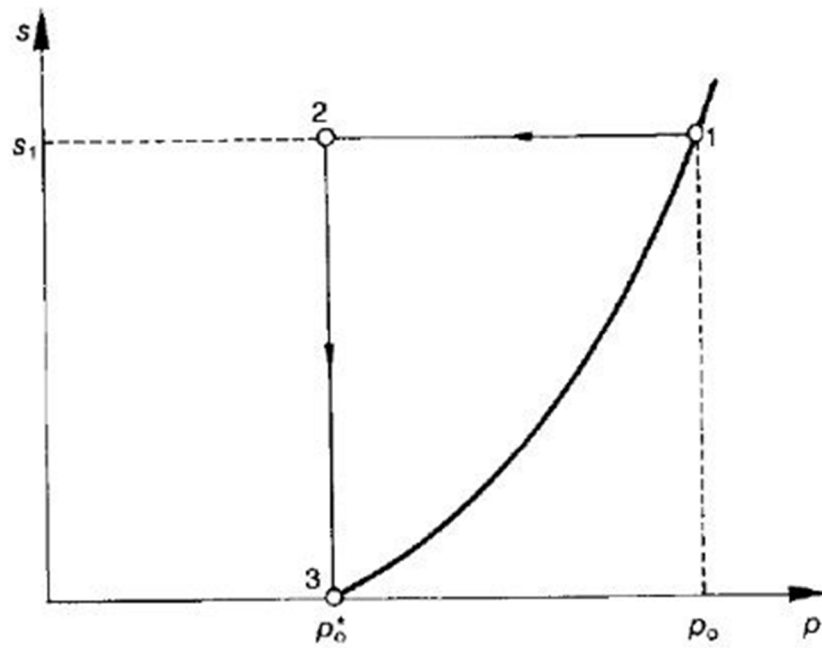
Δv_p คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะ จาก 1 ไป 2 เนื่องการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงสุทธิแบบไอโซโทรอปิก

Δv_s คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะเนื่องจากการลดลงของแรงดึงน้ำ

หลังจากนั้นได้ตั้งสมมุติฐานสำหรับแบบจำลอง คือสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงน้ำภายใต้พฤติกรรมแบบอิลาสติก (Δv_s) มีค่าเท่ากับผลต่างของปริมาตรจำเพาะ ณ หน่วยแรงสุทธิอ้างอิง (p^c) ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($N(0)$) กับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (N^s) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงครากสุทธิกับการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 ภาพร่างรูปแบบการอัดตัวของดินสองสถานะ (Alonso et al., 1990)



รูปที่ 2.9 ภาพร่าง LC curve (Alonso et al., 1990)

$$p_0 = p^c \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{[\lambda(0)-\kappa]/[\lambda(s)-\kappa]} \quad (2.10)$$

- โดยที่ p_0 คือ หน่วยแรงครากสุทธิแบบไอโซโทรปิกสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
 p_0^* คือ หน่วยแรงครากสุทธิแบบไอโซโทรปิกสำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ
 $\lambda(s)$ คือ ความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
 κ คือ ความชันของเส้นการขยายตัว (Swelling) ของดิน

สมการ 2.10 เป็นสมการทำนายหน่วยแรงครากสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำใดๆ โดยจะได้ความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ดังรูปที่ 2.9 ภายหลังได้เรียกเส้นโค้งนี้ว่าเส้นขอบเขตคราก (Loading collapse curve, LC curve) และภายใต้สมมุติฐานของแบบจำลอง จากสมการที่ 2.10 เมื่อหน่วยแรงครากสุทธิของดินอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเท่ากับหน่วยแรงสุทธิอ้างอิงด้วย LC curve จะเป็นเส้นตรงในแนวตั้งเปรียบเสมือนเป็นเส้นอ้างอิงในการนิยามหาหน่วยแรงครากสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ โดยหลักการแล้ว การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติก ($d\varepsilon_{vp}^p$) ของดินและการเปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดิน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการขยายของ LC curve จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติกับแรงดึงน้ำ Barcelona Basic Model ค่าความชันนี้จะลดลงตามการเพิ่มของแรงดึงน้ำ

หลังจากที่ Alonso et al. (1990) ได้เสนอ LC curve ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลอง Barcelona Basic Model ได้มีแบบจำลองที่ได้ทำการศึกษา LC curve ถูกเสนอขึ้นมาอีกมากมาย ซึ่งล้วนแล้วแต่ใช้ Barcelona Basic Model เป็นต้นแบบ แต่แบบจำลองนี้ ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการเลือกค่าหน่วยแรงสุทธิอ้างอิงเพื่อให้สอดคล้องกับสมมุติฐาน ของแบบจำลองซึ่งเป็นค่าที่หาค่ายากจากการทดสอบ

Wheeler and Sivakumar (1995) เห็นถึงข้อจำกัดของการเลือกใช้ค่าหน่วยสุทธิอ้างอิงของ Barcelona Basic Model จึงได้เสนอแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเลือกใช้สองตัวแปรหน่วยแรงในการอธิบายพฤติกรรมดิน เริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวเคลโอลินบดอัด (Compacted speswhite kaolin clay) ที่ระดับแรงดึงน้ำคงที่ ต่าง ๆ ซึ่งรูปแบบการอัดตัวของดินที่ได้ จะมีความชันของเส้นการอัดตัวปกติ ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสูงกว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากการพังตัวในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัว ซึ่งรูปแบบการอัดตัวนี้จะ

เป็นจุดเริ่มต้นของนิยาม LC curve ซึ่งใช้แนวทางตามแบบจำลอง Barcelona Basic Model และได้มีการเสนอให้เลือกใช้หน่วยแรงสุทธิอ้างอิง มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ p_{at} เนื่องจากภายใต้หน่วยแรงนี้ง่ายต่อการทดสอบหาค่า (N^s) โดยไม่มีการตั้งสมมติฐานและลดข้อจำกัดที่เห็นจาก Barcelona Basic Model แต่กำหนดให้ค่าความชื้นของเส้นการวิกฤติของดินจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดึงน้ำ จึงสรุปได้ว่า Wheeler and Sivakumar (1995) ได้ใช้แนวทางในการนิยาม LC curve เดียวกับ Barcelona Basic Model แตกต่างกันเพียงรายละเอียดบางอย่างในแบบจำลองเท่านั้น เช่นเดียวกับแบบจำลองอื่นที่เสนอขึ้นในภายหลัง เช่น Cui and Delage (1996); Rampino et al. (2000); Chiu and Ng (2003); Thu et al., (2007) และ Gallipoli et al. (2003) ที่ใช้หน่วยแรงประสิทธิผลในการอธิบายพฤติกรรมดิน เป็นต้น

นอกจากแนวทางนิยาม LC curve ตาม Barcelona Basic Model แล้ว Sun et al. (2000) ได้เสนอแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเริ่มจากศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวของ Pearl clay บดอัดที่ระดับแรงดึงน้ำค่าหนึ่งและอัตราส่วน โพรงเริ่มต้น (Initial void ratio) ต่าง ๆ กัน โดยทำให้ตัวอย่างดินมีการพังตัวจากการลดแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิ ที่แตกต่างกันออกไปพบว่าความชื้นของเส้นการอัดตัวปกติของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะสูงกว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ และจะไปบรรจบ ณ จุดเดียวกันซึ่งเป็นจุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากตามระดับแรงดึงน้ำหรือ LC curve เป็นเส้นตรงในแนวตั้งบนระนาบ $p-s$ และหน่วยแรงคราก ณ จุดนี้ จะเป็นหน่วยแรงอ้างอิงของแบบจำลอง แล้วใช้หลักการทางแบบจำลองอิลาสโต - พลาสติก ในการนิยาม LC curve คือการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติก (Plastic volumetric strain) ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเท่ากับของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ หากเส้นทางเดินของหน่วยแรงอยู่ระหว่าง LC curve สองเส้นซึ่งแต่ละเส้นเป็นเส้นที่มีอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นเท่ากัน จากแนวทางนี้ ทำให้แบบจำลองสามารถอธิบาย LC curve ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นของดินได้ เช่นเดียวกับ Sun et al. (2000); Sun et al.(2007a, 2007b)

Sheng et al. (2008) ได้เสนอ SFG Model โดยแยกการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินออกเป็นสองส่วนตามทางเดินหน่วยแรง คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเพิ่มแรงดึงน้ำ (Drying path) ซึ่งค่าความชื้นในช่วงการอัดตัวปกติ จะขึ้นอยู่กับแรงดึงน้ำ และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการอัดตัว (Loading path) ภายใต้แรงดึงน้ำคงที่ ซึ่งกำหนดให้ค่าความชื้นของเส้นการอัดตัวปกติของกระบวนการนี้เป็นอิสระกับแรงดึงน้ำ SFG Model ได้ เริ่มจากการนิยาม LC curve เริ่มต้น (Initial LC curve) ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ผลรวมของความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อสถานะของหน่วยแรง (State of stress) อยู่ บน LC curve เริ่มต้น ซึ่งคือผลรวมความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกระหว่างกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำภายใต้หน่วย

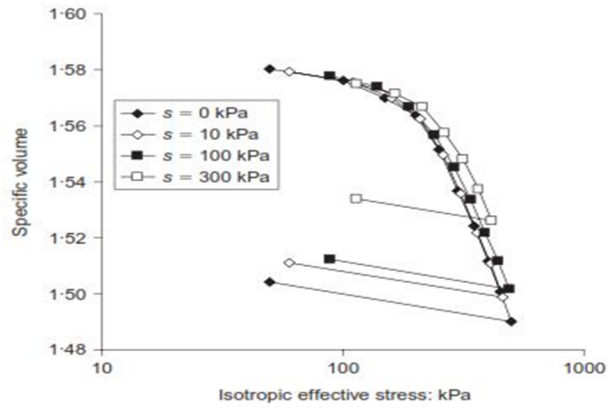
สูตรคิดที่และการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากสุทธิ การนิยาม LC curve เริ่มต้นนี้ใช้เป็นเส้นอ้างอิงถึงสถานะเริ่มต้นของดินเช่นเดียวกับจุดบรรจบกันของ Sun et al. เพื่อใช้นิยาม LC curve ที่สัมพันธ์กับเส้นทางเดินของหน่วยแรงลำดับถัดไป

A.Uchaipichat and Khalili (2009) ได้การทดสอบการอัดตัวของดินตะกอนเมืองบอร์ก (Brouke silt) โดยมีการเตรียมตัวอย่างด้วยเทคนิคที่คล้ายกับ Cui and Delage (1996) และมีการบดอัดแบบคงที่ ที่หน่วยน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 15.3 kN/m^3 และปริมาณความชื้นเท่ากับ 10.5% เป็นการเตรียมตัวอย่างจากเส้นทางด้านแห้งของค่าความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งก่อนนำมาบดอัดได้ทำให้ดินตัวอย่างแห้งในสภาพอากาศที่อุณหภูมิห้อง และนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด $400 \mu\text{m}$ จากนั้น จึงพ่นน้ำอย่างระวังเพื่อให้ได้ความชื้นที่ต้องการที่ 10.5% และนำมาใส่เพื่อห่อหุ้มด้วยถุงพลาสติกและบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำดินตัวอย่างที่ได้มาทำการบดอัด แล้วจึงนำไปทดสอบ โดยก่อนการทดสอบจะทำให้ตัวอย่าง ถูกเพิ่มหน่วยแรงที่กระทำขึ้นไปทีหน่วยแรงประสิทธิผล เท่ากับ 200 kPa จากนั้นจึงถอนแรงลงมาเหลือเท่ากับ 50 kPa ($\text{OCR}=4$) และทำให้แรงดันน้ำย้อนกลับเพื่อให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นจึงเพิ่มแรงดันน้ำ จากสถานะเริ่มต้นของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ไปที่ระดับแรงดันน้ำเท่ากับ 0, 10, 100, และ 300 kPa ตามลำดับ แล้วจึงทำการทดสอบด้วยเครื่องมือ Modified Bishop - Wesley cell ที่อุณหภูมิ 25, 40, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งได้เส้นโค้งการอัดตัวของดินเป็นไปตามรูปที่ 2.10 สำหรับการหาค่าหน่วยแรงของการทดสอบนี้จะใช้สมการในการคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย ดังนี้

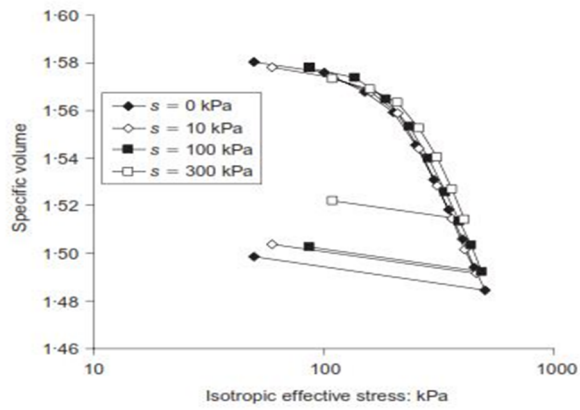
$$p' = p^{net} + \chi s \quad (2.11)$$

เมื่อ	p'	คือ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย
	p^{net}	คือ หน่วยแรงสุทธิเฉลี่ย
	χ	คือ พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล ซึ่งมีค่าดังสมการของ Khalili and Khabaz (1998)
	s	คือ ค่าแรงดึงน้ำ

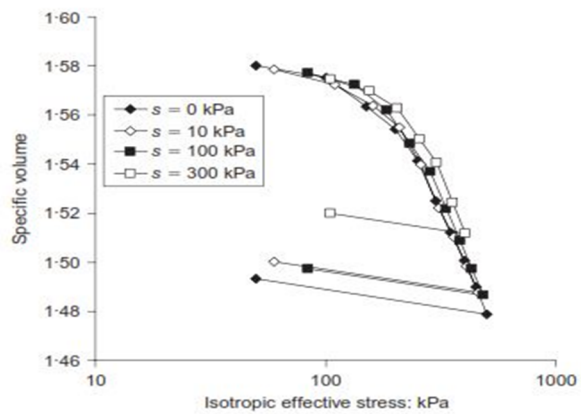
จากการศึกษาทำให้ได้ความสัมพันธ์ของ LC curve ดังรูปที่ 2.11



(a)



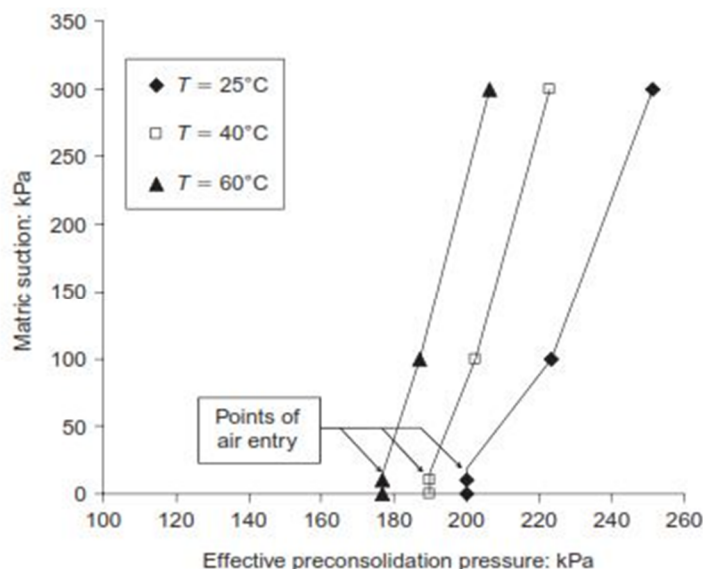
(b)



(c)

รูปที่ 2.10 เส้นโค้งการอัดตัวของดินที่อุณหภูมิต่างๆ (A.Uchaipichat and Khalili, 2009)

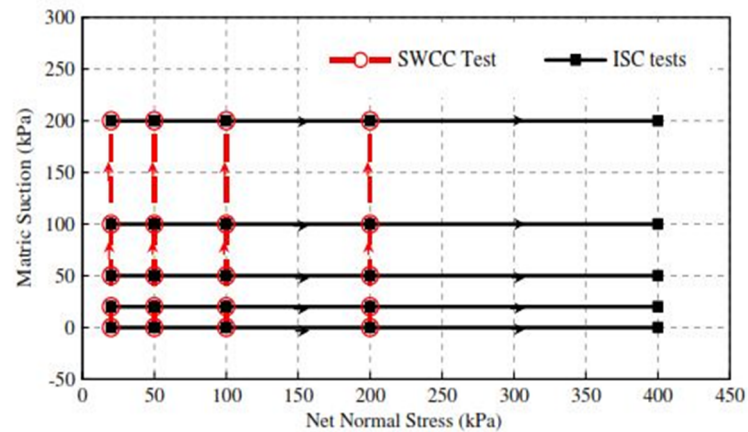
(a) 25°C, (b) 40°C, (c) 60°C



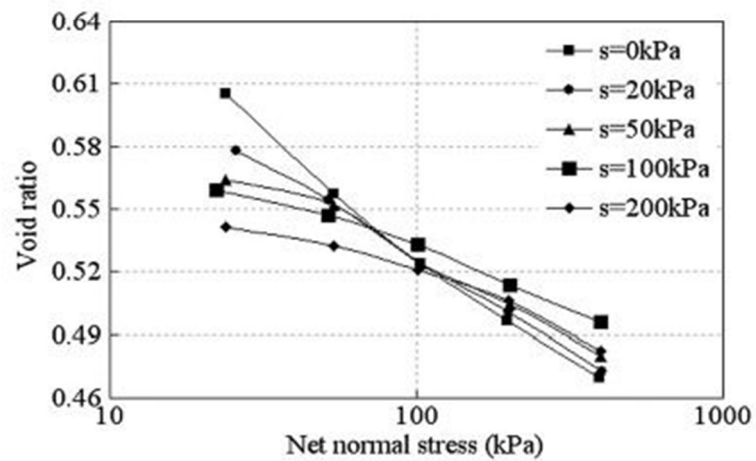
รูปที่ 2.11 LC curve ที่อุณหภูมิต่างกัน (A.Uchaipichat and Khalili , 2009)

Zhang et al. (2011) ได้เสนอข้อจำกัดในแบบจำลองความสัมพันธ์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเริ่มจากการแสดงการคำนวณพื้นผิวครากของ LC curve และ SI yield curve จากการใช้ผลการทดสอบของ Wang et al. (2008) ที่ได้ทดสอบดินตัวอย่าง 9 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ คือ การทดสอบการอัดตัวด้วยน้ำภายใต้หน่วยแรงที่กระทำเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic consolidation, ISC) ที่เท่ากับ 0, 20, 50, 100, และ 200 kPa ภายใต้แรงดึงน้ำคงที่ และการทดสอบคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินจากเส้นทางด้านแห้ง ที่หน่วยแรงสุทธิคงที่เท่ากับ 20, 50, 100, และ 200 kPa ดังรูปที่ 2.12 จากนั้นแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงในทั้ง 2 การทดสอบ ในรูปที่ 2.13 และ 2.14

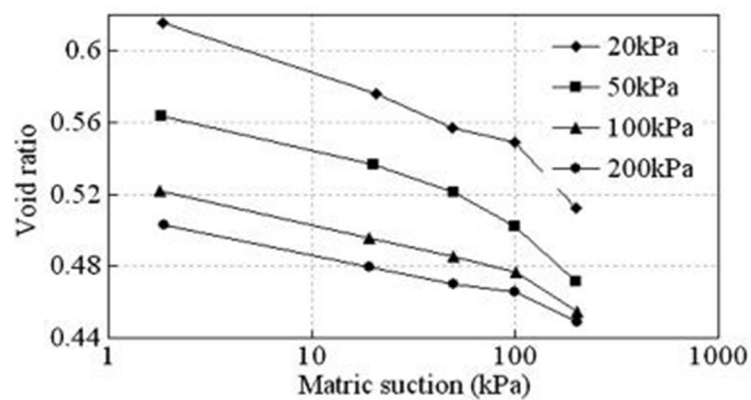
สำหรับการคำนวณ LC curve Zhang et al. (2011) อ้างว่าได้มีนักวิจัยหลายคนได้กำหนดให้รูปร่างของ LC curve เป็นอิสระจากการทดสอบ ISC เช่น Delage and Graham (1996), Cui and Delage (1996), Wheeler and Sivakumar (1996), Robles and Elorza (2002), Thu et al. (2007) ซึ่งในรูปที่ 2.15(a) เป็นการแสดงถึงเส้นทางเดินหน่วยแรง โดยการเพิ่มแรงที่กระทำ ภายใต้แรงดึงน้ำคงที่ จากสถานะที่จุด A ไปจุด B และ C ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมบนเส้นโค้งคุณลักษณะการอัดตัวของดิน บนระนาบ $v - \ln p$ ในรูปที่ 2.15(b) เมื่อจุดครากบนเส้นโค้งคุณลักษณะการอัดตัวของดิน บนระนาบ $v - \ln p$ สามารถได้โดยใช้วิธีของ Casagrande (1936) ทำให้ได้รูปร่างสถานะเริ่มต้นของ LC curve ตาม เส้นโค้ง HEB และจากตารางที่ 2.2 เป็นการสรุปค่าของหน่วยแรงคราก p_0 สำหรับการทดสอบ ISC ตามวิธีการข้างต้น ซึ่งจุดวงกลมทึบในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.12 ภาพร่างเส้นทางเดินหน่วยแรงการทดสอบ ISC และ SWCC (Zhang et al., 2011)

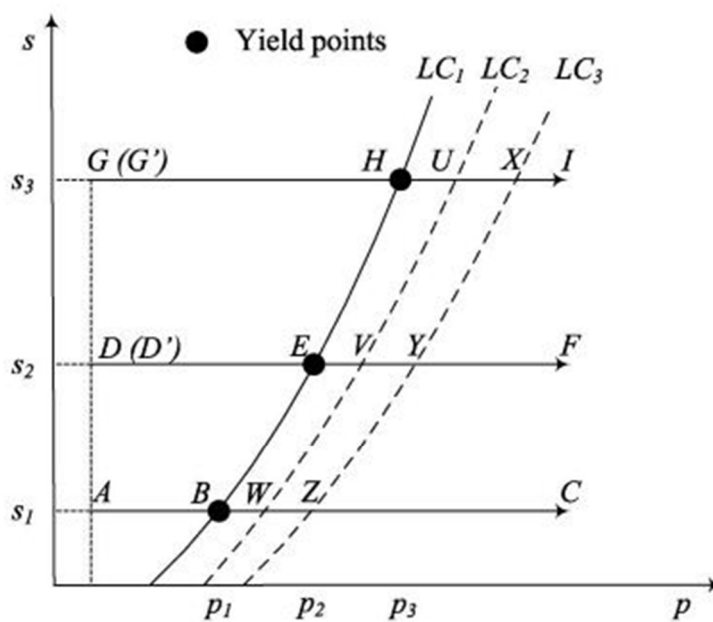


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับหน่วยแรงสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำต่างๆ ของการทดสอบ ISC (Zhang et al., 2011)

