



รายงานการวิจัย

การพัฒนาสมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับทำนายพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก
ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

**Development of Constitutive Equation for Predicting Load Deformation
Behavior in Unsaturated Soils**

ได้รับทุนอุดหนุนจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาสมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับทำนายพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก
ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

**Development of Constitutive Equation for Predicting Load Deformation
Behavior in Unsaturated Soils**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว

กันยายน 2556

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| สารบัญ..... | ค |
| 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 2 บริบทศัณวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 แรงดึงน้ำในดิน..... | 4 |
| 2.2 ตัวแปรหน่วยแรงของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ..... | 6 |
| 2.3 เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว..... | 11 |
| 3 วิธีดำเนินงานวิจัย | 18 |
| 3.1 บทนำ..... | 17 |
| 3.2 ข้อมูลการอัดตัวของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ..... | 17 |
| 3.3 สรุปผลการทดสอบของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ..... | 28 |
| 3.4 เส้นโค้งการอัดตัวของดิน..... | 33 |
| 3.4.1 รูปแบบเส้นโค้งการอัดตัวของดินบนระนาบ $\ln-\ln$ | 33 |
| 3.4.2 การเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นโค้งการอัดตัวปกติของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ..... | 33 |
| 3.4.3 ความชันของเส้นการอัดตัวปกติที่ระดับอัตราส่วนหน่วยแรงต่างๆ..... | 36 |
| 3.4.4 ความชันของเส้นการพังตัว | 37 |
| 4 พื้นผิวครากสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ | 41 |
| 4.1 บทนำ..... | 41 |
| 4.2 พื้นผิวครากเริ่มต้น..... | 41 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3 | ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและแรงดึงน้ำ..... | 52 |
| 4.4 | พื้นผิวครากต่อเนื่อง..... | 55 |
| 4.4.1 | พื้นผิวครากสำหรับเพิ่มหน่วยแรงสุทธิภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่..... | 55 |
| 4.4.2 | พื้นผิวครากสำหรับการพังตัวภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่..... | 56 |
| 4.5 | ตัวอย่างการคำนวณ..... | 59 |
| 5 | บทสรุป..... | 68 |
| | รายการอ้างอิง..... | 69 |



บทคัดย่อ

การทำนายพฤติกรรมการเสีรูปของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการนิยามพื้นผิวครากของดินบนระนาบของหน่วยแรงสุทธิต่อแรงดึงน้ำ (LC curve) โดยใช้การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินในโพรงขนาดต่างๆ ร่วมกับ ทฤษฎี อีลาสโต-พลาสติก โดยเริ่มจากนิยามสถานะเริ่มต้นของพื้นผิวคราก และใช้ทฤษฎี อีลาสโต-พลาสติก สำหรับนิยามพื้นผิวครากต่อเนื่อง ประกอบด้วย พื้นผิวครากที่สัมพันธ์กับการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิต่อแรงดึงน้ำคงที่ และการลดแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ แบบจำลองที่เสนอสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ทั้งรูปแบบการการเพิ่มความแกร่งของดินตามขนาดแรงดึงน้ำที่เพิ่มขึ้น และการลดพังตัวเมื่อเปียกที่ลดลงตามขนาดหน่วยแรงสุทธิ



ABSTRACT

The model is initiated by defining an initial yield surface on net pressure-suction plane (LC curve) by considering change of liquid saturation at every pore of soil skeleton. As such, the initial LC curve is derived by mathematic manipulating with the SWCC. After getting the initial LC curve, a set of subsequent LC curves are further defined based on equality of the plastic volumetric strains between any two stress paths travelling along the same yield surfaces. The subsequent LC curves were categorized to two sets depending on whether the net stress is increasing under constant suction or the suction is decreasing under constant net stress. The proposed model can predict stress strain relationship either the stiffness increases with suction or a magnitude of collapse decreases with net pressure.



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่ง เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะทางธรรมชาติที่แตกต่างกันจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถจำแนกตามสถานะได้เป็นสองชนิดด้วยกันคือ ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) และดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) พฤติกรรมทางกลต่างๆของดินเหล่านี้สามารถทำนายด้วยแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดิน (Constitutive soil model) สำหรับในดินอิ่มตัวด้วยน้ำแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างเป็นระบบนับตั้งแต่ Roscoe and Burland (1968) ได้เสนอ CAM clay Model ซึ่งมีพื้นฐานจากสมมติฐานที่ว่าพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการเสียรูปของดินเหนียว มาจากการเอาชนะความเสียดทานของดิน หลังจาก CAM clay model ได้มีการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดมาอีกมากมาย เช่น สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เป็นที่ทราบกันดีว่าในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดึงน้ำ (Suction, $u_a - u_w$) จะมีส่วนสำคัญต่อพฤติกรรมของดิน แต่ยังไม่มีการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1990 Alonso et al. ได้เสนอแบบจำลองซึ่งต่อมารู้จักกันในชื่อ Barcelona Basic Model (BBM) ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวใช้สองตัวแปรหน่วยแรง (Two stress variables) ได้แก่ หน่วยแรงสุทธิ (Net stress, $\sigma - u_a$) และแรงดึงน้ำในการอธิบายพฤติกรรมของดิน หลังจากงานวิจัยดังกล่าวได้รับการเผยแพร่ ได้มีการเสนอแบบจำลองสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้นอีกหลายแบบจำลอง เช่น Wheeler et al.(1995); Gallipoli et al.(2003); Sheng et al. (2008); Sun et al. (2000, 2003, 2007a) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นก่อนนี้ ยังมีความหลากหลายอย่างมากทั้งในมุมมองของประเภทตัวแปรหน่วยแรงที่ใช้ซึ่งแยกออกเป็นแบบจำลองที่ใช้ตัวแปรหน่วยแรงเดียว (Single stress variable) และแบบจำลองซึ่งใช้สองตัวแปรหน่วยแรงอีกทั้งแบบจำลองเหล่านี้ได้ถูกนำเสนอมาจากรูปแบบการอัดตัวของดิน (Compression curve) ที่เฉพาะเท่านั้น แต่จากผลทดสอบที่รวบรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมาและส่วนมากเป็นผลทดสอบการอัดตัวที่ใช้สองตัวแปรหน่วยแรงในการอธิบายพฤติกรรมของดิน พบว่ามีความขัดแย้งกันเองบางประการ กล่าวคือ ผลวิจัยกลุ่มแรกเป็นผลทดสอบการอัดตัวของดินภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่ใด ๆ จะแสดงค่าความชันของเส้นโค้งการอัดตัวในช่วงการอัดตัวปกติ (Normal compression curve, λ^s) ลดลงตามแรงดึงน้ำที่

เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลวิจัยกลุ่มที่สอง ค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติจะลดลงตามการเพิ่มของแรงดึงน้ำ

สำหรับผลทดสอบกลุ่มแรก การลดลงของค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติเมื่อระดับแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่า ความแกร่งของดิน (Stiffness) จะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลดินแห้งขึ้นซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของดินตามธรรมชาติ แต่การลดลงของค่าความชันนี้จะทำให้เกิดรูปแบบที่ผายออกจากกันของเส้นการอัดตัวปกติของดินสองสถานะ ซึ่งจากรูปแบบนี้เอง เมื่อมวลดินมีความชื้นเพิ่มขึ้นจากเส้นสถานะไม่อิ่มตัวไปยังสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่จะทำให้เกิดการพังตัว (Collapse) ขึ้น และระดับการพังตัวนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นซึ่งขัดแย้งกับพฤติกรรมที่แท้จริงของดิน กล่าวคือ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นระดับการพังตัวของดินจะต้องมีค่าลดลง และในทางตรงกันข้าม รูปแบบการอัดตัวของดินจากผลทดสอบกลุ่มที่สองสามารถใช้อธิบายถึงระดับการพังตัวที่ลดลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากการลู่เข้าหากันของเส้นการอัดตัวปกติของดินทั้งสองสถานะ แต่ในขณะเดียวกันก็ยังไม่สามารถใช้อธิบายถึงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของความแกร่งเมื่อมวลดินแห้งขึ้นได้

จากพฤติกรรมการอัดตัวของดินที่ตรงข้ามกันของผลทดสอบสองกลุ่มทำให้เกิดข้อสงสัยว่ารูปแบบการอัดตัวที่แท้จริงของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นอย่างไร และผ่านมายังไม่มีแบบจำลองใดที่อธิบายพฤติกรรมนี้ได้อย่างชัดเจน ดังนั้น เพื่อขจัดข้อสงสัยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและเสนอแบบจำลองที่ใช้สองตัวแปรหน่วยแรงเพื่อนำไปอธิบายพฤติกรรมการอัดตัวที่สอดคล้องกับผลทดสอบที่รวบรวมจากงานวิจัยผ่านมาและพฤติกรรมจริงของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่สามารถอธิบายได้ทั้ง การเพิ่มความแกร่งของดินตามขนาดของแรงดึงน้ำ และการลดลงของขนาดการพังตัวเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 รวบรวมผลทดสอบการอัดตัวของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 รวบรวมเฉพาะผลทดสอบการอัดตัวของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ทดสอบภายใต้แนวคิดสองตัวแปรหน่วยแรง

1.3.3 เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ภายใต้กรอบของแบบจำลองอีลาสโต – พลาสติก (Elasto-Plastic model) โดยใช้สองตัวแปรหน่วยแรง

บทที่ 2

ปริมาตรน้ำในดิน

2.1 แรงดึงน้ำในดิน

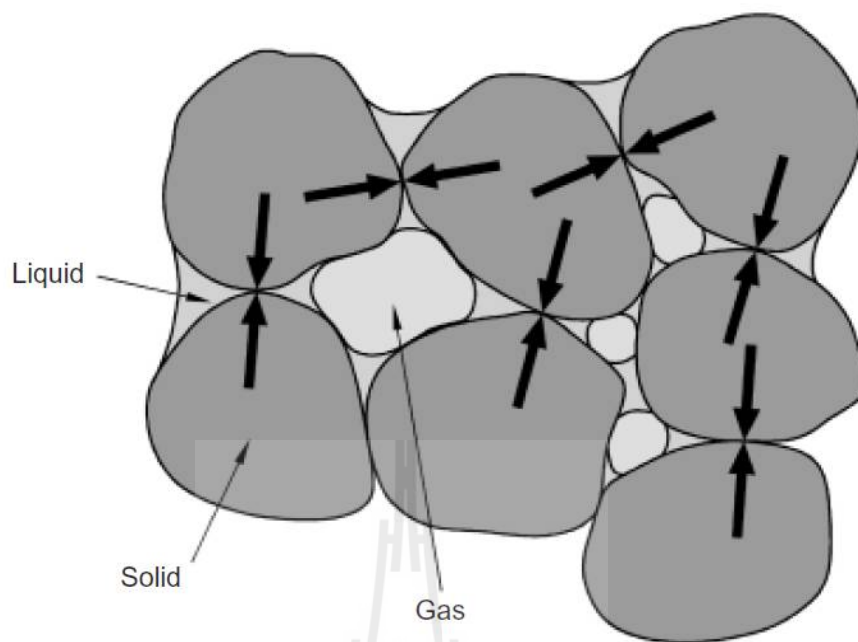
ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะมีองค์ประกอบในมวลดินสามส่วน ได้แก่ ของแข็ง (เม็ดดิน) ของเหลว (น้ำ) และก๊าซ (อากาศ) รูปที่ 2.1 แสดงโพรงอากาศเกิดขึ้นในช่องว่างเม็ดดิน ซึ่งโพรงอากาศเหล่านี้ส่งผลทำให้ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีพฤติกรรมแตกต่างจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างชัดเจน กล่าวคือ ในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โพรงอากาศจะแทรกอยู่ในช่องว่างเม็ดดินจะทำให้เกิดการดึงระหว่างเม็ดดินขึ้น ซึ่งแรงที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า แรงดึงน้ำ (Suction)

แรงดึงน้ำในมวลดินเป็นแรงที่มีความสำคัญที่ทำให้พฤติกรรมทางกลแตกต่างไปจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำ Aitchison (1965) ได้อธิบายถึงแรงดึงน้ำว่าประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ และสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.1

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

| | | |
|--------|-------|--|
| โดยที่ | s_t | เป็นแรงดึงน้ำรวม (Total suction) |
| | s | เป็นแรงดึงน้ำแบบเมตริก (Matric suction) |
| | s_0 | เป็นแรงดึงน้ำแบบออสโมติก (Osmotic suction) |

ทั้งนี้แรงดึงน้ำแบบเมตริกเป็นแรงดึงน้ำที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์คาพิลลารี (Capillary phenomena) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แรงตึงผิวของน้ำทำให้น้ำเกิดการโค้งเว้า (Menisci water) เข้าหากัน ณ จุดเชื่อมต่อระหว่างเม็ดดินสองอนุภาค และเกิดเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเม็ดดินขึ้น รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงส่วนโค้งเว้าของน้ำระหว่างเม็ดทรายสองอนุภาค (Gili, 1988) ซึ่งแรงดึงน้ำแบบเมตริกนี้เกิดขึ้นจากความแตกต่างระหว่างความดันน้ำของความดันอากาศ (Air pressure) ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ($s = u_a - u_w$) ในขณะที่ Mitchell (1991) ได้อธิบายแรงดึงน้ำแบบออสโมติกว่าเป็นแรงดึงน้ำที่เกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งมีการดูดผ่านช่องเล็ก ๆ ของตัวกลาง (Semi-permeable membrane) และจะเกิดขึ้นกับดินเหนียวที่มีความไวตัว (Active clays) เนื่องจากดินเหนียวมีโพรงขนาดเล็กและมีประจุลบ



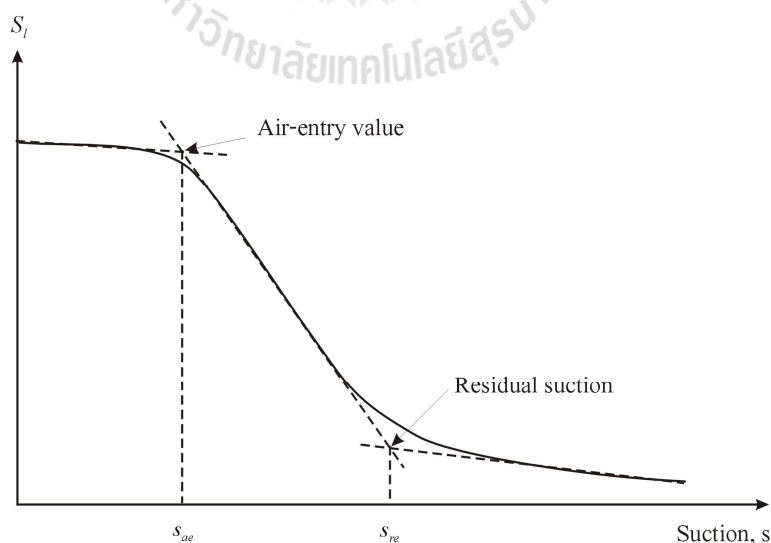
รูปที่ 2.1 ภาพร่างองค์ประกอบในมวลดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Gens A, 2010)



รูปที่ 2.2 ส่วนโค้งเว้าของน้ำระหว่างทรายสองอนุภาค (Gili, 1988)

ล้อมรอบแผ่นดินเหนียว เมื่อสารละลายที่มีประจุบวกแทรกระหว่างช่องว่างของแผ่นดินเหนียวจะเกิดการดึงประจุบวกเข้าหาตัวเองซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น และในบางกรณีดินเหนียวจะแสดงพฤติกรรมเป็นตัวกลางในการดูดผ่านเอง โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเข้าหาบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงกว่า โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดเป็นแรงดึงแบบออสโมติก แต่สำหรับดินที่มีความไวตัวต่ำ ปรากฏการณ์ออสโมติกจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางกลของดิน ดังนั้น โดยทั่วไปจึงพิจารณาเฉพาะแรงดึงน้ำแบบเมตริกเท่านั้น ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า แรงดึงน้ำ (Suction)

แรงดึงน้ำจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (Water content, w) หรือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในมวลดิน (Degree of saturation, S_r) โดยขนาดของแรงดึงน้ำจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณความชื้นที่ลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเป็นเส้นโค้งได้ และเรียกเส้นโค้งความสัมพันธ์ดังกล่าวว่า เส้นแสดงคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Soil-water characteristic curve, SWCC) รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่าง SWCC ของดิน เมื่อระดับแรงดึงน้ำมีค่าไม่เกินระดับแรงดึงที่จุดอากาศเข้า (Air entry value, s_{ae}) ความชื้นในดินจะมีค่าคงที่เท่ากับที่ระดับแรงดึงน้ำเป็นศูนย์ โดยพฤติกรรมของดินในช่วงนี้จะแสดงพฤติกรรมเป็นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อแรงดึงน้ำเกินจุดนี้ไป ความชื้นในดินจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจน จนกระทั่งถึงค่าแรงดึงน้ำพัฒนาถึงระดับหนึ่งหลังจากนั้นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่ลดลง หรือลดลงน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของแรงดึงน้ำที่เพิ่มขึ้น ระดับแรงดึงน้ำดังกล่าวเรียกว่าแรงดึงน้ำคงค้าง (Residual suction, s_{re})



รูปที่ 2.3 ภาพร่างคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน

SWCC เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินแต่ละชนิดซึ่งเกี่ยวข้องกับหน่วยแรงในดิน การจะอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจึงสัมพันธ์กับ SWCC ทั้งนั้น และมีความพยายามที่จะนำคุณสมบัตินี้ไปร่วมอธิบายพฤติกรรมทางกลของดิน อาทิเช่น การนำไปอธิบายถึงการเสีรูปร่างของดิน การเพิ่มเข้าไปในตัวแปรหน่วยแรง หรือการนำไปร่วมทำนายกำลังรับแรงเฉือนของดิน เป็นต้น

2.2 ตัวแปรหน่วยแรงของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุนั้นจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแบบจำลอง ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดซึ่งตัวแปรหน่วยแรงถือเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว โดยหลักการแล้ว การนิยามตัวแปรของหน่วยแรงนั้นควรจะไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ของ Terzaghi (Terzaghi, 1936) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมลักษณะทางวิศวกรรมของดิน เช่น กำลังต้านทานแรงเฉือนและการเสีรูปร่าง เป็นต้น โดยนิยามหน่วยแรงประสิทธิผลนี้มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างหน่วยแรงรวม (Total stress) กับ ความดันน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน (Pore water pressure) ซึ่งสามารถใช้ได้กับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ดินเหนียว ดินตะกอน และดินทราย เป็นต้น

สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การนิยามตัวแปรหน่วยแรงมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากมีผลกระทบของแรงดึงน้ำ ซึ่งแรงดึงน้ำนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินด้วย จึงมีความพยายามที่จะนิยามตัวแปรหน่วยแรงขึ้นมา เช่น Bishop (Bishop, 1959) ได้เสนอหน่วยแรงประสิทธิผลของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดย

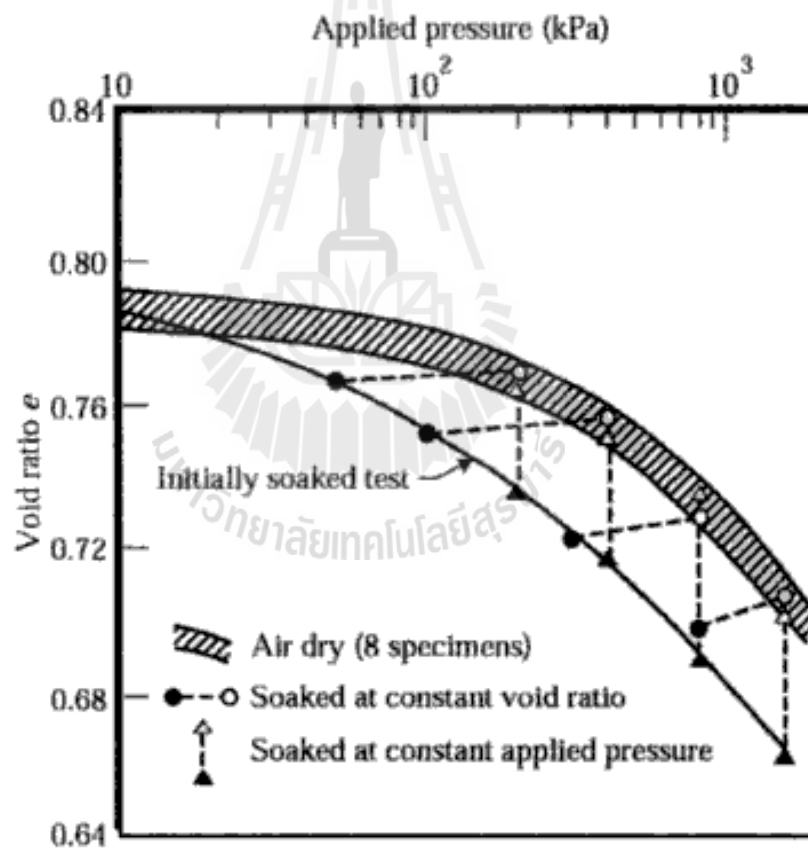
$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2.2)$$

| | | |
|--------|-----------|--------------------------------------|
| โดยที่ | σ' | เป็นหน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop |
| | σ | เป็นหน่วยแรงรวม |
| | u_a | เป็นความดันอากาศในช่องว่างของเม็ดดิน |
| | u_w | เป็นความดันน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน |
| | χ | เป็นค่าคงตัวของ Bishop |

ค่าคงตัวของ Bishop จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินซึ่งจะสัมพันธ์กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในมวลดิน กล่าวคือ เมื่อ $\chi = 1$ ดินจะอยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Full water saturation) ในขณะที่

$\chi = 0$ ดินจะอยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยอากาศ (Full air saturation) และทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop จะกลายเป็นหน่วยแรงประสิทธิผลของ Terzaghi ($\sigma - u_w$)

ในปี ค.ศ. 1962 Jennings and Burland ได้ทดสอบการอัดตัวของดินในหนึ่งมิติสองชั้น (Double oedometer compression test) โดยมีการเติมน้ำใส่ในตัวอย่างดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้หน่วยแรงคงที่ พบว่าดินเกิดการยุบตัวเมื่อมีการลดลงของแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงกดทับคงที่ เรียกว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า การพังตัวเมื่อเปียก (Wetting collapse) ผลทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งขัดกับหลักของหน่วยแรงประสิทธิผล เนื่องจากเมื่อพิจารณาตามหลักของหน่วยแรงประสิทธิผล โดยเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้นจะมีการพังตัวสูงขึ้น และในทำนองกลับกันเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลลดลงดินจะขยายตัว ดังนั้นจึงขัดแย้งกับผลทดสอบของ Jennings and Burland (1962)



รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบ Double Oedometer compression (Jennings and Burland, 1962)

จากปัญหาดังกล่าว Fredlund and Morgenstern (1977) จึงเสนอใช้คู่ตัวแปรหน่วยแรงที่เป็นอิสระต่อกันสองจากสามคู่ในการอธิบายพฤติกรรมทางกลของดินเรียกว่า สองตัวแปรหน่วยแรง (Two stress variables) ได้แก่ $(\sigma - u_a), (u_a - u_w)$; $(\sigma - u_w), (u_a - u_w)$ และ $(\sigma - u_a), (\sigma - u_w)$ โดยสมมุติฐานของทฤษฎีนี้มาจากการทดสอบที่เรียกว่า Null tests (Fredlund and Morgenstern 1977) ของตัวอย่างดินภายใต้การเปลี่ยนแปลง หน่วยแรงรวม, ความดันน้ำ และความดันอากาศ เนื่องจากในทางวิศวกรรมของดินส่วนใหญ่ความดันอากาศจะมีค่าคงที่เท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้น คู่ที่ได้รับความนิยมคือ $(\sigma - u_a)$ ซึ่งต่อมานิยามเป็นหน่วยแรงสุทธิ (Net stress) และ $(u_a - u_w)$ ซึ่งเป็นนิยามของแรงดึงน้ำ ต่อมาตัวแปรหน่วยแรงนี้ได้ถูกนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำอย่างเต็มรูปแบบเป็นครั้งแรกโดย Alonso et al. (1990) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Barcelona Basic Model (BBM) และหลังจากที่แบบจำลองนี้ถูกเสนอขึ้นยังได้มีการพัฒนาแบบจำลองอื่น ๆ ตามมา เช่น Wheeler and Sivakumar (1995) และ Cui and Delage (1996) เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่ใช้ $(\sigma - u_a)$ และ $(u_a - u_w)$ ในการอธิบายพฤติกรรมของดิน

แม้การเลือกใช้ $(\sigma - u_a)$ และ $(u_a - u_w)$ จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย แต่ยังคงพบว่ามีข้อจำกัดบางประการ ตามรายงานของ Houlsby (1997) ซึ่งเลือกหน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop มาอธิบายภายใต้หลักการงานเสมือน (Work conjugate) เพื่อให้สอดคล้องกับการอธิบายพฤติกรรมทางกลของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งงานทั้งหมดที่มวลดินได้รับ (Work input) จะเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงคูณกับความเครียดที่สัมพันธ์กับหน่วยแรงนั้น เมื่อเม็ดดินกับน้ำเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ และงานที่สูญเสียไปจะเกิดจากการเคลื่อนตัวของอากาศและน้ำ ณ ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดิน จะได้ว่า

$$dW \equiv \frac{u_a n (1 - S_l) d\rho_a}{\rho_a} - n(u_a - u_w) dS_l + \{\sigma - [S_l u_w + (1 - S_l) u_a]\} d\varepsilon \quad (2.3)$$