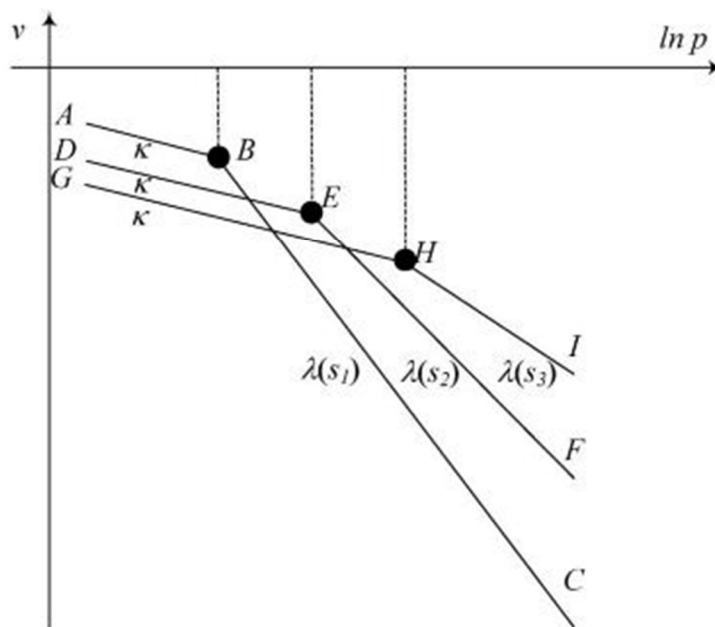


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับแรงดึงน้ำที่ระดับหน่วยแรงสุทธิต่างๆ ของการทดสอบ SWCC (Zhang et al., 2011)

คือจุดที่แสดงค่าของหน่วยแรงครากจากเส้นโค้งคุณสมบัติการอัดตัวของดิน โดยจุดเหล่านี้จะถูกพิจารณาให้แสดงเป็นจุดของสถานะเริ่มต้นของ LC curve



(a) Stress paths for ISC tests



(b) Volume changes upon loading at different suctions

รูปที่ 2.15 ภาพร่างวิธีการกำหนดรูปร่างของ LC curve (Delage and Graham, 1996)

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ ISC

Suction (kPa)	$\lambda(s)$	$N(s)$	κ	P_0 (kPa)
0	0.045	0.654	-	20
20	0.037	0.630	-	37
50	0.032	0.613	0.0149	46
100	0.024	0.598	0.0171	58
200	0.027	0.596	0.0140	96

ส่วนการคำนวณค่าพารามิเตอร์วัสดุจากการทดสอบ ISC เมื่อพิจารณากลุ่มของเส้นตรงการปล่อยแรงและเพิ่มแรงซ้ำ (unloading - reloading) ของรูปที่ 2.15(b) เส้นตรง AB, DE และ GH จะหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (Alonso et al., 1990):

$$dv = -\kappa \frac{dp}{p} \quad (2.12)$$

เมื่อ κ คือ ค่าคงที่ในทุกๆแรงดึงน้ำ และสำหรับเส้นการอัดตัวปกติเท่ากันทุกทิศทาง BC, EF, และ HI จะหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (Alonso et al., 1990):

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p}{p^c} \quad (2.13)$$

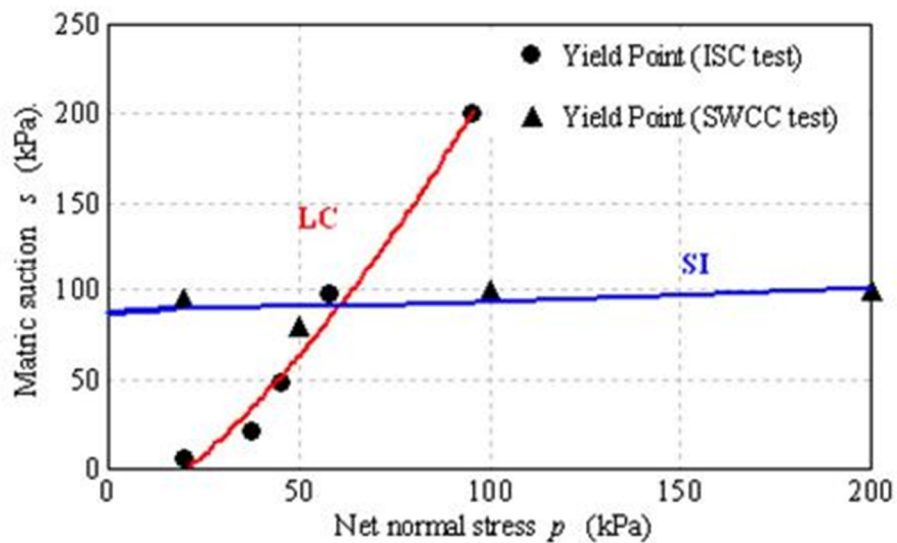
โดยที่

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r] \quad (2.14)$$

เมื่อ β คือ พารามิเตอร์ของการควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความแกร่งของดิน กับแรงดึงน้ำ

r คือ พารามิเตอร์การกำหนดค่าความแกร่งสูงสุดของดิน

ซึ่ง Wang et al. (2008) ได้ใช้วิธีการหา LC curve ตามวิธีการของ Alonso et al. (1990) และเป็นไปตามเส้นในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพร่าง LC curve และ SI yield curve ของ Wang et al., 2008

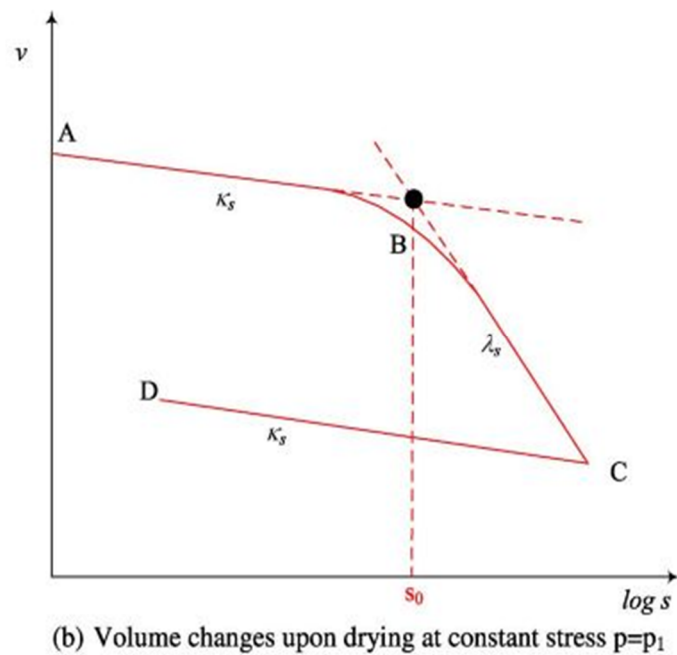
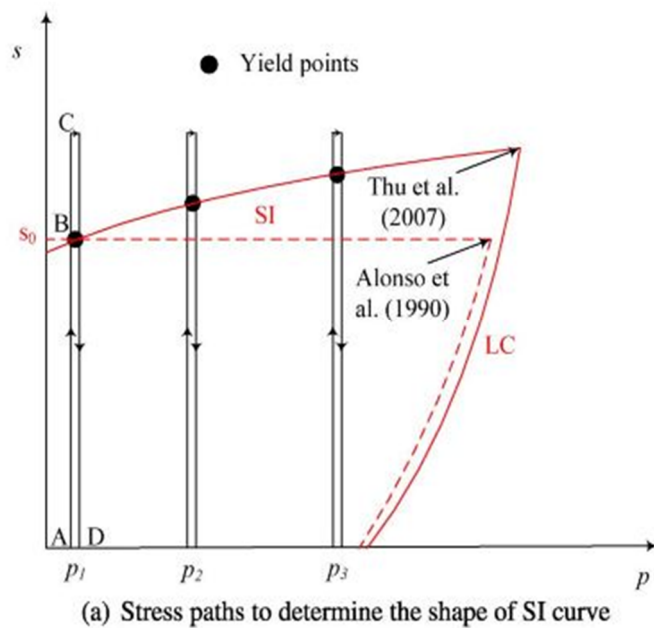
สำหรับการคำนวณ SI yield curve จากการทดสอบ โดยการเพิ่มแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงที่กระทำคงที่ ค่าต่างๆ อธิบายได้โดยรูปที่ 2.17 โดยแสดงเส้นทางเดินหน่วยแรงจาก A ไป B, C, และ D ซึ่งสำหรับสถานะเริ่มต้นของ BC มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$dv = -\lambda_s \frac{ds}{(s + p_{at})} \quad (2.15)$$

และสำหรับเส้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการเพิ่มและลดแรงดึงน้ำ

$$dv = -\kappa_s \frac{ds}{(s + p_{at})} \quad (2.16)$$

จากนั้น Wang et al. (2008) ใช้วิธีการคำนวณ SI yield curve ตามวิธีของ Thu et al. (2007) ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.16 และจากวิธีการที่อธิบายไปก่อนหน้านี้ได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่ Zhang et al. (2011) ได้เสนอว่ายังคงมีบางข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีเหล่านี้

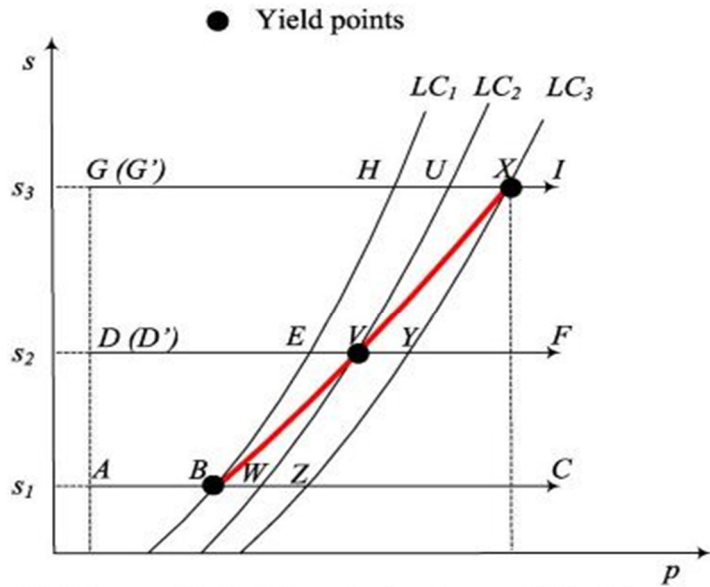


รูปที่ 2.17 ภาพร่างวิธีการกำหนดตำแหน่งของ SI yield curve ของ Thu et al., 2007

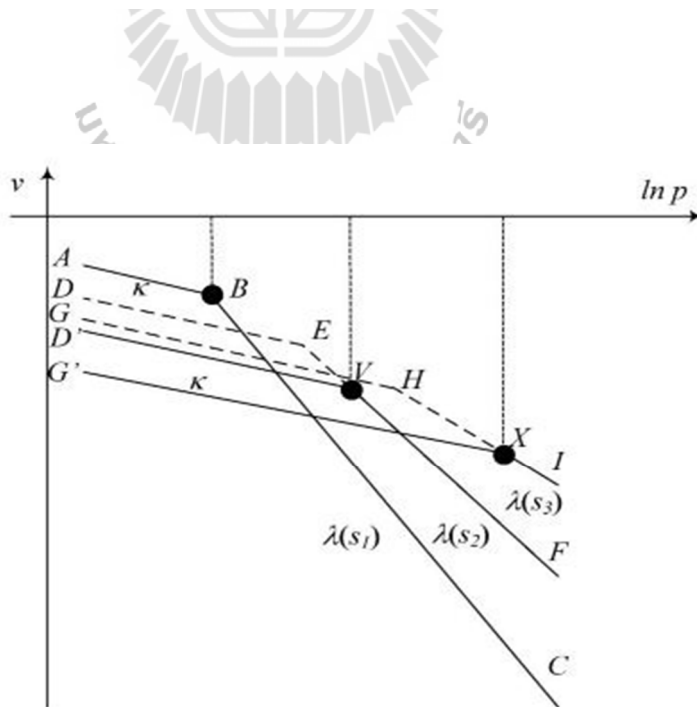
สำหรับข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ LC/SI yield curve Zhang et al. (2011) ได้ยกข้ออ้างมาจาก Zhang et al. (2010) ซึ่งมีการชี้ให้เห็นว่า วิธีการที่ใช้สำหรับคำนวณ LC/SI curve จากการใช้ข้อมูลผลการทดสอบภายใต้สมมุติฐานที่ว่าดินตัวอย่างทั้งหมดเคยมีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกเหมือนกัน ซึ่งสมมุติฐานนี้เป็นเพียงทฤษฎีที่เป็นไปได้เท่านั้น เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดึงน้ำ สามารถก่อให้เกิดการคราก ตำแหน่งของ LC curve และ SI yield curve ก็จะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีนักวิจัยจำนวนมากได้รายงานไว้ว่าขนาดเตรียมตัวอย่างให้เหมือนกันด้วยความระมัดระวัง ก็ยังมีความแตกต่างของจุดคราก เมื่อทำการทดสอบตามเส้นทางเดินหน่วยแรงที่เหมือนกัน (Wheeler and Sivakumar, 1995; Rampino et al., 2000; Blatz and Graham, 2003) สำหรับดินตัวอย่างที่มีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกต่างกัน ตำแหน่งเริ่มต้นของ LC curve และ SI yield curve ก็จะต่างกัน ซึ่งการใช้วิธีการที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ก็จะนำไปสู่ผลที่ทำให้เข้าใจผิดตามตัวอย่างในรูปที่ 2.18 เป็นดินตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ที่แสดงถึงความแตกต่างกันของ LC curve โดยที่ LC_1 , LC_2 และ LC_3 ในรูปที่ 2.18(a) จะไม่เหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกันกับ เส้นโค้งคุณลักษณะการอัดตัวบนระนาบ $v - \ln p$ ตามเส้น ABC, D' VF และ G' XI ในรูปที่ 2.18(b) และเส้นโค้ง BVX จะสร้างขึ้นจากจุดคราก ที่ตำแหน่ง B, V และ X อย่างไรก็ตาม ยังคงไม่ใช่เส้นโค้งขอบเขตครากที่ถูกต้อง เพราะว่าจุดเหล่านี้เป็นจุดของ เส้นโค้งขอบเขตครากที่ต่างกันบน LC_1 , LC_2 และ LC_3 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม เส้นประ ABC, DEF และ GHI ในรูปที่ 2.18(b) เมื่อตัวอย่างมีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกที่เหมือนกัน จะทำให้ดินมีเส้นขอบเขตครากเดียวกัน คือ BEH (LC_1) เพราะว่าเส้นโค้ง BVX และ BEH มีรูปแบบที่คล้ายกัน จึงเป็นเรื่องง่ายที่จะทำให้คำนวณรูปร่างของพื้นผิวครากผิด

แม้ว่าจะมีดินตัวอย่างที่เหมือนกัน แต่ถ้าออกแบบการทดสอบที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้หน่วยแรงที่กระทำมีค่ามากกว่าจุดสภาวะเริ่มต้นของ LC curve และ SI yield curve เนื่องจาก ดินมีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกัน จึงทำให้ไม่ทราบจุดของสภาวะเริ่มต้นของ LC/SI curve ที่แท้จริง ก่อนจะมีการทดสอบ สมมุติให้ดินมีรูปร่างของ LC curve และ SI yield curve ตามรูปที่ 2.18(c) ซึ่งมีดินตัวอย่างอยู่ 3 ตัวอย่าง มีการเตรียมตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง และมีเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นและประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกเหมือนกัน จากนั้นใช้การกำหนดรูปร่างของ SI_1 ตามวิธีของ Thu et al. (2007) โดยเมื่อทำการเพิ่มแรงที่กระทำต่อตัวอย่าง ที่หน่วยแรงปิดล้อมที่แตกต่างกันคือ p_1 , p_2 และ p_3 ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ทราบตำแหน่งของสภาวะเริ่มต้นของ LC_1 เป็นไปได้ว่าการออกแบบหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นที่เท่ากับ p_2 และ p_3 จะถูกกำหนดให้มีค่ามากกว่า P_0^* ดังนั้นจะนำไปสู่การครากของดินและเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของ LC curve และ SI yield curve จาก

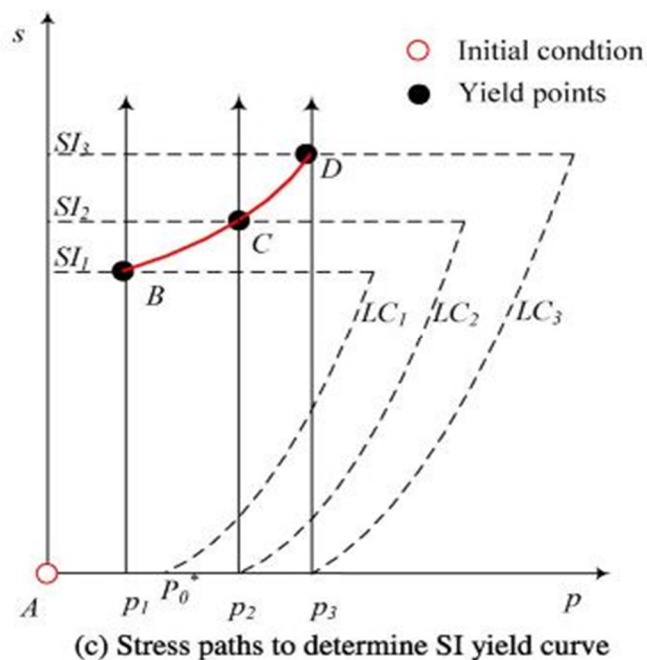
$LC_1 - SI_1$ ไป $LC_2 - SI_2$ และ $LC_3 - SI_3$ โดยจุดเส้นโค้งจากการคราก BCD จะถือว่าเป็น SI yield curve แต่มันไม่ถูกต้อง เพราะว่าจุดเหล่านี้เป็นของ SI yield curve ที่แตกต่างกัน



(a) Stress paths to determine the shape of LC yield curve



(b) Volume changes upon loading at different suctions



รูปที่ 2.18 ภาพร่างเส้นทางเดินหน่วยแรงที่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดกับการคำนวณ LC curve (Zhang et al., 2010) (a) จุดครากจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก, (b) จุดครากบนเส้นโค้งการอัดตัวของดิน, (c) จุดครากจากการเพิ่มแรงดึงน้ำ

ต่อมา Zhang et al. (2011) ได้กล่าวถึงข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณพารามิเตอร์แบบจำลอง ว่าค่าของ $\lambda(0)$, β , r และ p^c ได้จากการคำนวณที่แยกกัน โดย $\lambda(0)$ หาได้โดยตรงจากการทดสอบ ISC ของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ค่า β และ r ใช้จากการพิจารณา $\lambda(0)$, $\lambda(s)$ ที่ระดับแรงดึงน้ำต่างกัน ในสมการที่ 2.14 และ p^c ได้จากการพิจารณาจากหน่วยแรงครากบนการทดสอบ ISC ที่แรงดึงน้ำต่างกัน ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ได้รับจากขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติของดินที่เหมาะสมที่เกี่ยวข้องกัน (best fit) แต่บางคุณสมบัติของการทดสอบไม่ได้ถูกพิจารณาพร้อมกันในขั้นตอนการวิเคราะห์ (regression processes) เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.13 สำหรับ BBM จะมีเพียงค่า $\lambda(s)$ เท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ในขณะ $N(s)$ ถูกตัดออก ซึ่งเป็นตัวแทนคุณสมบัติที่สำคัญของพฤติกรรมของดิน นอกจากนี้ถ้าดินตัวอย่างในการทดสอบ ISC มีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกที่ไม่เหมือนกันก็จะทำให้ตำแหน่งที่สถานะเริ่มต้นของ LC curve ไม่สามารถพิจารณาได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นค่า p^c ที่ได้รับมีแนวโน้มที่จะผิดพลาด

จากนั้น Zhang et al. (2011) ยังพบอีกว่ามีข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับความแตกต่างระหว่างการยืดหยุ่นและการเสียดรูปถาวร โดย Zhang et al. (2011) อ้างถึงการทดสอบของ Wang et al. (2008) จากที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ทั้งการทดสอบ ISC และ คุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (SWCC) ตามรูปที่ 2.16 โดยมี 4 สถานะหน่วยแรงที่เหมือนกันในทั้งสองการทดสอบ ISC และ SWCC สำหรับในทฤษฎีอิลาสโต - พลาสติกการ ทดสอบของทั้งสองควรมีอัตราส่วน โพรงที่เท่ากัน แต่พบว่าผลของการทดสอบของทั้งสองจะได้ผลของอัตราส่วน โพรงที่ไม่เท่ากันโดยสรุปได้ตามตารางที่ 2.3 ซึ่งผลลัพธ์นี้ขัดแย้งกับทฤษฎีอิลาสโต - พลาสติกสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงให้เห็นว่าทั้งการครากจากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรง หรือการครากจากการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ ในรูปที่ 2.16 ไม่ถูกต้อง หลังจากนั้น Zhang et al. (2011) ได้ใช้หลักการของวิธีการของ MSSA (Modified State-Surface Approach) ที่เสนอโดย Zhang and Lytton (2009a,b) ในการอธิบายตัวอย่างในงานวิจัยของ Alonso et al. (1990) ภายใต้งานแรงที่กระทำเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งวิธีการเดียวกันนี้สามารถใช้แก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ได้เช่นกัน ซึ่งอธิบายได้จากรูปที่ 2.19 โดยพิจารณาเส้นทางเดินหน่วยแรงจาก D ไป E (1 และ 2) ในรูปที่ 2.19(a) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจำเพาะอยู่ในโซนอิลาสติก เส้นทางเดินหน่วยแรงของ 1 และ 2 จึงเป็นอิสระ และหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะในโซนอิลาสติก โดยการรวมกันของ สมการที่ 2.12 และ 2.16 ดังต่อไปนี้

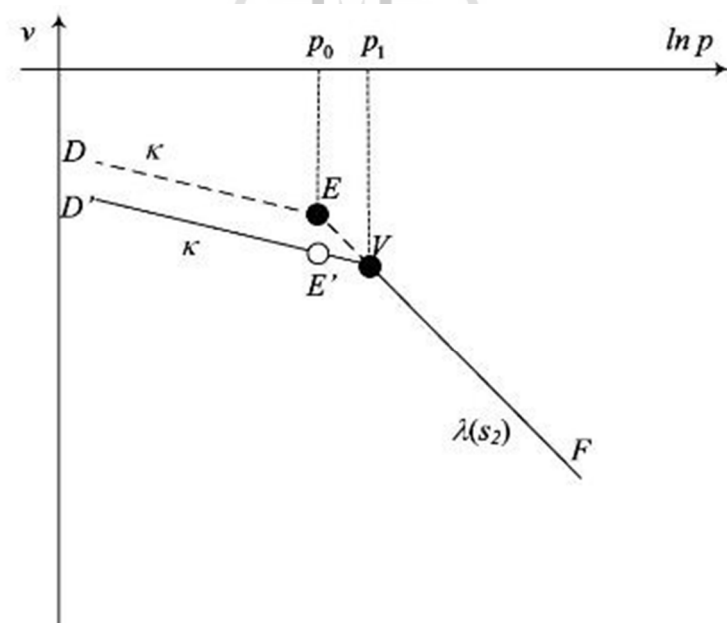
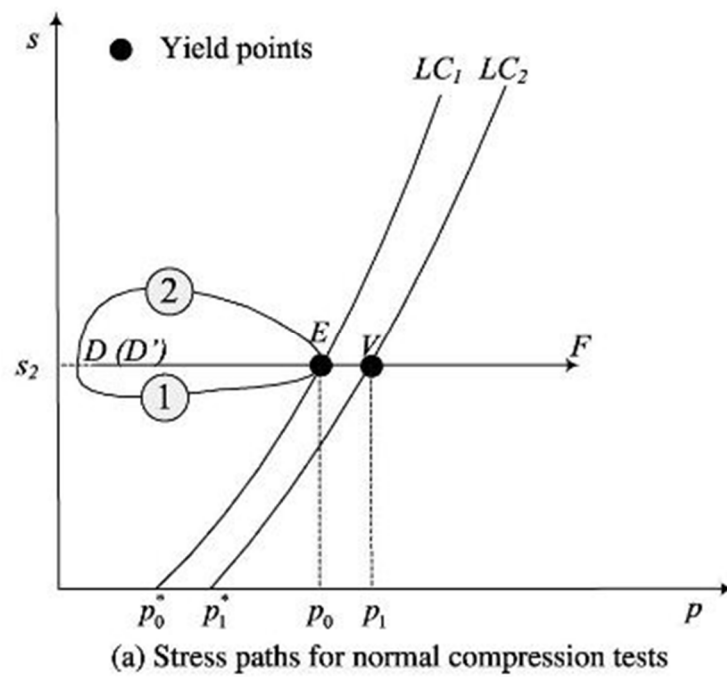
$$dv^e = -\kappa \frac{dp}{p} - \kappa_s \frac{ds}{(s + p_{at})} \quad (2.17)$$

$$\Delta v^e = v_D - v_E = \int dv^e = \int -\kappa \frac{dp}{p} - \kappa_s \frac{ds}{(s + p_{at})} \quad (2.18)$$