โดยที่ n เป็นปริมาตรของช่องว่างในมวลดิน (Pore volume)

ρ_a เป็นความหนาแน่นของอากาศ

S_l เป็นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

ε เป็นความเครียดเสมือน (Conjugate strain)

จากสมการ (2.3) หากสมมุติให้ความหนาแน่นของอากาศมีค่าคงที่ ผลรวมของงานทั้งหมดที่ได้ คือ

$$dW \equiv -n(u_a - u_w) dS_l + \{\sigma - [S_l u_w + (1 - S_l) u_a]\} d\varepsilon \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) เทอมแรกจะอธิบายถึงความสำคัญจากการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อปริมาณงานเสมือนเกิดขึ้นจากแรงดึงน้ำในมวลดิน ในขณะที่เทอมสองจะอธิบายถึงความเครียดเสมือนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงที่กระทำต่อเม็ดดิน (Soil skeleton stress) และสามารถอธิบายบนรูปแบบทั่วไปในหน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop ได้ เมื่อ $\chi = S_l$

จากสมการ(2.4) ตัวแปรความเครียดเสมือน (Conjugate strain variable) ที่สัมพันธ์กับหน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop และแรงดึงน้ำ คือ ความเครียดเสมือนที่เกิดจากหน่วยแรงที่กระทำต่อเม็ดดิน (Soil skeleton strain, $d\varepsilon$) กับการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (dS_l) ที่เกิดขึ้น (Wheeler et al., 2003) ซึ่งเป็นตัวแปรความเครียดที่เป็นอิสระต่อกันและเป็นไปตามหลักการงานเสมือน แต่หากพิจารณาตัวแปรหน่วยแรง ($\sigma - u_a$) และ ($u_a - u_w$) จากสมการ (2.4) จะได้ว่า

$$-n(u_a - u_w)dS_l + \{\sigma - [S_l u_w + (1 - S_l)u_a]\}d\varepsilon = (u_a - u_w)(-ndS_l + S_l d\varepsilon) + \{\sigma - u_a\}d\varepsilon \quad (2.5)$$

สมการ(2.5) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรความเครียดเสมือนที่สัมพันธ์กับหน่วยแรงสุทธิและแรงดึงน้ำ คือ $d\varepsilon_{ij}$ และ $(-ndS_l + S_l d\varepsilon)$ ไม่เป็นอิสระต่อกัน จึงขัดแย้งกับหลักการงานเสมือน

ในปัจจุบันยังมีข้อโต้แย้งกับหน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop และเกิดการวิพากษ์วิจารณ์อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น การพังตัวเมื่อเปียกของดินที่เกิดขึ้นในช่วงพฤติกรรมแบบอิลาสโต-พลาสติก ที่ประกอบด้วย การเคลื่อนตัวของอนุภาคเม็ดดินเนื่องจากสูญเสียเสถียรภาพของแรงที่เกิดจากส่วนโค้งเว้าของน้ำ ณ เชื่อมระหว่างเม็ดดินสองอนุภาค แต่การอธิบายถึงข้อจำกัดของหน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop จากผลทดสอบของ Jennings and Burland (1962) จะอธิบายบนพื้นฐานของหลักการอิลาสติกเท่านั้น นั่นจึงแสดงให้เห็นว่าผลทดสอบเหล่านี้ไม่สามารถใช้อธิบายถึงข้อจำกัดของหน่วยแรงประสิทธิผลของ Bishop ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำยังขึ้นกับสถานะและชนิดของดิน ซึ่งจึงขัดแย้งกับหลักการหน่วยแรงประสิทธิผล

สำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้มีการพัฒนาขึ้นหลายแบบจำลองนับตั้งแต่ Alonso et al. (1990) ได้เสนอ Barcelona Basic Model (BBM) ขึ้น และมีความหลากหลายในการเลือกตัวแปรหน่วยแรงของแบบจำลอง Gens (2010) จำแนกแบบจำลองเหล่านี้ตามการเลือกใช้ตัวแปรหน่วยแรงหลัก (First Constitutive Variable, FCV) คือ $\sigma - u_a + \mu_1(s, S_l)$ เมื่อ μ_1 เป็นองค์ประกอบของ FCV สัมพันธ์กับแรงดึงน้ำและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน ซึ่งตัวแปรหน่วยแรงหลักของดินเกิดจากการเปลี่ยนแปลง

หน่วยแรงภายในเม็ดดิน (Soil skeleton stress) จากการกระทำระหว่างน้ำและอากาศในช่องว่างเม็ดดินภายใต้น้ำหนักบรรทุก

แบบจำลองที่ใช้ FCV: $(\sigma - u_a, \mu_1 = 0)$ หรือหน่วยแรงสุทธิ การเลือกใช้ตัวแปรหน่วยแรงนี้จะได้แบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมกรรมของดินสัมพันธ์กับเส้นทางเดินของหน่วยแรง (Stress path) ได้โดยไม่ซับซ้อน และตัวแปรหน่วยแรงนี้ยังไม่ขึ้นอยู่กับสถานะของวัสดุอีกด้วย แต่ตามรายงานของ Houlsby (1997) พบว่าการเลือกใช้ตัวแปรหน่วยแรงนี้จะทำให้ตัวแปรความเครียดเสมือนไม่เป็นอิสระต่อกันดังที่กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งยังไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสถานะจากดินสถานะอิ่มตัวเป็นไม่อิ่มตัวด้วยค้ำด้วยน้ำได้อย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างแบบจำลองที่เลือกใช้หน่วยแรงสุทธิเป็น FCV เช่น Alonso et al. (1990); Wheeler and Sivakumar (1995); Cui and Delage (1996); Rampino et al.(2000); Chiu and Ng(2003); Thu et al.(2007); Sheng et al. (2008a) เป็นต้น

แบบจำลองที่เลือกใช้ FCV: $\sigma - u_a + \mu_1(s)$ ตัวแปรหน่วยแรงนี้รวมผลของแรงดึงน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งหากใช้ตัวแปรหน่วยแรงนี้ จะได้แบบจำลองที่สามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนสถานะของดินจากดินไม่อิ่มตัวเป็นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งตัวแปรหน่วยแรงนี้ยังไม่ขึ้นกับสถานะของวัสดุซึ่งสอดคล้องกับหลักของ Terzaghi แต่การอธิบายพฤติกรรมทางกลของดินที่สัมพันธ์กับเส้นทางเดินของหน่วยแรงจะเกิดความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มผลของแรงดึงน้ำเข้าไปในตัวแปรหน่วยแรง อีกทั้งยังไม่เป็นไปตามหลักการงานเสมือนตามรายงานของ Houlsby (1997) ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ตัวแปรหน่วยแรงนี้ในการสร้างแบบจำลองของดิน เช่น Loret & Khalili (2000, 2002); Sun et al.(2000, 2003) เป็นต้น

แบบจำลองที่เลือกใช้ FCV: $\sigma - u_a + \mu_1(s, S_l)$ สามารถอธิบายถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในเม็ดดินภายใต้การกระทำของน้ำหนักบรรทุก จะทำให้เป็นตัวแปรหน่วยแรงที่อธิบายพฤติกรรมของดินเมื่อเปลี่ยนสถานะจากดินไม่อิ่มตัวเป็นดินอิ่มตัวด้วยน้ำได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังเป็นหน่วยแรงที่เป็นตามหลักการงานเสมือน แต่การใช้ตัวแปรหน่วยแรงนี้ในการอธิบายพฤติกรรมของดินจะมีความซับซ้อนอย่างมาก เนื่องจากไม่สามารถจะอธิบายพฤติกรรมให้สัมพันธ์กับเส้นทางเดินของหน่วยแรงได้ อีกทั้งการรวมผลของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเข้าไปจะทำให้ตัวแปรหน่วยแรงขึ้นอยู่กับสถานะของวัสดุซึ่งขัดกับหลักการของ Terzaghi ตัวอย่างแบบจำลองที่เลือกตัวแปรหน่วยแรงนี้ในการสร้างแบบจำลองดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเช่น Bolzon et al.(1996); Jommi(2000); Wheeler et al. (2003); Gallipoli et al. (2003); Sheng et al. (2004) และ Sun et al.(2007a,2007b) เป็นต้น

จากการศึกษาตัวแปรหน่วยแรงพบว่า การเลือกใช้ตัวแปรหน่วยแรงในการสร้างแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่แตกต่างกัน จะทำให้ได้แบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมดินที่แตกต่างกันออกไป ทั้งในแง่คุณสมบัติของหน่วยแรงที่เลือกใช้และการอธิบายพฤติกรรมทางกายภาพของดินที่มีความซับซ้อนแตกต่างกันซึ่งตัวแปรหน่วยแรงเหล่านี้มีทั้งข้อดีและข้อจำกัดทั้งสิ้น ดังนั้นหากเลือกใช้ตัวแปรหน่วยแรงที่เหมาะสมในการพัฒนาแบบจำลองดินจะทำให้ได้แบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของดินได้ดียิ่งขึ้น

2.3 เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว

เส้นโค้งการรับน้ำหนักบรรทุกและการพังตัว (Loading collapse curve) หรือ LC curve ถูกนิยามครั้งแรกโดย Alonso et al. (1990) เพื่อกำหนดขอบเขตของการคราก (Yield surface) บนระนาบ $(p - u_a)$ และ $(u_a - u_w)$ ภายใต้กรอบแนวคิดแบบ อิลาสโต-พลาสติก กล่าวคือ ดินจะแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic behavior) เมื่อสถานะของหน่วยแรงอยู่ภายใน LC curve แต่เมื่อสถานะของหน่วยแรงอยู่บน LC curve ดินจะแสดงพฤติกรรมแบบพลาสติก (Plastic behavior)

Alonso et al. (1990) ได้เสนอ Barcelona Basic Model ขึ้น ซึ่งถือเป็นแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแบบจำลองแรกๆ ที่สร้างขึ้นอย่างเต็มรูปแบบในอธิบายพฤติกรรมทางกลของดินโดยเลือกใช้ $(\sigma - u_a)$ และ $(u_a - u_w)$ เป็นตัวแปรหน่วยแรงของแบบจำลอง โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, $v = 1 + e$) กับหน่วยแรงสุทธิแบบไอโซโทรปิก ($\bar{p} = p - u_a$) ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งสมมติให้สัมพันธ์กันในรูปแบบเส้นตรงบนระนาบของ $v - \ln \bar{p}$ ดังรูปที่ 2.5 และสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงครากกับแรงดึงน้ำของดิน เมื่อพิจารณาปริมาตรจำเพาะ ณ จุด 3 จะได้ความสัมพันธ์ของเส้นการอัดตัวปกติและหน่วยแรงครากของดินทั้งสองสถานะ คือ

$$v_3 = v_1 + \Delta v_p + \Delta v_s \quad (2.6)$$

โดยที่ v_1 เป็นปริมาตรจำเพาะ ณ จุดครากของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
 Δv_p เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะ จาก 1 ไป 2 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงสุทธิแบบไอโซโทรปิก
 Δv_s เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะเนื่องจากการลดลงของแรงดึงน้ำ

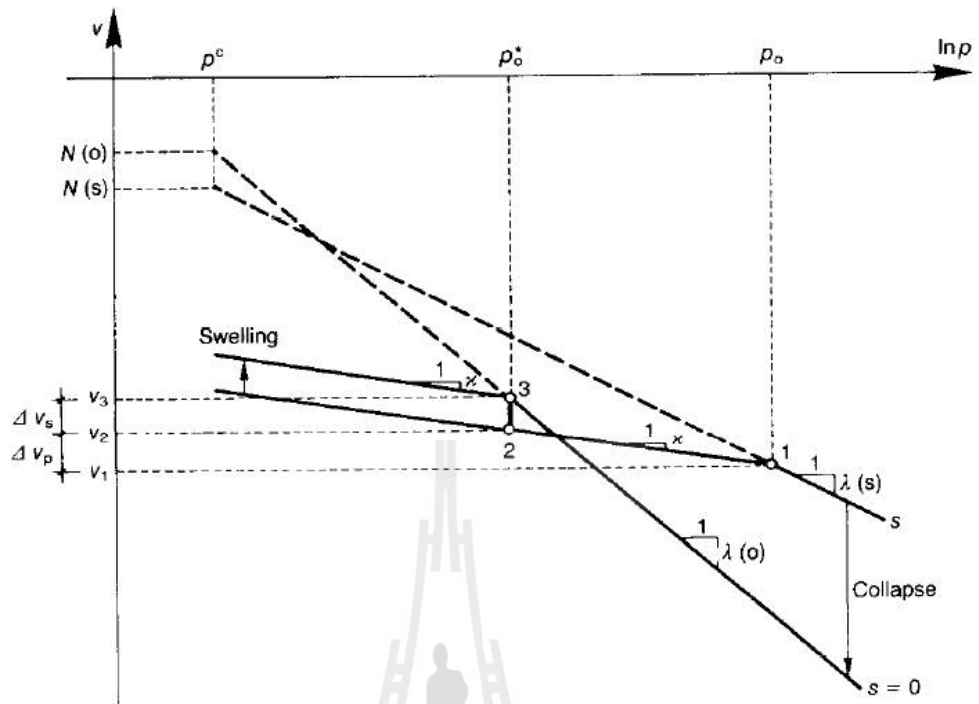
หลังจากนั้นได้ตั้งสมมุติฐานสำหรับแบบจำลอง คือ สมมุติให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงน้ำภายใต้พฤติกรรมแบบอิลาสติก (Δv_s) มีค่าเท่ากับผลต่างของปริมาตรจำเพาะ ณ หน่วยแรงสุทธิอ้างอิง (p^c) ของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ($N(0)$) กับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (N^s) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงครากสุทธิตกับการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำดังต่อไปนี้

$$p_0 = p^c \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{[\lambda(0)-\kappa]/[\lambda(s)-\kappa]} \quad (2.7)$$

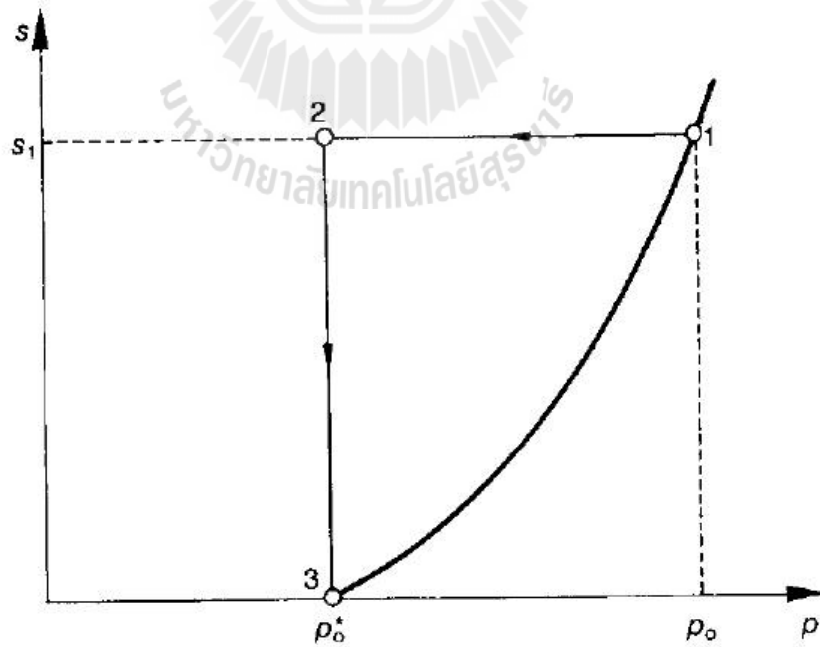
โดยที่ p_0 เป็นหน่วยแรงครากสุทธิแบบไอโซโทรปิกสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
 p_0^* เป็นหน่วยแรงครากสุทธิแบบไอโซโทรปิกสำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ
 $\lambda(s)$ เป็นความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
 κ เป็นความชันของเส้นการขยายตัว(Swelling) ของดิน

สมการ (2.7) เป็นสมการทำนายหน่วยแรงครากสุทธิตที่ระดับแรงดึงน้ำใดๆ โดยจะให้ความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ดังรูปที่ 2.6 ภายหลังจากได้เรียกเส้นโค้งนี้ว่าขอบเขตคราก (Loading collapse, LC curve) และภายใต้สมมุติฐานของแบบจำลอง จากสมการ (2.7) เมื่อหน่วยแรงครากสุทธิของดินอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเท่ากับหน่วยแรงสุทธิอ้างอิงด้วย LC curve จะเป็นเส้นตรงในแนวตั้ง เปรียบเสมือนเป็นเส้นอ้างอิงในการนิยามหาหน่วยแรงครากสุทธิตที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ โดยหลักการแล้ว การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติก ($d\varepsilon_{vp}^p$) ของดิน และการเปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดิน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการขยายของ LC curve จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติกับแรงดึงน้ำในแบบจำลอง Barcelona Basic Model ค่าความชันนี้จะลดลงตามการเพิ่มของแรงดึงน้ำ หลังจากนั้นได้ใช้พื้นผิวครากรูปวงรีมากำหนดขอบเขตครากบนระนาบหน่วยแรงสุทธิและหน่วยแรงเฉือน ($p - q$) โดยกำหนดให้เส้นการวิกฤติ (Critical state line, CSL) ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขนานกับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ทำให้ได้พื้นผิวครากบนห้วงทะเล $p - q - s$ ดังรูปที่ 2.9

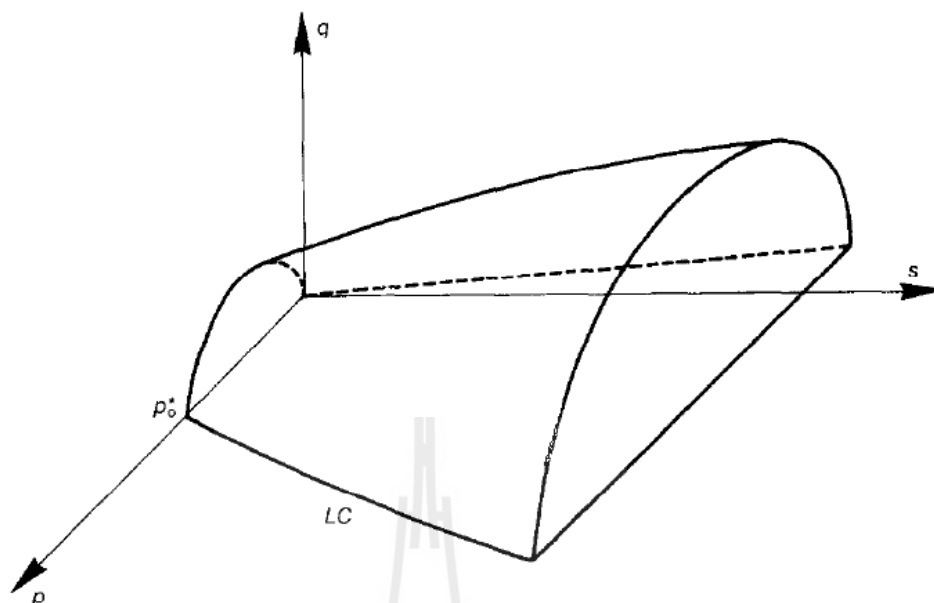
หลังจากแบบจำลอง Barcelona Basic Model ถูกเสนอขึ้นได้มีแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำถูกเสนอขึ้นมามากมาย ซึ่งล้วนแล้วแต่ใช้ Barcelona Basic Model เป็นต้นแบบ แต่แบบจำลองนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการเลือกค่าหน่วยแรงสุทธิอ้างอิงเพื่อให้สอดคล้องกับสมมุติฐานของแบบจำลองซึ่งเป็นค่าที่หาได้ยากจากการทดสอบ



รูปที่ 2.5 ภาพร่างรูปแบบการอัดตัวของดินสองสถานะ (Alonso et al., 1990)



รูปที่ 2.6 ภาพร่าง LC curve (Alonso et al., 1990)



รูปที่ 2.7 ภาพร่างพื้นผิวคราก (Yield surface) ของ Barcelona Basic Model

Wheeler and Sivakumar (1995) เห็นถึงข้อจำกัดของการเลือกใช้ค่าหน่วยสุทธิอ้างอิงของ Barcelona Basic Model จึงได้เสนอแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเลือกใช้สองตัวแปรหน่วยแรงในการอธิบายพฤติกรรมดิน เริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวเคโอลินบดอัด (Compacted speswhite kaolin clay) ที่ระดับแรงดึงน้ำคงที่ต่าง ๆ ซึ่งรูปแบบการอัดตัวของดินที่ได้จะมีความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสูงกว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากการพังตัวในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัว ซึ่งรูปแบบการอัดตัวนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของนิยาม LC curve ซึ่งใช้แนวทางตามแบบจำลอง Barcelona Basic Model และได้มีการเสนอให้เลือกใช้หน่วยแรงสุทธิอ้างอิงมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ (p_{at}) เนื่องจากภายใต้หน่วยแรงนี้ง่ายต่อการทดสอบหาค่า N^s โดยไม่มีการตั้งสมมุติฐานและลดข้อจำกัดที่เห็นจาก Barcelona Basic Model หลังจากนั้นได้เลือกใช้พื้นผิวครากรูปวงรีมากำหนดขอบเขตครากบนระนาบ $\bar{p} - q$ เช่นเดียวกับ Barcelona Basic Model แต่กำหนดให้ค่าความชันของเส้นการวิกฤติของดินจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดึงน้ำ จึงสรุปได้ว่า Wheeler and Sivakumar (1995) ได้ใช้แนวทางในการนิยาม LC curve เช่นเดียวกับ 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 บดอัด ที่ระดับแรงดึงน้ำค่าหนึ่งและอัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (Initial void ratio) ต่าง ๆ กัน โดยทำให้ตัวอย่างดินมีการพังตัวจากการลดแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิที่แตกต่างกันออกไป พบว่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะสูงกว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำและจะไปบรรจบ ณ จุดเดียวกัน ซึ่งเป็นจุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากตามระดับแรงดึงน้ำหรือ LC curve เป็นเส้นตรงในแนวตั้งบนระนาบ $\bar{p} - s$ และหน่วยแรงคราก ณ จุดนี้จะเป็นหน่วยแรงอ้างอิงของแบบจำลอง แล้วใช้หลักการทางแบบจำลอง อิลาสโต - พลาสติก ในการนิยาม LC curve คือการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติก (Plastic volumetric strain) ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะเท่ากับของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ หากเส้นทางเดินของหน่วยแรงอยู่ระหว่าง LC curve สองเส้นซึ่งแต่ละเส้นเป็นเส้นที่มีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นเท่ากัน จากแนวทางนี้ทำได้แบบจำลองสามารถอธิบาย LC curve ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินได้ เช่นเดียวกับ Sun et al. (2000); Sun et al. (2007a, 2007b)

Sheng et al. (2008) ได้เสนอ SFG Model โดยแยกการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินออกเป็นสองส่วนตามทางเดินหน่วยแรง คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเพิ่มแรงดึงน้ำ (Drying path) ซึ่งค่าความชันในช่วงการอัดตัวปกติจะขึ้นอยู่กับแรงดึงน้ำ และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการอัดตัว (Loading path) ภายใต้แรงดึงน้ำคงที่ ซึ่งกำหนดให้ค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติของกระบวนการนี้เป็นอิสระกับแรงดึงน้ำ SFG Model ได้เริ่มจากการนิยาม LC curve เริ่มต้น (Initial LC curve) ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า ผลรวมของความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อสถานะของหน่วยแรง (State of stress) อยู่บน LC curve เริ่มต้น ซึ่งคือผลรวมความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกระหว่างกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่และการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงครากสุทธิ การนิยาม LC curve เริ่มต้นนี้ ใช้เป็นเส้นอ้างอิงถึงสถานะเริ่มต้นของดินเช่นเดียวกับจุดบรรจบกันของ Sun et al. เพื่อใช้นิยาม LC curve ที่สัมพันธ์กับเส้นทางเดินของหน่วยแรงลำดับถัดไป หลังจากนั้นได้เลือกพื้นผิวครากรูปวงรีมากำหนดขอบเขตครากบนระนาบ $\bar{p} - q$ โดยกำหนดให้ค่าความชันของเส้นการวิกฤติเป็นอิสระกับแรงดึงน้ำ ทำให้ได้พื้นผิวครากบนห้วงทะเล $\bar{p} - q - s$

จากการศึกษาแบบจำลองของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำพบว่า การนิยาม LC curve จะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกของดินและจะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติจากรูปแบบการอัดตัวที่ได้นำเสนอขึ้น ซึ่งพบว่าแต่ละแบบจำลองได้เลือกรูปแบบการอัดตัวของดินรูปแบบใดแบบหนึ่งในการนิยาม LC curve เท่านั้น ซึ่งสามารถ

สรุปได้เป็น 3 รูปแบบ คือ รูปแบบการผายออก กู้เข้า และขนานกันของเส้นการอัดตัวเนื่องจากค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดิน

สำหรับการเลือกรูปแบบการผายออกของเส้นการอัดตัวปกติตามแบบจำลองของ Alonso et al. (1990); Thu et al. (2007); Cui and Delage (1996); Rampino et al. (2000) แบบจำลองเหล่านี้สามารถอธิบายถึงความแกร่ง (Stiffness) ของดินที่เพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้นได้เป็นอย่างดี แต่จะไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการพังตัวของดินที่ลดลงตามการเพิ่มของหน่วยแรงได้ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วระดับการพังตัวจะลดลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามแบบจำลองของ Wheeler and Sivakumar (1995); Sun et al. (2000, 2003); Chiu and Ng (2003) ที่เลือกรูปแบบการกู้เข้าของเส้นการอัดตัวปกติเนื่องจากค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติที่เพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้น แบบจำลองเหล่านี้จะสามารถอธิบายถึงระดับการพังตัวของดินที่ลดลงตามการเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกได้เป็นอย่างดี แต่จะไม่สามารถอธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของความแกร่งเมื่อระดับแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Sheng et al. (2008) ได้เลือกรูปแบบการขนานของเส้นการอัดตัวปกติของดินเนื่องจากกำหนดให้ค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติที่ไม่ขึ้นกับระดับแรงดึงน้ำมาสร้างแบบจำลองของดิน แบบจำลองนี้จะมีข้อดีในแง่การเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ซับซ้อน แต่จะไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเสีรูปที่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่แท้จริงของดินที่กล่าวมาข้างต้นได้

จากปัญหาเรื่องการเลือกรูปแบบการอัดตัวของดิน ไม่อึดตัวด้วยน้ำ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษารูปแบบการอัดตัวของดิน รวมทั้งการเสีรูปเนื่องจากกระบวนการลดลงของแรงดึงน้ำภายใต้ น้ำหนักบรรทุกคงที่ จากผลการทดสอบที่รวบรวมได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

บทที่ 3

พฤติกรรมการอัดตัวของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

3.1 บทนำ

พฤติกรรมการอัดตัวของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะแตกต่างกันเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกการเสีรูปร่างของดินตามเส้นทางเดินของหน่วยแรง (Stress path) ได้ 2 รูปแบบ คือ พฤติกรรมการอัดตัวของดินภายใต้การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุก (Loading path) และพฤติกรรมการอัดตัวของดินภายใต้การลดลงของแรงค้ำน้ำ (Wetting path) หรือที่เรียกว่าการพังตัวเมื่อเปียก (Wetting collapse) ซึ่งหากเข้าใจพฤติกรรมเหล่านี้จะสามารถสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้อย่างถูกต้อง

3.2 ข้อมูลการอัดตัวของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวของดิน งานวิจัยนี้จึงทำการรวบรวมข้อมูลทดสอบการอัดตัวภายใต้ระดับแรงค้ำน้ำคงที่ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจากงานวิจัยในวารสารวิชาการ บทความวิชาการ วิทยานิพนธ์ ที่เกี่ยวข้อง โดยคัดเฉพาะข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรจำเพาะกับหน่วยแรงสุทธิรวมทั้งมีรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและคุณสมบัติทางกายภาพสำหรับดิน และเป็นข้อมูลที่ระบุหรือสามารถหา LC curve ของตัวอย่างดินก่อนให้แรงค้ำน้ำเพื่อทดสอบการอัดตัวได้ โดยมีรายละเอียดแยกตามงานวิจัย ดังนี้

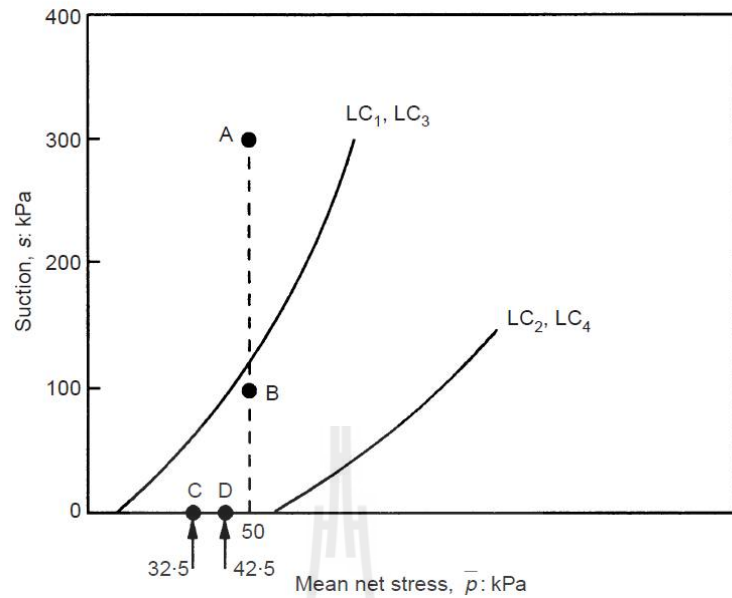
Sivarkumar and Wheeler (2000) ได้ทดสอบกับดินเหนียวเกาลิน (Kaolin clay) โดยแยกข้อมูลออกเป็น 4 ชุดข้อมูล สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.12 ประกอบด้วยปริมาณความชื้น รูปแบบการบดอัด พลังงานบดอัด ปริมาตรจำเพาะเริ่มต้น และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

การเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัวแบบไอโซโทรปิก จะลดแรงค้ำน้ำเป็น 300 kPa 100 kPa ภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ 50 kPa ส่วนตัวอย่างดินที่ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำ (แรงค้ำน้ำเท่ากับ 0 kPa) จะกระทำภายใต้หน่วยแรงสุทธิ 32.5 และ 42.5 kPa สำหรับชุดข้อมูลที่ 1 และ ชุดข้อมูลที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงค้ำน้ำที่สัมพันธ์กับ LC curve ของตัวอย่างดินเมื่อเปรียบเทียบดินตัวอย่างชุดที่ 1 และ 3 ซึ่งมีความหนาแน่นและปริมาณความชื้นบดอัดเท่ากัน ขณะที่ดินตัวอย่างชุดที่ 2 และ 4 มีการบดอัดด้วยพลังงานบดอัดสูงกว่าและมีความหนาแน่นสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบ LC curve ของตัวอย่างชุดที่ 2 และ 4 จะมีขนาดใหญ่กว่า LC curve ของตัวอย่างชุดที่ 1 และ 3 จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่า สำหรับชุดตัวอย่างที่ 2 และ 4 การเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัวของดินสถานะของหน่วยแรงยังอยู่ใน LC curve ในขณะที่ชุด

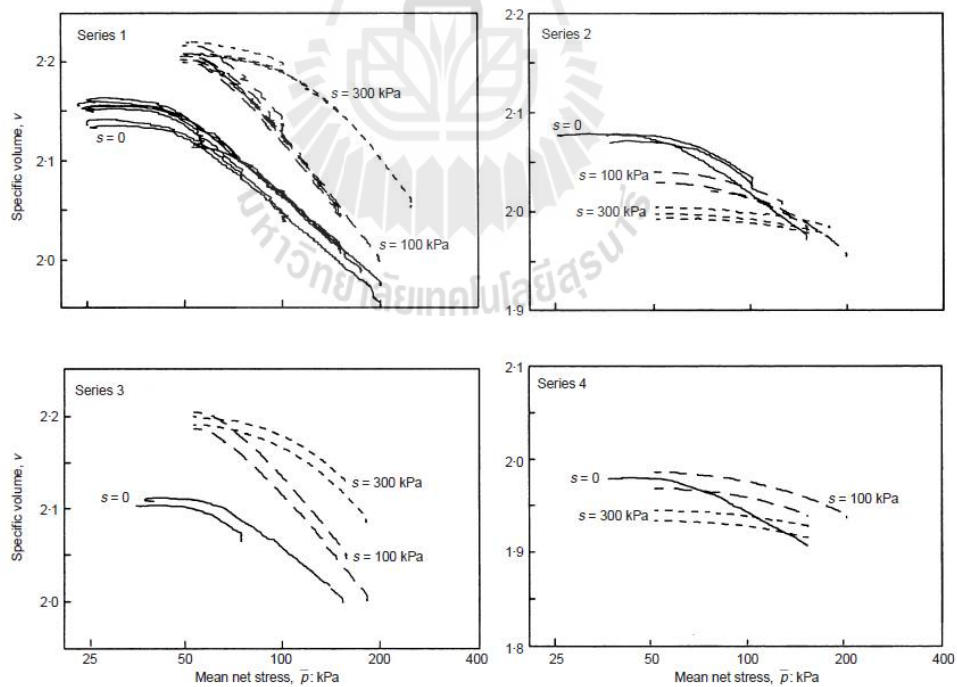
ตัวอย่างที่ 1 และ 3 มีบางช่วงของสถานะหน่วยแรง (เช่นเมื่อแรงค้ำน้ำต่ำกว่า 100 kPa) สถานะของหน่วยแรงจะเกิน LC curve รูปที่ 3.2 ลักษณะการอัดตัวของดินแต่ละชุดข้อมูลหลังการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิ แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงครากของดินทุกชุดข้อมูลจะเพิ่มขึ้นตามแรงค้ำน้ำ ส่วนความชื้นในช่วงการอัดตัวปกติของดินตัวอย่างชุดที่ 1 และ 3 ที่แรงค้ำน้ำเท่ากับ 0 kPa จะต่ำกว่าที่แรงค้ำน้ำเท่ากับ 100 และ 300 kPa ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างชุดที่ 2 และ 4 จะไม่เห็นความชื้นในช่วงการอัดตัวปกติของดินที่ชัดเจนเนื่องจากอยู่ในช่วงของหน่วยแรงสุทธิต่ำ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดินเหนียวกาลินและการเตรียมตัวอย่างใน Sivakumar and Wheeler (2000)

| ชุดข้อมูลทดสอบ | ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์) | รูปแบบการบดอัด | พลังงานบดอัดแบบ Static (kPa) | ปริมาตรจำเพาะเริ่มต้น | ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (เปอร์เซ็นต์) |
|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 1 | 25 | Static | 400 | 2.201 ± 0.015 | 53.8 ± 1.3 |
| 2 | 25 | Static | 800 | 1.976 ± 0.009 | 68.1 ± 0.8 |
| 3 | 25 | Proctor | - | 2.190 ± 0.009 | 54.6 ± 0.7 |
| 4 | 28.5 | Static | 500 | 1.954 ± 0.009 | 79.8 ± 0.9 |

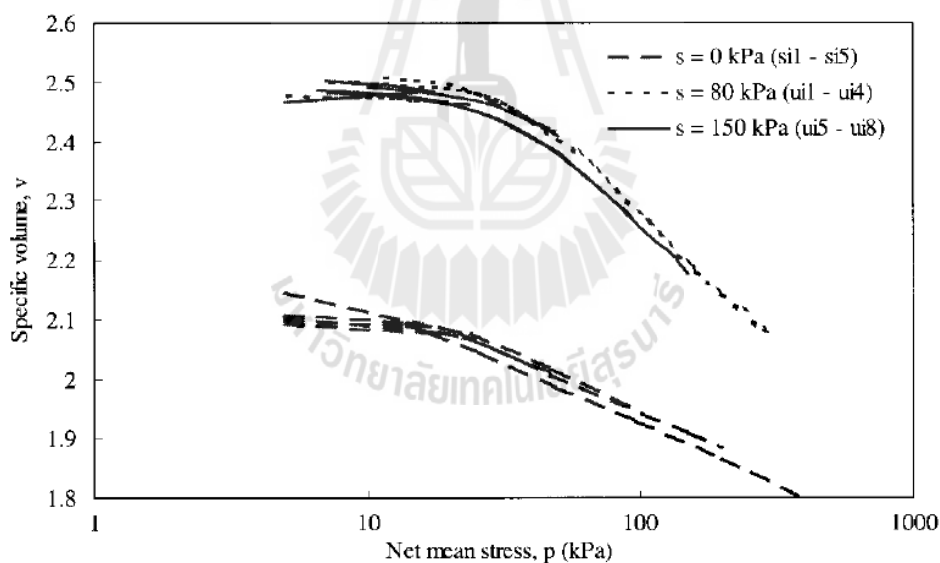


รูปที่ 3.1 ภาพร่างสถานะหน่วยแรงระหว่างเตรียมตัวอย่างดินเหนียวเกาหลีกับ LC curve ของแต่ละชุดข้อมูล (Sivarkumar และ Wheeler, 2000)



รูปที่ 3.2 เส้นโค้งการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของดินเหนียวเกาหลีชนิดอัด (Sivarkumar and Wheeler, 2000)

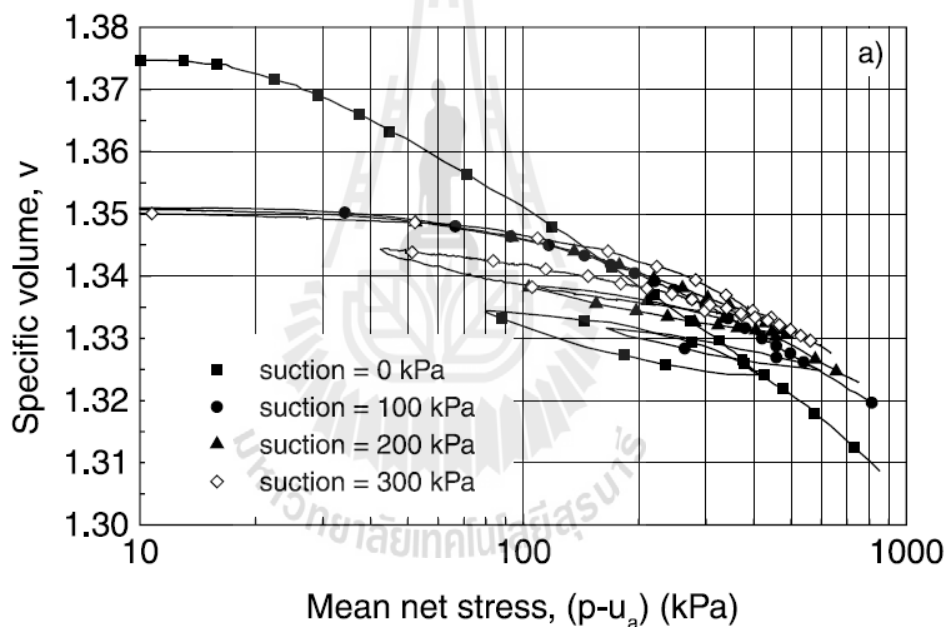
Charles and Chiu (2001) ได้ทำการทดสอบกับดิน โวลคานิก (Volcanic soil) ภายใต้การอัดตัวแบบไอโซโทรปิก โดยตัวอย่างดินมีองค์ประกอบเป็นดินตะกอน(Silt) 65 เปอร์เซ็นต์ ดินทราย (Sand) 25 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว(Clay) 10 เปอร์เซ็นต์ จีดจำกัดเหลว(Liquid limit, LL) 48 เปอร์เซ็นต์ พิกัดพลาสติก(Plastic limit, PL) 35 เปอร์เซ็นต์ เตรียมตัวอย่างโดยการบดอัดดินทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (Dry side of optimum water content) เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ และการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบไอโซโทรปิกจะลดแรงค้ำน้ำเป็น 150 kPa 80 kPa และ 0 kPa ภายใต้หน่วยแรงสุทธิตั้งที่ 5 kPa ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน LC curve สำหรับแรงค้ำน้ำเท่ากับ 150 kPa และ 80 kPa ในขณะที่แรงค้ำน้ำ 0 kPa จะเกิดขึ้นนอก LC curve รูปที่ 3.3 เป็นเส้นโค้งการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของตัวอย่างดินแสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงครากสุทธิของดินจะเพิ่มขึ้นตามแรงค้ำน้ำ และความชันในช่วงการอัดตัวปกติที่แรงค้ำน้ำ 0 kPa จะมีค่าต่ำกว่าที่แรงค้ำน้ำ 80 kPa และ 150 kPa



รูปที่ 3.3 เส้นโค้งการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของดินโวลคานิกบดอัด (Charles and Chiu, 2001)

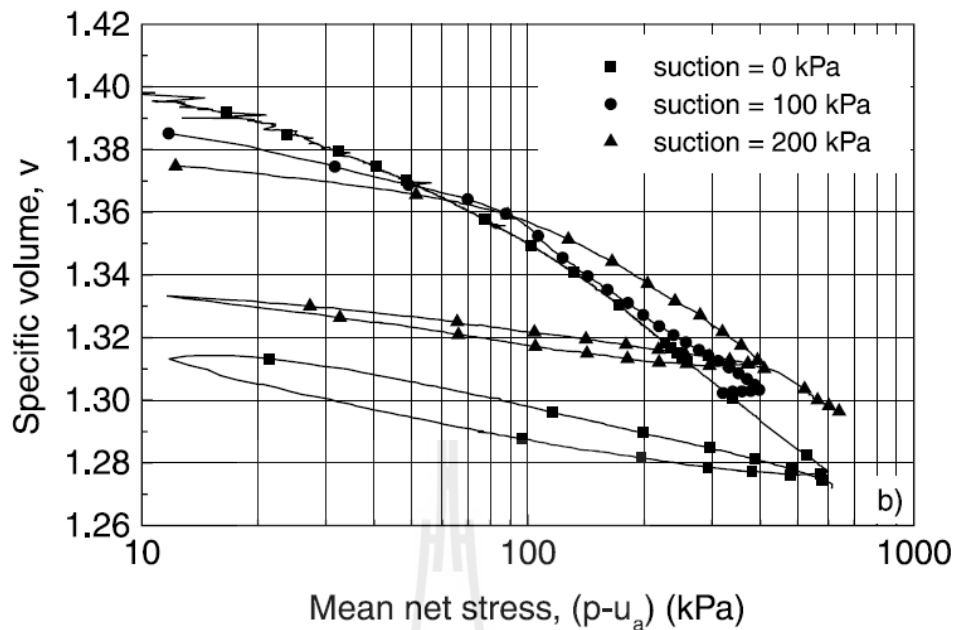
Mancuso et al. (2002) ทำการทดสอบกับดิน Silty sand ภายใต้การอัดตัวแบบไอโซโทรปิก โดยตัวอย่างดินมีองค์ประกอบเป็นดินทราย 63 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 21 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว 16 เปอร์เซ็นต์ มีจีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 35.4 และ 21.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เตรียมตัวอย่างโดยบดอัดดินแบบ Modified proctor ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม(Optimum water content)

9.8 เปอร์เซ็นต์ และทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม(Wet side of optimum water content) 12.3 เปอร์เซ็นต์ เตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัวโดยลดแรงดึงน้ำเป็น 300 kPa 200 kPa 100 kPa และ 0 kPa สำหรับตัวอย่างดินบดอัดปริมาณความชื้นเหมาะสมและเพิ่มแรงดึงน้ำ (Drying) เป็น 100 kPa และ 200 kPa สำหรับตัวอย่างที่บดอัดทางด้านเปียกซึ่งเกิดขึ้นภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ 10 kPa จะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใน LC curve ทุกแรงดึงน้ำ รูปที่ 3.4 และ 3.5 เป็นเส้นโค้งการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของตัวอย่างดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและทางด้านเปียก ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากสุทธิต่อกับแรงดึงน้ำ และความชื้นในช่วงการอัดตัวปกติของดินจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำสำหรับดินทั้งสองตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 เส้นโค้งการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของ Silty sand บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม

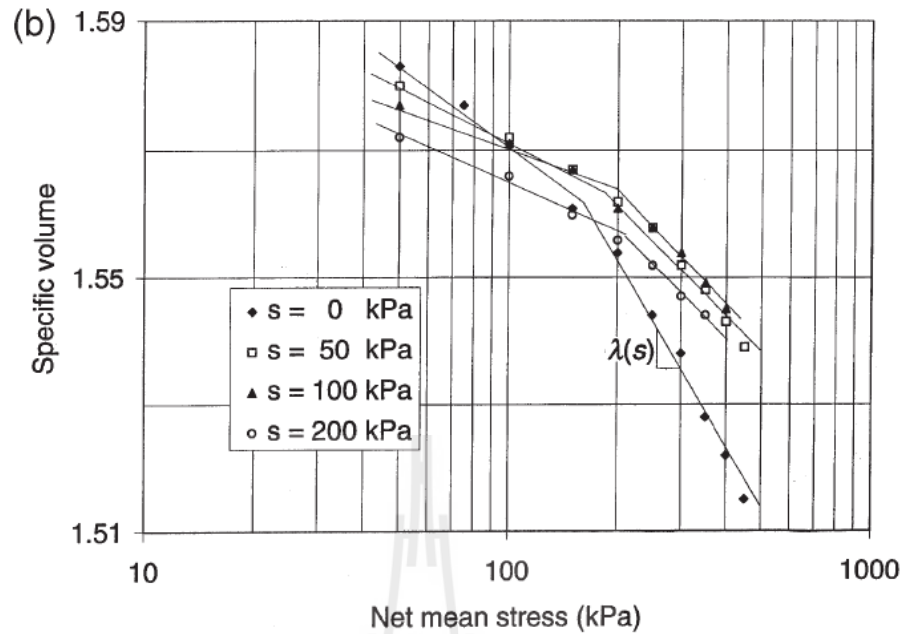
(Mancuso et al., 2002)



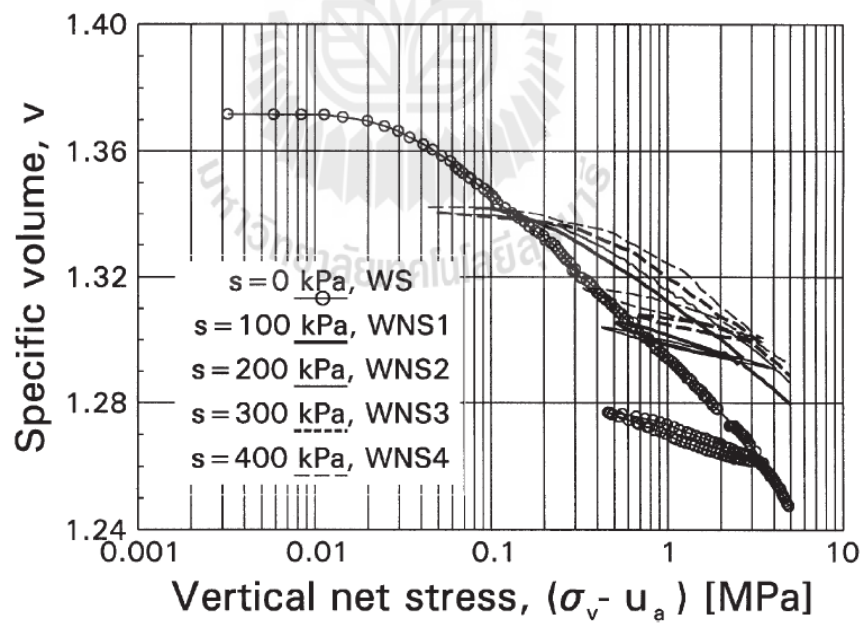
รูปที่ 3.5 เส้นโค้งการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของ Silty sand บดอัดทางด้านของเปียกปริมาณ
ความชื้นเหมาะสม (Mancuso et al., 2002)

Chen et al. (1999) ได้ทำการทดสอบกับดินลมหอบสีเหลือง (Loess soil) ภายใต้การอัดตัวแบบไอโซโทรปิก เตรียมตัวอย่างโดยการบดอัดดินแบบ Static ซึ่งมีแรงค้ำน้ำเริ่มต้น 20 kPa และการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบไอโซโทรปิกโดยลดแรงค้ำน้ำเป็น 0 kPa และเพิ่มแรงค้ำน้ำเป็น 50 kPa 100 kPa และ 200 kPa ภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ 10 kPa โดยกระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นภายใน LC curve รูปที่ 3.6 เป็นเส้นการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของตัวอย่างดินแสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงครากสุทธิของดินจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงค้ำน้ำและความชื้นในช่วงการอัดตัวปกติจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแรงค้ำน้ำ

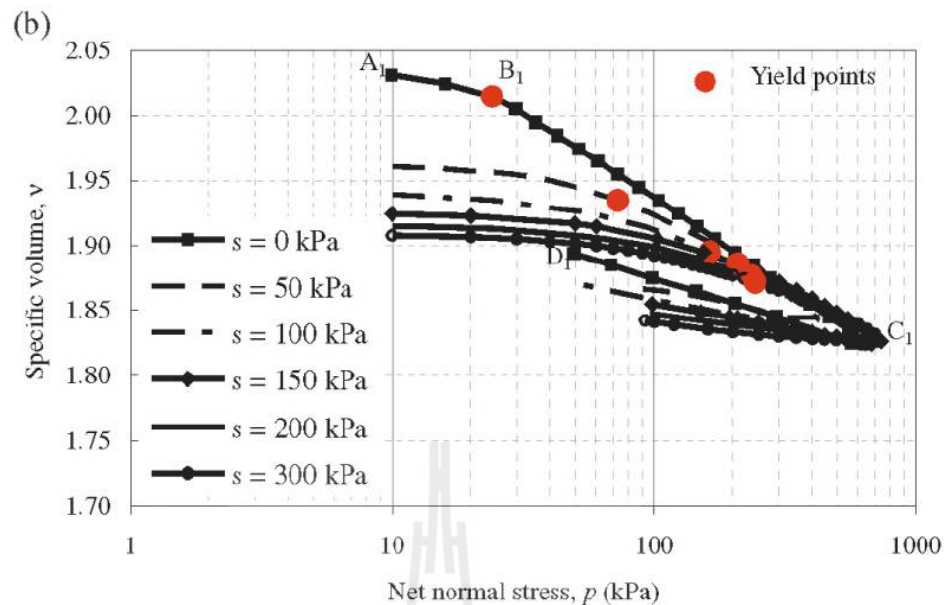
Rampino et al. (1999) ได้ทำการทดสอบกับ Lean clay ภายใต้การอัดตัวแบบหนึ่งทิศทาง ซึ่งตัวอย่างดินมีขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติก 34.6 และ 21.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เตรียมตัวอย่างโดยการบดอัดดินแบบ Modified proctor ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม 9.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวัดแรงค้ำน้ำเริ่มต้นได้ 750 kPa การเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัวจะลดแรงค้ำน้ำเป็น 400 kPa 300 kPa 200 kPa 100 kPa และ 0 kPa ภายใต้หน่วยแรงสุทธิ 50 kPa และ 3 kPa สำหรับตัวอย่างที่ลดแรงค้ำน้ำเป็น 0 kPa ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใน LC curve รูปที่ 3.8 เป็นเส้นโค้งการอัดตัวแบบหนึ่งทิศทางของตัวอย่างดินที่แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงครากสุทธิจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงค้ำน้ำเพิ่มขึ้น และความชื้นในช่วงการอัดตัวปกติของดินจะลดลงเมื่อแรงค้ำน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.6 เส้นการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของดินเหนืองบดอัด (Chen et al., 1999)