เมื่อ κ คือ ค่าความชันของเส้นการปล่อยแรงและการเพิ่มแรงซ้ำ ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยแรงสุทธิเฉลี่ย

κ_s คือ ค่าความชันของเส้นการปล่อยแรงและการเพิ่มแรงซ้ำที่เกี่ยวข้องกับ แรงดึงน้ำ

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แนวคิดและวิธีการของ Zhang et al. (2011) เป็นส่วนประกอบในการคำนวณด้วย แต่ได้เลือกใช้ความสัมพันธ์จากเส้นโค้งคุณลักษณะการอัดตัวของดินบนระนาบ $\ln v - \ln p$ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 2.19 ภาพร่างแสดงหลักการของแนวคิด MSSA (Zhang et al., 2010)

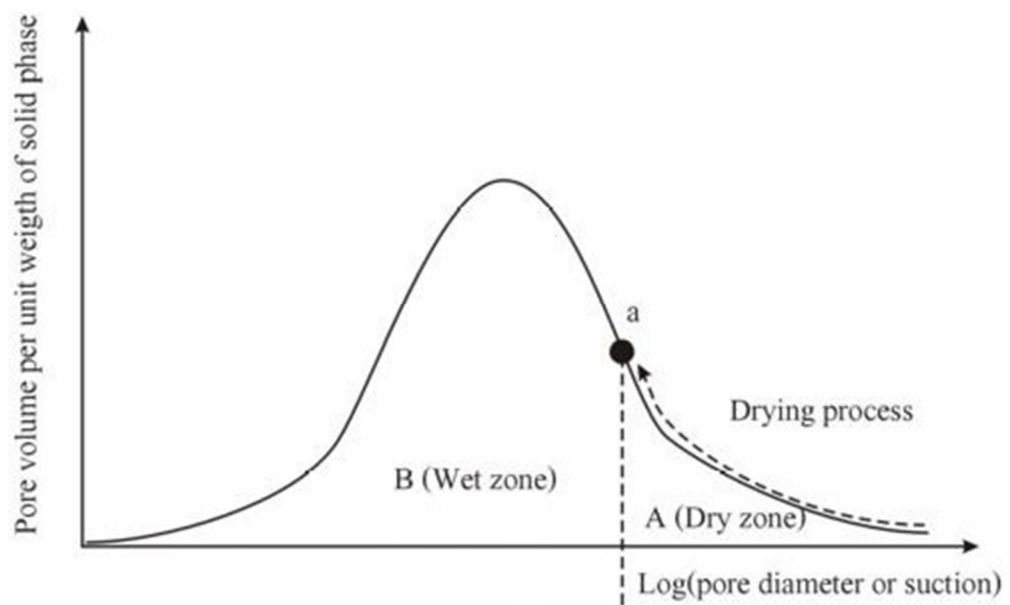
ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราส่วนโพรงที่สถานะเริ่มต้นของการทดสอบที่ต่างกัน

Suction state (kPa)	Void ratio	
	ISC test	SWC test
$p = 100, s = 100$	0.533	0.476
$p = 100, s = 200$	0.513	0.465
$p = 200, s = 100$	0.521	0.455
$p = 200, s = 200$	0.506	0.451

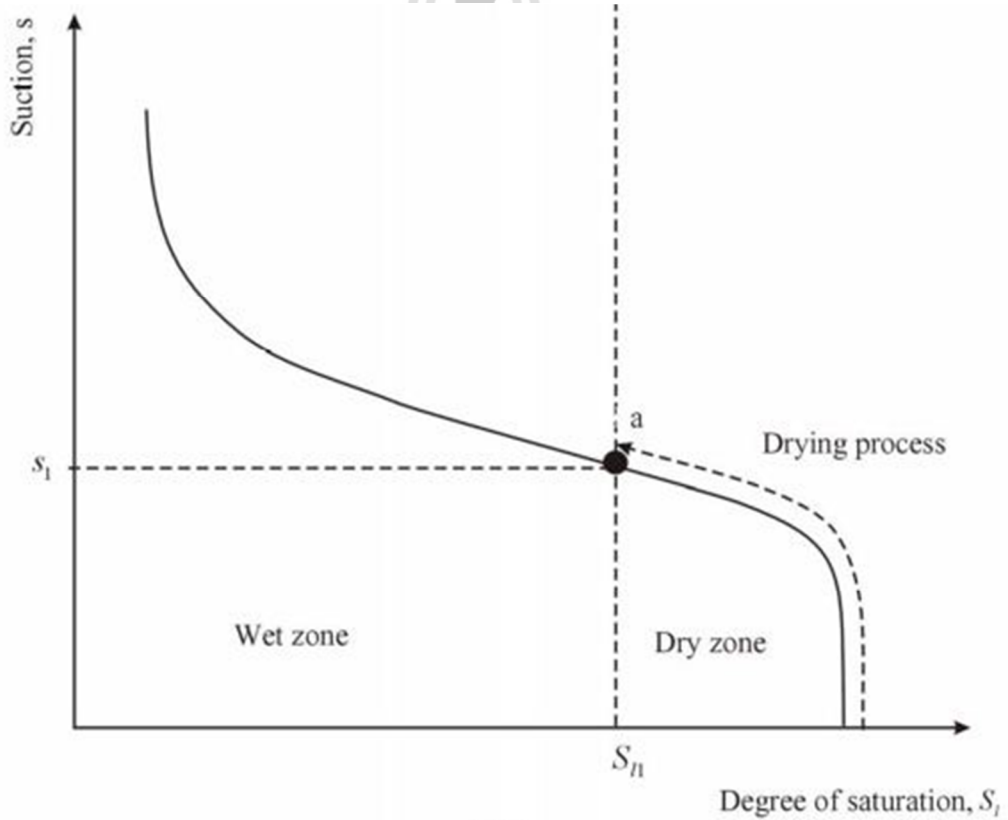
ในปีค.ศ. 2011 สมใจ ยุบลชิต ได้อ้างอิงวิธีการนิยาม LC curve ของแบบจำลองดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นพบว่า การนิยาม LC curve จะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกของดิน และจะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความชื้นของเส้นการอัดตัวปกติของดิน ซึ่ง สมใจ ยุบลชิต (2011) ได้ทำการศึกษาและนำเสนอพัฒนาสมการ LC curve เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรม การเสีรูปร่างของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการนิยามสถานะเริ่มต้นของ LC curve จากการพิจารณา โครงสร้างดินที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ (Drying path) ภายใต้ระดับหน่วยแรง คงที่เท่ากับศูนย์ โดยเริ่มจากดินสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและมีสมมุติฐาน คือ

- 1) สำหรับโพรงระหว่างเม็ดดินที่ยังมีน้ำเต็มอยู่ ขนาดของหน่วยแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้น รอบ ๆ โพรงจะมีค่าเท่ากับขนาดของแรงดึงน้ำ
- 2) เมื่อแรงดึงน้ำในโพรงมีค่าเกินกว่าค่าแรงดึงน้ำที่อากาศเข้า (Air entry suction, s_{ae}) ของ โพรงน้ำ ในโพรงจะถูกแทนที่ด้วยอากาศ ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของดินรอบ ๆ โพรง จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่กระทำต่อ โครงสร้างดินรอบโพรง หรือหน่วยแรงครากประสิทธิผลจะมีค่าเท่ากับ (s_{ae})

ในมวลดินมีโพรงหลายขนาด หน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นจึงต้องเป็นค่าเฉลี่ยต่อปริมาตร โพรงอากาศทั้งหมดในมวลดิน โดยสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและขนาดของโพรง อากาศในมวลดิน (Pore – size distribution curve) ดังรูปที่ 2.20



(a)



(b)

รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore — size distribution curve กับ WRC

ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำที่เกี่ยวข้องกับการกระจายปริมาตรของโพรงกับหน่วยแรงคราก ดังนี้

$$\Delta p'_0 = \frac{s_{ae}A + sB}{A + B} \quad (2.19)$$

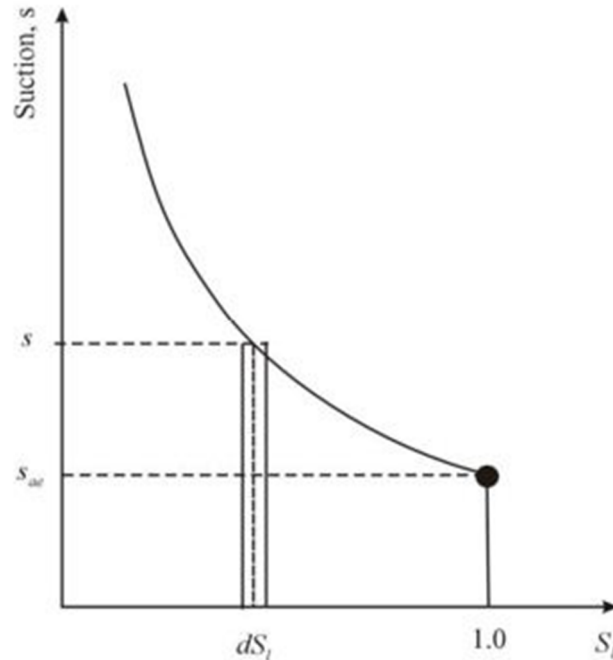
โดยที่ $\Delta p'_0$ คือ หน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของแรงดึงน้ำ
 s_{ae} คือ แรงดึงน้ำที่อากาศเข้าของโพรง
 A คือ พื้นที่ใต้กราฟส่วนแห้งบน Pore – size distribution curve
 B คือ พื้นที่ใต้กราฟส่วนเปียกบน Pore – size distribution curve

สมการที่ 2.19 เป็นสมการทำนายการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผลโดยการแบ่งส่วนย่อย บน Pore – size distribution curve ซึ่งเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของโพรงทุก ๆ การเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ จึงทำให้ส่วนแห้งเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน อีกทั้ง Pore – size distribution curve เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่หาได้ยากจากการทดสอบ

หลังจากนั้น สมใจ ยุบลชิต (2011) ได้อ้างอิงงานวิจัยของ Fredlund and Xing, (1994) และใช้หลักการเดียวกัน ที่กล่าวถึงภาพร่างคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Water retention characteristics, WRC) จากรูปที่ 2.20 (b) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation, S_l) นั้นได้มาจากปริพันธ์ของ Pore – size distribution curve และเลือกใช้ความสัมพันธ์ของ WRC รูปที่ 2.21 ตาม Brook and Corey (1964) ดังสมการต่อไปนี้

$$S_l = \begin{cases} 1.0 & s < s_{ae} \\ \left(\frac{s_{ae}}{s}\right)^n & \text{เมื่อ} \\ & s \geq s_{ae} \end{cases} \quad (2.20)$$

โดย n คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องรูปร่างของการกระจายปริมาตรพร่งอากาศใน มวลดิน (Pore-shape parameter)



รูปที่ 2.21 ภาพร่าง WRC ของดินโดยใช้สมการ Brook and Corey (1964)

เมื่อหาปริพันธ์ที่สัมพันธ์กับการเพิ่มแรงดึงน้ำของความสัมพันธ์นี้ จะได้รับการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากประสิทธิผลที่แรงดึงน้ำใดๆ (Δp_0^s) ดังนี้

$$\Delta p_0^s(S_l) = \int_{S_l}^{1.0} s dS_l + sS_l \quad (2.21)$$

$$\Delta p_0^s(S_l) = \int_{S_l}^{1.0} \frac{s_{ae}}{S_l} \frac{1}{S_l^n} dS_l + sS_l \quad (2.22)$$

$$\Delta p_0^s(S_l) = \frac{ns_{ae}}{n-1} \left(1 - S_l^{\left(\frac{n-1}{n}\right)} \right) + sS_l \quad (2.23)$$

โดยที่ $\Delta p_0^s(S_i)$ คือ หน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ ขึ้นกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

ทำการแปลงสมการที่ 2.23 ให้เป็นหน่วยแรงครากสุทธิ จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการของ Bishop (1959) ดังนี้

$$\bar{p}_0^s = \Delta p_0^s(S_i) - \chi s \quad (2.24)$$

โดยที่ \bar{p}_0^s คือ หน่วยแรงครากสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ

ซึ่งสมใจ ยูบลชิต (2011) ได้กำหนดค่า χ มีค่าเท่ากับ S_i โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Bolzon et al. (1996) และให้เป็นตามสมการของ Brook and Corey (1964) ตามสมการที่ 2.20 ส่วนสมการที่ 2.24 จะใช้ในการทำนายหน่วยแรงครากสุทธิตามการเพิ่มแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นหากกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำเกิดขึ้นภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ใด ๆ (\bar{p}_0^0) สามารถทำนายได้โดยสมมติให้ WRC ของดินไม่ขึ้นกับระดับหน่วยแรงสุทธิ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\bar{p}_0^s = \bar{p}_0^0 + (\Delta p_0^s - S_i s) \quad (2.25)$$

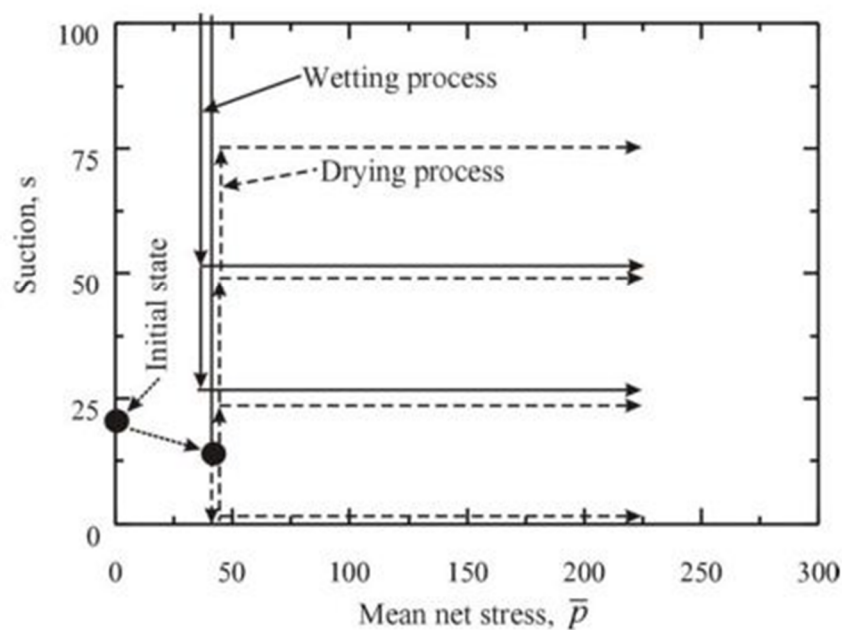
โดยที่ \bar{p}_0^0 เป็นหน่วยแรงครากสุทธิที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ

เมื่อได้หน่วยแรงครากสุทธิเริ่มต้นในสมการที่ 2.25 ยังไม่สามารถนิยาม LC curve เริ่มต้นได้ เนื่องจาก LC curve ของดินจะเปลี่ยนแปลงไปทุกๆ การเพิ่มของแรงดึงน้ำ เห็นได้จากผลทดสอบของ Stager G. (2010) ซึ่งทดสอบกับ Fine-sandy silt บดอัดมีองค์ประกอบของดิน คือ ดินเหนียว 5.9 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 56.3 เปอร์เซ็นต์ และดินทรายละเอียด 37.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีแรงดึงน้ำเริ่มประมาณ 16 ถึง 19 kPa และมีการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัว ดังรูปที่ 2.22

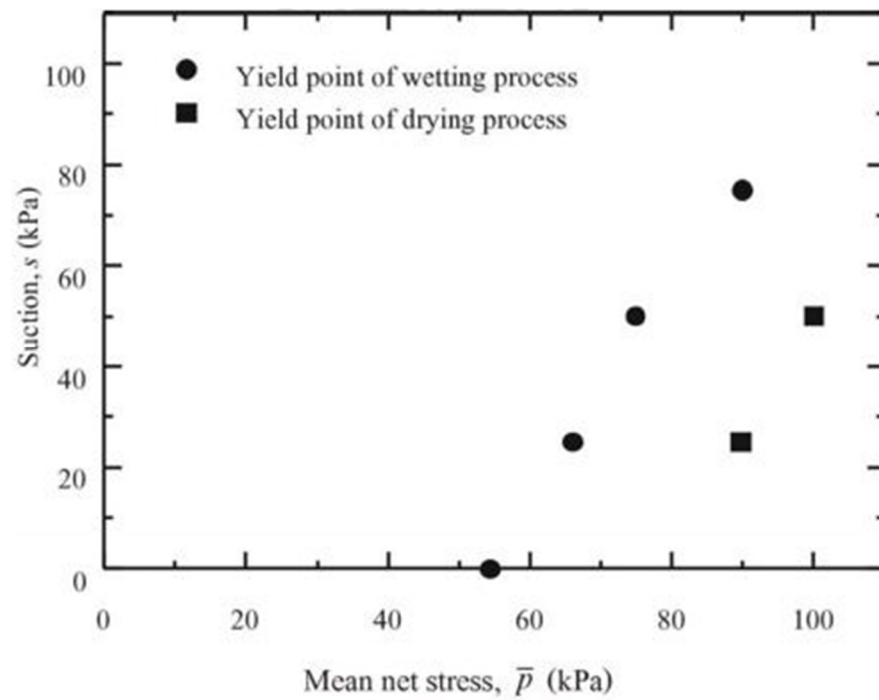
รูปที่ 2.22 เป็นการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัวของ Stager G.(2010) โดยการเพิ่มและลดแรงดึงน้ำจากสถานะเริ่มต้น การทดสอบจะแยกออกเป็นสองส่วนตามการเตรียมตัวอย่าง คือ เตรียมจากการเพิ่มแรงดึงจากแรงดึงน้ำเริ่มต้น โดยเพิ่มแรงดึงน้ำไปยังค่าสูง ๆ และลดลงมายังค่าที่ต้องการทดสอบการอัดตัวซึ่งมีค่าเท่า 50 และ 25 kPa ตามลำดับ และการเตรียมตัวอย่างโดยการลดแรงดึงน้ำ จะกระทำโดยลดแรงดึงน้ำจากแรงดึงน้ำเริ่มต้นไปที่ 0 kPa หลังจากนั้น เพิ่มแรงดึงน้ำไป

ยังค่าที่ต้องการทดสอบการอัดตัว เท่ากับ 0, 25, 50 และ 75 kPa ตามลำดับ จากการเตรียมตัวอย่างนี้ จะ ได้หน่วยแรงครากสุทธิต่างกัน ดังรูปที่ 2.23

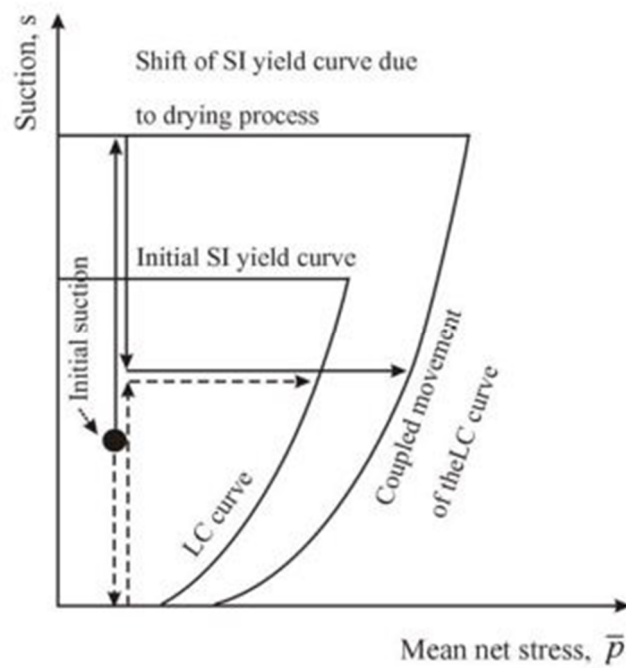
รูปที่ 2.23 หน่วยแรงครากสุทธิจากการเตรียมตัวอย่างทั้งสองรูปแบบจะแตกต่างกันโดยการเตรียมจากการเพิ่มแรงดึงจะมีค่าสูงกว่าการลดแรงดึงน้ำ ทำให้ LC curve ของดิน ขยายมากกว่า สาเหตุคือ การเพิ่มแรงดึงน้ำก่อนทดสอบการอัดตัว จะมีการเพิ่มเกินค่าแรงดึงน้ำสูงสุดที่ตัวอย่างดินเคยได้รับ (Suction yield, s_0) จากกระบวนการบดอัด ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งเรียกพื้นผิวครากจากการเพิ่มแรงดึงน้ำนี้ว่า SI yield curve (Alonso et al., 1990) การเปลี่ยนแปลง SI yield curve นี้ จะทำให้เกิดความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกเพิ่มขึ้น และ LC curve ใหม่ขึ้น ดังนั้นหากดินที่ไม่เคยมีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุก การเพิ่มแรงดึงน้ำจากดินที่มีสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ จะทำให้ LC curve ของดินเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ตามระดับของแรงดึงน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังภาพร่างในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.22 การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ Stager G. (2010)



รูปที่ 2.23 หน่วยแรงครากสุทธิจากผลการทดสอบการอัดตัวของ Stager G. (2010)



รูปที่ 2.24 ผลกระทบของ LC curve จากการเตรียมตัวอย่างของ Stager G. (2010)

รูปที่ 2.25 แสดงการเปลี่ยนแปลง LC curve ตามการเพิ่มแรงดึงน้ำของดินโดยเริ่มจากการอัดตัวภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ไปยังหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ \bar{p}_0^0 และเพิ่มแรงดึงน้ำไปยัง s_1 และ s_2 ตามลำดับทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง LC curve ซึ่งจะเป็น LC curve เริ่มต้น เมื่อดินถูกเพิ่มแรงดึงน้ำไปยังระดับดังกล่าว การนิยาม LC curve เริ่มต้น ของสมใจ ยุบลชิต (2011) จะใช้สมมุติฐานคือ

- 1.) LC curve เริ่มต้นจะมีรูปเหมือนกันทุกการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ
- 2.) LC curve จะอยู่บนระนาบที่มี ปริมาตรจำเพาะคงที่
- 3.) เมื่อทำการ Normalization หน่วยแรงครากสุทธิเริ่มต้นของดิน ด้วยค่าหน่วยแรงสุทธิสมมูล (Equivalent net stress, $\bar{p}_{e,s}$) จะได้ LC curve ที่ซ้อนทับกัน
- 4.) $\bar{p}_{e,s}$ เป็นหน่วยแรงสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำ s และปริมาตรจำเพาะ v ใด ๆ คือหน่วยแรงสุทธิบนเส้นการอัดตัวปกติของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ที่ระดับแรงดึงน้ำมีค่าเท่ากับศูนย์และให้ค่า v เท่ากับปริมาตรจำเพาะของตัวเอง ดังรูปที่ 2.26
- 5.) $\bar{p}_{e,s}$ ต้องมีค่าเท่ากันทุก ๆ หน่วยแรงสุทธิและแรงดึงน้ำ เมื่อ v เท่ากัน

จากสมมุติฐานดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่า $\bar{p}_{e,s}$ ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln v - \ln \bar{p}$ ดังนี้
เมื่อแรงดึงเท่ากับศูนย์

$$\ln v = N^0 - \lambda^0 \ln \bar{p}_{e,s} \quad (2.26)$$

เมื่อแรงดึงน้ำเท่ากับ s

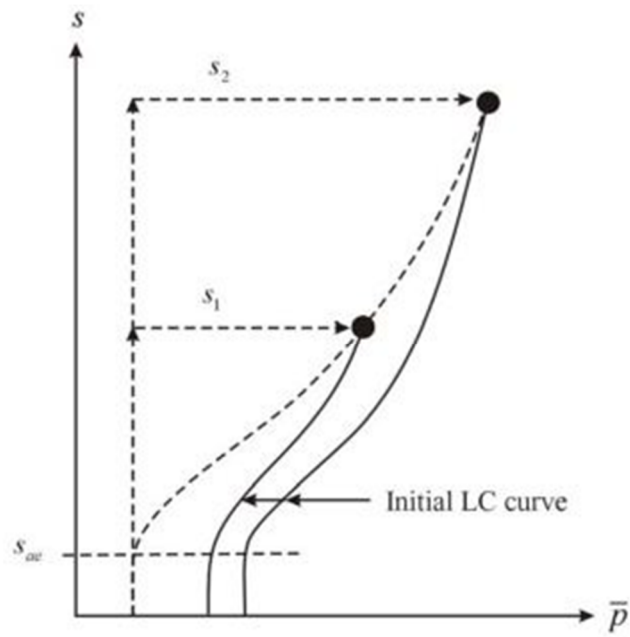
$$\ln v = N^s - \lambda^s \ln \bar{p}_0^s \quad (2.27)$$

เมื่อปริมาตรจำเพาะเท่ากัน สมการ 2.26 จะเท่ากับสมการ 2.27 จะได้ว่า

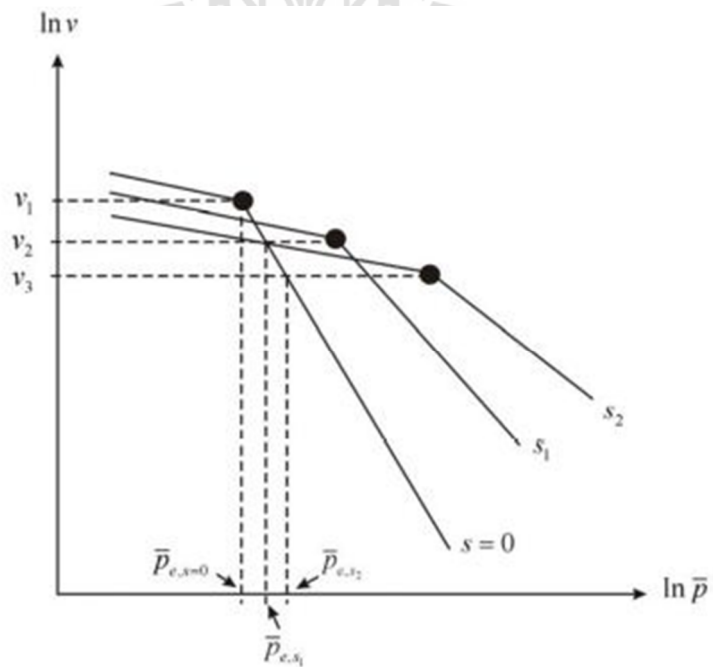
$$N^s - \lambda^s \ln \bar{p}_0^s = N^0 - \lambda^0 \ln \bar{p}_{e,s} \quad (2.28)$$

ดังนั้น

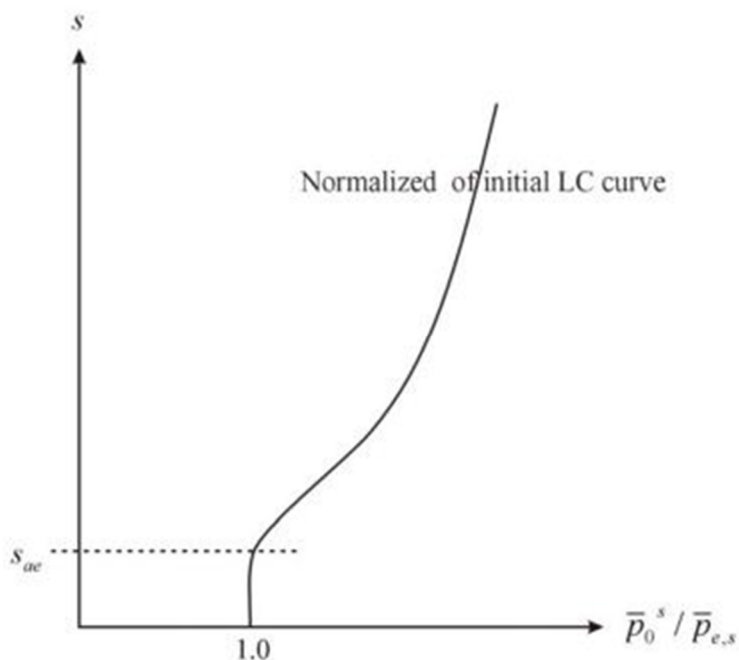
$$\bar{p}_{e,s} = \left[\exp(N^0 - N^s + \lambda^s \ln \bar{p}_0^s) \right]^{1/\lambda^0} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.25 LC curve ภายใต้ระดับแรงคิ่งน้ำต่างๆ (สมใจ ยุกลชิต, 2011)



รูปที่ 2.26 หน่วยแรงสุทธิสมมูลบนระนาบ $\ln v - \ln \bar{p}$ (สมใจ ยุกลชิต, 2011)



รูปที่ 2.27 LC curve เริ่มต้น ที่ Normalization ด้วยค่า $\bar{p}_{e,s}$ (สมใจ ยุบลชิต, 2011)

สมการที่ 2.29 เป็นสมการทำนายค่า $\bar{p}_{e,s}$ ตลอดกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำไปยังระดับต่างๆ เมื่อทำการ Normalization ด้วยสมการที่ 2.25 จะได้ภาพร่างดังรูปที่ 2.27 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\bar{p}_0^s}{\bar{p}_{e,s}} = \frac{\bar{p}_0^0 + \left(\frac{ns_{ae}}{n-1} \left(1 - S_l^{\left(\frac{n-1}{n} \right)} \right) + sS_l \right) - sS_l}{\left[\exp(N^0 - N^s + \lambda^s \ln \bar{p}_0^s) \right]^{1/\lambda^0}} \quad (2.30)$$

จากการศึกษางานวิจัยของ สมใจ ยุบลชิต (2011) พบว่าหน่วยแรงสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ s บนเส้นการอัดตัวของดิน ($\bar{p}_{e,s}$) ในความจริงแล้วจะไม่ได้เท่ากับสมการที่ 2.29 เนื่องจากว่า เมื่อหน่วยแรงหรือแรงดึงน้ำที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาตรจำเพาะมีค่าลดลง ซึ่งในงานวิจัยของ โดยอ้างอิงมาจาก Zhang et al. (2011) ซึ่งสมใจ ยุบลชิต (2011) จะสมมติ

ให้ปริมาตรจำเพาะของหน่วยแรงสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำ เท่ากับ s ที่มีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้น เหตุนี้ จึงทำให้ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ความสัมพันธ์ของการลดลงของปริมาตรจำเพาะ เมื่อมีหน่วยแรง หรือแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้นในการอธิบายพฤติกรรมดังกล่าว ซึ่งจะแสดงในหัวข้ออื่นต่อไป



บทที่ 3

หน่วยแรงของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

3.1 บทนำ

การศึกษาพฤติกรรมทางกลของดินนั้นจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ในการนิยามสมการสำหรับทำนายค่าหน่วยแรงของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จึงเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำนิยามหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย หน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ จากการพิจารณาปริมาตรโพรงในดินที่มีความเกี่ยวข้องกับแรงดึงน้ำที่กระทำต่อโครงสร้างรอบๆโพรง เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาสมการสำหรับนำไปประมาณค่า สภาวะเริ่มต้นของพื้นผิวครากบนระนาบของหน่วยแรงเฉลี่ยกับแรงดึงน้ำ หรือเส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัวต่อไป

3.2 หน่วยแรงเฉลี่ยของดินเม็ดหยาบอัดตัวคายน้ำแบบปกติ

หน่วยแรงเฉลี่ยของดิน คือส่วนหนึ่งของการพัฒนาสมการทำนาย สภาวะเริ่มต้นของ LC curve โดยจากงานวิจัยที่ก่อนหน้านี้ เช่น Tarantino and Tombolato (2005), Tarantino (2007) และ Alonso et al. (2010) ได้ชี้ให้เห็นว่า หน่วยแรงเฉลี่ยในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้น จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงดึงน้ำ ที่มีต่อโครงสร้างของโพรงในดิน โดยแต่ละโพรงนั้นเกิดจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน สามารถแบ่งประเภทของโพรงออกเป็น สองประเภทหลักๆ คือ โพรงใหญ่ (large open pore) และโพรงเล็กมาก (micro - pores) สำหรับโพรงใหญ่ (large open pore) นั้น ส่วนใหญ่แล้ว น้ำในโพรงจะมีการเชื่อมโยงกันด้วยผลที่เกิดจากปรากฏการณ์คาпилลารี ในแต่ละโพรงจะสามารถถูกแทนที่ได้ด้วยอากาศ ภายใต้แรงดึงน้ำที่กระทำต่อโพรง แต่สำหรับโพรงเล็กมาก (micro - pores) ไม่สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยอากาศ ซึ่งจะสังเกตได้จากเส้นโค้งคุณสมบัติการอุ้มน้ำของดิน (WRC) ที่ยังมีค่าความชื้นหรือระดับความอิ่มตัว คงค้างไว้อยู่ (residual saturation) เมื่อพิจารณาที่ระดับแรงดึงน้ำสูงๆ จะต้องใช้การอบแห้งเท่านั้นที่จะสามารถไล่น้ำในโพรงเล็กนี้ได้ โดยมวลดินจะประกอบไปด้วยขนาดของโพรงหลายๆขนาด ดังเช่นรูปที่ 3.1 และได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในโพรง ที่เกิดจากขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำต่อโพรงขนาดต่างๆ ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อมีแรงดึงน้ำกระทำต่อโครงสร้างโพรงดิน จนถึงจุดๆหนึ่ง อากาศจะเริ่ม

แทรกเข้าไปแทนที่น้ำที่อยู่ในโพรงของโพรงที่ใหญ่ที่สุดในมวลดินก่อน จนทำให้โพรงนั้นเต็มไปด้วยอากาศ และเมื่อแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้นไปอีก ก็จะทำให้โพรงที่มีขนาดใหญ่รองลงมาเป็นลำดับถัดไป ถูกแทนที่ด้วยอากาศไปเรื่อยๆ จนถึงจุดๆหนึ่งของแรงดึงน้ำที่กระทำมีค่าน้อยกว่าแรงดันน้ำที่อยู่ในโพรง อากาศจึงไม่สามารถแทรกเข้าไปแทนที่น้ำในโพรงของโพรงในลำดับนั้นได้ ในที่นี้โพรงที่ p_1 จะเป็นโพรงที่ใหญ่ที่สุดในมวลดิน และมีค่าแรงดึงน้ำจุดที่อากาศเข้าเท่ากับ $s_{ae}^{p_1}$ ดังนั้นแล้ว จากการพิจารณาข้างต้น ทำให้ทราบว่าค่าแรงดึงน้ำที่จุดอากาศเข้าของมวลดิน (s_{ae}) จึงเท่ากับ $s_{ae}^{p_1}$ ด้วยเช่นกัน ส่วนในโพรงที่ p_2 และ p_3 เป็นโพรงที่ใหญ่รองลงมาเป็นลำดับที่สองและลำดับที่สามของมวลดินตามลำดับ สำหรับในโพรงที่ p_i ก็จะเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่เป็นลำดับที่ i ของมวลดิน และ $s_{ae}^{p_i}$ ก็เป็นค่าแรงดึงน้ำจุดที่อากาศเข้าของโพรง p_i อธิบายเพิ่มเติมต่อไปได้ว่า เมื่อขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำต่อโครงสร้างโพรงดิน มีค่าน้อยกว่าแรงดึงน้ำจุดที่อากาศเข้า ($s_{ae}^{p_i}$) จะทำให้ทุกๆโพรงที่มีขนาดเล็กกว่าโพรงของ p_i ยังคงเต็มไปด้วยน้ำ แต่ทันทีหลังจากที่แรงดึงน้ำที่กระทำต่อโพรง มีค่าเกินกว่า $s_{ae}^{p_i}$ ก็จะทำให้ในโพรงของ p_i ถูกแทนที่ด้วยอากาศด้วยเช่นกัน จะเหลือก็แต่แรงดันน้ำในโพรงที่เป็นแรงดึงผิว มีความโค้งเว้า คล้ายสะพานที่เชื่อมระหว่างอนุภาคของแต่ละเม็ดดิน (interparticle water bridges) หรือเรียกอีกอย่างว่าปรากฏการณ์คาพิลลารีเท่านั้น และสำหรับแรงดันน้ำที่ยังคงเหลืออยู่ในโพรงนั้น ประกอบไปด้วย (1) โพรงใหญ่ (large open pore) ที่มีขนาดเล็กมากกว่าโพรงที่ p_i (2) โพรงเล็กมาก (micro - pores) ไม่สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยอากาศ จะเต็มไปด้วยน้ำ ในทุกๆขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำต่อโพรง ในลำดับต่อไปจะเรียกแรงดันน้ำที่คงเหลือนี้ว่า ส่วนเปียก (wet portion)

เริ่มต้นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะของโพรงดิน ที่สอดคล้องกับการนำมาใช้ในการคำนวณหน่วยแรงเฉลี่ยของดิน ไม่อิมตัวด้วยน้ำ โดยที่การเปลี่ยนแปลงสถานะของดินอิมตัวด้วยน้ำ ภายใต้การเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำที่หน่วยแรงเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ (ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ) จะพบว่า เมื่อขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำ (applied suction, s) มีค่าน้อยกว่าแรงดึงน้ำที่จุดอากาศเข้าของโพรงที่ใหญ่ที่สุด (p_1) คือ $s_{ae}^{p_1}$ ($s < s_{ae}^{p_1}$) จะทำให้ทุกๆโพรงในดินนั้นยังคงเต็มไปด้วยน้ำ ดังนั้นแล้วหน่วยแรงเฉลี่ย (p') ที่เกิดขึ้นที่แรงดึงน้ำนี้ มีค่าเท่ากับขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำต่อโพรงดิน และถ้าขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำมีค่ามากกว่าแรงดึงน้ำจุดที่อากาศเข้าของโพรงที่ p_1 แต่มีค่าน้อยกว่าแรงดึงน้ำที่อากาศเข้าของโพรงที่ p_2 ($s_{ae}^{p_1} \leq s < s_{ae}^{p_2}$) จะทำให้ในโพรงที่ p_1 จะถูกแทนที่ด้วยอากาศ ส่วน โพรงที่มีขนาดเล็กกว่าจะยังคงมีน้ำเต็มอยู่ เมื่อพิจารณาว่าโพรงใหญ่ (large open pore) เท่านั้นที่มีส่วนสำคัญจากผลของปรากฏการณ์คาพิลลารี และสมมุติให้หน่วยแรงเฉลี่ย (p') อันเนื่องมาจากแรงดึงน้ำ เป็นการคำนวณโดยใช้หลักการ การถ่วงน้ำหนักของแรงดึงน้ำที่เกิดขึ้นในโพรงเปียก กับสัดส่วนปริมาตรโพรง จะได้ว่าหน่วยแรงเฉลี่ย (p') ที่สถานะนี้จะเท่ากับ

$$p' = \left[\frac{(v_{pt} - v_{pm}) - v_{p1}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s = \left[\frac{(v_{pt} - v_{p1}) - v_{pm}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s \quad (3.1)$$

ในกรณีเดียวกัน ถ้าหากเมื่อ $s_{ae}^{pi} \leq s < s_{ae}^{p(i+1)}$ จะพบว่าในในโพรงโพรงที่ p_i และโพรงที่ใหญ่กว่า จะถูกแทนที่ด้วยอากาศทั้งหมด จากหลักการนี้ทำให้สามารถหาหน่วยแรงเฉลี่ย ที่ค่าแรงดึงน้ำนี้ได้ว่า

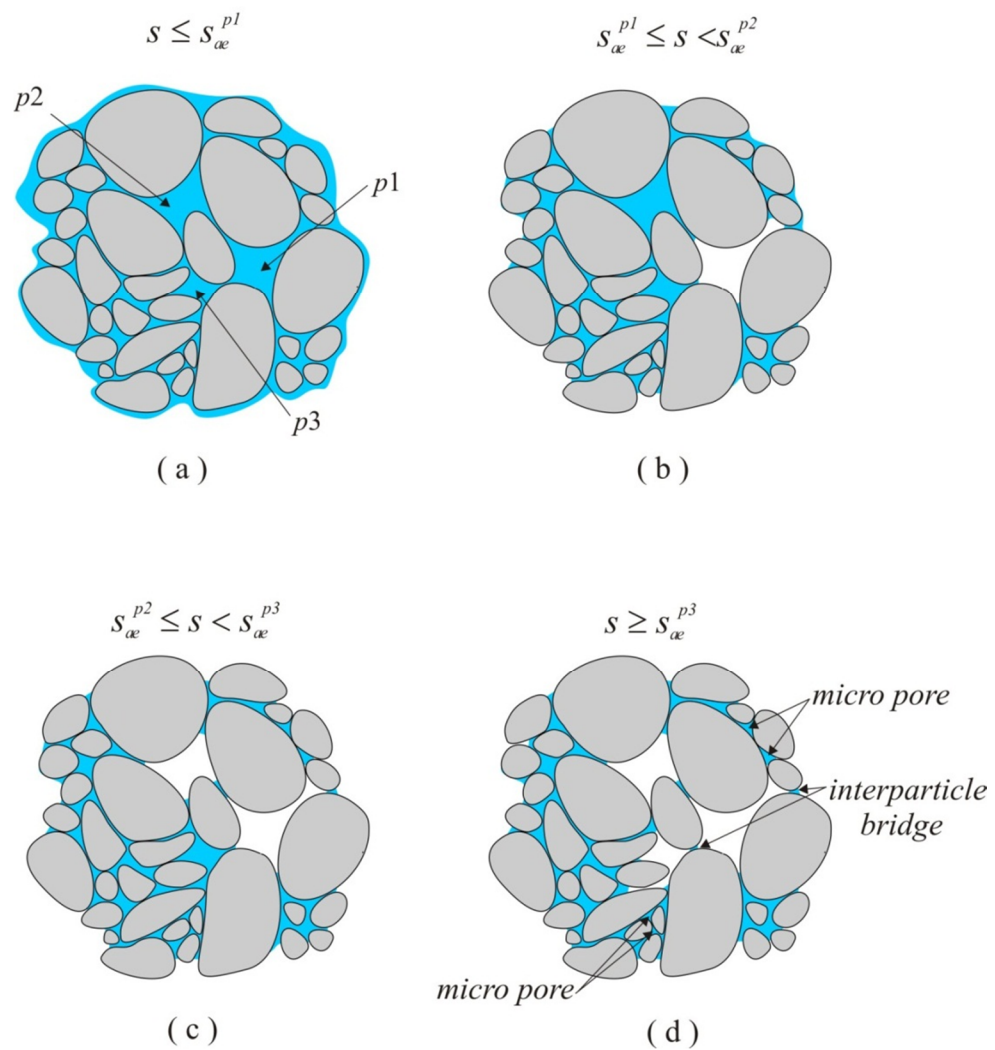
$$p' = \left[\frac{(v_{pt} - \sum_{\alpha=1}^i v_{p\alpha}) - v_{pm}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s = \left[\frac{(v_{pt} - v_{pm}) - \sum_{\alpha=1}^i v_{p\alpha}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s \quad (3.2)$$

เมื่อ	v_{pt}	คือ ปริมาตรของโพรงทั้งหมดในดิน
	v_{pm}	คือ ปริมาตรของ โพรงขนาดเล็กทั้งหมดที่ไม่สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยอากาศ
	$v_{pt} - v_{pm}$	คือ ปริมาตรของโพรงที่สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยอากาศ
	$v_{p\alpha}$	คือ ปริมาตรของโพรงที่ α ซึ่งน้ำได้ถูกแทนที่ด้วยอากาศเนื่อง จากแรงดึงน้ำที่กระทำ

จากสมการที่ 3.2 สามารถจัดรูปใหม่ได้โดยการที่นำ $\frac{1}{v_{pt}}$ มาคูณ ในเทอมทางขวามือทั้งเศษและส่วน จะได้ว่า

$$p' = \left[\left(\frac{(v_{pt} - \sum_{j=1}^i v_{pj})}{v_{pt}} - \frac{v_{pm}}{v_{pt}} \right) / \left(\frac{v_{pt}}{v_{pt}} - \frac{v_{pm}}{v_{pt}} \right) \right] \times s = \frac{S_l - S_{lr}}{1 - S_{lr}} \times s = S_e s \quad (3.3)$$

เมื่อ S_l คือ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ
 S_{lr} คือ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำคงเหลือ
 S_e คือ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล



รูปที่ 3.1 ภาพร่างการพัฒนารูปร่างของแรงดันน้ำในดินภายใต้ขนาดของแรงดึงน้ำต่างๆ

ต่อไปจะเป็นการพิจารณา การเปลี่ยนแปลงสถานะของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ภายใต้หน่วยแรงสุทธิเฉลี่ย (มีแรงภายนอกกระทำ) เท่ากับ p_{net} kPa และการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ s ภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่นี้ โดยพบว่าขนาดของหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ส่วนเปียกจะมีค่าเท่ากับ ผลรวมของขนาดของแรงดึงน้ำ กับขนาดของหน่วยแรงสุทธิแรงที่เกิดขึ้นที่โพรง นั่นคือ

$$p'_p = p_{net,p} + s_p \quad (3.4)$$

เมื่อ p' คือ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่โพรง
 $p_{net,p}$ คือ หน่วยแรงสุทธิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่โพรง
 s_p คือ แรงดึงน้ำที่เกิดขึ้นที่โพรง