รูปที่ 3.7 เส้นโค้งการอัดตัวแบบหนึ่งทิศทางของ Lean clay บดอัด (Rampino et al., 1999)



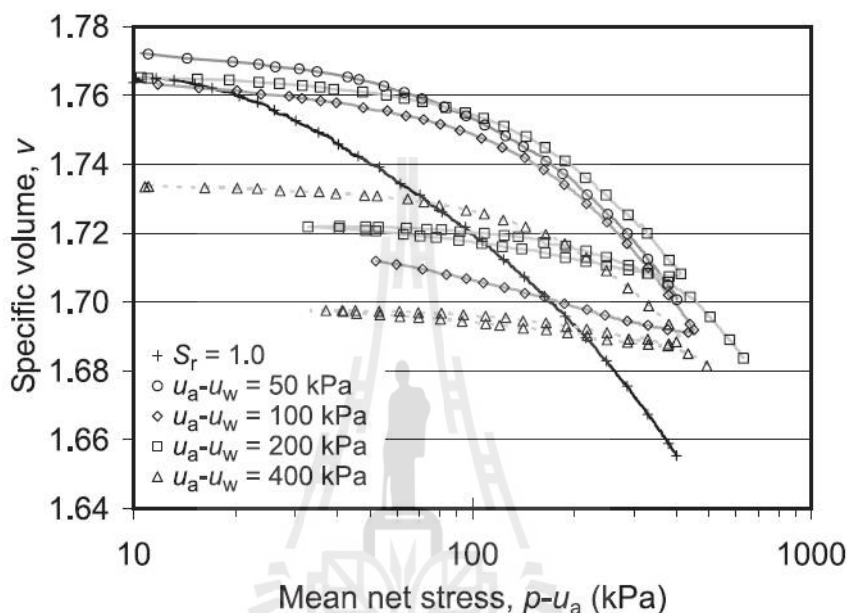
รูปที่ 3.8 เส้นโค้งการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของดินเหนียวมาเลเซียบดอัด (Thu et al., 2007)

Thu et al. (2007) ได้ทำการทดสอบกับดินเหนียวมาเลเซีย (Kaolin Malaysia) ภายใต้การอัดตัวแบบไอโซโทรปิก ซึ่งตัวอย่างดินมีองค์ประกอบเป็นดินตะกอน 85 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว 15 เปอร์เซ็นต์ เตรียมตัวอย่างโดยการบดอัดตัวอย่างดินแบบ Static ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม 22 เปอร์เซ็นต์ และการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัวจะลดแรงค้ำน้ำเป็น 300 kPa 200 kPa 150 kPa 100 kPa 50 kPa และ 0 kPa ภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ 10 kPa ซึ่งเกิดขึ้นภายใน LC curve รูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงครากของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงค้ำน้ำเพิ่มขึ้น และความของช่วงการอัดตัวปกติของดินจะลดลงเมื่อแรงค้ำน้ำเพิ่มขึ้น

Vassallo et al. (2007) ได้ทดสอบการอัดตัวภายใต้สภาวะไอโซโทรปิกของ Po silt บดอัด ซึ่งมี ดินตะกอน 40 เปอร์เซ็นต์ ดินทราย 33 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว 27 เปอร์เซ็นต์ และมีคุณสมบัติพื้นฐาน ดังนี้ ชีดจำกัดเหลว 50.4 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดพลาสติก 32.5 เปอร์เซ็นต์ และพิกัดพลาสติก 17.9 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างดินถูกบดอัดแบบ Standard Proctor ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับ 23.1 ได้ความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 15.59 kN/m³ ปริมาตรจำเพาะหลังการบดอัด เท่ากับ 1.73 ค่าแรงค้ำน้ำเริ่มต้นเฉลี่ย เท่ากับ 140 kPa

การเตรียมตัวอย่างดินก่อนทดสอบการอัดตัวได้ทำการเพิ่มลดแรงค้ำน้ำไปที่ 0, 50, 100, 200, และ 400 kPa ภายใต้หน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 10 kPa สำหรับตัวที่ทดสอบการอัดตัวภายใต้แรงค้ำน้ำเท่ากับ 0 kPa และ 50 kPa ได้ทำการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิไปที่ 400 kPa และตัวอย่างทำสอบภายใต้แรงค้ำน้ำเท่ากับ 100 kPa ได้เพิ่มหน่วยแรงสุทธิไปที่ 400 kPa หลังจากนั้นทำการลดหน่วยแรงสุทธิไปที่ 50 kPa ในขณะที่ทดสอบภายใต้แรงค้ำน้ำเท่า 200 และ 400 kPa จะทำการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิ

ไป 400 kPa และทำการลดหน่วยแรงสุทธิไปที่ 30 หลังจากนั้นได้เพิ่มหน่วยแรงสุทธิไปที่ 600 และ 500 kPa สำหรับตัวอย่างที่มีแรงค้ำน้ำเท่า 200 และ 400 kPa ตามลำดับ รูปที่ 3.9 แสดงผลทดสอบการอัดตัวที่ระดับแรงค้ำน้ำต่าง ๆ พบว่า ค่าหน่วยแรงครากสุทธิของดินจะเพิ่มขึ้นตามแรงค้ำน้ำที่เพิ่ม ในขณะที่ค่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติของดินจะลดลงเมื่อแรงค้ำน้ำเพิ่มขึ้น



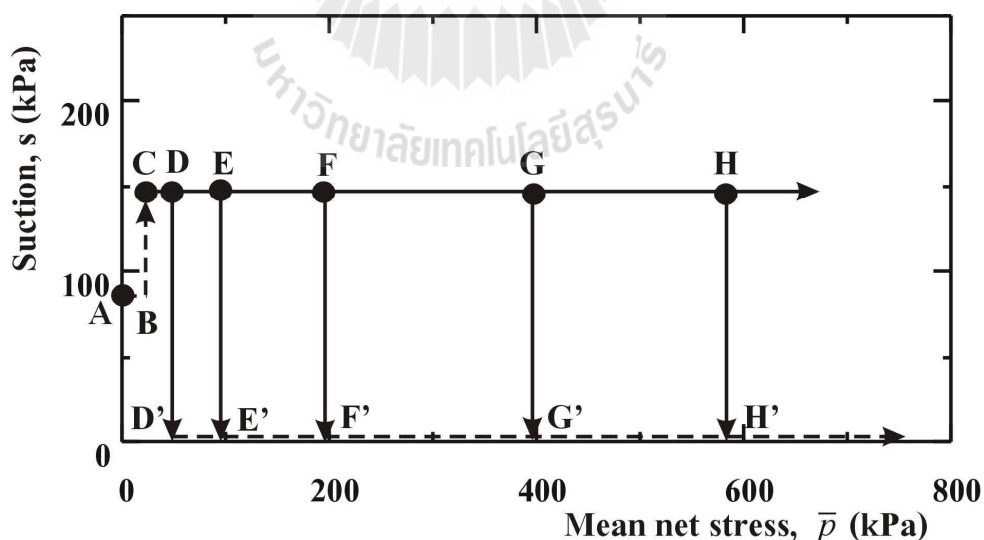
รูปที่ 3.9 เส้นโค้งการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของ Po silt บดอัด (Vassallo et al, 2007)

Sun et al. (2007c) ได้ทดสอบการอัดตัวพร้อมทั้งการพังตัวภายใต้สภาวะแบบไอโซโทรปิกของ Pearl Clay บดอัด ซึ่งตัวอย่างดินมีคุณสมบัติพื้นฐาน ดังนี้ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 ปริมาณดินตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว 50 เปอร์เซ็นต์ ชิดจำกัดเหลว 49 เปอร์เซ็นต์ และพิกต์พลาสติก 22 ตัวอย่างดินถูกบดอัดแบบ Static ด้วยปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 26 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้หน่วยแรงในแนวตั้งเท่ากับ 300 kPa 400 kPa และ 600 kPa ตามลำดับ ทำให้ได้อัตราส่วนโพรงเริ่มต้นอยู่ในช่วง 1 ถึง 1.5 และแรงค้ำน้ำเริ่มต้นในช่วง 90 kPa ถึง 130 kPa

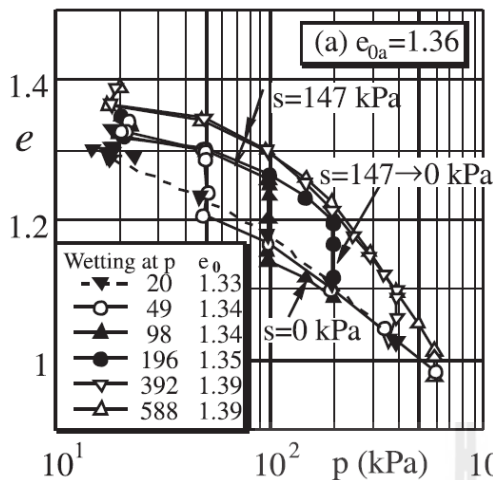
ขั้นตอนการทดสอบการพังตัวของดินภายใต้สภาวะแบบไอโซโทรปิกจะแสดงในรูปที่ 3.10 เมื่อดินมีสถานะหน่วยแรงเริ่มต้น ณ จุด A จากนั้นทำการอัดตัวไปยังจุด B ซึ่งมีหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 20 kPa และเพิ่มแรงค้ำน้ำภายใต้หน่วยแรงนี้ไปที่จุด C ที่มีค่าแรงค้ำน้ำ 147 kPa แล้วทำการอัดตัวภายใต้แรงค้ำน้ำดังกล่าวไปยังค่าที่กำหนดและทำการลดแรงค้ำน้ำให้ตัวอย่างดินเข้าสู่สภาวะอิมพัคด้วยน้ำ โดยค่าหน่วยแรงสุทธิที่กำหนด คือ 49 kPa(DD') 98 kPa(EE') 196 kPa(FF')

392 kPa(GG') และ 588 kPa(HH') เมื่อลดแรงดึงน้ำจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0 kPa ได้ทำการอัดตัวเพื่อศึกษาการอัดตัวภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งได้ผลทดสอบ ดังรูป 3.11

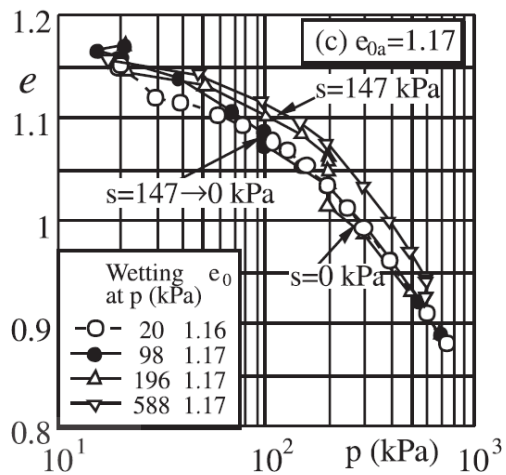
รูปที่ 3.11 เป็นผลทดสอบการพังตัวของ Pearl Clay ที่มีอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นหลังการบดอัด (e_{0a}) ต่างกัน เมื่อสถานะหน่วยแรงและอัตราส่วน โพรงเริ่มต้น (e_0) จะอยู่บนเส้น โคง์การอัดตัวที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ 147 kPa จากรูปที่ 3.11(a) เป็นผลทดสอบการพังตัวที่มีอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.36 พบว่า ระดับการพังตัวของตัวอย่างในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นตามระดับหน่วยแรงสุทธิ จนกระทั่งหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 98 kPa ซึ่งค่าที่ใกล้เคียงกับหน่วยแรงครากสุทธิบนเส้นการอัดตัวที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ 147 kPa ตัวอย่างดินจะมีระดับการพังตัวสูงสุด หลังจากนั้นจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระดับหน่วยแรงสุทธิ ซึ่งจะทำให้เกิดรูปแบบการลู่เข้าหากันของเส้นการอัดที่แรงดึงน้ำเท่า 147 kPa และ 0 kPa เช่นเดียวกับ ผลทดสอบของตัวอย่างที่มีอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นต่ำกว่า ดังรูปที่ 3.11(b) 3.11(c) และ 3.11(d) ซึ่งมีอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นเท่ากับ 1.28 1.17 และ 1.05 ตามลำดับ แต่หากเปรียบเทียบระดับการพังตัวของตัวอย่างดิน ณ หน่วยแรงสุทธิเดียวกัน พบว่า ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นสูงจะมีระดับการพังตัวสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นต่ำกว่า และจากผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าเส้นการอัดตัวของดินอิ่มตัวด้วยน้ำหลังการพังตัวที่ระดับหน่วยแรงสุทธิต่างกันจะมีตำแหน่งและความชันที่ใกล้เคียงกันหากตัวอย่างดินมีอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นใกล้เคียงกัน



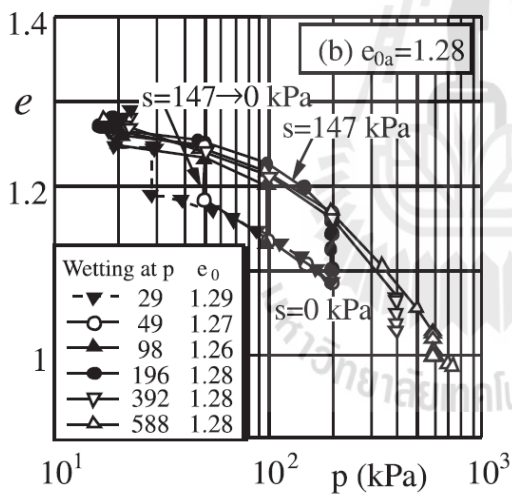
รูปที่ 3.10 เส้นทางเดินของหน่วยแรงสำหรับการทดสอบการพังตัวของดิน (Sun et al., 2007c)



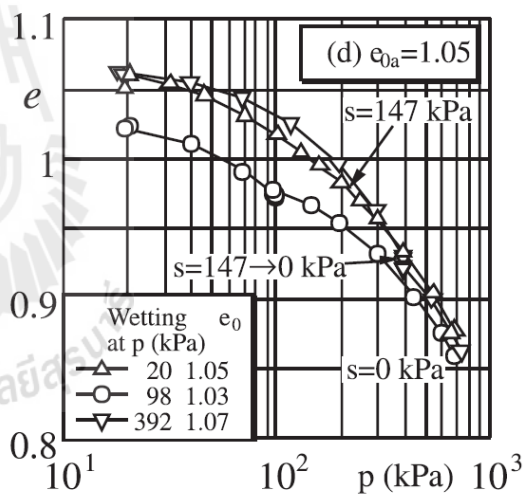
รูปที่ 3.11(a)



รูปที่ 3.11(b)

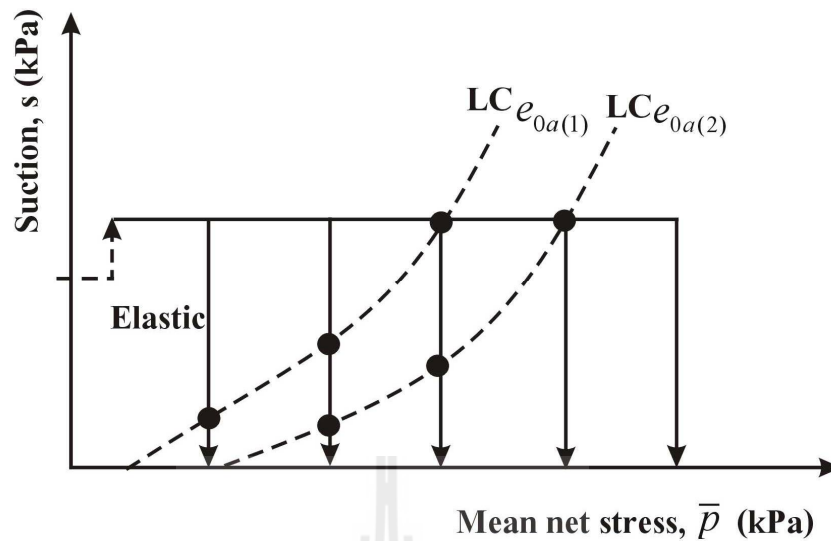


รูปที่ 3.11(c)



รูปที่ 3.11(c)

รูปที่ 3.11 แสดงผลทดสอบการพังตัวของดินเมื่ออัตราส่วนโพรงเริ่มต้นต่าง ๆ (Sun et al, 2007c)



รูปที่ 3.12 ภาพร่างแสดงการพังตัวของดินที่สัมพันธ์กับ LC curve

จากผลทดสอบเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า ระดับการพังตัวของดินจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงสุทธิและอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดิน และหากอธิบายบนหลักการอีลาสโต-พลาสติก จากรูปที่ 3.12 เป็นภาพร่างกระบวนการพังตัวของดินที่สัมพันธ์กับ LC curve เมื่อตัวอย่างดินมีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นสูงจะมี LC curve เป็น $LC_{e_{0a(1)}}$ และอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นต่ำกว่าจะเป็น $LC_{e_{0a(2)}}$ ภายใต้หน่วยแรงสุทธิเดียวกันจะมีพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การลดลงของแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ ซึ่งเกิดขึ้นภายในช่วงอีลาสติกตัวอย่างดินจะเกิดการบวมตัว (Swelling) เล็กน้อยและจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดิน ก่อนจะมีการพังตัวขึ้นเมื่อลดแรงดึงน้ำต่ำกว่าแรงดึงน้ำ ณ LC curve ซึ่งภายใต้กระบวนการนี้ตัวอย่างดินจะมีการจัดเรียงโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการพังตัวขึ้นและจะสูงขึ้นตามระดับหน่วยแรงสุทธิที่เพิ่มขึ้น จนมากที่สุดเมื่อหน่วยแรงสุทธิมีค่าประมาณหน่วยแรงครากบนเส้นการอัดตัวที่ระดับแรงน้ำเริ่มต้นก่อนลดแรงดึงน้ำ จึงส่งผลให้การพังตัวของตัวอย่างดินที่เป็น $LC_{e_{0a(1)}}$ สูงกว่า $LC_{e_{0a(2)}}$ เนื่องจากจะแสดงพฤติกรรมแบบอีลาสโต-พลาสติกมากกว่า และหากมีการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิเพิ่มขึ้นหน่วยแรงคราก ในช่วงนี้จะทำให้ตัวอย่างดินแน่นขึ้นและเมื่อลดแรงดึงน้ำจะทำให้เกิดการพังตัวต่ำลงตามหน่วยแรงสุทธิที่เพิ่มขึ้น

3.3 สรุปผลการทดสอบของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

จากผลทดสอบการอัดตัวที่รวบรวมมา พบว่า การอัดตัวของดินจะแบ่งเป็นสองรูปแบบอย่างชัดเจน คือ การผายออกและการถูเข้าหากันของเส้นการอัดตัวปกติของดินภายใต้แรงดึงน้ำที่แตกต่างกัน และจะขึ้นอยู่กับเส้นทางเดินของหน่วยแรงที่สัมพันธ์กับ LC Curve เดิมของดิน รูปที่ 3.13 แสดง

เส้นทางเดินของหน่วยแรงก่อนทดสอบการอัดตัว เมื่อตัวอย่างดินมี LC curve เดียวกัน จะเป็นการลดแรงดึงภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ เท่ากับ $\bar{p}_{r,1}$ จะเกิดขึ้นภายใน LC curve เดิม ขณะที่เส้นทางเดินหน่วยแรงภายใต้หน่วยแรงสุทธิเท่ากับ $\bar{p}_{r,2}$ จะเป็นการลดแรงดึงน้ำที่มีสถานะหน่วยแรงบางส่วนที่ข้าม LC curve เดิมของดิน

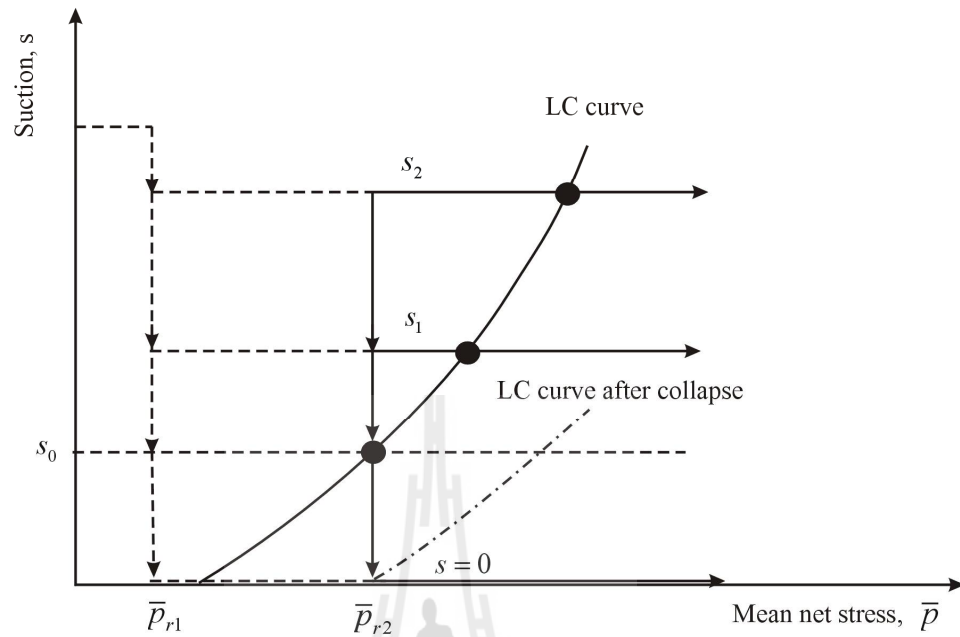
สำหรับการลดแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิ $\bar{p}_{r,1}$ จะทำให้เกิดรูปแบบการผายออกจากกันของเส้นโค้งการอัดตัวปกติ ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของ Mancuso et al. (2002); Chen et al. (1999); Rampino et al. (1999); Thu et al. (2007) และ Vassallo et al. (2007) กล่าวคือ ผลทดสอบเหล่านี้ได้จากตัวอย่างดินโดยการเพิ่มหรือลดแรงดึงน้ำของดินภายใน LC curve เดิม (ยังไม่มีครากเกิดขึ้น) ตัวอย่างดินจะแสดงพฤติกรรมแบบอิลาสติกโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดิน เมื่อทดสอบการอัดตัวไม่ว่าจะเป็นแบบไอโซโทรปิกหรือแบบหนึ่งทิศทาง ตัวอย่างดินจะมีหน่วยแรงครากสุทธิเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ ในขณะที่ค่าความชันในช่วงการอัดตัวปกติของดินจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินที่มีแรงดึงน้ำสูงจะมีความแกร่ง (Stiffness) สูงกว่าตัวอย่างดินที่มีแรงดึงน้ำต่ำกว่า

ในขณะที่ การลดแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิ $\bar{p}_{r,2}$ จะทำให้เกิดรูปแบบการลู่เข้าหากันของเส้นโค้งการอัดตัวปกติ ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของ Sivakumar and Wheeler (2000) สำหรับชุดข้อมูลที่ 1 และ 3 Charles and Chiu (2001) และ Sun et al. (2007c) กล่าวคือ ผลทดสอบเหล่านี้จะมีการลดแรงดึงน้ำจนเกิดการครากจากการลดลงของแรงดึงน้ำ (Wetting collapse) เนื่องจากสถานะของหน่วยแรงบางส่วนจะข้าม LC curve เดิมของดิน ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมแบบอิลาสโต-พลาสติก ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวโครงสร้างเม็ดดินเป็นระเบียบมากขึ้น จึงทำให้ตัวอย่างดินหลังการพังตัวนี้มีความแกร่งสูงกว่าตัวอย่างดินที่มีสถานะหน่วยแรงเริ่มต้นภายใน LC curve เดิม และเมื่อทดสอบการอัดตัวจะทำให้รูปแบบการอัดตัวเป็นดังรูปที่ 3.15

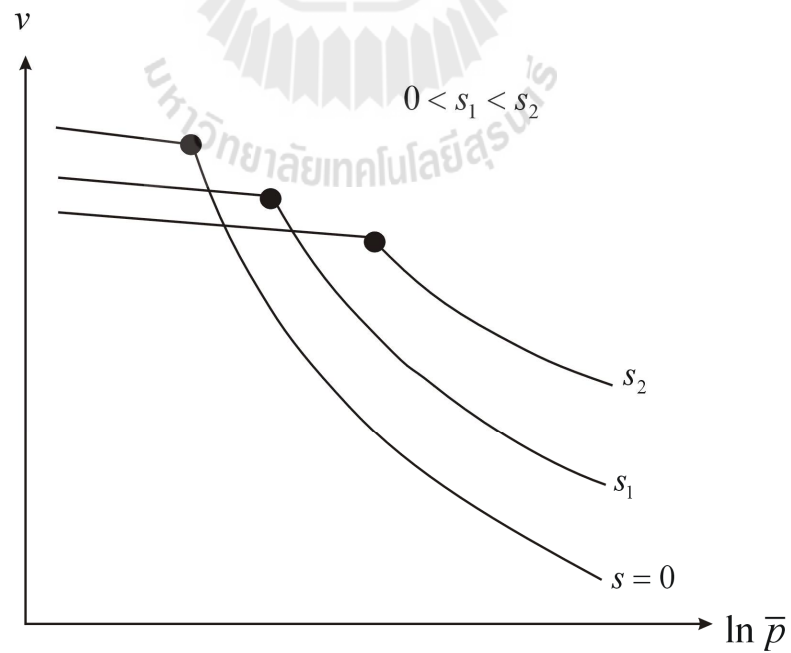
อย่างไรก็ตาม รูปแบบการอัดตัวของดินทั้งสองแบบนี้ จะมีความสอดคล้องและขัดแย้งกันทั้งคู่ กล่าวคือ สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยแท้จริงแล้วความแกร่งของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงดึงน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้น ซึ่งผลทดสอบที่มีรูปแบบแรกสามารถอธิบายพฤติกรรมนี้ได้ แต่ไม่สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการพังตัวเมื่อเปียกที่ลดลงเมื่อหน่วยแรงสุทธิเพิ่มขึ้นได้ ในขณะที่ผลทดสอบในรูปแบบที่สองสามารถอธิบายการพังตัวที่ลดลงตามหน่วยแรงสุทธิที่เพิ่มขึ้นได้ แต่ขัดแย้งกับพฤติกรรมของดินในด้านความแกร่งที่เพิ่มขึ้นตามระดับแรงดึงน้ำ

ผลการทดสอบการอัดตัวสรุปได้ว่า การอัดตัวทั้งสองรูปแบบจะเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงกับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้นอยู่กับสถานะหน่วยแรงเริ่มต้นของดิน กล่าวคือ บนหลักการอิลาสโต-พลาสติก รูปแบบการผายออกของเส้นการอัดตัวปกติเส้นทางเดินของหน่วยแรงก่อนทดสอบการอัด

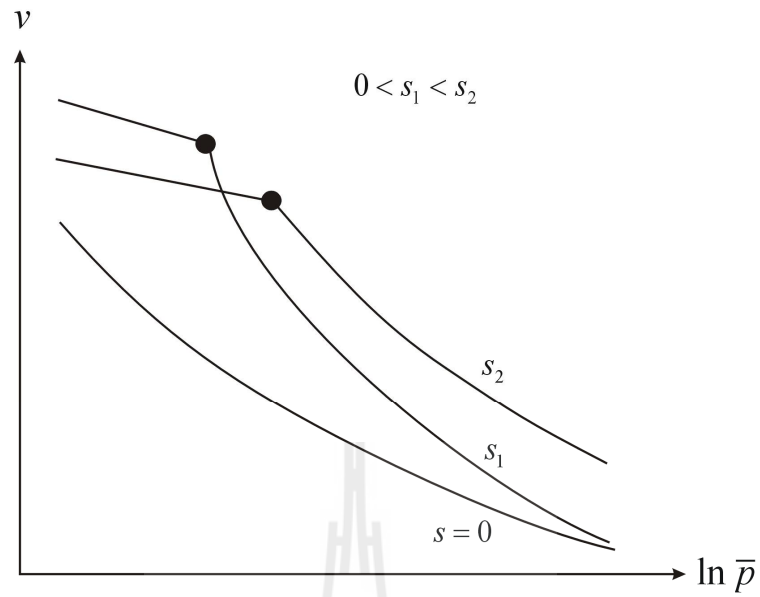
ตัวจะเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำเกิดขึ้นภายใน LC curve เดิมของดิน ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมแบบอิลาสติกโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินเกิดขึ้น ในขณะที่ผลทดสอบที่แสดงการดูเข้าของเส้นการอัดตัวปกติจะเกิดขึ้นเนื่องจากการลดแรงดึงน้ำที่ข้าม LC curve เดิมบางส่วน ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงพฤติกรรมแบบอิลาสโต-พลาสติก เนื่องจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างดินใหม่ที่เป็นระเบียบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกขึ้นซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการครากของดินที่เปลี่ยนไปทำให้ LC curve เดิมของดินเปลี่ยนเป็น LC curve ใหม่ขึ้น ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลง LC curve ของดินเนื่องจากโครงสร้างดินที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งสัมพันธ์กับเส้นทางเดินของหน่วยแรง และสามารถจำแนกออกเป็นสองกลุ่มอย่างชัดเจน คือ LC curve ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกจากผลของการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิภายใต้แรงดึงน้ำคงที่ และ LC curve จากผลของการลดลงของแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่เมื่อสถานะของหน่วยแรงข้าม LC curve เดิมของดิน ในขณะที่การประมาณค่าความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกจะสัมพันธ์กับความชื้นของเส้นการอัดตัวปกติ (λ^s) สำหรับเส้นทางเดินหน่วยที่เพิ่มหน่วยแรงสุทธิ (Loading stress path) ในขณะที่เส้นทางเดินของหน่วยแรงแบบการลดลงของแรงดึงน้ำ (Wetting stress path) จะสัมพันธ์กับความชื้นของเส้นการพังตัวปกติของดิน (λ^{*w}) ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการครากของดินไม่อิมตัวด้วยน้ำ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลง λ^s และ λ^{*w} ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในส่วนถัดไป



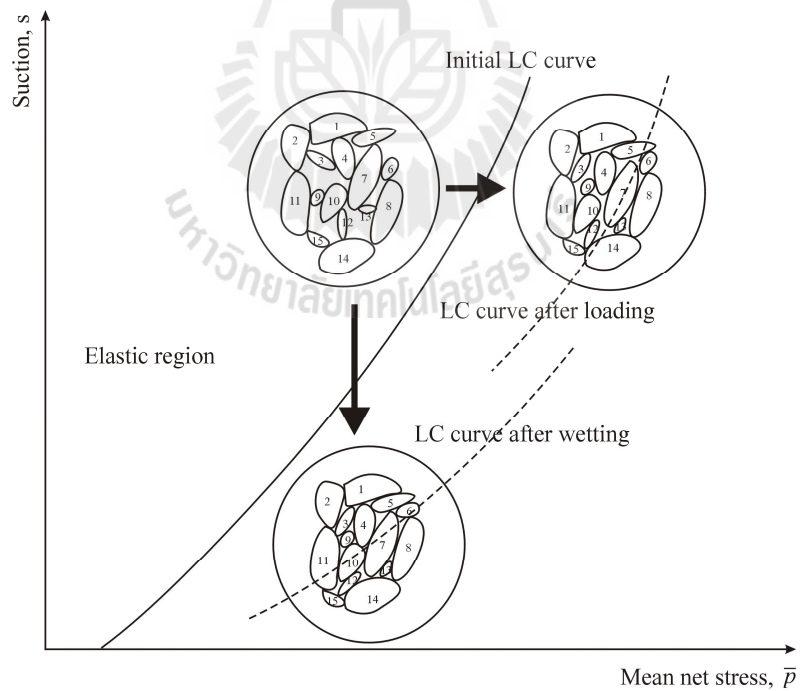
รูปที่ 3.13 ภาพร่างแสดงการเตรียมตัวอย่างดินที่สัมพันธ์กับ LC curve เริ่มต้นของดิน



รูปที่ 3.14 ภาพร่างแสดงรูปแบบการผายออกของเส้นโค้งการอัดตัวปกติของดิน



รูปที่ 3.15 ภาพร่างแสดงรูปแบบการลู่เข้าของเส้นโค้งการอัดตัวปกติของดิน



รูปที่ 3.16 ภาพร่างการเปลี่ยนแปลง LC curve ตามเส้นทางเดินหน่วยแรง

3.4 เส้นโค้งการอัดตัวของดิน

3.4.1 รูปแบบเส้นโค้งการอัดตัวของดินบนระนาบ $\ln-\ln$

ผลการทดสอบการอัดตัวของดิน โดยทั่วไปจะนิยมนำเสนอบนความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะกับหน่วยแรงแบบลอการิทึม ($v - \ln \sigma'$) และมีการนิยามค่าความของเส้นการอัดปกติ (λ) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแกร่งของดิน จากความสัมพันธ์แบบเส้นตรงบนระนาบดังกล่าวจะใช้ประมาณความเครียดเชิงปริมาตรของดิน แต่ในขณะที่ Butterfield (1979) และ Hashiguchi (1995) ได้ศึกษาผลทดสอบการอัดตัวของดินอิมิตัวด้วยน้ำหลายชนิด พบว่าการนิยามค่า λ บนความสัมพันธ์ของ $v - \ln \sigma'$ จะเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความเครียดเชิงปริมาตร เนื่องจากภายใต้หน่วยแรงประสิทธิผลที่สูงมากผลทดสอบการอัดตัวของดินจะไม่เป็นเส้นตรงบนระนาบ $v - \ln \sigma'$ แต่จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงบนระนาบ $\ln v - \ln \bar{p}$ ซึ่งภายหลังได้มีหลายแบบจำลองที่เลือกใช้ความสัมพันธ์นี้ในการอธิบายพฤติกรรมของดิน เช่น Rouainia and Muir Wood (2000) Sheng et al. (2004, 2008a) และ Masin (2005) เป็นต้น และจากเหตุผลดังกล่าวทำให้งานวิจัยนี้เลือกนิยาม λ รวมทั้ง κ บนความสัมพันธ์ของ $\ln v - \ln \bar{p}$ ดังนี้

$$\frac{\Delta(\ln v)}{\Delta(\ln \bar{p})} = -\lambda^s \quad (3.1)$$

$$\frac{\Delta(\ln v)}{\Delta(\ln \bar{p})} = -\kappa^s \quad (3.2)$$

โดยที่ λ^s เป็นความชันของเส้นการอัดตัวปกติ(NCL) ภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่ใด ๆ

κ^s เป็นความชันของเส้นถอน-เพิ่มหน่วยแรงสุทธิ (Unloading-Reloading Line, URL) ภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่ใด ๆ

3.4.2 การเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นโค้งการอัดตัวปกติของดินไม่อิมิตัวด้วยน้ำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าความชันของเส้นการอัดตัวปกติจะเป็นค่าที่สัมพันธ์ในการประมาณค่าความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติก (plastic volumetric strain) ของดิน สำหรับดินไม่อิมิตัวด้วยน้ำความชันของเส้นการอัดตัวปกติจะขึ้นอยู่กับสถานะหน่วยแรงเริ่มต้นที่สัมพันธ์กับ LC curve เดิมของดิน ซึ่งสามารถจำแนกการเปลี่ยนแปลงความชันนี้ได้สองรูปแบบคือ การเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นการอัดตัวปกติที่มีสถานะหน่วยแรงเริ่มต้นภายใน LC curve เดิม และส่วนที่ข้าม LC curve

เดิมของดิน แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นทั้งสองรูปแบบนี้จะมีความสัมพันธ์กัน โดยแยกออกเป็น

ก) ความชื้นของเส้นการอัดตัวของดินเมื่อสถานะหน่วยแรงเริ่มต้นอยู่ภายใน LC curve เดิม

จากผลทดสอบการอัดตัวของดินภายใต้ระดับแรงค้ำน้ำคงที่จากงานวิจัยที่รวบรวมมาสำหรับตัวอย่างดินที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงค้ำน้ำก่อนทดสอบการอัดตัวของดินอยู่ภายใน LC curve เดิม ความแกร่งของดินจะเพิ่มขึ้นตามแรงค้ำน้ำที่เพิ่มขึ้น แสดงได้จากการลดลงของค่าความชื้นของเส้นการอัดตัวของดินที่ลดลงตามแรงค้ำน้ำ

Thu et al. (2007) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง λ^s และแรงค้ำน้ำ พร้อมทั้งความสัมพันธ์ระหว่าง N^s กับแรงค้ำน้ำ บนระนาบ $v - \ln \bar{p}$ โดยรวมผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$N^s = N^0 - (1 - \Theta) / m_N \quad (3.3)$$

$$\lambda^s = \lambda^0 - (1 - \Theta) / m_\lambda \quad (3.4)$$

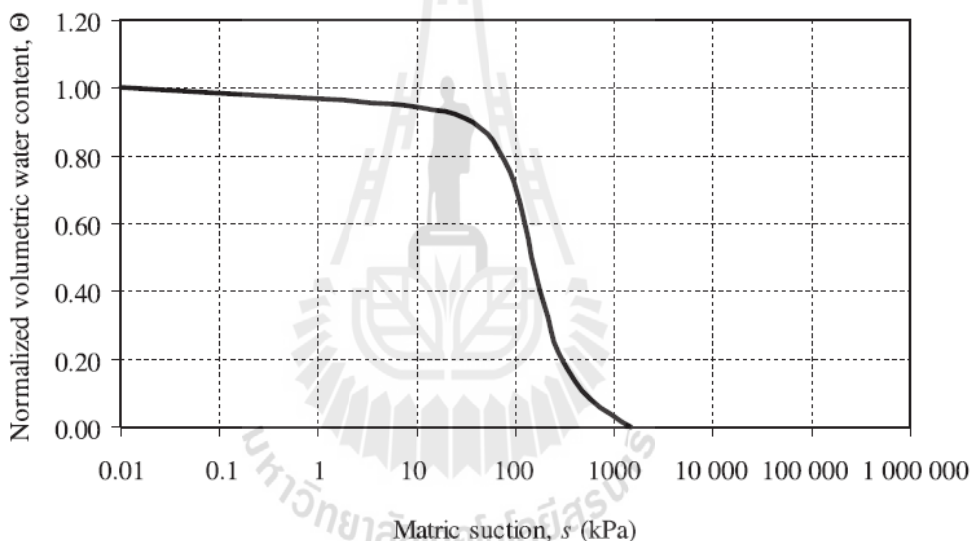
โดยที่ λ^0 เป็นความชื้นของเส้นการอัดตัวของดินอิ่มตัวด้วยน้ำบน $v - \ln \bar{p}$
 Θ เป็น Normalized volumetric water content ตามรูปที่ 3.17
 m_λ เป็นค่าคงตัวของดิน ควบคุมอัตราส่วนระหว่างค่า λ^s ต่ำสุด และ λ^0 บน $v - \ln \bar{p}$ ($m_\lambda \neq 0$)
 N^0 เป็นปริมาตรจำเพาะ ณ หน่วยแรงสุทธิอ้างอิง ของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ บน $v - \ln \bar{p}$
 m_N เป็นเป็นค่าคงตัวของดิน ควบคุมอัตราส่วนระหว่างค่า N^s ต่ำสุด และ N^0 บน $v - \ln \bar{p}$ ($m_N \neq 0$)

งานวิจัยนี้จะเลือกใช้ความสัมพันธ์ของ λ^s และ N^s ตามสมการ (3.3) และ (3.4) แตกต่างที่พารามิเตอร์ m_λ และ m_N เนื่องจากงานวิจัยนี้ เลือกนิยามค่า λ^s บนระนาบ $\ln v - \ln \bar{p}$ และ Θ มีค่าเท่ากับ S_l โดยเลือกความสัมพันธ์ตาม Brook and Corey (1964) ดังนั้น จึงสามารถปรับปรุงสมการ (3.3) และ (3.4) ได้ดังนี้

$$N^s = N^0 - (1 - S_l) / m'_N \quad (3.5)$$

$$\lambda^s = \lambda^0 - (1 - S_l) / m'_\lambda \tag{3.6}$$

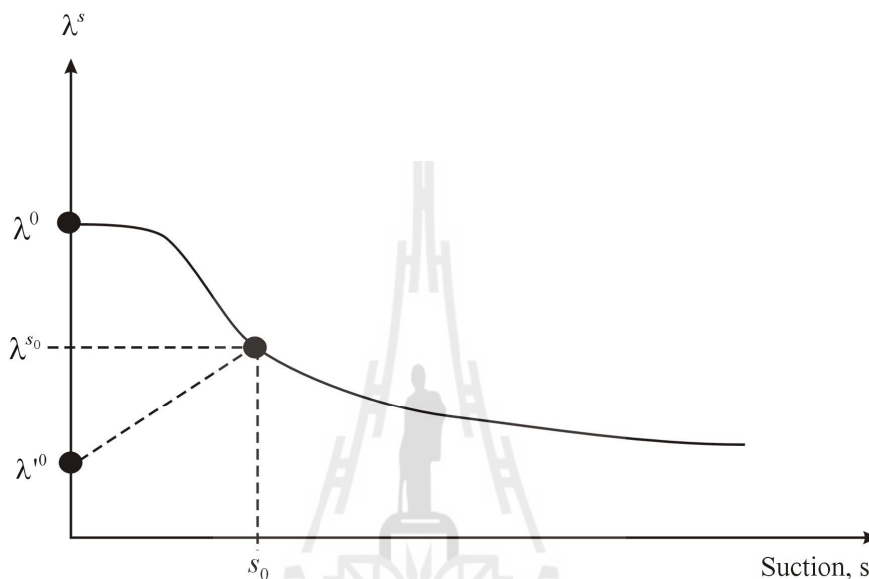
โดยที่ λ^0 เป็นความชื้นของเส้นการอัดตัวปกติของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ บน $\ln v - \ln \bar{p}$
 m'_λ เป็นค่าคงตัวของดิน ความคุมอัตราส่วนระหว่างค่า λ^s ต่ำสุด และ λ^0 บน $\ln v - \ln \bar{p}$ ($m'_\lambda \neq 0$)
 N^0 เป็นปริมาตรจำเพาะ ณ หน่วยแรงสุทธิอ้างอิง ของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ บน $\ln v - \ln \bar{p}$
 m'_N เป็นเป็นค่าคงตัวของดิน ความคุมอัตราส่วนระหว่างค่า N^s ต่ำสุด และ N^0 บน $\ln v - \ln \bar{p}$ ($m'_N \neq 0$)



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized volumetric water content และแรงดึงน้ำ

ข) ความชื้นของเส้นการอัดตัวปกติเมื่อสถานะหน่วยแรงเริ่มต้นข้าม LC curve เดิมของดิน
 สำหรับข้อมูลการอัดตัวของตัวอย่างที่เกิดการพังตัวในกระบวนการเตรียมตัวอย่าง หากอธิบายตามหลักการอิลาสโต - พลาสติก การลดแรงดึงน้ำจะทำให้ตัวอย่างดินเกิดการพังตัวขึ้น เมื่อแรงดึงน้ำลดลงเกินค่าแรงดึงน้ำ ณ LC curve (s_0) ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความแกร่งเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดึงน้ำที่ลดลง เมื่อตัวอย่างดินมี LC curve เริ่มต้นเดียวกัน และการทดสอบการอัดตัวที่เตรียมตัวอย่างภายใน LC curve ดังรูป 3.13 จะสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความแกร่งของตัวอย่างดินตามแรงดึงน้ำที่สัมพันธ์กับการเตรียมตัวอย่างที่สองกระบวนการได้ ดังรูปที่

3.18 ซึ่งแสดงภาพร่างแสดงการเปลี่ยนแปลง λ^s กับแรงดึงน้ำ เมื่อ λ^0 เป็นค่าความของเส้นอัดตัวของดินอิมตัวด้วยน้ำหลังการพังตัว ซึ่งจะคงที่ไม่ขึ้นกับระดับการพังตัวที่หน่วยสุทธิแตกต่างกันตามผลทดสอบของ Sun et al. (2003) หากตัวอย่างดินมี LC curve เริ่มต้นเดียวกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จะสมมุติให้การลดลงของค่าความชันของเส้นการอัดตัวของดิน เมื่อตัวอย่างดินเกิดการพังตัวที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ (λ^s) มีความสัมพันธ์แบบลดลงเชิงเส้นจาก λ^{s_0} ถึง λ^0



รูปที่ 3.18 ภาพร่างการเปลี่ยนแปลงความแกร่งของดินตามแรงดึงน้ำ

3.4.3 ความชันของเส้นการอัดตัวของดินที่ระดับอัตราส่วนหน่วยแรงต่างๆ

จากการศึกษาผลการทดสอบการอัดตัวของดินสามารถเสนอความสัมพันธ์ในการทำนายค่า λ^s ตามการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำได้จากสมการ (3.5) และ λ^s ได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นเมื่อ λ^0 และ λ^0 เป็นค่าคงตัว ซึ่งหาได้จากการทดสอบการอัดตัวของดินอิมตัวด้วยน้ำที่มีสถานะหน่วยแรงเริ่มต้นอยู่ก่อนและหลังการพังตัว Rampino et al, (1999) ได้ทดสอบการอัดตัวของดินภายใต้สภาวะไอโซโทรปิกและแบบหนึ่งทิศทาง พบว่าค่า λ^s ที่ระดับแรงดึงน้ำเท่า 0 kPa, 100 kPa, 200 kPa จะมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับการทดสอบทั้งสอง ดังนั้น จึงแสดงให้เห็นว่า λ^0 และ λ^0 สามารถหาได้ทั้งการทดสอบการอัดตัวภายใต้สภาวะไอโซโทรปิกหรือแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic compression) เช่นเดียวกับดินอิมตัวด้วยน้ำค่า λ จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของหน่วยแรง (Stress ratio, $\eta = q/p'$)

สำหรับค่า κ^s ซึ่งแสดงถึงการขยายตัวของตัวอย่างดินภายใต้พฤติกรรมแบบอิลาสติก จากผลทดสอบ พบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำ งานวิจัยนี้จึงสมมุติให้ κ^s เป็นอิสระกับแรงดึงและเป็นค่าคงตัวของดิน และสามารถหาได้จากผลทดสอบการอัดตัวของดินอิ่มตัวน้ำภายใต้สภาวะการถอน-เพิ่มของหน่วยแรง

3.4.4 ความชันของเส้นการพังตัว

จากผลทดสอบการอัดและการพังตัวภายใต้สภาวะไอโซโทรปิกของดินโดย Sun et al. (2007c) แสดงให้เห็นถึงระดับการพังตัวของดินที่ขึ้นอยู่กับหน่วยแรงสุทธิสำหรับตัวอย่างที่มีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นหลังการบดอัดเดียวกัน ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งจะเห็นว่าระดับการพังตัวของดินจะเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงสุทธิหากสถานะเริ่มต้นมีพฤติกรรมแบบอิลาสติกบนเส้นการอัดตัวภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่ ในขณะที่การพังตัวของดินจะลดลงตามหน่วยแรงสุทธิเมื่อสถานะเริ่มต้นอยู่ในช่วงการอัดตัวปกติ และจะสูงสุดเมื่อหน่วยแรงสุทธิมีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก

งานวิจัยนี้จะสมมุติให้ความสัมพันธ์ระหว่างเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะกับการลดลงของแรงดึงน้ำเป็นเส้นตรงบนระนาบ $\ln v - \ln(s + p_{at})$ ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์นี้จะเรียกว่า ค่าความชันของเส้นการพังตัว (λ^{*w}) แสดงถึงระดับการพังตัวที่ลดลงตามการเพิ่มของหน่วยแรงสุทธิเมื่อสถานะเริ่มต้นของดินอยู่บนเส้นการอัดตัวปกติภายใต้แรงดึงน้ำคงที่ใด ๆ และสามารถประมาณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเส้นการอัดตัวปกติของดินก่อนและหลังการพังตัว ดังนี้

$$\lambda^{*w} = \frac{\ln v_c - \ln v_1}{\ln(s_c + p_{at}) - \ln(s_1 + p_{at})} \quad (3.7)$$

| | | |
|--------|----------------|--|
| โดยที่ | λ^{*w} | เป็นความชันของเส้นการพังตัวที่ระดับหน่วยแรงสุทธิใด ๆ |
| | v_c | เป็นปริมาตรจำเพาะหลังการพังตัวเมื่อ $s = s_c$ |
| | s_c | เป็นแรงดึงน้ำหลังการพังตัวของดิน |
| | v_1 | เป็นปริมาตรจำเพาะบนเส้นการอัดตัวปกติก่อนการพังตัว |
| | s_1 | เป็นแรงดึงน้ำก่อนการพังตัวของดิน |

จากรูป 3.21 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนปริมาตรจำเพาะบนเส้นการอัดตัวที่ระดับแรงดึงน้ำทั้งสอง สามารถหาได้ ดังนี้

ก) เมื่อแรงดึงน้ำเท่ากับ s_1

$$\ln v_1 = \ln v_{1i} - \lambda^{s_1} \ln \left(\frac{\bar{p}}{\bar{p}_0^{s_1}} \right) \quad (3.8)$$

โดย

v_{1i} เป็นปริมาตรจำเพาะบนเส้นการอัดตัวปกติก่อนการพังตัว ที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ s_1 และหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ $\bar{p}_0^{s_1}$

λ^{s_1} เป็นความชันของเส้นการอัดตัวปกติก่อนการพังตัวที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ s_1

$\bar{p}_0^{s_1}$ เป็นหน่วยแรงครากสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ s_1

ข) เมื่อแรงดึงน้ำเท่ากับ s_c

$$\ln v_c = \ln v_{ci} - \lambda^{s_c} \ln \left(\frac{\bar{p}}{\bar{p}_0^{s_1}} \right) \quad (3.9)$$