นอกจากนี้ยังสันนิษฐานไว้ว่า หน่วยแรงสุทธิเฉลี่ย (แรงภายนอก) ที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผลกระทบในทุกๆ โพรง โดยไม่คำนึงถึงสถานะของโพรงนั้นๆ ไม่ว่าจะเป็นโพรงที่แห้งอยู่ หรือโพรงที่เปียกอยู่ก็ตาม ดังนั้นแล้วผลของหน่วยแรงเฉลี่ย ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ของแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิเฉลี่ยคงที่ เท่ากับ p_{net} kPa คือ

$$p' = p_{net} + S_e s \quad (3.5)$$

จากการแสดงผลของสมการข้างต้นนี้ เปรียบเทียบได้กับสมการของ Bishop ในสมการที่ 2.2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล (χ) ของ Bishop เทียบได้กับค่า ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล (S_e) ของสมการนี้ นั่นคือ $\chi = S_e$ โดยที่ค่าพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล (χ) จะมีความเกี่ยวข้องอย่างยิ่งกับโครงสร้างของดิน และเพื่อที่จะจัดการกับความซับซ้อนที่เป็นผลของโครงสร้างดิน จึงได้มีการนำตัวยกกำลังปรับแก้ ω มาใช้ในเทอมที่เกี่ยวข้องกับปริมาตรของโพรง ในสมการที่ 3.1, 3.2, และ 3.3 ยกตัวอย่างเช่น ในสมการที่ 3.1 จะถูกนำมาเขียนใหม่ได้ว่า $p' = \left\{ \frac{(v_{pt} - v_{p1}) - v_{pm}}{(v_{pt} - v_{pm})} \right\}^\omega \times s$ ด้วยเหตุนี้การแสดงผลสมการสำหรับหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยของดิน ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ สามารถเขียนได้เป็นดังต่อไปนี้

$$p' = p^{net} + S_e^\omega s \quad (3.6)$$

เมื่อ ω คือ ดัวยกกำลังปรับแก้ ที่เชื่อมโยงกับโครงสร้างของโพรงในดิน

นอกจากนี้ เนื่องจากผลของแรงดันน้ำภายในที่อยู่ในรูปแบบของคาพิลลารีเชื่อมระหว่างอนุภาค (inter-partical water bridges) ยังไม่ถูกนำมารวมในการคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผล ในสมการที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งพารามิเตอร์ ω นี้จะสอดคล้องกับอิทธิพลของแรงดันน้ำภายในที่อยู่ในรูปแบบของคาพิลลารีเชื่อมระหว่างอนุภาค (inter-partical water bridges)

จากความสัมพันธ์ของค่า χ ที่ถูกนำเสนอขึ้นโดย Khalili and Khabbaz (1998) ที่แสดงในสมการที่ 2.8 พบว่าพารามิเตอร์ $\gamma = 0.55$ และค่าระดับอิมตัวด้วยน้ำประสิทธิผล (S_e) เกี่ยวข้องกับค่าแรงดึงน้ำ ตามความสัมพันธ์ของเส้นโค้งคุณลักษณะการอุมน้ำของดิน (WRC) ที่ถูกนำเสนอโดย Brook and Corey (1964) ในสมการที่ 2.13 โดยที่พารามิเตอร์ n คือพารามิเตอร์จำลองที่สัมพันธ์กับการกระจายขนาดของโพรง ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้ ω มีเท่ากับ $\frac{0.55}{n}$ ซึ่งตรงกับค่าที่ถูกนำเสนอโดย Masin (2010)

3.3 หน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ

จากการใช้การพิจารณาปริมาตร โพรงและผลจากอิทธิพลที่เกิดจากแรงดันน้ำภายในที่อยู่รูปของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของเม็ดดินนั้น จะถูกนำมาเพื่อใช้ในการประมาณค่า ของหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) ต่อไป ซึ่งในการประมาณค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับนั้น จะเหมาะสมสำหรับดินเม็ดใหญ่ ที่อนุภาคของดิน ไม่มีพันธะเชื่อมติดกัน (cohesionless soil) จะมีโครงสร้างของดินเป็นลักษณะของอนุภาคโดดๆ และทำหน้าที่อย่างอิสระ เป็นรูปแบบที่เรียกว่า “โครงสร้างของดินแบบเดี่ยว” (single grain structure) ดังนั้นในโครงสร้างที่เป็นดินเหนียวที่มีความซับซ้อนสูง การประมาณด้วยวิธีนี้จะไม่สามารถใช้ได้ ซึ่งสำหรับค่าของหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) นั้นจะถูกกำหนดโดยแบ่งตามค่าของหน่วยแรงในอดีตที่ดินเคยได้รับ ออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) ดินอัดตัวคายน้ำแบบปกติ และ 2) ดินอัดตัวคายน้ำแบบมากกว่าปกติ

3.3.1 ดินอัดตัวคายน้ำแบบปกติ

พิจารณาดินสำหรับการอัดตัวคายน้ำแบบปกติ จากสถานะเริ่มต้นของดินอิมตัวด้วยน้ำ ซึ่งมีการอัดตัวคายน้ำที่หน่วยแรงสุทธิเท่ากับ p_{net} kPa และทำการเพิ่มแรงดึงน้ำให้กับดินตัวอย่างจนถึงแรงดึงน้ำที่ต้องการ ภายใต้การควบคุมให้หน่วยแรงสุทธิเฉลี่ยคงที่ตลอดกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำ จากนั้นแนวคิดการพิจารณาปริมาตร โพรงดินจะถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าหน่วยแรงประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) ซึ่งถ้าหากว่าแรงดึงน้ำที่กระทำมีค่าไม่เกินแรง

ดึงน้ำจืดที่อากาศเข้า (s_{ae}) ของดิน จะทำให้ทุกๆ โพรงยังคงเต็มไปด้วยน้ำ และด้วยเหตุนี้จะทำให้หน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับมีค่าเท่ากับ ผลรวมของหน่วยแรงเฉลี่ยสุทธิกับแรงดึงน้ำที่กระทำ ($p'_{\max} = p_{net} + s$) kPa

สำหรับในส่วนของโพรง ในกรณีเดียวกันพบว่าถ้าหากแรงดึงน้ำที่กระทำค่าไม่เกินแรงดึงน้ำจืดที่อากาศเข้า ของโพรง (s_{ae}^p) ในโพรงนั้นก็ยังคงมีน้ำเต็มอยู่ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดขึ้นในอนุภาคของเม็ดดินรอบๆ โพรง ($p'_{\max,p}$) จะเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงสุทธิเฉลี่ยกับแรงดึงน้ำที่กระทำเช่นกัน ($p_{net} + s$) แต่ถ้าหากว่าขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำมีค่าเกินกว่าแรงดึงน้ำจืดที่อากาศเข้าของโพรง (s_{ae}^p) น้ำที่อยู่ในโพรงจะถูกแทนที่ด้วยอากาศ และทำให้แรงดึงน้ำที่กระทำนั้น จะไม่มีส่งผลต่ออนุภาคของดินรอบๆ โพรง ดังนั้นหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่โพรงเคยได้รับ ($p'_{\max,p}$) จะมีค่าเท่ากับ ผลรวมของหน่วยแรงสุทธิเฉลี่ย กับแรงดึงน้ำจืดที่อากาศเข้าของโพรง ($p_{net} + s_{ae}^p$) จากแนวความคิดคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา จะถูกนำมาใช้กำหนดหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ ในหัวข้อนี้ด้วยเช่นกัน เป็นดังนี้

$$p'_{\max} = p_{net} + \frac{(v_{p1})^\omega s_{ae}^{p1} + \dots + (v_{pi})^\omega s_{ae}^{pi}}{(v_{pt} - v_{pm})^\omega} + \frac{\left[(v_{pt} - \sum_{j=1}^i v_{pj}) - v_{pm} \right]^\omega \times s}{(v_{pt} - v_{pm})^\omega} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.7 จะแบ่งโพรงของดินออกเป็นสองส่วน คือส่วนแห้ง และส่วนเปียก ซึ่งในสมการนี้ ในเทอมที่สองทางขวามือจะแสดงถึงผลที่เกิดจากส่วนแห้งของโพรง และในเทอมที่สามจะแสดงถึงผลที่เกิดจากส่วนเปียกของโพรง โดยทำการพิจารณาเทอมของ $\frac{v_{pi}}{v_{pt} - v_{pm}}$ เป็นการเปลี่ยนแปลงของระดับความอึดตัวของดิน ($-\Delta S_e$) จะสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่ว่า

$$p'_{\max} = p_{net} + \sum_{\alpha=1}^i \left[-\Delta S_{e\alpha}^\omega \times s_{ae}^{p\alpha} \right] + S_e^\omega \times s \quad (3.8)$$

เมื่อ $\Delta S_{e\alpha}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับความอึดตัวของดิน เนื่องจากการเพิ่มแรงดึงของโพรงที่ α

ซึ่งในเทอมที่สองทางขวามือของสมการที่ 3.8 สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของปริพันธ์ได้ว่า

$$p'_{\max} = p_{net} + \int_{1.0}^{S_e} -s \times dS_e^\omega + S_e^\omega \times s \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.9 พบว่าในเทอมที่สองทางขวามือ สามารถหาได้ โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำและระดับความอิ่มตัว ตามเส้นทางด้านข้างของเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน ซึ่งถูกนำเสนอโดย Brook and Corey เมื่อใช้วิธีทางคณิตศาสตร์จะทำให้ได้รูปสมการดังนี้

$$p'_{\max} = p_{net} + \frac{n\omega \times s_{ae}}{n\omega - 1} (1 - S_e^{\frac{n\omega-1}{n\omega}}) + S_e^\omega \times s \quad (3.10)$$

3.3.2 ดินอัดตัวคายน้ำแบบมากกว่าปกติ

สำหรับดินอัดตัวคายน้ำแบบเกินกว่าปกติ จะเป็นการอัดตัวคายน้ำของดินอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้หน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่กระทำต่อดินที่มีค่าเท่ากับ $p'_{app,\max}$ จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป หน่วยแรงเฉลี่ยที่กระทำต่อดินจะถูกทำให้มีค่าลดลง หรือหน่วยแรงเฉลี่ยที่เคยกระทำต่อดินนั้นหายไป จนเหลือหน่วยแรงเฉลี่ยที่กระทำเท่ากับ p_{net} และต่อมาจึงทำการเพิ่มแรงดึงน้ำ ไปยังระดับแรงดึงน้ำที่ต้องการที่เท่ากับ s ภายใต้หน่วยแรงเฉลี่ยคงที่เท่ากับ p_{net} จากนั้นเพื่อที่จะกำหนดหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{\max}) จำเป็นต้องทำการพิจารณาขนาดของ $p'_{app,\max}$ และ s_{ae} ที่เกิดขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้ แหล่งที่มาของหน่วยแรงครากของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

$$(I) \quad p'_{app,\max} \geq s_{ae} \quad \text{และ}$$

$$(II) \quad p'_{app,\max} < s_{ae}$$

กรณี (I)

บนพื้นฐานพัฒนาการของแรงดึงน้ำที่กระทำ (s) ในกรณีนี้จะประกอบไปด้วย 3 สถานะที่สามารถเป็นไปได้ ที่ขึ้นอยู่กับหน่วยแรงที่กระทำ ก็คือ $s + p_{net}$ ซึ่งจะแบ่งเป็นสถานะดังนี้

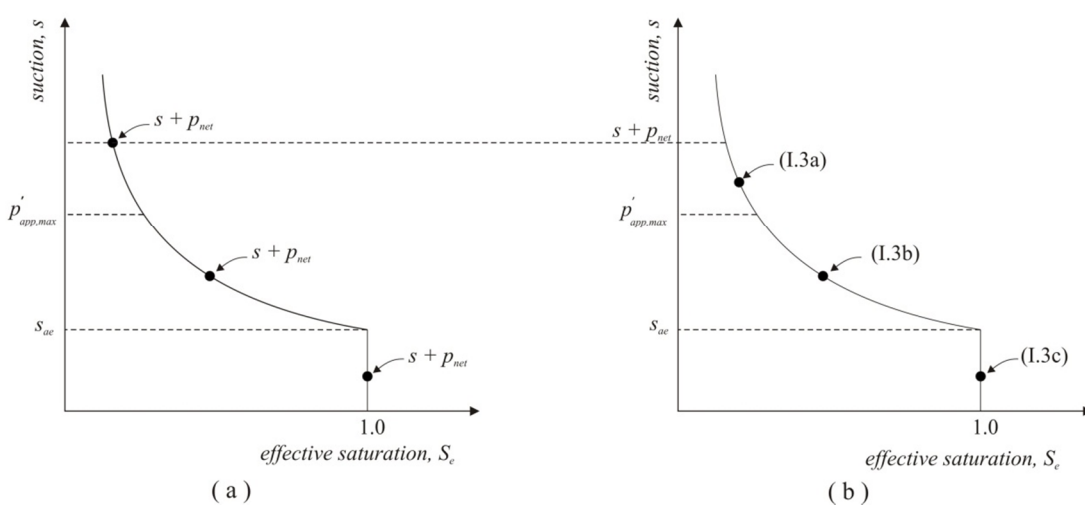
$$(I.1) \quad s + p_{net} \leq s_{ae}$$

$$(I.2) \quad s_{ae} < s + p_{net} \leq p'_{app,\max} \quad \text{และ}$$

$$(I.3) \quad s + p_{net} > p'_{app,\max} \quad \text{ดังแสดงในรูปที่ 3.2(a)}$$

หน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างดินรอบๆ โพรง ($p'_{max,p}$) ทุกๆ โพรงในสถานะที่ I.1 และ I.2 จะมีค่าเท่ากับ $p'_{app,max}$ ดังนั้นหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) ในสถานะเหล่านี้ก็คือ

$$p'_{max} = \int_{1.0}^0 -p'_{app,max} dS_e^\omega = p'_{app,max} \tag{3.11}$$



รูปที่ 3.2 ภาพร่างสถานะที่เป็นไปได้สำหรับกรณี I ตามหน่วยแรงที่กระทำเท่ากับ $s + p_{net}$

ส่วนในสถานะที่ I.3 ก็จะแบ่งออกเป็นอีก 3 ประเภทโดยขึ้นกับขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำ (s) คือ

(I.3a) $s \geq p'_{app,max}$

(I.3b) $s_{ae} < s < p'_{app,max}$

(I.3c) $s \leq s_{ae}$

และ

ดังแสดงในรูปที่ 3.2(b)

สำหรับสถานะที่ I.3(a) เมื่อ $s \geq p'_{app,max}$ พบว่าโพรงในดินจะประกอบไปด้วยโพรงที่แห้ง และโพรงที่เปียก ซึ่งในโพรงที่เปียกมีความหมายว่า โพรงนั้นจะมีค่าแรงดึงน้ำจุดที่อากาศเข้า (s_{ae}^p) มากกว่าแรงดึงน้ำที่กระทำต่อโพรง (s) ดังนั้นค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดขึ้นใน

โครงสร้างดินรอบๆ โพรง ($p'_{\max,p}$) ทุกๆ โพรงที่เปียก มีค่าเท่ากับ $s + p_{net}$ ส่วนโพรงแห้งนั้นค่าหน่วยแรงเฉื่อยสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างดินรอบๆ โพรง ($p'_{\max,p}$) ทุกๆ โพรงที่แห้ง สามารถเป็นไปได้ทั้ง $s_{ae}^p + p_{net}$ หรือ $p'_{app,\max}$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่า $s_{ae}^p + p_{net}$ มีค่าเกินกว่า $p'_{app,\max}$ หรือนั่นก็คือ $s_{ae}^p > p'_{app,\max} - p_{net}$ เช่นนั้นแล้วโพรงที่แห้งจะถูกแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแห้งล่างและส่วนแห้งบน ในส่วนแห้งล่างจะประกอบไปด้วยโพรงทั้งหมดที่มี ขนาดของแรงดึงน้ำจุดที่อากาศเข้า ของโพรงไม่เกินกว่า ขนาดของผลต่างของค่าหน่วยแรงเฉื่อยสูงสุดที่กระทำต่อดิน กับหน่วยแรงสุทธิเฉื่อย ($s_{ae}^p \leq p'_{app,\max} - p_{net}$) และส่วนแห้งบน ($s_{ae}^p > p'_{app,\max} - p_{net}$) จะประกอบไปด้วยโพรงที่เหลืตรงข้ามกับส่วนแห้งล่างทั้งหมด จากนิยามของส่วนแห้งบนและล่างพบว่าจะขึ้นอยู่กับทอมของ $p'_{app,\max} - p_{net}$ ที่สถานะที่ I.3(a) จึงถูกแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภทคือ

(I.3ai) $p'_{app,\max} - p_{net} > s_{ae}$ คือโพรงที่แห้งจะประกอบไปด้วย ส่วนแห้งล่างและบน หรือว่า

(I.3aai) $p'_{app,\max} - p_{net} \leq s_{ae}$ คือโพรงที่แห้งทั้งหมดจะถูกจัดเป็นส่วนแห้งบนทั้งหมด

ส่วนต่างๆทั้งหมด (ส่วนแห้งล่าง ส่วนแห้งบน และส่วนเปียก) สำหรับสถานะที่ I.3(ai) และ I.3(aai) จะถูกแสดงโดยใช้เส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) ดังแสดงในรูปที่ 3.3(a) และ 3.3(b) ตามลำดับ สำหรับส่วนเปียกคือโชนที่ถูกแสดงโดยการแรเงา เมื่อค่าความอึดตัวประสิทธิผลมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ S_e ซึ่งสอดคล้องกับค่าความอึดตัวประสิทธิผลในปัจจุบันบนเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) ที่แรงดึงน้ำที่กระทำมีค่าเท่ากับ s สำหรับโพรงที่แห้งคือโชนที่ถูกแสดงโดยจุดไข่ปลา เมื่อค่าความอึดตัวประสิทธิผลมีค่ามากกว่า S_e ซึ่งโพรงแห้งจะแยกส่วนแห้งล่างและส่วนแห้งบนออกจากกัน โดยใช้ค่าความอึดตัวประสิทธิผลเท่ากับ S^* ซึ่งสอดคล้องกับค่าความอึดตัวประสิทธิผลบนเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) ที่แรงดึงน้ำที่กระทำมีค่าเท่ากับ $p'_{app,\max} - p_{net}$ ด้วยเหตุนี้ ในส่วนแห้งล่าง ส่วนแห้งบน และส่วนเปียกสามารถกำหนดได้โดยใช้ S_e และ S^* ส่วนในสถานะที่ I.3(aai) ค่าของ S^* จะมีค่าเท่ากับ 1.0 และเหตุนี้โพรงแห้งจึงประกอบด้วยเพียงแค่ส่วนแห้งบน จากพื้นฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ค่าหน่วยแรงเฉื่อยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{\max}) สำหรับสถานะที่ I.3(ai) จะแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$p'_{\max} = p'_{app,\max} (1.0 - S^*) + \frac{s_{ae} n \omega}{n \omega - 1} (S^{*\frac{n \omega - 1}{n \omega}} - S_e^{\frac{n \omega - 1}{n \omega}}) + p_{net} (S^* - S_e) + (s + p_{net}) S_e \quad (3.12)$$

ในเทอมที่สองทางขวามือของสมการที่ 3.12 จะได้มาจากการใช้สมการของ Brook & Corey ในสมการที่ 2.10 และค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{\max}) สำหรับสถานะที่ I.3(aii) จะกำหนดโดยการแทนที่ S^* เท่ากับ 1.0 ในสมการที่ 3.12 ทำให้ได้ว่า

$$p'_{\max} = \frac{s_{ae}n\omega}{n\omega-1} \left(1 - S_e^{\frac{n\omega-1}{n\omega}}\right) + p_{net}(1 - S_e) + (s + p_{net})S_e \quad (3.13)$$

ในส่วนของสถานะที่ I.3(b) เมื่อ $s_{ae} < s < p'_{app,\max}$ ยังมีการแบ่งต่อไปได้อีก 2 ประเภทคือ

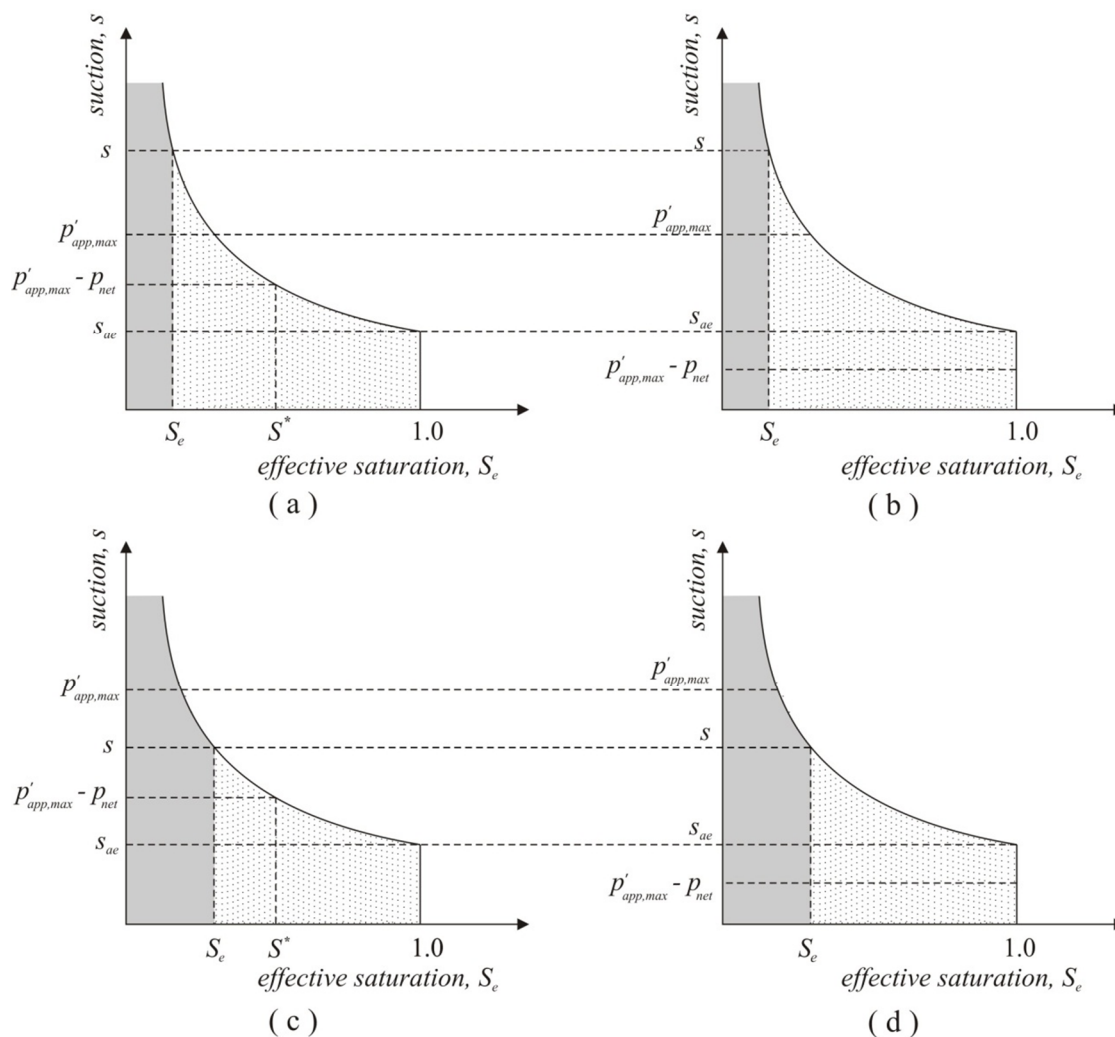
$$(I.3bi) \quad p'_{app,\max} - p_{net} > s_{ae} \quad \text{หรือ}$$

$$(I.3bii) \quad p'_{app,\max} - p_{net} \leq s_{ae}$$

ซึ่งรูปที่ 3.3(c) และ 3.3(d) แสดงถึงสถานะที่ I.3(bi) และ I.3(bii) ตามลำดับ เช่นเดียวกับสถานะที่ I.3(ai) และ I.3(aii) ส่วนแห้งและเปียกจะแบ่งตามค่าความอิ่มตัวประสิทธิผลปัจจุบันที่เท่ากับ S_e และส่วนแห้งบนและล่างจะถูกแยกออกจากกันโดยค่าความอิ่มตัวประสิทธิผลที่เท่ากับ S^* เมื่อสอดคล้องกับแรงดึงน้ำที่กระทำบน SWCC เท่ากับ $p'_{app,\max} - p_{net}$ ด้วยเหตุนี้การแสดงหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{\max}) ในสถานะที่ I.3(bi) และ I.3(bii) จึงเป็นไปดังสมการที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