โดย

v_{ci} เป็นปริมาตรจำเพาะบนเส้นการอัดตัวปกติก่อนการพังตัว ที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ s_c และหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ \bar{p}

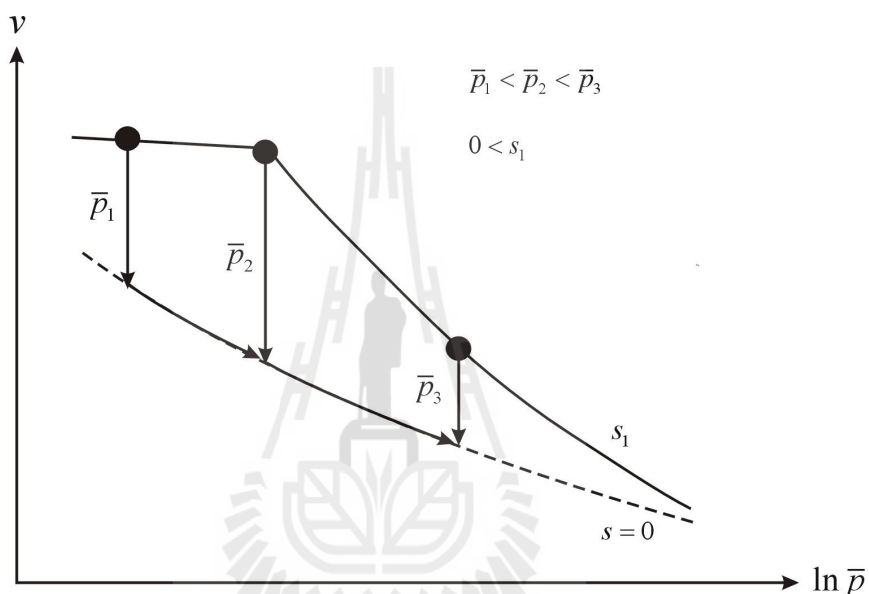
λ^{s_c} เป็นความชันของเส้นการอัดตัวปกติหลังการพังตัวที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ s_c

นำสมการ (3.8) และ (3.9) แทนใน (3.7) จะได้

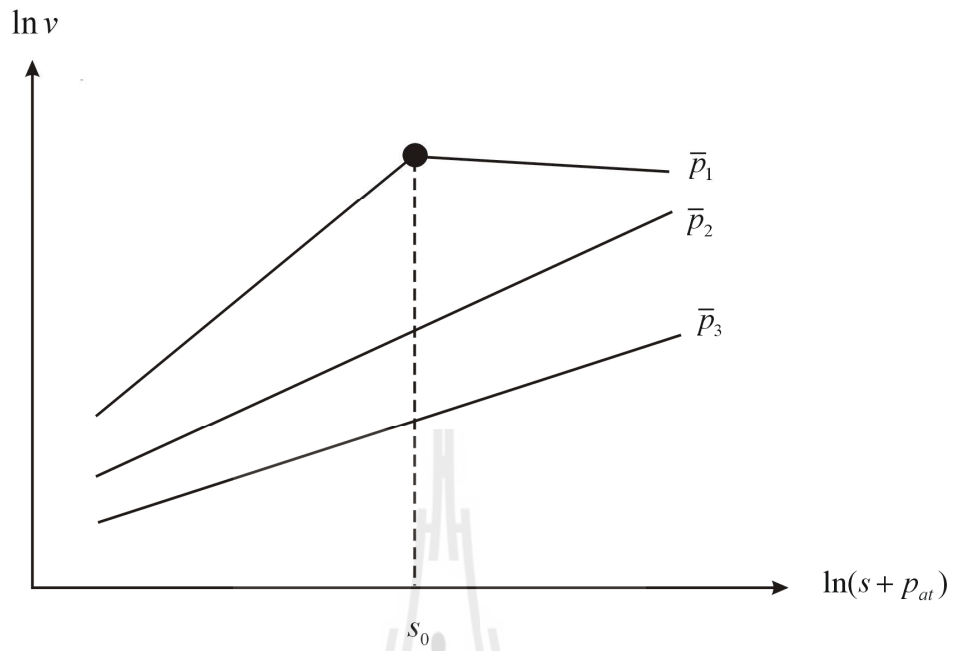
$$\lambda^{*w} = \lambda^{*w}_{\bar{p}_{ref}} + \frac{\left[(\lambda^{s_1} - \lambda^{s_c}) \ln \frac{\bar{p}}{\bar{p}_0^{s_1}} \right]}{\ln \left(\frac{s_1 + p_{at}}{s_c + p_{at}} \right)} \quad (3.10)$$

โดย $\lambda^{*w}_{\bar{p}_{ref}}$ เป็นความชันของเส้นการพังตัวที่ระดับหน่วยแรงสุทธิอ้างอิง ($\bar{p}_0^{s_1}$)

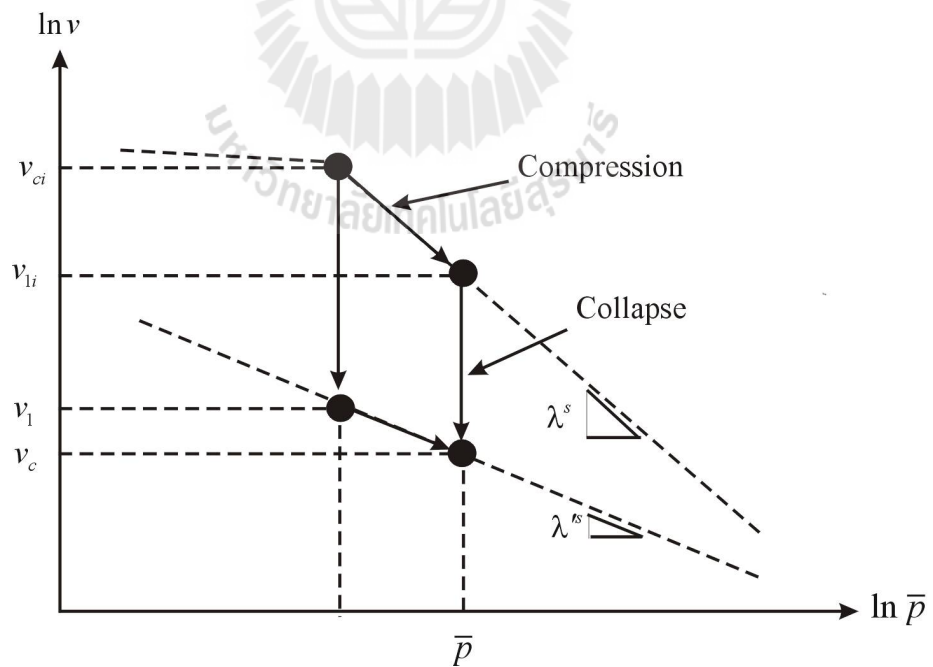
สมการ (3.10) สามารถใช้ทำนายระดับการพังตัวที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสุทธิ หากทราบ $\lambda^{*w}_{\bar{p}_{ref}}$ ที่สัมพันธ์กับการพังตัวเริ่มต้นของดิน ที่ระดับหน่วยแรงสุทธิ $\bar{p} = \bar{p}_0^{s_1}$ ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบการพังตัวภายใต้หน่วยแรงสุทธิต่ำ ๆ จนกระทั่งดินอิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อวัดปริมาตรจำเพาะเริ่มต้นและทำการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิเพื่อหาความชัน λ^0 หลังการพังตัวเริ่มต้นของดิน โดยสามารถทดสอบได้ภายใต้สภาวะแบบไอโซโทรปิกหรือแบบหนึ่งทิศทาง



รูปที่ 3.19 ภาพร่างระดับการพังตัวภายใต้หน่วยแรงสุทธิต่าง ๆ บนระนาบ $v - \ln \bar{p}$



รูปที่ 3.20 ภาพร่างระดับการพังตัวของดินบนระนาบ $\ln v - \ln(s + p_{at})$



รูปที่ 3.21 ภาพร่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการอัดตัวกับการพังตัวของดิน

บทที่ 4

พื้นผิวครากของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

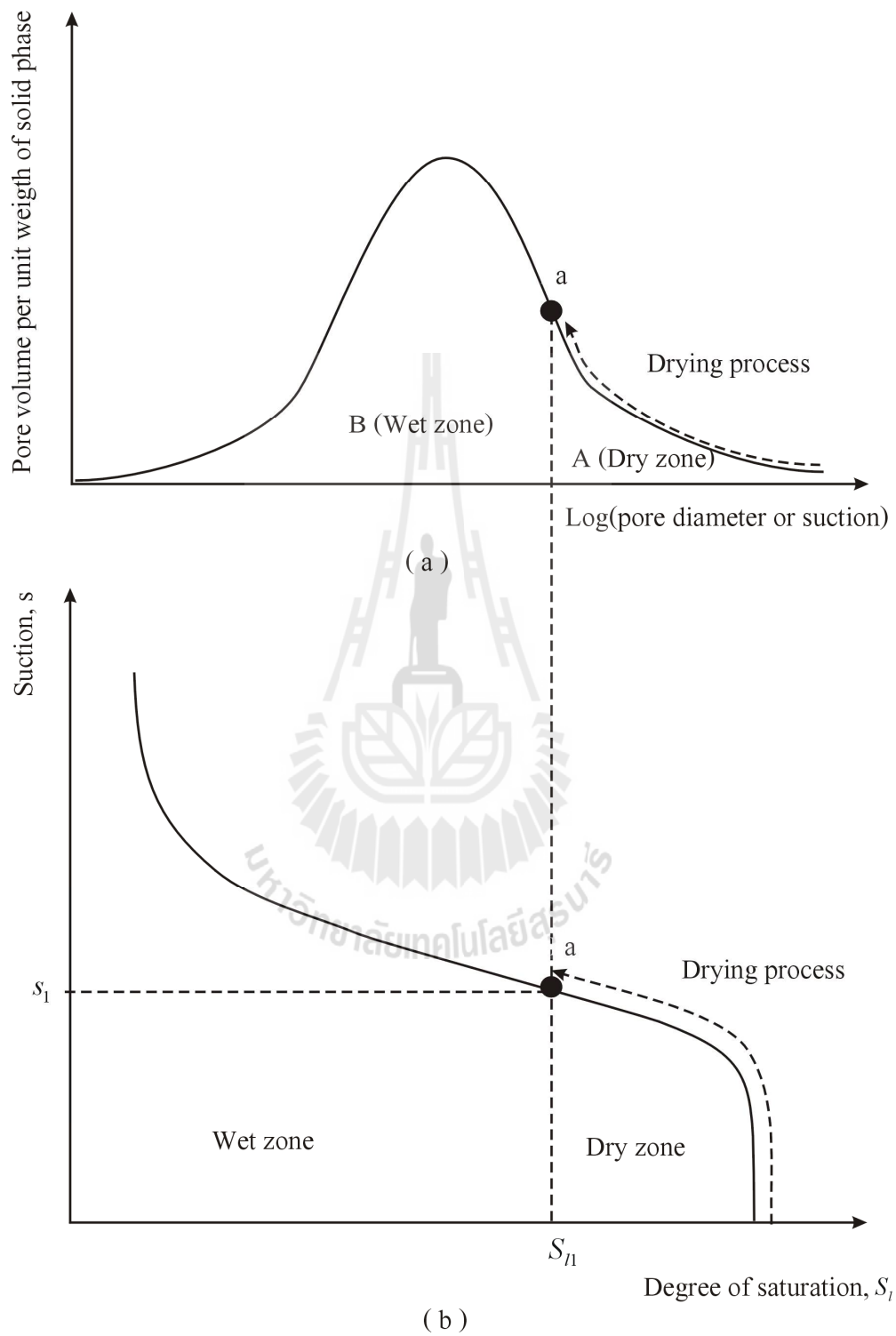
4.1 พื้นผิวครากเริ่มต้น

พื้นผิวครากเริ่มต้นบนระนาบหน่วยแรงสุทธิ และแรงดึงน้ำ หรือ LC curve เริ่มต้น เปรียบเสมือนเส้นอ้างอิง เพื่อใช้สำหรับการนิยาม LC curve ต่อเนื่อง ที่สัมพันธ์กับเส้นทางเดินหน่วยแรงถัดไป งานวิจัยนี้จะนิยาม LC curve เริ่มต้น โดยใช้การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในโพรงต่างๆ ของดิน ตามการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ (Drying path) ภายใต้ระดับหน่วยแรงสุทธิคงที่เท่ากับศูนย์ โดยให้ดินถูกทำให้แห้งจากดินสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำและมีสมมติฐาน ดังนี้

- 1) สำหรับโพรงที่ยังมีน้ำเต็มอยู่ ขนาดของหน่วยแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้นรอบ ๆ โพรงจะมีค่าเท่ากับขนาดของแรงดึงน้ำ
- 2) เมื่อแรงดึงน้ำในโพรงมีค่าเกินกว่าค่าแรงดึงน้ำที่อากาศเข้า (Air entry suction, s_{ae}) ของโพรง น้ำในโพรงจะถูกแทนที่ด้วยอากาศ ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของดินรอบ ๆ โพรงจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่กระทำต่อโครงสร้างดินรอบโพรง หรือหน่วยแรงครากประสิทธิผลจะมีค่าเท่ากับ s_{ae}

ในมวลดินมีโพรงหลายขนาด หน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นจึงต้องเป็นค่าเฉลี่ยต่อปริมาตรโพรงอากาศทั้งหมดในมวลดิน โดยสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและขนาดของโพรงอากาศในมวลดิน (Pore – size distribution curve) ดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1(a) เมื่อมีกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำ ไปยังจุด a ดินจะมีส่วนที่โพรงอากาศแห้งเท่ากับ A และส่วนที่เปียกเท่ากับ B จากสมมติฐานข้อ 1) และ 2) การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากประสิทธิผล ($\Delta p'_0$) ที่กระทำต่อโครงสร้างดินรอบโพรงทั้งหมด จากการเพิ่มแรงดึงน้ำไปยังจุด a จะมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore – size distribution curve กับ SWCC

$$\Delta p'_0 = \frac{s_{ae}A + sB}{A + B} \quad (4.1)$$

- โดยที่ $\Delta p'_0$ เป็นหน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของแรงดึงน้ำ
 s_{ae} เป็นแรงดึงน้ำที่อากาศเข้าของโพรง
 A พื้นที่ใต้กราฟส่วนแห้งบน Pore – size distribution curve
 B พื้นที่ใต้กราฟส่วนเปียกบน Pore – size distribution curve

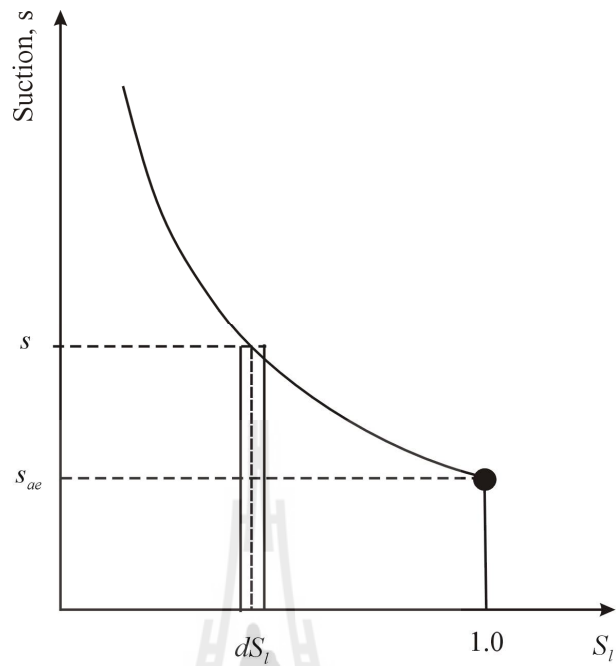
สมการ(4.1) เป็นสมการทำนายเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผล โดยการแบ่งส่วนย่อยบน Pore – size distribution curve ซึ่งเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนแปลงของโพรงทุก ๆ การเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ จึงทำให้ส่วนแห้งเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน อีกทั้ง Pore – size distribution curve เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่หาได้ยากจากการทดสอบ

รูปที่ 4.1 (b) แสดงภาพร่างเส้นโค้งคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Soil-water characteristic curve, SWCC) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation, S_l) ได้จากปริพันธ์ของ Pore – size distribution curve (Fredlund and Xing, 1994) จากรูป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนแห้งของโพรงในดินจากกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำ หน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับปริพันธ์ของ SWCC ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนิยามการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากประสิทธิผลโดยการหาปริพันธ์ของความสัมพันธ์นี้ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่หาได้ง่ายกว่าจากการทดสอบ และเลือกความสัมพันธ์ตาม Brook and Corey (1964) ดังสมการต่อไปนี้

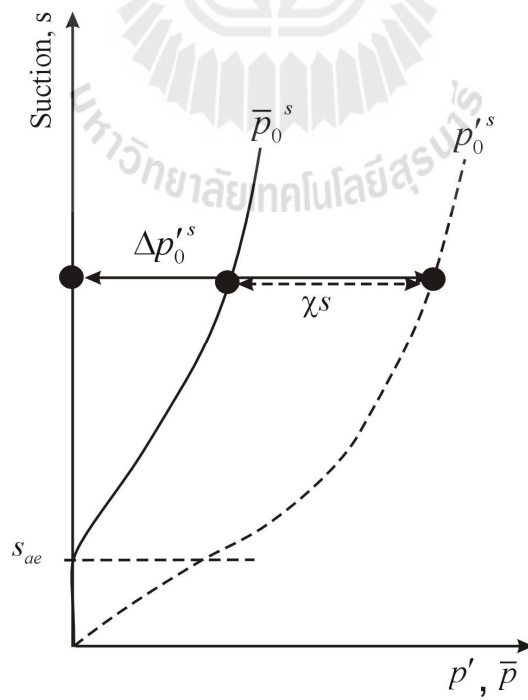
$$S_l = 1.0 \quad \text{เมื่อ } s < s_{ae} \quad (4.2a)$$

$$S_l = \left(\frac{s_{ae}}{s} \right)^n \quad \text{เมื่อ } s \geq s_{ae} \quad (4.2b)$$

- โดยที่ n เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องรูปร่างของการกระจายปริมาตรโพรงอากาศในมวลดิน (Pore-shape parameter)



รูปที่ 4.2 ภาพร่าง SWCC ของดินโดยใช้สมการ Brook and Corey (1964)



รูปที่ 4.3 ภาพร่างแสดง LC curve เริ่มต้นของดิน

สมการ (4.2a) และ (4.2b) เป็นสมการทำนาย SWCC ของดิน ดังภาพร่างในรูปที่ 4.2 จากรูปเมื่อหาปริพันธ์ที่สัมพันธ์กับการเพิ่มแรงดึงน้ำของความสัมพันธ์นี้จะได้การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากประสิทธิผลที่แรงดึงน้ำใด ๆ (Δp_0^s) ดังนี้

$$\Delta p_0^s(S_l) = \int_{S_l}^{1.0} s dS_l + sS_l \quad (4.3)$$

$$\Delta p_0^s(S_l) = \int_{S_l}^{1.0} \frac{s_{ae}}{S_l^{\frac{1}{n}}} dS_l + sS_l \quad (4.4)$$

$$\Delta p_0^s(S_l) = \frac{ns_{ae}}{n-1} \left(1 - S_l^{\left(\frac{n-1}{n}\right)} \right) + sS_l \quad (4.5)$$

โดยที่ $\Delta p_0^s(S_l)$ เป็นหน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ ขึ้นกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

สมการ (4.5) เป็นสมการทำนายการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากประสิทธิผล จากการเพิ่มแรงดึงน้ำในดินบนระนาบหน่วยประสิทธิผลกับแรงดึงน้ำ เนื่องจากหน่วยแรงครากที่ต้องการนำเสนอ ในงานวิจัยนี้จะเป็นหน่วยแรงครากบนพื้นฐานของหน่วยสุทธิ และแรงดึงน้ำ ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงหน่วยแรงครากประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นให้เป็นหน่วยแรงครากสุทธิ ทั้งนี้หน่วยแรงสุทธิจะมีความสัมพันธ์กับหน่วยแรงประสิทธิผลตาม Bishop (1959) ทำให้ได้หน่วยแรงครากสุทธิหลังกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำ (\bar{p}_0^s) ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\bar{p}_0^s = \Delta p_0^s(S_l) - \chi s \quad (4.6)$$

โดยที่ \bar{p}_0^s เป็นหน่วยแรงครากสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ

ค่า χ ในสมการ (4.6) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ S_l (Bolzon et al., 1996) ตาม Brook and Corey (1964) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ (4.2a) และ (4.2b) สมการ (4.6) ใช้ในการทำนายหน่วยแรงครากสุทธิตามการเพิ่มแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น หากกระบวนการ

เพิ่มแรงดึงน้ำเกิดขึ้นภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ใด ๆ (\bar{p}_0^0) สามารถทำนายได้โดย สมมติให้ SWCC ของดินไม่ขึ้นกับระดับหน่วยแรงสุทธิ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

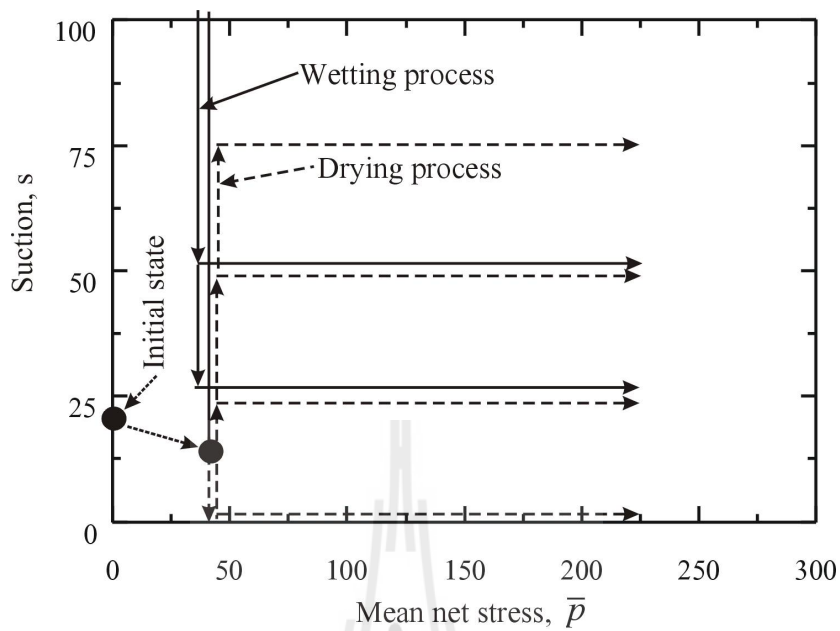
$$\bar{p}_0^s = \bar{p}_0^0 + (\Delta p_0^s - S_r s) \quad (4.7)$$

โดยที่ \bar{p}_0^0 เป็นหน่วยแรงครากสุทธิที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

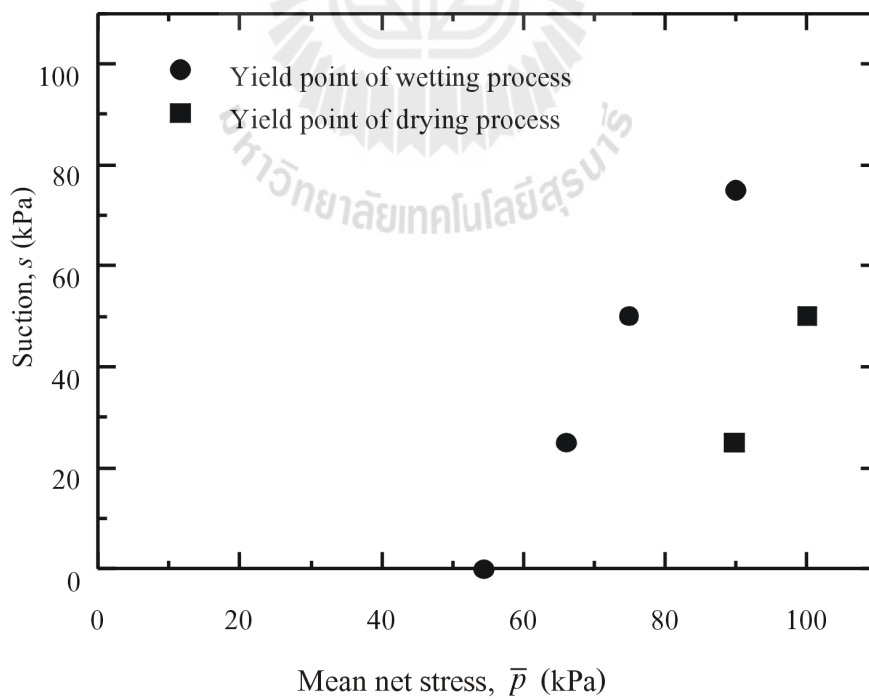
หน่วยแรงครากสุทธิเริ่มต้นในสมการ (4.7) ยังไม่สามารถนำไปนิยาม LC curve เริ่มต้นได้ เนื่องจาก LC curve ของดินจะเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ การเพิ่มขึ้นของระดับแรงดึงน้ำ เห็นได้จากผลทดสอบของ Stager (2010) ซึ่งทดสอบกับ Fine-sandy silt บดอัด มืองค์ประกอบของดิน คือ ดินเหนียว 5.9 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 56.3 เปอร์เซ็นต์ และดินทรายละเอียด 37.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีแรงดึงน้ำเริ่มประมาณ 16 ถึง 19 kPa และมีการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัว ดังรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.4 เป็นการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัวของ Stager (2010) โดยการเพิ่มและลดแรงดึงน้ำจากสภาวะเริ่มต้น การทดสอบจะแยกออกเป็นสองส่วนตามการเตรียมตัวอย่าง คือ เตรียมจากการเพิ่มแรงดึงจากแรงดึงน้ำเริ่มต้น โดยเพิ่มแรงดึงน้ำไปยังค่าสูง ๆ และลดลงมายังค่าที่ต้องการทดสอบการอัดตัวซึ่งมีค่าเท่า 50 และ 25 kPa ตามลำดับ และการเตรียมตัวอย่างโดยการลดแรงดึงน้ำ จะกระทำโดยลดแรงดึงน้ำจากแรงดึงน้ำเริ่มต้นไปที่ 0 kPa หลังจากนั้น เพิ่มแรงดึงน้ำไปยังค่าที่ต้องการทดสอบการอัดตัว เท่ากับ 0 25 50 และ 75 kPa ตามลำดับ จากการเตรียมตัวอย่างนี้จะได้หน่วยแรงครากสุทธิ ดังรูปที่ 4.5

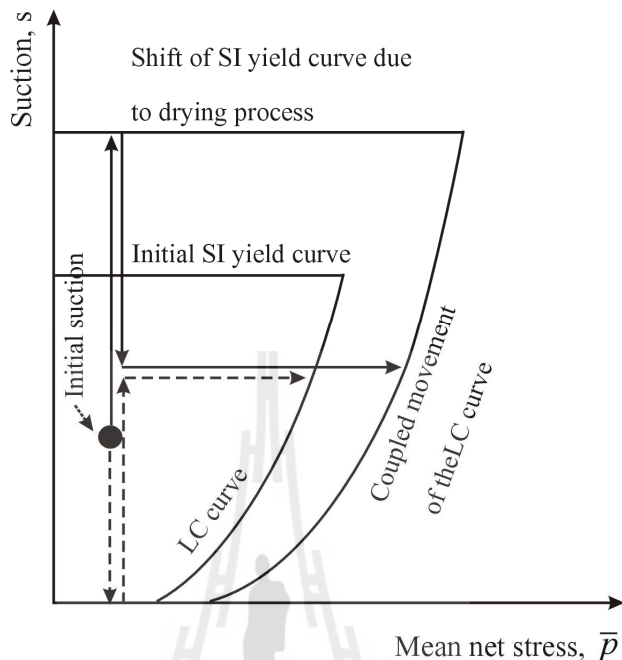
รูปที่ 4.5 หน่วยแรงครากสุทธิจากการเตรียมตัวอย่างทั้งสองรูปแบบจะแตกต่างกัน โดยการเตรียมจากการเพิ่มแรงดึงจะมีค่าสูงกว่าการลดแรงดึงน้ำ ทำให้ LC curve ของดิน ขยายมากกว่าสาเหตุคือ การเพิ่มแรงดึงน้ำก่อนทดสอบการอัดตัว จะมีการเพิ่มเกินค่าแรงดึงน้ำสูงสุดที่ตัวอย่างดินเคยได้รับ (Suction yield, s_0) จากกระบวนการบดอัด ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเรียกพื้นผิวครากจากการเพิ่มแรงดึงน้ำนี้ว่า SI yield curve (Alonso et al., 1990) การเปลี่ยนแปลง SI yield curve นี้ จะทำให้เกิดความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกเพิ่มขึ้นและ LC curve ใหม่ขึ้น ดังนั้น หากดินที่ไม่เคยมีประวัติการรับแรง การเพิ่มแรงดึงน้ำจากดินที่มีสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำจะทำให้ LC curve ของดินเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ตามระดับของแรงดึงน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังภาพร่างในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.4 การเตรียมตัวก่อนทำสอบการอัดตัวของ Stager G. (2010)



รูปที่ 4.5 หน่วยแรงครากสุทธิจากผลการทดสอบการอัดตัวของ Stager G. (2010)



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของ LC curve จากการเตรียมตัวอย่างของ Stager G. (2010)

รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลง LC curve ตามการเพิ่มแรงดึงน้ำของดิน โดยเริ่มจากการอัดตัวภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ไปยังหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ \bar{p}_0^0 และเพิ่มแรงดึงน้ำไปยัง s_1 และ s_2 ตามลำดับ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง LC curve ซึ่งจะเป็น LC curve เริ่มต้น เมื่อดินถูกเพิ่มแรงดึงน้ำไปยังระดับดังกล่าว ดังนั้น งานวิจัยนี้จะนิยาม LC curve เริ่มต้น โดยมีสมมติฐาน คือ

- 1.) LC curve เริ่มต้นจะมีรูปเหมือนกัน ทุกการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำ
- 2.) LC curve จะอยู่บนระนาบที่มีปริมาตรจำเพาะคงที่
- 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 ที่ระดับแรงดึงน้ำมีค่าเท่ากับศูนย์ และให้ค่า v เท่ากับปริมาตรจำเพาะของตัวเอง ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9
- 5.) $\bar{p}_{e,s}$ ต้องมีค่าเท่ากันทุก ๆ หน่วยแรงสุทธิและแรงดึงน้ำ เมื่อ v เท่ากัน

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

เมื่อแรงดึงเท่ากับศูนย์

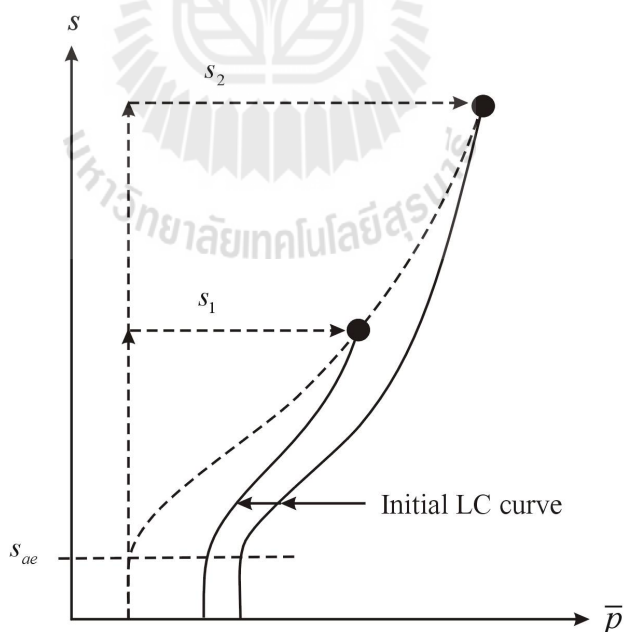
$$\ln v = N^0 - \lambda^0 \ln \bar{p}_{e,s} \tag{4.8}$$

เมื่อแรงดึงน้ำเท่ากับ s

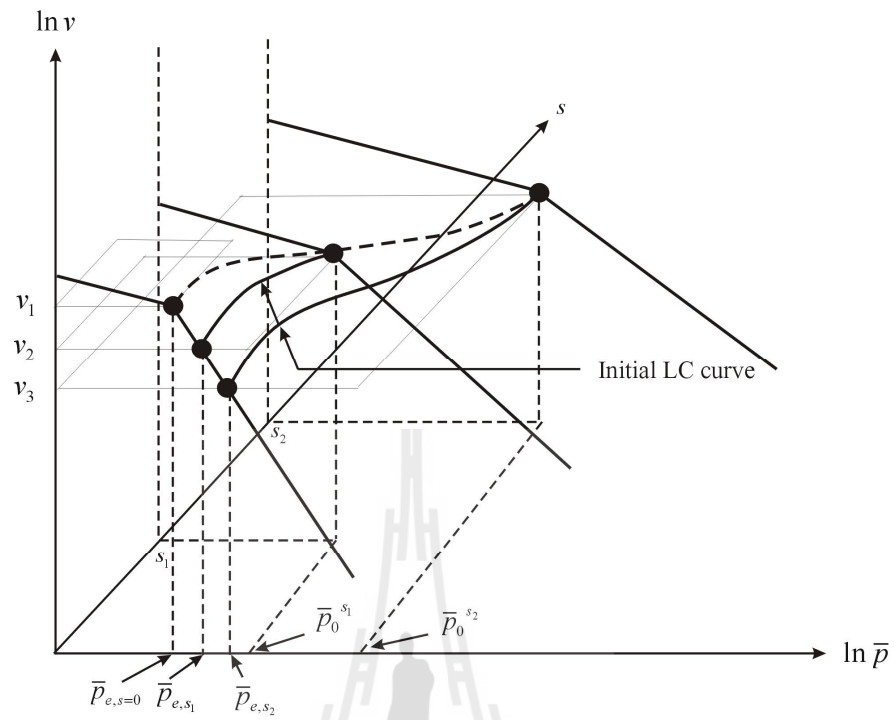
$$\ln v = N^s - \lambda^s \ln \bar{p}_0^s \tag{4.9}$$

เมื่อปริมาตรจำเพาะเท่ากัน สมการ(4.9) จะเท่ากับสมการ (4.8) จะได้ว่า

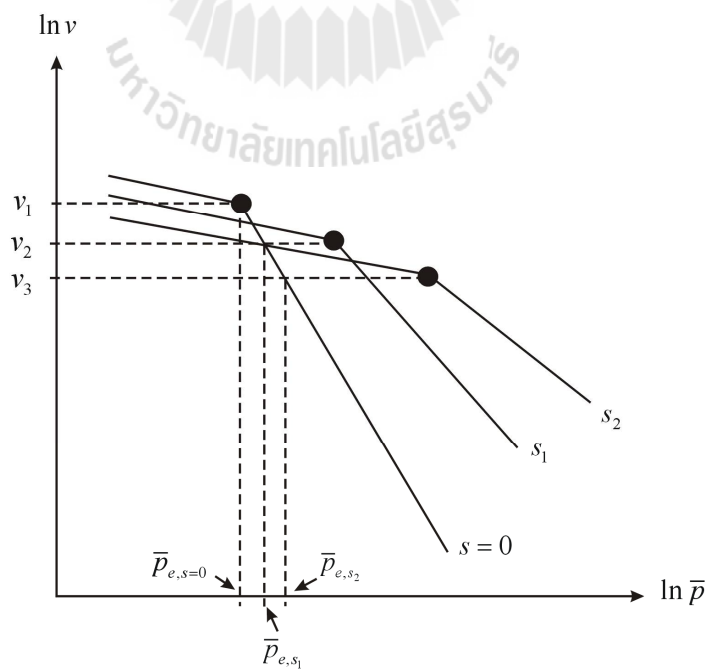
$$N^s - \lambda^s \ln \bar{p}_0^s = N^0 - \lambda^0 \ln \bar{p}_{e,s} \tag{4.10}$$



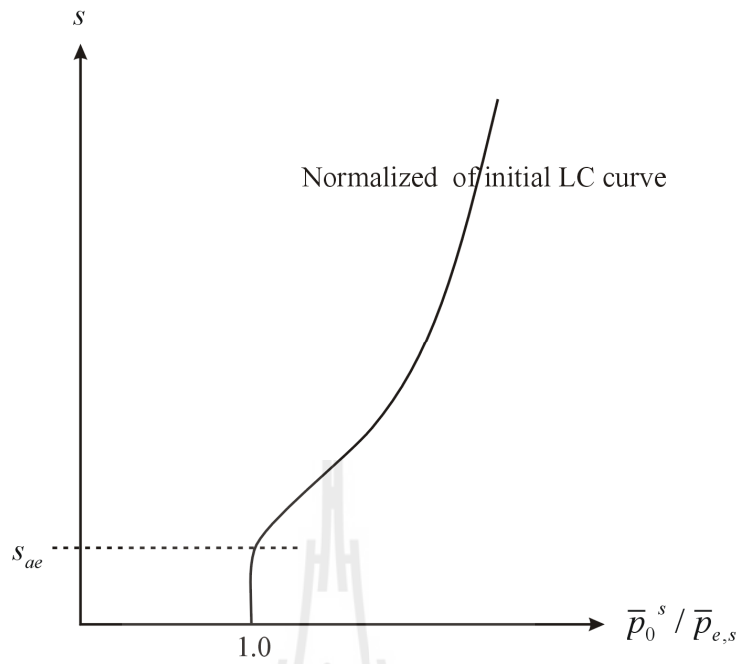
รูปที่ 4.7 LC curve ภายใต้ระดับแรงดึงน้ำต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 LC curve ของดิน บนห้วงทะเล $\ln v - \ln \bar{p} - s$



รูปที่ 4.9 หน่วยแรงสุทธิสมมูลบนระนาบ $\ln v - \ln \bar{p}$



รูปที่ 4.10 LC curve เริ่มต้น ที่ Normalization ด้วยค่า $\bar{p}_{e,s}$

ดังนั้น

$$\bar{p}_{e,s} = \left[\exp(N^0 - N^s + \lambda^s \ln \bar{p}_0^s) \right]^{1/\lambda^0} \quad (4.11)$$

สมการ (4.11) เป็นสมการทำนายค่า $\bar{p}_{e,s}$ ตลอดกระบวนการเพิ่มแรงดึงน้ำไปยังระดับต่างๆ เมื่อนำสมการ (4.7) มาทำการ Normalization ด้วยหน่วยแรงนี้ จะได้ภาพร่างดังรูปที่ 4.10 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{\bar{p}_0^s}{\bar{p}_{e,s}} = \frac{\bar{p}_0^0 + \left(\frac{n s_{ae}}{n-1} \left(1 - S_l \left(\frac{n-1}{n} \right) \right) + s S_l \right) - s S_l}{\left[\exp(N^0 - N^s + \lambda^s \ln \bar{p}_0^s) \right]^{1/\lambda^0}} \quad (4.12)$$

โดยที่ N^s, λ^s คำนวณตามสมการ (3.5) และ (3.6)

สมการ (4.12) สามารถหาค่าหน่วยแรงสุทธิ บน LC curve เริ่มต้น (\bar{p}_{0i}^s) ภายใต้ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ สามารถได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\bar{p}_{0i}^{s_i} = \bar{p}_{e,s_i} \left\{ \frac{\bar{p}_0^0 + \left(\frac{ns_{ae}}{n-1} \left(1 - S_l \left(\frac{n-1}{n} \right) \right) + sS_l \right) - sS_l}{\left[\exp(N^0 - N^s + \lambda^s \ln \bar{p}_0^s) \right]^{\lambda^0}} \right\} \quad (4.13)$$

โดยที่ $\bar{p}_{0i}^{s_i}$ เป็นหน่วยแรงครากสุทธิบน LC curve เริ่มต้น ที่ระดับแรงดึงน้ำ s_i

\bar{p}_{e,s_i} เป็นหน่วยแรงสุทธิสมมูลที่ระดับแรงดึงน้ำ s_i

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและแรงดึงน้ำ

ในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและแรงดึงน้ำ บน Mohr-Coulomb failure criterion ของ Bishop (1959) จะมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\tau_f = c' + \left\{ (\sigma_f - u_a)_f + \chi(u_a - u_w)_f \right\} \tan \phi' \quad (4.14)$$

โดยที่ τ_f เป็นหน่วยแรงเฉือนบนระนาบวิบัติ (Failure plane)

c' เป็นหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินบนระนาบ τ_f และ $(\sigma_f - u_a)_f$ เมื่อแรงดึงน้ำมีค่าเป็นศูนย์

$(\sigma_f - u_a)_f$ เป็นหน่วยแรงตั้งฉากสุทธิบนระนาบวิบัติ

u_{af} เป็นความดันอากาศบนระนาบวิบัติ

$(u_a - u_w)_f$ เป็นแรงดึงน้ำบนระนาบวิบัติ

u_{wf} เป็นความดันน้ำบนระนาบวิบัติ

ϕ' เป็นมุมเสียดทานภายในบนระนาบ τ_f และ $(\sigma_f - u_a)_f$

สมการ (4.14) เป็นหน่วยแรงเฉือนบนระนาบวิบัติในหน่วยแรงประสิทธิผล สามารถเขียนใหม่ ดังต่อไปนี้

$$\tau_f = \bar{c} + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' \quad (4.15)$$

$$\bar{c} = c' + \chi(u_a - u_w)_f \tan \phi' \quad (4.16)$$

สมการ (4.16) \bar{c} เป็นหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน บนระนาบ τ_f และ $(\sigma_f - u_a)_f$ ภายใต้แรงดึงน้ำคงที่ใด ๆ หากพิจารณาดินที่ไร้พันธะเชื่อมประสาน c' มีค่าเป็นศูนย์ จะได้ความสามารถรับแรงดึง (Tensile strength) บนระนาบหน่วยแรงสุทธิและแรงดึงน้ำ ที่สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน ดังรูปที่ 4.11 มีความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$\bar{c} = -\bar{p}_{0,s} \tan \phi' = \chi(u_a - u_w)_f \tan \phi' \quad (4.17)$$

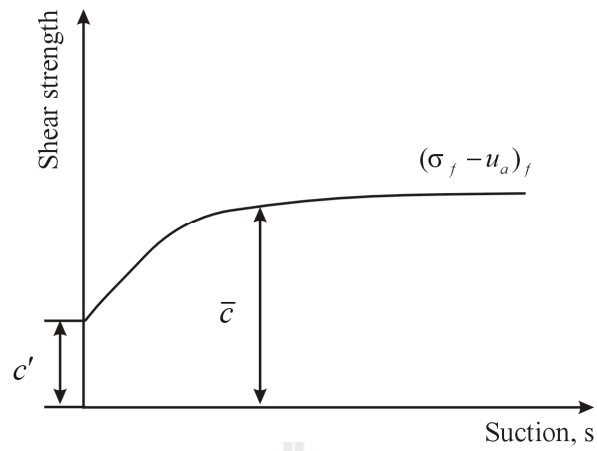
จากสมการ (4.17) เมื่อ χ กำหนดให้เท่ากับ S_f ตาม Brook and Corey (1964) จะได้ LC curve ที่แสดงถึงกำลังรับแรงดึงของดินตามระดับแรงดึงน้ำ ดังรูปที่ 4.12 โดยมีความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$-\bar{p}_{0,s} = s \quad \text{เมื่อ } s < s_{ae} \quad (4.18a)$$

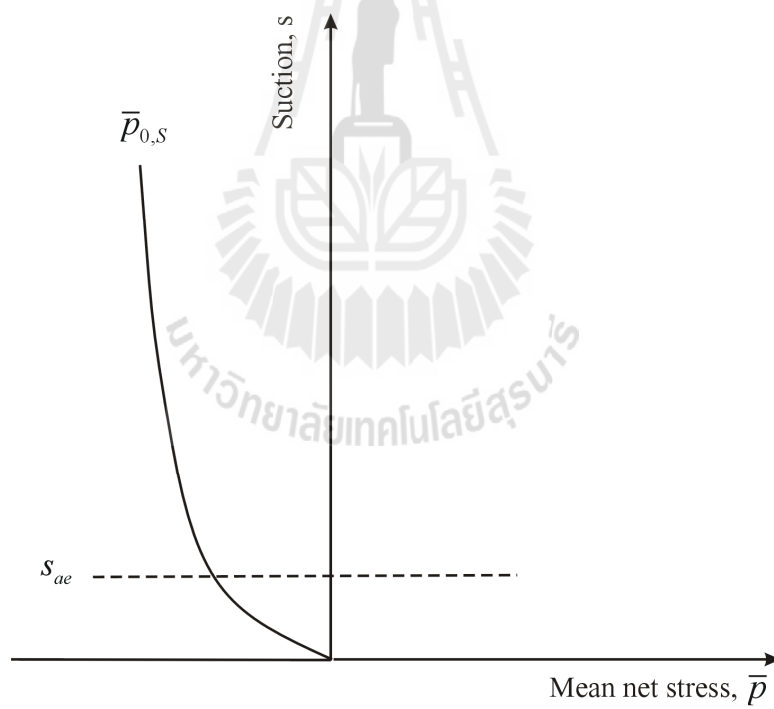
$$-\bar{p}_{0,s} = \left(\frac{s_{ae}^*}{s} \right)^n s \quad \text{เมื่อ } s \geq s_{ae} \quad (4.18b)$$

โดยที่ $\bar{p}_{0,s}$ เป็นหน่วยแรงครากสุทธิที่บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินตามแรงดึงน้ำ

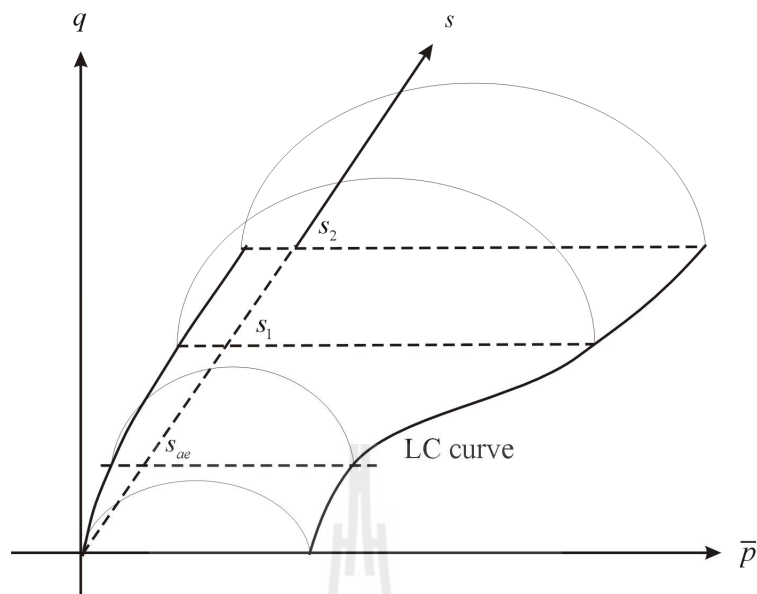
จาก LC curve ที่นำเสนอ สามารถพิจารณาบนห้วงเศษ $\bar{p} - q - s$ โดยสมมติพื้นผิวครากบนระนาบ $\bar{p} - q$ เป็นรูปวงรีตามแบบจำลอง Modified Cam clay จะได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและแรงดึงน้ำ



รูปที่ 4.12 ภาพร่าง LC curve ที่แสดงถึงกำลังรับแรงดึงของดิน



รูปที่ 4.13 ภาพร่างพื้นผิวครากบนห้วงทะเล $\bar{p} - q - s$

4.3 พื้นผิวครากต่อเนื่อง

4.3.1 พื้นผิวครากสำหรับเพิ่มหน่วยแรงสุทธิภายใต้ระดับแรงดึงน้ำคงที่

การเปลี่ยนแปลง LC curve ภายใต้การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสุทธิจะนิยามโดยใช้ทฤษฎี อีลาสโต-พลาสติก คือ กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกของดินอิ่มตัวตัวน้ำ ($\delta\varepsilon_{vp1}^p$) เท่ากับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($\delta\varepsilon_{vp2}^p$) เมื่อเส้นทางเดินของหน่วยแรงอยู่ระหว่าง LC curve เริ่มต้นและ LC curve ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\delta\varepsilon_{vp1}^p = \delta\varepsilon_{vp2}^p \quad (4.19)$$

$$(\lambda^0 - \kappa) \frac{\delta\bar{p}_0^0}{\bar{p}_0^0} = (\lambda^s - \kappa) \frac{\delta\bar{p}_0^s}{\bar{p}_0^s} \quad (4.20)$$

$$(\lambda^0 - \kappa) \int_{\bar{p}_{0i}^0}^{\bar{p}_{0c}^0} \frac{1}{\bar{p}_0^0} d\bar{p}_0^0 = (\lambda^s - \kappa) \int_{\bar{p}_{0i}^s}^{\bar{p}_{0c}^s} \frac{1}{\bar{p}_0^s} d\bar{p}_0^s \quad (4.21)$$

เมื่อจัดให้อยู่ในรูปของ \bar{p}_{0c}^s จะได้ว่า

$$\bar{p}_{0c}^s = \bar{p}_{0i}^s \left(\frac{\bar{p}_{0c}^s}{\bar{p}_{0i}^s} \right)^{\frac{\lambda^0 - \kappa}{\lambda^s - \kappa}} \quad (4.22)$$

โดยที่ \bar{p}_{0c}^s เป็นหน่วยแรงครากสุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำใด ๆ บน LC curve ต่อเนื่อง

\bar{p}_{0c}^0 เป็นหน่วยแรงครากสุทธิของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ บน LC curve ต่อเนื่อง

\bar{p}_{0i}^0 เป็นหน่วยแรงครากสุทธิของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ บน LC curve เริ่มต้น

4.3.2 พื้นผิวครากสำหรับการพังตัวภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่

การเปลี่ยนแปลง LC curve ภายใต้การลดลงของแรงดึงน้ำข้าม LC curve เดิมของดิน จะใช้หลักการเดียวกันกับ LC curve ในกรณีการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิ โดยกำหนดให้ความเครียดเชิงปริมาตรแบบพลาสติกของดินจากการลดแรงดึงน้ำที่ระดับหน่วยแรงสุทธิอ้างอิง ($\delta\varepsilon_{vs1}^p$) เท่ากับระดับหน่วยแรงสุทธิใด ๆ ($\delta\varepsilon_{vs2}^p$) ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\delta\varepsilon_{vs1}^p = \delta\varepsilon_{vs2}^p \quad (4.23)$$

$$(\lambda^{*w}_{\bar{p}_{ref}} + \kappa) \frac{\delta s_o^{\bar{p}_{ref}}}{s_o^{\bar{p}_{ref}} + p_{at}} = (\lambda^{*w} + \kappa) \frac{\delta s_o^{\bar{p}}}{s_o^{\bar{p}} + p_{at}} \quad (4.24)$$