ในส่วนของสถานะที่ I.3(c) เมื่อ $s \leq s_{ae}$ พบว่าค่าแรงดึงน้ำที่กระทำมีค่าไม่เกินไปกว่าแรงดึงน้ำจุดที่อากาศเข้าของโพรง จึงทำให้ในโพรงทุกโพรงมีแต่ส่วนเปียก ดังนั้นค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างดินรอบๆโพรง ($p'_{\max,p}$) ทุกๆโพรง จึงมีค่าเท่ากับ $s + p_{net}$ ค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{\max}) สำหรับสถานะที่ I.3(c) แสดงได้ดังนี้

$$p'_{\max} = \int_{1.0}^0 -(s + p_{net})dS_e^\omega = s + p_{net} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.3 ภาพร่างแสดงส่วนแห้งและเปียกบน WRC สำหรับสถานะที่ I.3(ai), I.3(aii), I.3(bi) และ I.3(bii)

กรณี (II)

บนพื้นฐานพัฒนาการของแรงดึงน้ำที่กระทำ (s) ในกรณีนี้จะประกอบไปด้วย 3 สถานะที่สามารถเป็นไปได้ ที่ขึ้นอยู่กับหน่วยแรงที่กระทำ ก็คือ $s + p_{net}$ ซึ่งจะแบ่งเป็นสถานะดังนี้

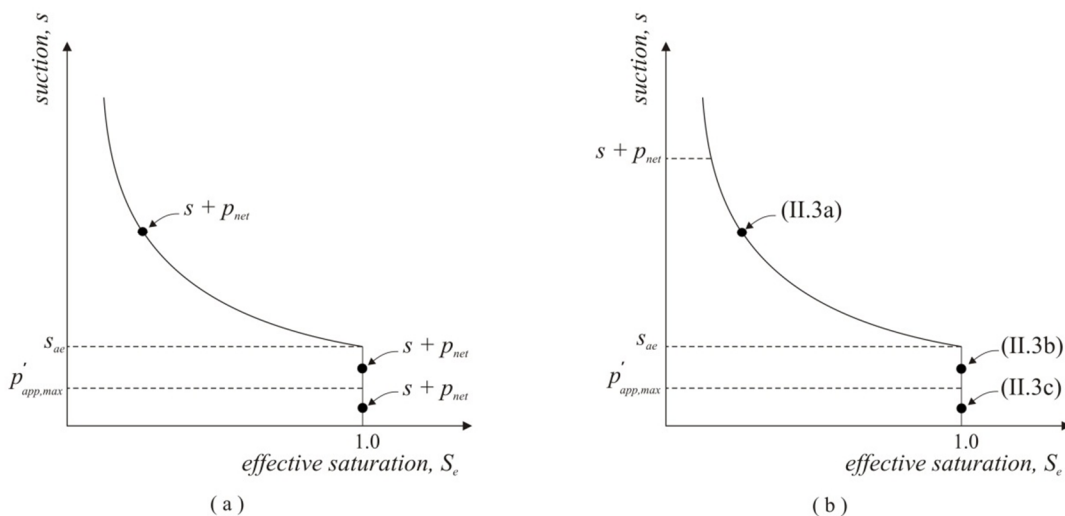
$$(II.1) \quad s + p_{net} \leq p'_{app,max}$$

$$(II.2) \quad p'_{app,max} < s + p_{net} \leq s_{ae}$$

$$(II.3) \quad s + p_{net} > s_{ae}$$

และ

ดังแสดงในรูปที่ 3.4(a)



รูปที่ 3.4 ภาพร่างแสดงสถานะที่เป็นไปได้สำหรับกรณี (II) ตามหน่วยแรงที่กระทำ เท้ากับ $s + p_{net}$

จากรูปที่ 3.4(a) จะเห็นว่าสถานะของหน่วยแรงจะอยู่ที่ $s \leq s_{ae}$ ดังนั้นสำหรับสถานะที่ II.1 และ II.2 ทุกๆ โพรงใน สถานะเหล่านี้จะยังคงมีน้ำเต็ม โพรงอยู่ ด้วยเหตุนี้ค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างดินรอบๆ โพรง ($p'_{max,p}$) ในสถานะที่ (II.1) จะเท่ากับ $p'_{app,max}$ และค่าหน่วยแรงเฉลี่ย สูงสุดที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างดินรอบๆ โพรง ($p'_{max,p}$) ในสถานะที่ II.2 จะเท่ากับ $s + p_{net}$ ดังนั้น ค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับสำหรับสถานะที่ II.1 และ II.2 คือ $p'_{app,max}$ และ $s + p_{net}$ ตามลำดับ

ส่วนในสถานะที่ II.3 ก็จะถูกแบ่งออกเป็นอีก 3 ประเภทโดยขึ้นกับขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำ (s) คือ

$$(II.3a) \quad s \geq s_{ae}$$

$$(II.3b) \quad s_{ae} > s \geq p'_{app,max}$$

$$(II.3c) \quad s < p'_{app,max}$$

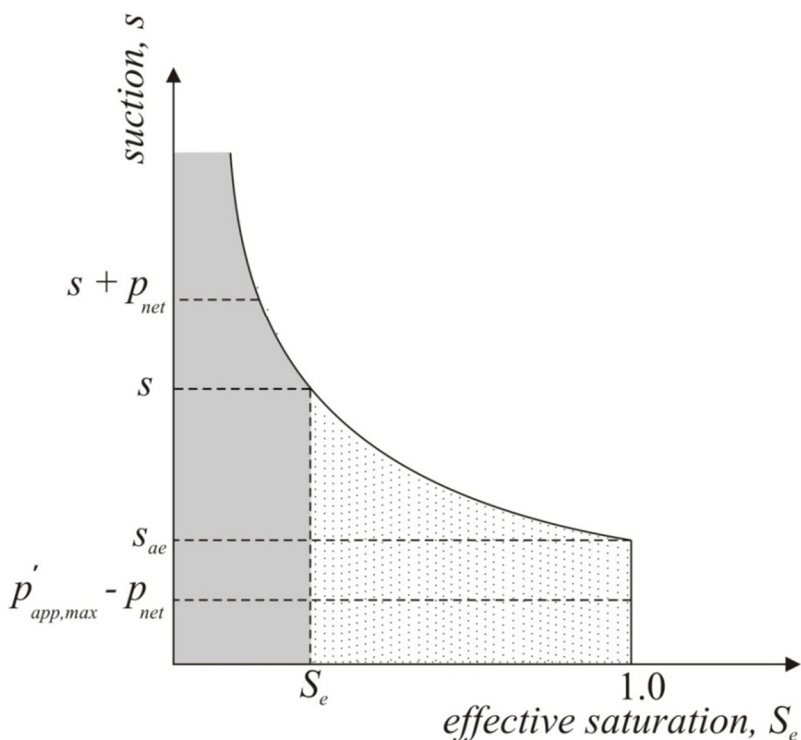
และ

ดังแสดงในรูปที่ 3.4(b)

สำหรับสถานะที่ II.3(a) ในมวลดินจะประกอบไปด้วยโพรงที่แห้ง และโพรงที่เปียก ดัง อธิบายได้จากรูปที่ 3.5 ดังนั้นค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างดิน รอบๆ โพรง

($p'_{max,p}$) ทุกๆ โพรงที่เปียก จะมีค่าเท่ากับ $s + p_{net}$ เพราะว่าขนาดของ $s_{ae}^p + p_{net}$ จะมีค่าเกินกว่า หน่วยแรงเฉลี่ยที่กระทำต่อโครงสร้างของดินสูงสุด ($p'_{app,max}$) ตลอด และโพรงแห้งเมื่อพิจารณา จากค่าของ S^* ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0 พบว่าโพรงแห้งจะมีแค่ ส่วนแห้งบน ด้วยเหตุนี้ค่าหน่วยแรงเฉลี่ย สูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) สำหรับสถานะนี้จึงถูกกำหนดโดย สมการที่ 3.13

สำหรับสถานะที่ II.3(b) และ II.3(c) จะประกอบไปด้วยโพรงเปียกเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ค่า หน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างดินรอบๆโพรง ($p'_{max,p}$) ทุกๆโพรง จึงมีค่าเท่ากับ $s + p_{net}$ ในสถานะที่ II.3(b) และเท่ากับ $p'_{app,max}$ ในสถานะที่ II.3(c) เพราะฉะนั้นค่าหน่วยแรง เฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) สำหรับสถานะที่ II.3(b) และ II.3(c) จึงเท่ากับ $s + p_{net}$ และ $p'_{app,max}$ ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ภาพร่างแสดงส่วนแห้งและเปียกบนเส้นโค้งลักษณะการอุ้มน้ำของดิน สำหรับสถานะที่ II.3(a)

บทที่ 4

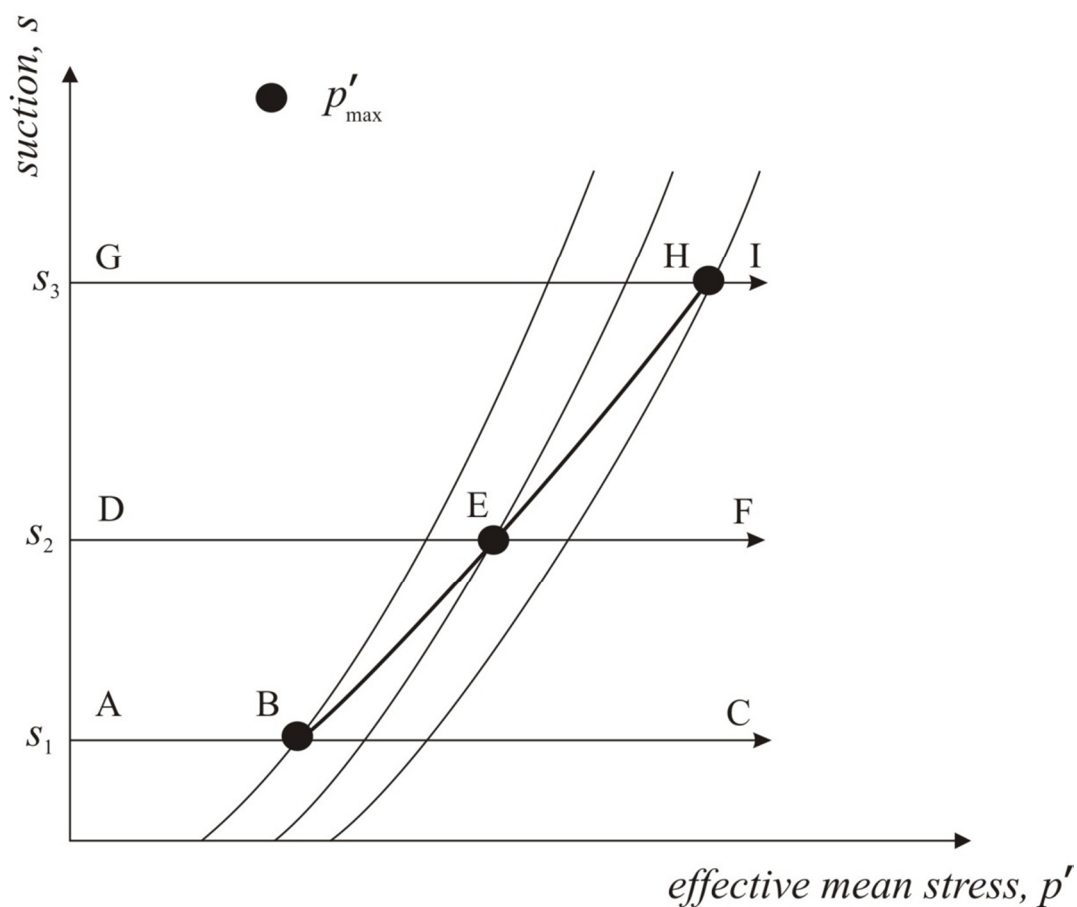
พื้นผิวครากสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

4.1 บทนำ

การนิยามพื้นผิวครากของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในหลายๆงานวิจัยที่ผ่านมาจะเป็นการนิยามพื้นผิวครากที่อยู่บนระนาบระหว่างหน่วยแรงกับแรงดึงน้ำ (LC curve) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงและความเครียดของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ภายใต้ทฤษฎี อีลาสโต - พลาสติก โดยจะมีสองส่วนหลักๆ คือ สภาวะเริ่มต้นของ LC curve และวิวัฒนาการของการเปลี่ยนแปลงการคราก เมื่อสถานะของหน่วยแรงอยู่บน LC curve ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอพื้นผิวครากที่อยู่บนระนาบระหว่างหน่วยแรงประสิทธิภาพเฉลี่ยกับแรงดึงน้ำ และหลักการในการพัฒนาสมการสำหรับทำนาย สภาวะเริ่มต้นของ LC curve ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองความสัมพันธ์ ที่จะใช้สำหรับเป็นเส้นอ้างอิง เพื่อศึกษา LC curve ที่มีวิวัฒนาการเมื่อเกิดการคราก เพื่อนำไปอธิบายพฤติกรรมทางกลของดินได้อย่างถูกต้องต่อไป

4.2 พื้นผิวครากบนระนาบหน่วยแรงประสิทธิภาพเฉลี่ยกับแรงดึงน้ำ

LC curve คือพื้นผิวครากของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่อยู่บนระนาบระหว่างหน่วยแรงกับแรงดึงน้ำ หัวข้อก่อนหน้าเป็นการนำเสนอ วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าของหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) ตามเส้นทางด้านข้างของเส้น โต้คงคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) ในปี ค.ศ.1990 Alonso et. al. ได้เสนอสองพื้นผิวครากอยู่ร่วมกันในแบบจำลองของเขา คือ LC curve และ พื้นผิวครากจากการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ (SI yield surface) และได้รายงานการเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงควบคู่กันระหว่าง LC curve และ SI yield ซึ่งการเปลี่ยนแปลง SI yield นี้ จะทำให้ความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกเพิ่มขึ้น และจากนั้นจะเกิด LC curve ใหม่ขึ้น ดังนั้นหากดินไม่เคยมีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกมาก่อน ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) ตามการเพิ่มของแรงดึงน้ำจากเส้น โต้คงคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) จะทำให้ LC curve ของดินเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ตามตัวอย่างในรูปที่ 4.1 ที่ได้อธิบาย p'_{max} ของทั้งสามค่าที่อยู่บนเส้น โต้พื้นผิวครากที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 ภาพร่างแสดงตำแหน่งของ p'_{\max} ที่เกี่ยวข้องกับ LC curve

การที่จะกำหนด LC curve ให้ถูกต้อง และการอธิบายวิวัฒนาการของการเปลี่ยนแปลง LC curve จะพบว่าในงานวิจัยนี้ได้พิจารณา เลือกใช้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของปริมาตรจำเพาะ ($\ln v$) กับลอการิทึมธรรมชาติของหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย ($\ln p'$) ซึ่งการใช้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่าง $\ln v$ กับ $\ln p'$ นั้น มักจะเห็นได้ทั่วไปในหลายๆงานวิจัย เช่น Butterfield (1979), Cui et al. (2002), และ Sheng et al. (2008), เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าว จะสามารถใช้ได้ดีขึ้นในเส้นโค้งคุณลักษณะการอัดตัวของดินที่มีระดับของหน่วยแรงที่สูงมากๆ ดังนั้น จาก hardening law เมื่อหน่วยแรงอยู่บนพื้นผิวคราก สำหรับ

วิวัฒนาการของการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากภายใต้แรงดึงน้ำคงที่ จะสามารถแสดงได้จากสมการที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

$$\delta \varepsilon_v^p = (\lambda_s - \kappa) \frac{dp'}{p'} \quad (4.1)$$

เมื่อ κ คือ ความชันของเส้นการปล่อยแรง และเพิ่มแรงซ้ำบนเส้นโค้งคุณลักษณะการอัดตัวของดิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับหน่วยแรงสุทธิที่แรงดึงน้ำคงที่

สำหรับสมการที่ 4.1 คือส่วนที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงภายใต้แรงดึงน้ำคงที่เท่ากับ s_1 ดังอธิบายได้จากรูปที่ 4.2 และพื้นผิวครากจะแสดงได้จากสมการที่ 4.2 ดังนี้

$$\left(\frac{P'_{oLC2}}{P'_{oLC1}} \right)^{\lambda_o - \kappa} = \left(\frac{P'_{s2LC2}}{P'_{s1LC1}} \right)^{\lambda_{s1} - \kappa} \quad (4.2)$$

ในสมการที่ 4.2 อธิบายได้ว่า มี 4 จุดหน่วยแรงบนคู่ของ LC curve โดยที่เส้นหนึ่งจะเป็นของ LC curve ที่ต้องการ (LC_{req}) และอีกเส้นหนึ่งจะเป็น LC curve ที่สอดคล้องกับการคำนวณที่ได้จากการหาหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) ใดๆ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า LC curve อ้างอิง (LC_{ref}) ซึ่งถ้าหากเราทราบจุดหน่วยแรงที่อยู่บน LC curve สามจุด ที่ประกอบด้วยสองจุดหน่วยแรงที่อยู่บน LC_{ref} (จุด p'_o และ จุด p'_{max} ที่ได้จากการคำนวณ) และอีกจุดหนึ่งคือ p'_o ที่อยู่บน LC_{req} จุดที่สี่ก็จะสามารถหาได้

โดยที่ ขนาดของหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) บน LC_{ref} สามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ ส่วน p'_o ที่อยู่บน LC_{ref} คือหน่วยแรงครากบนเส้นการอัดตัวปกติของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยมีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุก ที่เหมือนกันกับการคำนวณหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) และเมื่อขนาดของ p'_o ที่อยู่บน LC_{req} ที่ระบุไว้ จุดของหน่วยแรงที่ระดับแรงดึงน้ำที่เท่ากันกับของ p'_{max} สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 4.3 ดังนี้

$$P'_{LCreq} = P'_{max} \left(\frac{P'_{oLCreq}}{P'_{oLCref}} \right)^{\frac{\lambda_o - \kappa}{\lambda_s - \kappa}} \quad (4.3)$$

ซึ่งการหา LC_{req} สามารถทำได้โดยการทำซ้ำตามขั้นตอนข้างต้น สำหรับขนาดต่างๆของ p'_{max} ภายใต้อุณหภูมิเฉพาะ P'_{oLCref} ดังรูปที่ 4.2 ที่แสดงแผนภาพสำหรับขั้นตอนที่จะได้มาของ LC_{req} ขนาดของ p'_o ที่อยู่บน LC_{ref} (P'_{oLCref}) ในสมการที่ 4.2 คือหน่วยแรงครากบนเส้นการอัดตัวปกติของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยมีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกที่เหมือนกันกับการคำนวณหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับบน LC_{ref} เดียวกัน ในการแสดงวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการกำหนด P'_{oLCref} จะทำได้โดยการพิจารณาจากรูปภาพที่ 4.3 โดยขณะที่ P'_{oLCref} และ LC_{req} ตั้งอยู่บนเส้นการอัดตัวแบบปกติที่สอดคล้องกัน ซึ่งการแสดงผลเฉพาะจากจุดดังกล่าวเหล่านี้ จะแสดงได้จากสมการที่ 4.4a และ 4.4b ตามลำดับ

$$\ln v_o = N_o - \lambda_o \ln(p'_{oLCref}) \quad (4.4a)$$

$$\ln v_s = N_s - \lambda_s \ln(p'_{max}) \quad (4.4b)$$

เมื่อ	N_o, N_s	คือ ค่าคงที่ของวัสดุ ซึ่งจะเท่ากับปริมาตรจำเพาะของเส้นการอัดตัวแบบปกติที่หน่วยความดัน
	λ_o	คือ ค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติที่สัมพันธ์กับหน่วยแรงสุทธิเฉลี่ยที่ $s = 0$ kPa
	λ_s	คือ ค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติที่สัมพันธ์กับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยที่แรงดึงน้ำคงที่เท่ากับ s

สำหรับการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงเฉลี่ย (dp') และแรงดึงน้ำ (ds) ภายในช่วงอีลาสติก การเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรจะเท่ากับ

$$\frac{\partial v}{v} = \partial \varepsilon_v = -\kappa \frac{dp'}{p} - \kappa_s \frac{ds}{s + p_{at}} \quad (4.5)$$

เมื่อ	κ	คือ ความชันของเส้นการปล่อยแรง และเพิ่มแรงซ้ำ ที่สัมพันธ์กับหน่วยแรงประสิทธิผล
	κ_s	คือ ความชันของเส้นการปล่อยแรง และเพิ่มแรงซ้ำที่สัมพันธ์กับแรงดึงน้ำในดิน

p_{at} เป็นความดันบรรยากาศ

เมื่อ p'_{oLCref} และ p'_{max} อยู่บนพื้นผิวแบบอิลาสติกเดียวกัน และด้วยเหตุนี้ ความแตกต่างระหว่าง $\ln v_o$ กับ $\ln v_s$ คือ

$$\int_{v_o}^{v_s} \frac{dv}{v} = \int_{p'_{oLCref}}^{p'_{max}} -\kappa \frac{dp'}{p'} + \int_0^s -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{at}} \quad (4.6)$$

โดยเมื่อนำสมการที่ 4.4 และ 4.6 มาใช้ร่วมกัน จะได้สมการที่แสดงผลสำหรับ p'_{oLCref} ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \ln v_s - \ln v_o &= N_s - \lambda_s \ln p'_{max} - N_o + \lambda_s \ln p'_{oLCref} \\ &= -\kappa \ln \left(\frac{p'_{max}}{p'_{oLCref}} \right) - \kappa_s \ln \left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}} \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