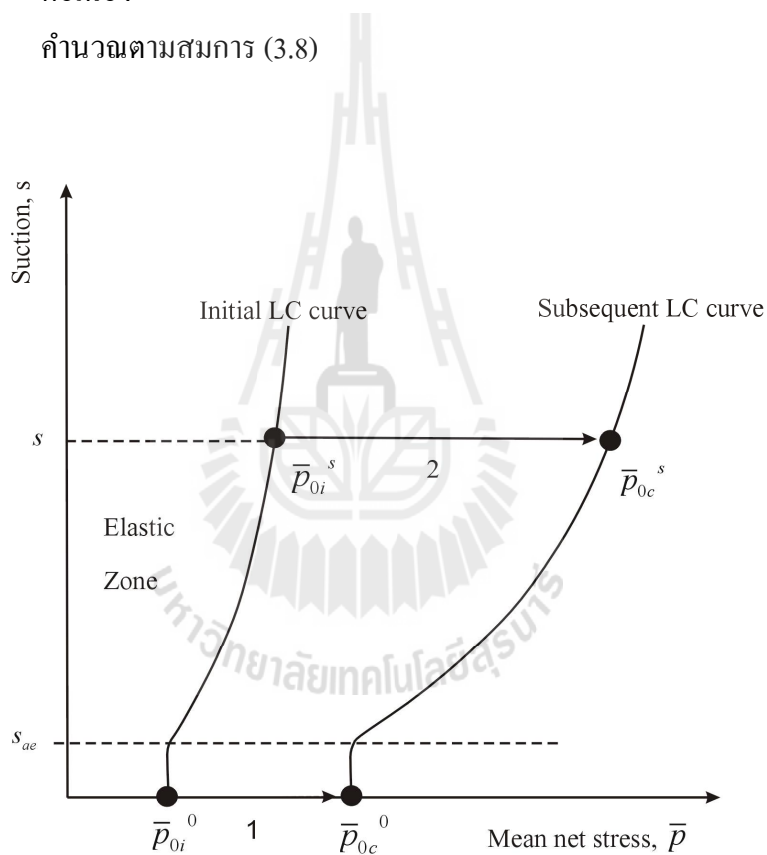
$$(\lambda^{*w}_{\bar{p}_{ref}} + \kappa) \int_{s_{0i}^{\bar{p}_{ref}}}^{s_{0c}^{\bar{p}_{ref}}} \frac{1}{s_o^{\bar{p}_{ref}} + p_{at}} ds_o^{\bar{p}_{ref}} = (\lambda^{*w} + \kappa) \int_{s_{0i}^{\bar{p}}}^{s_{0c}^{\bar{p}}} \frac{1}{s_o^{\bar{p}} + p_{at}} ds_o^{\bar{p}} \quad (4.25)$$

เมื่อจัดรูปให้อยู่ในรูป $s_{0c}^{\bar{p}}$ จะได้ว่า

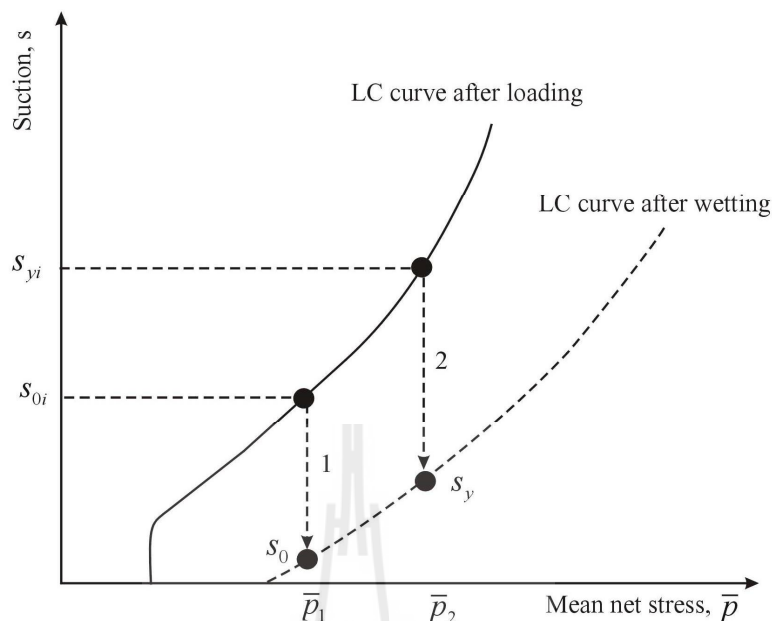
$$s_{0c}^{\bar{p}} = \left(\frac{s_{0i}^{\bar{p}} + p_{at}}{\left(\frac{s_{0i}^{\bar{p}_{ref}} + p_{at}}{s_{0c}^{\bar{p}_{ref}} + p_{at}} \right)^k} \right) - p_{at} \quad (4.26)$$

เมื่อ $k = \frac{\lambda^{*w}_{\bar{p}_{ref}} + \kappa}{\lambda^{*w} + \kappa}$

- โดยที่ $s_{0c}^{\bar{p}}$ เป็นแรงดึงน้ำ ณ จุดครากของดินที่ระดับหน่วยแรงสุทธิใด ๆ บน LC curve
 ต่อเนื่อง
- $s_{0i}^{\bar{p}}$ เป็นแรงดึงน้ำ ณ จุดครากของดินที่ระดับหน่วยแรงสุทธิใด ๆ บน LC curve เริ่มต้น
- $s_{0i}^{\bar{p}_{ref}}$ เป็นแรงดึงน้ำ ณ จุดครากของดินที่ระดับหน่วยแรงสุทธิอ้างอิง ๆ บน LC curve
 เริ่มต้น
- $s_{0c}^{\bar{p}_{ref}}$ เป็นแรงดึงน้ำ ณ จุดครากของดินที่ระดับหน่วยแรงสุทธิอ้างอิง บน LC curve
 ต่อเนื่อง
- λ^{*w} คำนวณตามสมการ (3.8)



รูปที่ 4.14 ภาพร่าง LC curve ของการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิ



รูปที่ 4.15 ภาพร่าง LC curve สำหรับการลดลงของแรงดึงน้ำ

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำนายการเสียน้ำของดินจาก LC curve ที่นำเสนอ ประกอบด้วย 10 พารามิเตอร์ ได้แก่ s_{ae} , n , N^0 , λ^0 , κ , λ^{*w}_{pref} , λ^0 , p_{at} , m'_N และ m'_λ สามารถสรุปความหมายทางกายภาพ ได้ดังต่อไปนี้

- 1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ SWCC สามารถหาโดยทดสอบการทดสอบ SWCC โดยการเพิ่มแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิตั้งที่ ได้แก่ s_{ae} และ n
- 2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ทดสอบโดยการอัดตัวแบบเท่ากันทุกทิศทางภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน ได้แก่ N^0 , λ^0 และการถอนแรง-เพิ่มแรงกลับเพื่อหาค่า κ
- 3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการพังตัวของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ทดสอบโดยการลดแรงดึงน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธิตั้งที่อ้างอิงใด ๆ เพื่อวัดระดับการพังตัวเริ่มของดิน ได้แก่ λ^{*w}_{pref} และการทดสอบการอัดตัวของดินภายหลังกระบวนการพังตัวที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ได้แก่ λ^0
- 4 p_{at} เป็นความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ 100 kPa
- 5 m'_N , m'_λ เป็นค่าคงตัวของดิน ควบคุมอัตราการลดลงระหว่างค่า λ^s ต่ำสุด และ λ^0

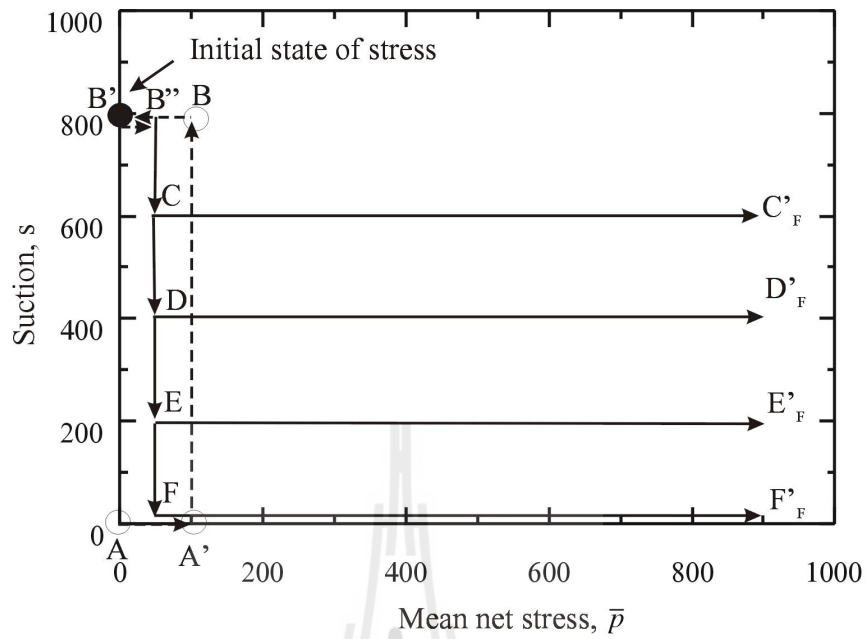
4.4 ตัวอย่างการคำนวณ

การศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของดินไม่อิ่มตัวด้วยในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมากจะเป็นตัวอย่างดินที่ผ่านกระบวนการบดอัด ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้เกิด LC curve หลังการบดอัดขึ้นและกระบวนการบดอัดนี้จะมีเส้นทางเดินของหน่วยแรงที่ซับซ้อนส่งผลให้การจำลองพฤติกรรมทางกลของดินมีความซับซ้อน อย่างไรก็ตามเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของดินชนิดนี้ งานวิจัยนี้จึงจะจำลองเส้นทางเดินของหน่วยที่ใกล้เคียงกับสภาวะการบดอัดของดิน ดังรูปที่ 4.16

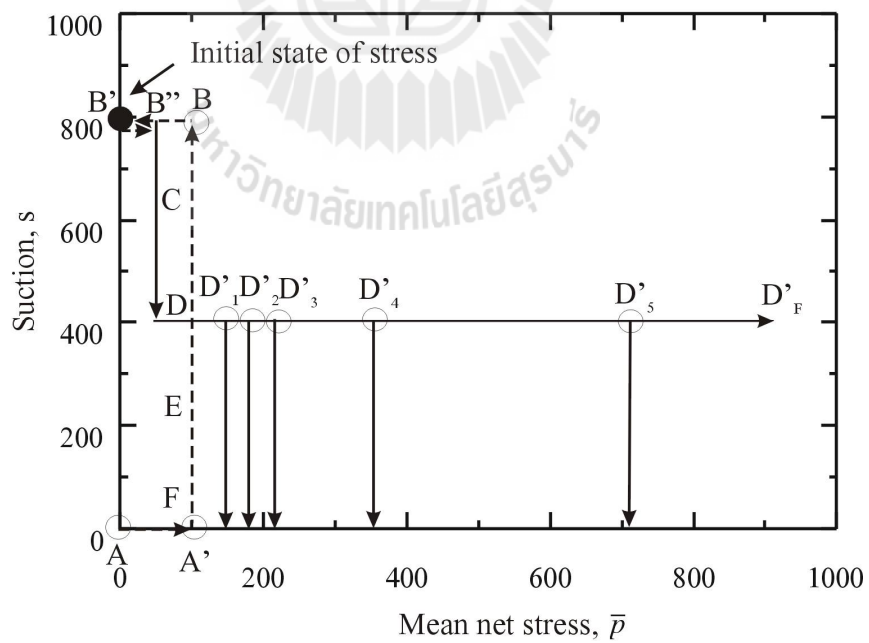
รูปที่ 4.16 แสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรงบนระนาบหน่วยแรงสุทธิและแรงค้ำน้ำ เริ่มจากตัวอย่างดินที่ไม่เคยมีประวัติการรับแรงมาก่อน (Normally consolidated soil) อัดตัวภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ จาก A ไป A' แล้วเพิ่มแรงค้ำน้ำภายใต้หน่วยแรงสุทธินี้ไปยังจุด B และทำการถอนแรง (Unloading) ภายใต้แรงค้ำน้ำ ณ จุดนี้ไปยัง B' เพื่อกำหนดสถานะของหน่วยแรงเริ่มต้นหลังกระบวนการบดอัด หลังจากนั้นเพิ่มแรงกลับ (Reloading) ภายใต้แรงค้ำน้ำคงที่มายังจุด B'' และทำการลดแรงค้ำน้ำเพื่อเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการอัดตัวมายัง C D E และ F แล้วทำการอัดตัวภายใต้ระดับแรงค้ำน้ำดังกล่าว ไปยัง C' D' E' และ F' ตามลำดับ ในขณะที่การพังตัวของดินจะจำลองเส้นทางเดินของหน่วยแรง ดังรูปที่ 4.17 เพื่อศึกษาการพังตัวของตัวอย่างดินบดอัด โดยลดแรงค้ำน้ำจากแรงค้ำน้ำจาก B'' มายังจุด D และทำการอัดตัวภายใต้แรงค้ำน้ำ ณ จุดนี้ ไปยัง D' ₁ D' ₂ D' ₃ D' ₄ และ D' ₅ หลังจากนั้นทำการลดแรงค้ำน้ำจนถึงเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ไปยัง D' _{1F} D' _{2F} D' _{3F} D' _{4F} และ D' _{5F} ตามลำดับ

รูปที่ 4.18 เป็นตัวอย่างการคำนวณอัตราส่วนระหว่าง \bar{p}_0^s และ $\bar{p}_{e,s}$ หรือ Normalized LC curve เริ่มต้น เมื่อเพิ่มแรงค้ำน้ำจาก 0 kPa (จุด A) ไปยัง 800 kPa (จุด B) สำหรับค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณจะสมมติค่าตาม ตารางที่ 4.1 จากสมการ (4.12) จะได้อัตราส่วนระหว่าง \bar{p}_0^s และ $\bar{p}_{e,s}$ เท่ากับ 1.00 เมื่อแรงค้ำน้ำต่ำกว่า 50 kPa และจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มแรงค้ำน้ำ และค่า $\bar{p}_{e,s}$ ที่ระดับแรงค้ำน้ำเท่ากับ 800 kPa มีค่าเท่ากับ 114.5 kPa ดังนั้นจึงสามารถคำนวณ LC curve เริ่มต้นของตัวอย่างดิน ได้ดังรูปที่ 4.19 โดยใช้ สมการ (4.13) จากรูป หน่วยแรงครากเริ่มต้นจะมีค่าคงที่เท่า 114.5 kPa เมื่อแรงค้ำน้ำต่ำกว่า 50 kPa และจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงค้ำน้ำเกิน 50 kPa

รูปที่ 4.20 เป็นตัวอย่างการคำนวณ LC curve ต่อเนื่อง จาก LC curve เริ่มต้นที่ได้ ในรูป 4.19 สำหรับการเพิ่มหน่วยแรงสุทธิแบบเท่ากันทุกทิศทาง สามารถคำนวณตามสมการ (4.22) โดยกำหนดให้เพิ่มหน่วยแรงครากสุทธิที่สภาวะอิ่มตัวด้วย จาก (\bar{p}_{oi}^0) เท่ากับ 114.5 kPa ไปยัง \bar{p}_{oc}^s เท่ากับ 150 200 และ 250 kPa ตามลำดับ จะได้ LC curve เป็น LC_{L1} LC_{L2} และ LC_{L3} ตามลำดับ ในขณะที่การลดแรงค้ำน้ำ คำนวณได้ตามสมการ (4.26) โดยกำหนดให้ลดแรงค้ำน้ำจาก 400 kPa ไปยัง 0 kPa ภายใต้หน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 302 437 และ 583 kPa ซึ่งเป็นหน่วยแรงคราก



รูปที่ 4.16 เส้นทางเดินหน่วยแรงของตัวอย่างดินบดอัดเมื่อเกิดการอัดตัว



รูปที่ 4.17 เส้นทางเดินหน่วยแรงของตัวอย่างดินบดอัดเมื่อเกิดการพังตัว

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์

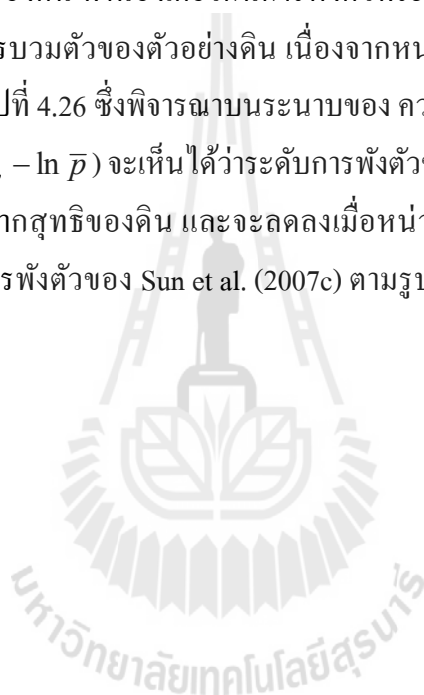
| พารามิเตอร์ | ค่า |
|------------------|---------|
| S_{ae} | 50 kPa |
| n | 0.5 |
| $N(0)$ | 2.50 |
| $\lambda_p(0)$ | 0.10 |
| κ | 0.010 |
| P_{at} | 100 kPa |
| λ_{si}^w | 0.045 |
| $\lambda_p'(0)$ | 0.045 |
| m'_λ | 32 |
| m'_N | 6 |

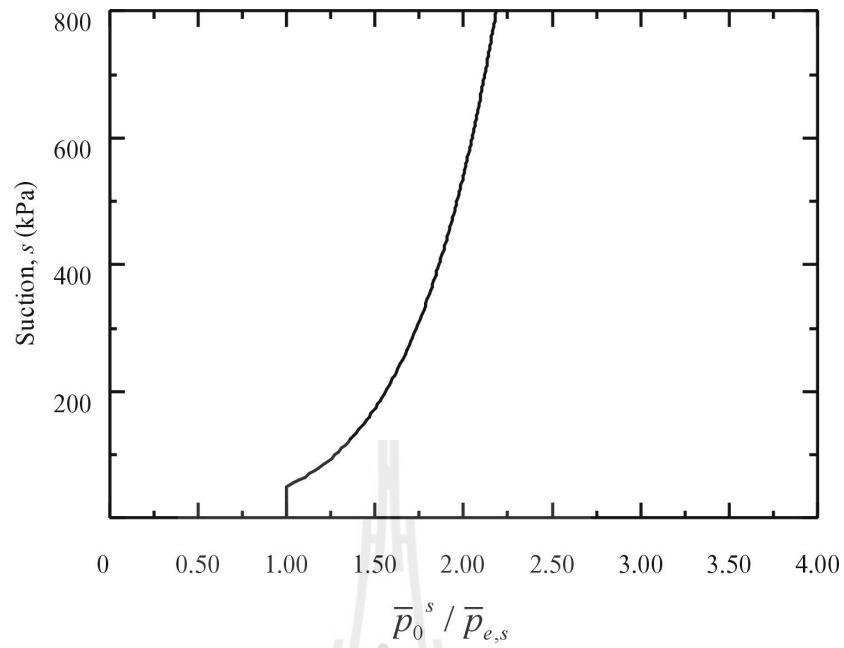
สุทธิที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ 400 kPa บน LC_{L1} , LC_{L2} และ LC_{L3} จากการคำนวณจะได้ LC curve ของดิน เป็น LC_{w1} , LC_{w2} และ LC_{w3} ตามลำดับ จากการคำนวณ LC curve เริ่มต้นของตัวอย่างดินสามารถนำไปทำนายการเสีรูปร่างของดินได้ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22

รูปที่ 4.21 เป็นตัวอย่างการทำนายเส้นการอัดตัวของตัวอย่างดิน ตามเส้นทางเดินของหน่วยแรงในรูปที่ 4.16 เตรียมตัวอย่างโดยลดแรงดึงน้ำจากแรงดึงน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 800 kPa (จุด B") ภายใต้หน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 50 kPa มายังแรงดึงน้ำเท่ากับ 600(จุด C) 400(จุด D) 200(จุด E) และ 0 kPa (จุด F) ตามลำดับ โดยกำหนดให้การเพิ่มหน่วยแรงครากสุทธิที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจาก 114.5 kPa ไปยัง 900 kPa จากตัวอย่างการคำนวณที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบการอัดตัวของ Chen et al. (1999) ตามรูปที่ 4.22 พบว่า จะมีรูปแบบการอัดตัวที่สอดคล้องกัน

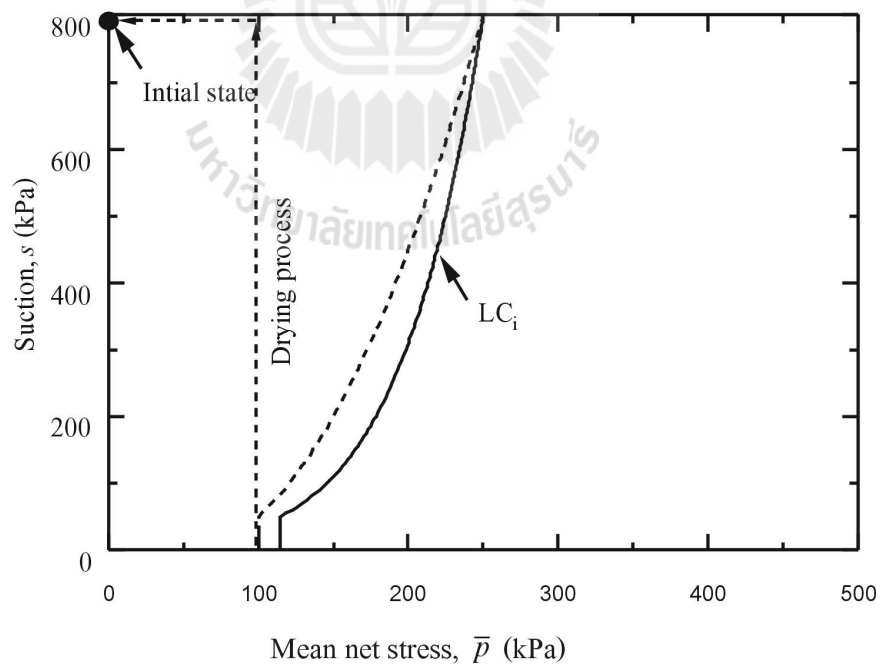
รูปที่ 4.23 เป็นการทำนายเส้นการพังตัวของตัวอย่างดิน ภายใต้หน่วยแรงสุทธิคงที่ เท่ากับ 146 (จุด D'₁) 178(จุด D'₂) 213(จุด D'₃) 355(จุด D'₄) และ 706 kPa (จุด D'₅) โดยลดแรงดึงน้ำจาก 400 kPa ไป 0 kPa จากการคำนวณจะได้การพังตัวของดินบนระนาบ $v - \ln(\bar{p})$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับการพังตัวของดินจะมีค่าต่ำสุดเมื่อ หน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 146 kPa และมากที่สุดเมื่อหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 213 kPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบการพังตัวของ Sun et al. (2007c) ตามรูปที่ 4.24 พบว่า จะมีรูปแบบการพังตัวที่สอดคล้องกัน

รูปที่ 4.25 เป็นการพังตัวของตัวอย่างดินบนระนาบของความเครียดเชิงปริมาตรและแรงดึงน้ำ ($\varepsilon_{vs} - s$) ภายใต้หน่วยแรงสุทธิต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการพังตัวที่ระดับหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 146 kPa ความเครียดเชิงปริมาตรของดินจะมีค่าเป็นลบ เมื่อลดแรงดึงน้ำจาก 400 kPa ไปยัง 100 kPa เช่นเดียวกับ ระดับหน่วยแรงสุทธิเท่า 178 kPa จะมีค่าเป็นลบเมื่อลดแรงดึงน้ำจาก 400 kPa ถึง 200 kPa เนื่องจากภายใต้หน่วยสุทธิทั้งสอง มีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงครากสุทธิบนเส้นการอัดตัวที่ระดับแรงดึงน้ำเท่ากับ 400 kPa ซึ่งเท่ากับ 213 kPa กระบวนการลดแรงดึงน้ำจึงเกิดขึ้นภายใน LC curve เดิมของตัวอย่างดิน จึงเกิดการบวมตัวเมื่อลดแรงดึงน้ำในช่วงแรก หลังจากนั้นจะพังตัวเมื่อลดแรงดึงน้ำข้าม LC curve เดิมของดิน ทำนองเดียวกันการพังตัวที่ระดับหน่วยแรงสุทธิเท่ากับ 355 kPa และ 706 kPa จะไม่มีการบวมตัวของตัวอย่างดิน เนื่องจากหน่วยแรงสุทธิมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงครากสุทธิ แสดงได้ตามรูปที่ 4.26 ซึ่งพิจารณาบนระนาบของ ความเครียดเชิงปริมาตรและลอการิทึมของหน่วยแรงสุทธิ ($\varepsilon_v - \ln p$) จะเห็นได้ว่าระดับการพังตัวของดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงสุทธิต่ำกว่าหน่วยแรงครากสุทธิของดิน และจะลดลงเมื่อหน่วยแรงสุทธิเกินช่วงดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบการพังตัวของ Sun et al. (2007c) ตามรูปที่ 4.27 พบว่า จะมีรูปแบบการพังตัวที่สอดคล้องกัน