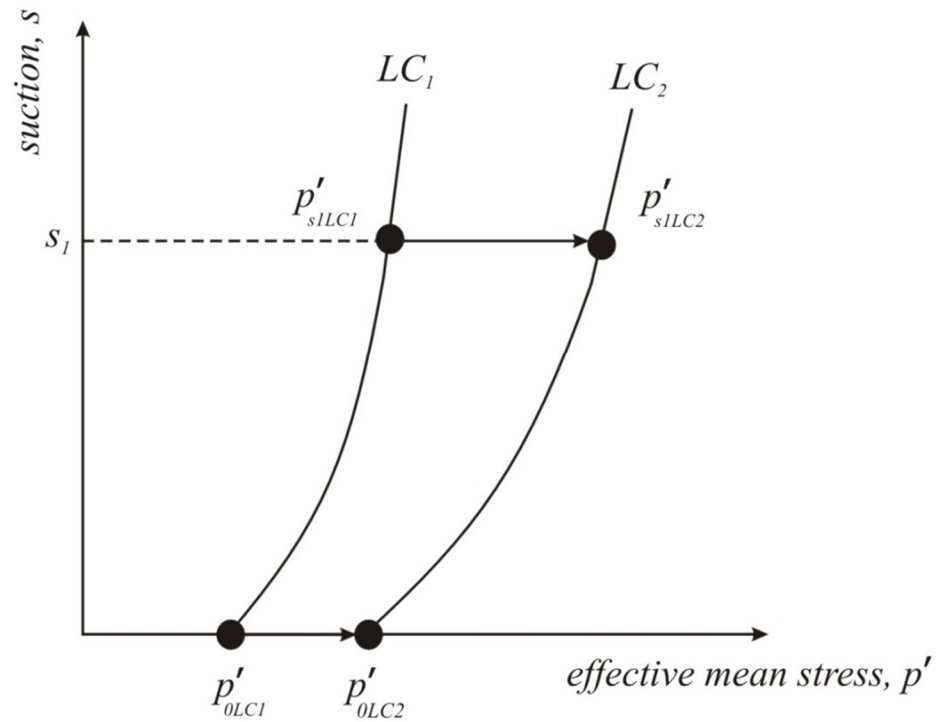
$$p'_{oLCref} = \exp \left(\frac{N_o - N_s + (\lambda_s - \kappa) \ln p'_{max} - \kappa_s \ln \left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}} \right)}{\lambda_o - \kappa} \right) \quad (4.8)$$

ในการหา p'_{oLCref} โดยการใช้สมการที่ 4.8 จะเห็นว่าในเทอมของ N_s และ λ_s ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดึงน้ำนั้น จะต้องทราบค่าเสียก่อน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณหาค่าจากสมการที่ถูกลำเสนอโดย Thu. et. al. ในปี ค.ศ.2007 ดังนี้

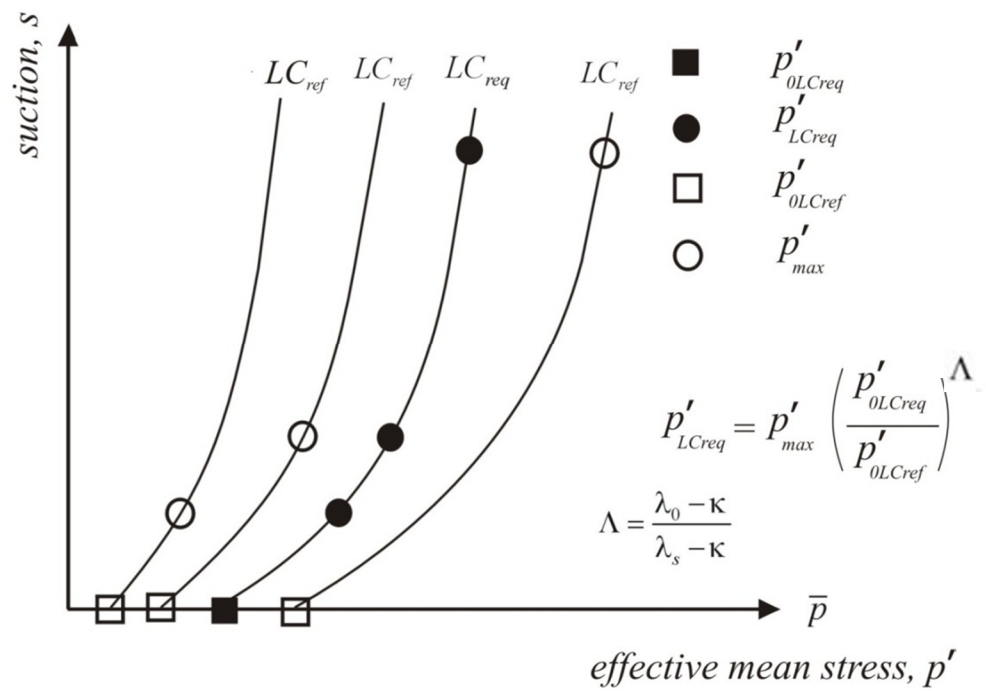
$$\lambda_s = \lambda_o - (1 - S_e) / m_\lambda \quad (4.9)$$

$$N_s = N_o - (1 - S_e) / m_N \quad (4.10)$$

เมื่อ m_λ และ m_N เป็นพารามิเตอร์จำลองที่ไม่เท่ากับศูนย์

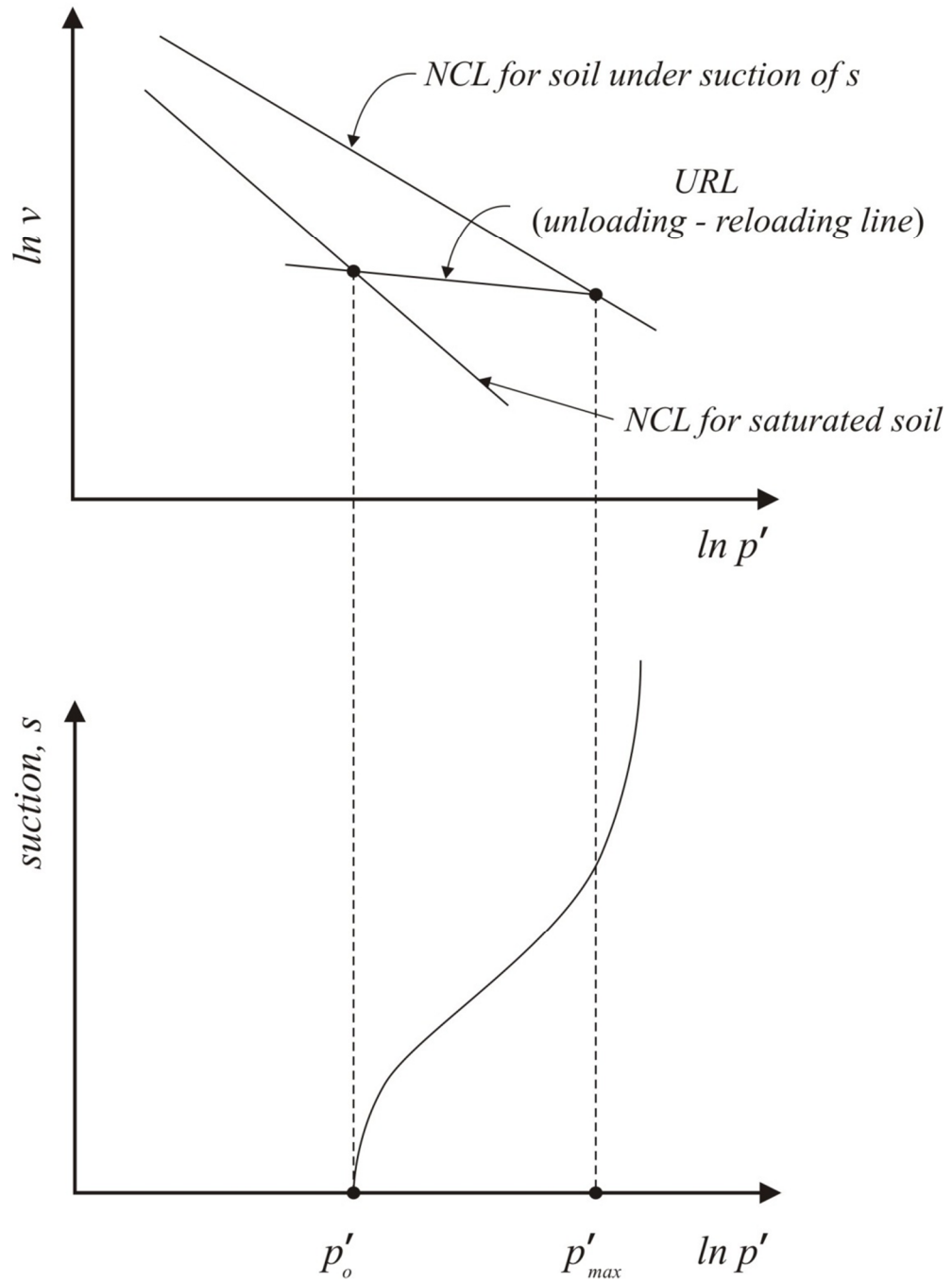


(a)



(b)

รูปที่ 4.2 (a) ภาพร่างแสดงวิวัฒนาการการเปลี่ยนแปลงของ LC curve ระหว่างการเพิ่มแรงภายใต้แรงดึงน้ำคงที่, (b) ภาพร่างแสดงขั้นตอนที่จะได้ มาของ LC_{req}



รูปที่ 4.3 ภาพร่างที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ P'_{oLCref}

บทที่ 5

ยืนยันและสรุปผลการศึกษา

5.1 การตรวจสอบและยืนยันผล

ในงานวิจัยนี้ จะนำผลที่ได้จากการคำนวณของสมการในหัวข้อก่อนหน้า มาทำการตรวจสอบ และยืนยันผล กับผลจากการวัดของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อพิสูจน์ว่าสมการที่ได้มานั้นมีความถูกต้อง โดยใช้ผลการทดสอบที่ถูกลำเสนอไว้ในงานวิจัยของ Uchaipichat & Khalili ในปี ค.ศ.2009 มาใช้ในการตรวจสอบ ซึ่ง Uchaipichat & Khalili (2009) ได้ทำการศึกษาดินตะกอนของเมืองบอร์ก (Bourk silt) ประเทศออสเตรเลีย ที่มีคุณสมบัติเป็นไปดังตารางที่ 5.1 โดยได้มีการเตรียมตัวอย่างแบบบดอัดคงที่ ทางด้านข้าง ที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 15.3 kN/m^3 ปริมาณความชื้นเท่ากับ 10.5% และใช้วิธีการทดสอบโดยเครื่องมือ Modified Bishop-Wesley triaxial cell โดยก่อนการทดสอบ ในแต่ละตัวอย่างจะถูกทำการเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลที่กระทำเท่ากับทุกทิศทาง ต่อตัวอย่างไปที่ 200 kPa และจากนั้นจึงปล่อยแรงให้ลดลงเหลือเพียง 50 kPa โดยจะมีค่าอัตราส่วนการอัดตัวของดินมากกว่าปกติเป็น (OCR) 4 เท่า เพื่อให้ตัวอย่างไม่มีผลกระทบจากการถูกรบกวนเนื่องจากการติดตั้ง และก่อนการทดสอบการอัดตัวเท่ากันทุกทิศทางของแต่ละตัวอย่าง อุณหภูมิของน้ำในเซลล์จะถูกเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่ต้องการที่หน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 50 kPa จากนั้นตัวอย่างจะถูกทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำโดยการเพิ่มแรงดันน้ำย้อนกลับ ซึ่งจะพิจารณาว่าตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ จากค่า B โดยจะต้องมากกว่า 0.95 จึงจะถือว่าตัวอย่างมีความอิ่มตัวแล้วจึงทำการเพิ่มระดับของแรงดึงน้ำในตัวอย่าง เพื่อให้แรงดึงน้ำมีค่าตามที่ต้องการที่เท่ากับ 0 10 100 และ 300 kPa เพื่อใช้ในการทดสอบ สำหรับในการตรวจสอบและยืนยันผลในงานวิจัยนี้ จะใช้เพียงผลจากการทดสอบ การอัดตัวของดินที่อุณหภูมิเท่ากับ 25°C เท่านั้น โดยเส้นโค้งการอัดตัวภายใต้แรงดึงน้ำต่างๆ และเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) จะแสดงในรูปที่ 5.1(a) และ 5.1(b) ตามลำดับ โดยเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) จะได้จากสมการของ Brook & Corey (1968) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จาก ข้อมูลนี้คือ s_{ae} และ n ซึ่งเท่ากับ 18 kPa และ 0.32 ตามลำดับ ดังนั้นแล้วค่า ω จึงเท่ากับ 1.72 สำหรับการหาค่า p'_{\max} ตามเส้นทางด้านข้าง เนื่องจากว่าตัวอย่างถูกทำให้มีการอัดตัวมากกว่าปกติ จึงทำการพิจารณาตามหัวข้อ 3.3.2 ที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นจึงทำการพิจารณาตามเงื่อนไขที่ถูกระบุไว้ระหว่าง $p'_{app, \max}$ และ s_{ae} โดยที่

$p'_{app,max} = 200$ kPa ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดของ s_{ae} ที่เท่ากับ 18 kPa เป็นไปตามเงื่อนไขของ กรณีที่ I ดังนั้นในการหาค่า p'_{max} เมื่อขนาดของ $p_{net} = 50$ kPa สถานะที่เป็นไปได้ของหน่วยแรงนี้จึงเป็นไปได้แค่ 2 สถานะ คือสถานะที่ I.2 ($s_{ae} < s + p_{net} \leq p'_{app,max}$) และสถานะที่ I.3 ($s + p_{net} > p'_{app,max}$) โดยสำหรับสถานะที่ I.2 ขนาดของ p'_{max} จะเป็นไปตามสมการที่ 3.11 นั่นก็คือ

$$p'_{max} = p'_{app,max} = 200 \text{ kPa}$$

สำหรับสถานะที่ I.3 ($s + p_{net} > p'_{app,max}$) ก็จะเป็นไปได้อยู่ 2 สถานะ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดึงน้ำที่กระทำคือ สถานะที่ I.3(a) ($s \geq p'_{app,max}$) และ สถานะที่ I.3(b) ($s_{ae} < s < p'_{app,max}$) แต่ในสถานะที่ (I.3c) ($s \leq s_{ae}$) จะไม่เกิดขึ้นในกรณีนี้เพราะว่าขนาดของ $p'_{app,max} - p'_{max} = 200 - 50 = 150$ kPa ซึ่งจะทำให้ค่าของแรงดึงน้ำที่จะเป็นไปตามเงื่อนไขของสถานะที่ (I.3) ได้นั้นขนาดของแรงดึงน้ำจะมีค่าเกินกว่าขนาดของ s_{ae} กล่าวคือในสถานะที่ (I.3) ขนาดของแรงดึงน้ำจะมีค่าเกินกว่าขนาดของ s_{ae} เสมอ และจากเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ดังกล่าว ในสถานะที่ I.3(a) และ I.3(b) จะจำแนกออกมาได้อีกเป็นสถานะที่ I.3(ai) และ I.3(bi) ตามลำดับ ดังนั้นจึงทำให้สามารถหาค่า p'_{max} ได้จากการใช้สมการที่ 3.12 เมื่อ $p'_{app,max} = 200$ kPa, $p_{net} = 50$ kPa, $s_{ae} = 18$ kPa, $n = 0.32$, $S^* = 0.507$ (ค่าของระดับความอิ่มตัวประสิทธิผลที่ $p'_{app,max} - p'_{max} = 150$ kPa) ซึ่งจะได้ว่า

$$p'_{max} = 85.603 + 22 \times \left(\frac{18}{s}\right)^{-0.262} + s \left(\frac{18}{s}\right)^{0.32}$$

ค่า p'_{max} ตามเส้นทางด้านแห้งจะถูกแสดงโดยใช้เส้นประในรูปที่ 5.2(b) โดยที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ 300 kPa จะได้ว่า $s + p_{net} = 350$ kPa $\geq p'_{app,max} = 200$ kPa, $s = 300$ kPa $\geq p'_{app,max} = 200$ kPa และ $p'_{app,max} - p_{net} = 150$ kPa $> s_{ae} = 18$ kPa ดังนั้นดินจะอยู่ในสถานะที่ I.3(ai) ($p'_{app,max} - p_{net} > s_{ae}$) ขนาดของ p'_{max} ที่แรงดึงน้ำเท่ากับ 300 kPa จะคำนวณได้จากสมการที่ 3.12 ซึ่งจะได้ $p'_{max} = 253.52$ kPa

สำหรับรูปแบบของ N_s และ λ_s กับแรงดึงน้ำ จะได้มาจากการหาค่าบนเส้นโค้งการอัดตัวของดินในรูปที่ 5.1(a) และมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 5.2(a) ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะการอัดตัวของดินจะประกอบไปด้วย N_o , λ_o , κ , κ_s , m_N , และ m_λ จะมีค่าเป็น 0.766, 0.059, 0.004, 0.0013, 12, และ 54 ตามลำดับ ซึ่ง LC curve ที่ต้องการนั้น จะใช้ค่าที่เกิดจากหน่วย

แรงเฉื่อยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{\max}) ที่ระดับแรงดึงน้ำที่ 300 kPa ในการเปลี่ยนค่า p'_{\max} ตามเส้นทางด้านข้างให้กลายเป็น LC curve ที่ต้องการ และสามารถทำได้โดยการคำนวณจากสมการที่ 4.3 จากนั้นหน่วยแรงครากที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับศูนย์ของ LC curve ที่ต้องการ (p'_{oLCreq}) เป็นการคำนวณเบื้องต้นโดยกำหนดให้ p'_{\max} และ s มีค่าเท่ากับ 253.52 kPa และ 300 kPa ตามลำดับ จากนั้นแทนลงใน สมการที่ 4.8 ซึ่งได้ผลดังนี้

$$p'_{oLCreq} = \exp \left(\frac{N_o - N_s + (\lambda_s - \kappa) \ln p'_{\max} - \kappa_s \ln \left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}} \right)}{\lambda_o - \kappa} \right)$$

$$p'_{oLCreq} = \exp \left(\frac{0.766 - 0.717 + (0.048 - 0.004) \ln(253.52) - 0.0013 \ln \left(\frac{300 + 100}{100} \right)}{0.059 - 0.004} \right)$$

และสำหรับหน่วยแรงครากที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับศูนย์ของ LC curve อ้างอิง (p'_{oLCref}) ของระดับแรงดึงน้ำต่างๆ จะใช้การคำนวณ โดยการแทนค่าของเทอม p'_{\max} ที่เขียนได้ดังนี้

$$p'_{\max} = 85.603 + 22 \times \left(\frac{18}{s} \right)^{-0.262} + s \left(\frac{18}{s} \right)^{0.32}$$

ลงไปในสมการที่ 4.8 ซึ่งได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned}
 p'_{oLCref} &= \exp \left(\frac{N_o - N_s + (\lambda_s - \kappa) \ln p'_{\max} - \kappa_s \ln \left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}} \right)}{\lambda_o - \kappa} \right) \\
 &= \exp \left(\frac{0.766 - N_s + (\lambda_s - 0.004) \ln \left(85.603 + 22 \times \left(\frac{18}{s} \right)^{-0.262} + s \times \left(\frac{18}{s} \right)^{0.32} \right) - 0.0013 \ln \left(\frac{s + 100}{100} \right)}{0.059 - 0.004} \right)
 \end{aligned}$$

เมื่อ $\lambda_s = \lambda_o - (1 - S_e) / m_\lambda = 0.059 - (1 - S_e) / 54$

$$N_s = N_o - (1 - S_e) / m_N = 0.766 - (1 - S_e) / 12$$

ต่อมาการหาค่าหน่วยแรงครากสำหรับ LC curve ที่ต้องการ ที่ระดับแรงดึงน้ำใดๆ (p'_{LCreq}) จะทำได้โดยการใช้สมการที่ 4.2 และ LC curve ที่ต้องการนี้ จะแสดงเป็นเส้นทึบในรูปที่ 5.2(b) โดยได้เปรียบเทียบกับผลของการทดสอบที่ถูกเสนอโดย Uchaipichat & Khalili (2009) ซึ่งจะเห็นได้ว่าระหว่างผลของการวัดจากการทดสอบ กับผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ได้กล่าวไปข้างต้นนั้น มีความสอดคล้องตรงกันดีมาก ซึ่งดูได้จากค่า r^2 ที่เท่ากับ 0.966 ตามที่ระบุไว้ในรูปที่ 5.2(b)

5.2 สรุปผลการศึกษา

LC curve เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ บนพื้นฐานของทฤษฎี อิลาสโต - พลาสติก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการในการกำหนด สภาวะเริ่มต้นของ LC curve ของดินที่ไม่มีพันธะเชื่อมแน่นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการเพิ่มแรงดึงน้ำจากที่สภาวะอิ่มตัวและมีสถานะของการอัดตัวคายน้ำแบบปกติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นด้วยการพูดถึงการพิจารณาปริมาตรของโพรงในดิน เพื่อใช้คำนวณหาหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย สำหรับดินเม็ดหยาบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ต่อจากนั้นใช้การพิจารณาปริมาตร โพรงในดินอีก เพื่อขยายความเพิ่มเติมถึง

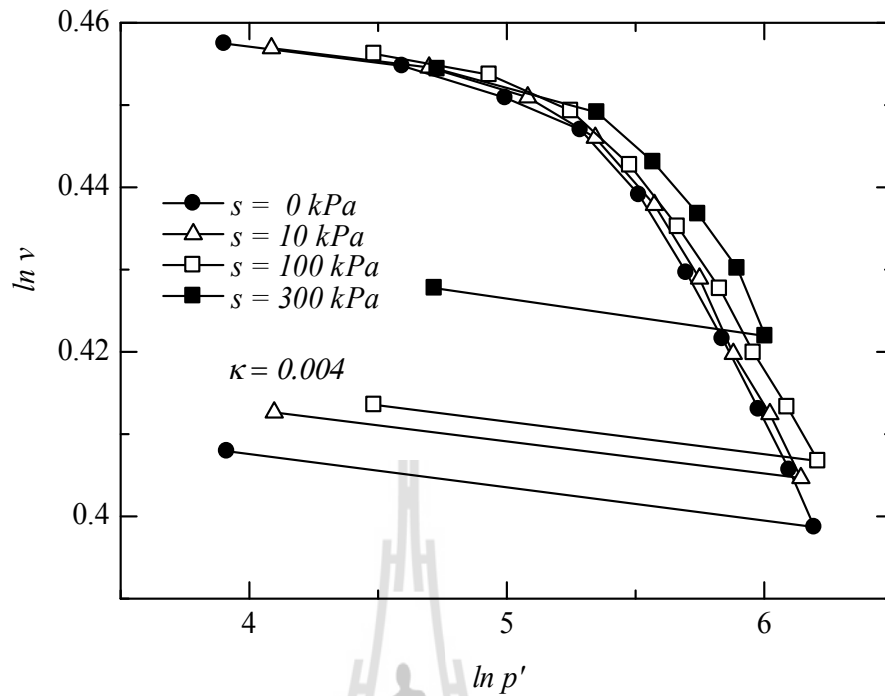
การแสดงวิธีทางคณิตศาสตร์ที่มาได้มาซึ่งหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) โดยพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากแรงดึงน้ำในส่วนเปียกเท่านั้น

เนื่องจากเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่าง LC curve และพื้นผิวครากจากการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ (SI yield surface) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวครากจากการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ (SI yield surface) ในระหว่างกระบวนการเริ่มต้นของการเพิ่มแรงดึงน้ำ ค่าหน่วยแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ดินเคยได้รับ (p'_{max}) ที่คำนวณได้ตามเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (WRC) จะมีประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้ค่า p'_{max} ที่คำนวณได้ตาม WRC จึงไม่ใช่หน่วยแรงครากบน LC curve เส้นเดียวกัน เพราะฉะนั้น คุณลักษณะการอัดตัวและพฤติกรรมการแข่งขันด้วยความเครียด (strain hardening) จึงได้มีการนำ hardening rule มาใช้ เพื่อแปลงค่าที่คำนวณได้ของ p'_{max} สำหรับประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ เป็นค่า p'_{max} สำหรับประวัติการรับน้ำหนักบรรทุกที่แน่นอน และต่อมา LC curve ที่เฉพาะ จะถูกสร้างขึ้นตามการแปลงค่า p'_{max} ซึ่งการตรวจสอบและยืนยันผลระหว่างผลของการวัดจากการทดสอบดินตะกอนเมืองบอร์ค ที่ถูกเสนอ โดย Uchaipichat & Khalili (2009) กับผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการนั้น คูได้จากรูปภาพที่ 5.2(b) โดยที่แรงดึงน้ำเท่านั้น จะมีค่า LC curve จากผลของการทดสอบมีความใกล้เคียงกับเส้นที่บ่งชี้ที่ได้มาจากสมการที่ได้เสนอมาก เส้นแนวโน้มที่ได้จะคูมีความสอดคล้องกัน ซึ่งมีค่า r^2 เท่ากับ 0.9663

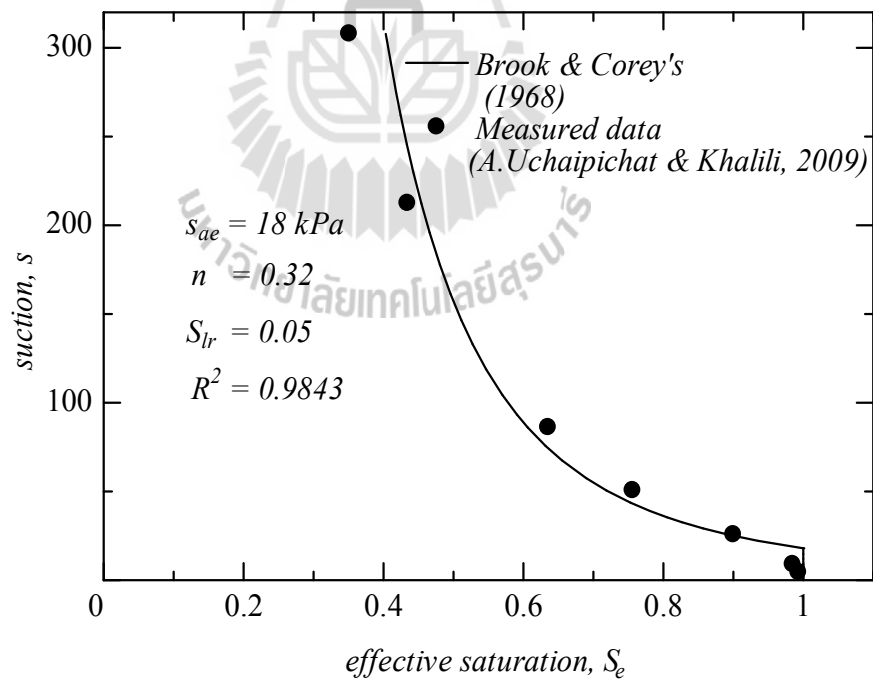
ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของดินตะกอน เมืองบอร์ค (A. Uchaipichat & Khalili, 2009)

คุณสมบัติ	ค่า
ขีดจำกัดเหลว: %	20.5
ขีดจำกัดพลาสติก: %	14.5
ความถ่วงจำเพาะ	2.65
หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด: * kN/m ³	18.8
ความชื้นเหมาะสม: * %	12.5

* ได้จากการทดสอบแบบ standard Proctor

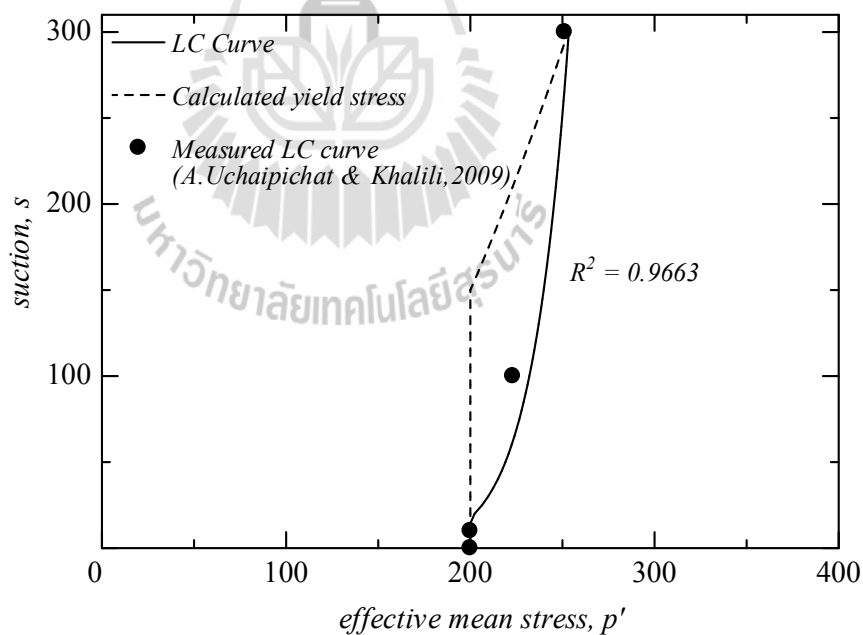
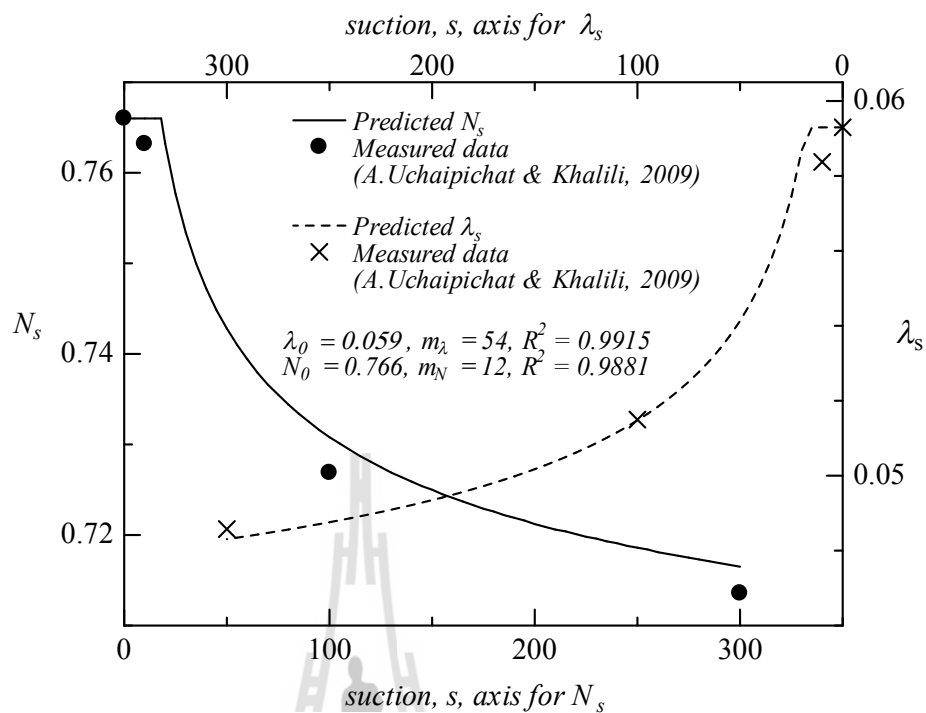


(a)



(b)

รูปที่ 5.1(a) เส้นโค้งการอัดตัวของดิน, 5.1(b) เส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน
(A. Uchaipichat & Khalili, 2009)



รูปที่ 5.2 (a) รูปแบบของ N_s และ λ_s กับแรงดึงน้ำ จากการหาค่าบนเส้นโค้งการอัดตัวของดิน

(b) LC curves ที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดจากการทดสอบของ

A. Uchaipichat & Khalili (2009)

รายการอ้างอิง

- Alonso, E.E., Gens, A., and Josa, A. (1990). **A constitutive model for partially saturated soils.** Geotechnique, 40, 405 – 430.
- Alonso, E.E., Pereira, J.-M., Vaunat, J., and Olivella, S. (2010). **A microstructurally based effective stress for unsaturated soils.** Geotechnique, 60, 913-925.
- Bishop, A.W. (1959). **The principle of effective stress.** Teknisk Ukeblad, 106, 859 – 863.
- Bishop, A.W., and Henkel, D.J. (1962). **The measurement of soil properties in the triaxial test.** London: Edward Arnold.
- Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). **Hydraulic properties of porous media affecting fluid flow.** Proc. ASCE J. Irrig. Drain. Div. 92:61-88.
- Butterfield, R. (1979). **A natural compression law for soils (an advance on e -log p '),** Geotechnique, 29, 469-480.
- Cui, Y. J., Yahia-Aissa, M, Delage, and P. (2002). **A model for volume change behavior of heavily compacted swelling clay.** Engineering Geology, 64, 233 – 250.
- Farias, M.M., Pinheiro, M., and Cordao Neto, M.P. (2006). **An elastoplastic model for unsaturated soils under general three-dimensional conditions.** Soils and Foundations., 46, 613-628.
- Gallipoli, D., Wheeler, S.J., and Karstunen, M. (2003). **Modeling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil.** Geotechnique, 53, 105 – 112.
- Geiser, F., Laloui, L., and Vulliet, L. (2006). **Elasto-plasticity of unsaturated soils: Laboratory test result on a remoulded silt.** Soils and Foundations., 46, 545-556.
- Gens, A., and Alonso, E.E. (1992). **A framework for the behavior of unsaturated expansive clays.** Can. Geotech. J., 29, 1013-1032.
- Hvorslev, M.J. (1937). **Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden. (On the physical properties of undisturbed cohesive soils).** Ingeniorvidenskabelige Skrifter, A, No. 45, Copenhagen. English translation (1969), US Waterways Experiment Station.

- Khalili, N., and Loret, B. (2001). **An elasto-plastic model for nonisothermal analysis of flow and deformation in unsaturated soils: Formulation.** *Int. J. Solids. Struct.*, 38, 8305-8330.
- Khalili, N., Geiser, F., and Blight, G. E. (2004). **Effective stress in unsaturated soils: review with new evidence.** *Int. J. Geomech.*, 4(2), 115-112.
- Loret, B. and Khalili, N. (2002). **An effective stress elastic–plastic model for unsaturated porous media.** *Mechanics of Materials*, 34, 97 – 116.
- Masin, D. (2010). **Predicting the dependency of a degree of saturation on void ratio and suction using effective stress principle for unsaturated soils.** *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 34, 73-90.
- Nuth, M., and Laloui, L. (2008). **Effective stress concept in unsaturated soils: clarification and validation of a unified framework.** *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 32, 771-801.
- Sheng D, Fredlund DG, and Gens A. (2008). **A new modeling approach for unsaturated soils using independent stress variables.** *Can. Geotech. J.*, 45, 511 – 534.
- 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, 1079-1098.
- Thu, T.M., Rahardjo, H., and Leong, E.C. (2007). **Elastoplastic model for unsaturated soil with incorporation of the soil-water characteristic curve.** *Can. Geotech. J.*, 44, 67-77.
- Uchaipichat, A. and Khalili, N. (2009). **Experimental investigation of thermo-hydro mechanical behaviour of an unsaturated silt.** *Geotechnique*, 59, 339 – 353.
- Wheeler, S.J., and Sivakumar, V. (1995). **An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil.** *Geotechnique*, 45, 35 – 53.
- Wheeler, S.J., Sharma, R.S., and Buisson, M.S.R. (2003). **Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behavior in unsaturated soils.** *Geotechnique*, 53, 41 – 54.
- Zhang, X. and Li, L. (2011). **Limitations in the constitutive modeling of unsaturated soils and solutions.** *ASCE International Journal of Geomechanics*, 11, 174-185.

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- A. Chinkulkijniwat, S. Yubolchit & T. Rakkop (2014). **Determination of Effective Stress in Unsaturated Soil using Pore Structure**. International Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development (ACESD). Volume2, PP. 671-674.



Determination of Effective Stress in Unsaturated Soil using Pore Structure

A. Chinkulkijniwat, S. Yubolchit & T. Rakkop
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

ABSTRACT: This paper presents a rational method to derive an expression for effective stress of an unsaturated cohesionless soil. The derivation of an expression for the effective mean stress of an unsaturated soil is achieved by considering its pore volumes and the corresponding air entry suctions. The effective stress parameter χ , which is strongly related to the soil structure, is derived and compared with the widely accepted expression. The comparison confirms that the consideration of pore volume and the corresponding air entry suction can be further utilized for approximation of the maximum pass pressure in the unsaturated cohesionless soil.

1 INTRODUCTION

Unsaturated soils are widely found in nature and are the basis for several geotechnical aspects in current engineering practices. A mathematical model that can describe the load-deformation behavior of unsaturated granular soil has become essential to the field. Proper stress variable is one important factor to characterize the mechanical behavior of a soil. Terzaghi (1936) introduced the effective stress to explain mechanical behavior of a saturated soil. In unsaturated soil, the effective stress was proposed to explain the mechanical behaviors of an unsaturated soil (Bishop, 1965). The expression is a function of the externally applied stresses and the internal fluid pressures and it can be expressed as $p' = p_{net} + \chi s$ where p_{net} is net mean stress which is the difference between the applied stress and the pore-air, s is the matric suction, and χ is the effective stress parameter attaining a value of unity for a saturated soils and zero for a dry soils. The effective stress converts a multi-phase, multi porous media to a mechanically equivalent, single-phase and single-stress state continuum (Uchaipichat, 2005).

One limitation of the effective stress concept, which is often cited in the literature, is that there are no unique relationships between χ and some basic soil properties such as the degree of saturation, S_r . However, as commented by Coleman (1962), χ is a parameter strongly related to the soil structure, and therefore one should not be surprised if a correlation is found between χ and a volumetric parameter such as the degree of saturation, S_r . This paper derives an expression for χ for cohesionless soil. The derivation

concept can be further used to determine maximum pass pressure for the unsaturated soil subjected to suction increment.

2 EFFECTIVE STRESS

Previous studies, such as those by Tarantino & Tombolato (2005), Tarantino (2006) and Alonso et al. (2010), have suggested that the effective stress in an unsaturated soil should be related to its pore structure. Additionally, pores can be grouped into two categories: large open pores and extremely small pores (micro-pores), and only water from the large open pores is primarily linked to capillary effects. Figure 1 presents a variation of pore water at various magnitudes of applied suction. A soil consists of several pores of various sizes, of which the pores labelled p_1 are the largest pores. $s_{ac}^{p_1}$ is the highest suction at which the pores p_1 remain filled with water. Hence, $s_{ac}^{p_1}$ is also the soil air entry suction (s_{ac}). Pores p_2 and p_3 are the second and third largest pores in the soil, respectively, and pore p_i is the i^{th} largest pore. $s_{ac}^{p_i}$ is the air entry suction of pore p_i . When the magnitude of the applied suction is less than $s_{ac}^{p_i}$, all pores that are smaller than pore p_i are filled with water. Once the magnitude of the applied suction exceeds $s_{ac}^{p_i}$, water is expelled from pore p_i . The retained water is in the form of pore water and inter-particle water bridges. The pore water is water retained in pores that are categorized as (1) large open pores with sizes smaller than that of pore p_1 and (2) small pores (p_m), which are always filled with water for any magnitude of applied suction.

This retained water is further referred to as the wet portion, and suction affects the effective stresses of a soil through only the wet portion.

An initially saturated soil subjected to a suction increase under zero mean stress (i.e., no external force) is considered. When the magnitude of applied suction (s) is less than $s_{ae}^{p_1}$ ($s < s_{ae}^{p_1}$), all pores remain filled with water. The effective mean stress (p') at this suction value is equal to the magnitude of the applied suction. When $s_{ae}^{p_1} \leq s < s_{ae}^{p_2}$, water is expelled from pore p_1 . By considering that only large open pores play a role in the capillary effect and assuming that due to suction, p' is calculated by weighting the magnitude of the suction occurring in the large open wet pores with their volume fraction, p' at $s_{ae}^{p_1} \leq s < s_{ae}^{p_2}$ can be obtained as follows:

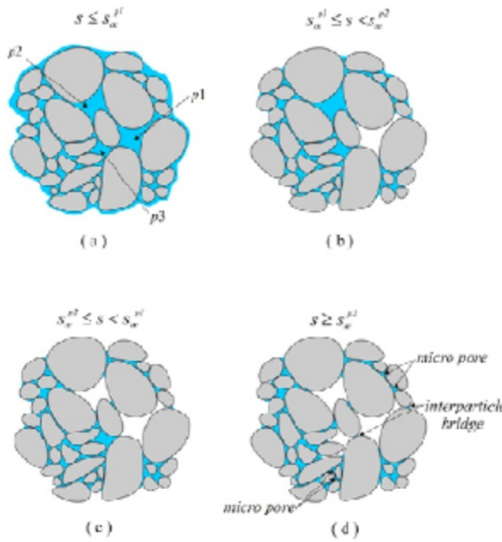


Figure 1. Development of pore water in soil at various magnitudes of suction.

$$p' = \left[\frac{(v_{pt} - v_{pm}) - v_{p_1}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s = \left[\frac{(v_{pt} - v_{p_1}) - v_{pm}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s \quad (1)$$

Accordingly, when $s_{ae}^{p_1} \leq s < s_{ae}^{p_{i+1}}$, water is expelled from pores larger than pores p_i . At this suction value, p' can be expressed as follows:

$$p' = \left[\frac{(v_{pt} - \sum_{\alpha=1}^i v_{p_\alpha}) - v_{pm}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s = \left[\frac{(v_{pt} - v_{pm}) - \sum_{\alpha=1}^i v_{p_\alpha}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s \quad (2)$$

where v_{pt} is the total soil pore volume; v_{pm} is the total volume of the small pores; $v_{pt} - v_{pm}$ is the volume of the large open pores; and v_{p_α} is the volume of the α^{th} pores, in which the water is expelled from the pores due to applied suction. Eq. 2 can be rear-

ranged by multiplying both the numerator and the denominator in its right side by the term $1/v_{pt}$, which gives

$$p' = \left[\frac{(v_{pt} - \sum_{\alpha=1}^i v_{p_\alpha}) - v_{pm}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \left[\frac{v_{pt} - v_{pm}}{v_{pt} - v_{pm}} \right] \times s = \frac{S_l - S_r}{1 - S_r} \times s = S_e s \quad (3)$$

where S_l is the degree of liquid saturation; S_r is the residual liquid saturation; and S_e is the effective liquid saturation.

Now, let us consider a saturated soil subjected to a net mean stress of p_{net} kPa and subsequently brought to a suction of s under this constant net mean stress. Consider that the magnitude of the effective mean stress occurring at a certain wet pore is equal to the summation of the magnitude of applied suction and the magnitude of the net mean stress occurring at the pore, i.e., $p'_p = p_{net,p} + s_p$, where p'_p , $p_{net,p}$, and s_p are the effective mean stress, net mean stress, and suction occurring at a certain wet pore, respectively. Furthermore, it is assumed that p_{net} affects every pore regardless of its state (dry or wet). Consequently, p' of a saturated granular soil brought to a suction of s under a constant net mean stress of p_{net} kPa can be obtained as follows:

$$p' = p_{net} + S_e s \quad (4)$$

An expression of p' in Eq. 4 is Bishop's [2] effective stress ($p' = p_{net} + \chi s$) with $\chi = S_e$. The parameter χ is strongly related to the soil structure [4]. To cope with the complexity of the soil structure, a factor ω is introduced into the pore volume-related terms in Eqs. 1, 2, and 3, i.e., Eq. 1 is written as $p' = \left\{ \frac{(v_{pt} - v_{p_1}) - v_{pm}}{v_{pt} - v_{pm}} \right\}^\omega \times s$. Hence, an expression for the effective stress in unsaturated soil can be rewritten as follows:

$$p' = p_{net} + S_e^\omega s \quad (5)$$

where ω is a correction factor linked to the pore structure of the soil. Moreover, because the contribution of inter-particle water bridges is not included in the calculation for effective stress in Eqs. 3 and 4, the parameter ω also corresponds to the influence of inter-particle water bridges.

Khalili et al. (2004) suggested that χ can be expressed as a function of suction ratio, which is defined as the ratio of matric suction over air entry suction, as follows:

$$\chi = \begin{cases} 1 & s < s_{ae} \\ (s_{ae}/s)^{0.55} & s \geq s_{ae} \end{cases} \quad (6)$$

The effective saturation (S_e) can be related to the suction using the relationship proposed by Brook and Corey (Brook and Corey, 1964) as follows:

$$S_e = \frac{S_l - S_b}{1 - S_b} = \begin{cases} 1 & \text{for } s \leq s_{ac} \\ (s_{ac}/s)^n & \text{for } s > s_{ac} \end{cases} \quad (7)$$

where n is the model parameter relating to the pore size distribution and S_b is the residual degree of saturation. Accordingly, the correction factor ω in Eq. 5 is equal to a ratio of 0.55 over n , which is the same value proposed by Masin (2010).

3 CONCLUSION

The expression of the effective stress in an unsaturated cohesionless soil was derived and discussed. The derivation is based on a consideration of the pore's volumes in the soil. The expression is in accordance with the widely accepted expression [2,8]. This consideration of pore volume can be further used to estimate the maximum pass pressure for unsaturated soil subjected to certain magnitude of suction.

PREFERENCES

- Alonso, E.E., Pereira, J.M., Vaunat, J. and Olivella, S. 2010. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils. *Geotechnique* 60: 913-925.
- Bishop, A.W. 1965. The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad* 106: 859-863.
- Coleman, J. D. 1962. Stress-Strain relations for partly saturated soils, *Geotechnique* 12(4): 348-350.
- Khalili, N., Geiser, F., and Blight, G.E. 2004. Effective stress in unsaturated soils: review with new evidence. *Int. J. Geomech.* 4(2): 115-112.
- Masin, D. 2010. Predicting the dependency of a degree of saturation on void ratio and suction using effective stress principle for unsaturated soils. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 34: 73-90.
- Tarantino, A. and Tombolato, S. 2005. Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay. *Géotechnique* 55(4): 307-317.
- Tarantino, A. 2007. A possible critical state framework for unsaturated compacted soils. *Géotechnique* 57(4): 385-389.
- Terzaghi, K. 1936. The shear resistance of saturated soils, *Proceedings of 1st International Conference of SMFE*: 54-56.
- Uchaipichat A. 2005. Experimental Investigation and Constitutive Modelling of Thermo- Hydro-Mechanical Coupling in Unsaturated Soils. Ph.D. thesis, University of New South Wales, Sydney.

ประวัติผู้เขียน

นายชนากรณ์ รักคบ เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดสี่สุท ขะตงอมทอง จังหวัดกรุงเทพมหานคร จากนั้นสำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และตอนปลายจากโรงเรียนทิวาภิเศก 2 เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร และได้เข้ามาศึกษาในระดับปริญญาตรี ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างทำการศึกษาอยู่นั้น ได้ไปสหกิจศึกษาที่บริษัท สุภาลัย จำกัด (มหาชน) เป็นระยะเวลา 4 เดือน และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2554 ต่อมาได้ทำการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งจากศึกษาที่ผ่านมาผู้ทำการวิจัยได้นำความรู้ มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี

ผลงานวิจัย : **Determination of Effective Stress in Unsaturated Soil using Pore Structure.** International Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development (ACESD), Volume2, PP.671-674. Suranaree University of Technology 27-29 August 2014.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี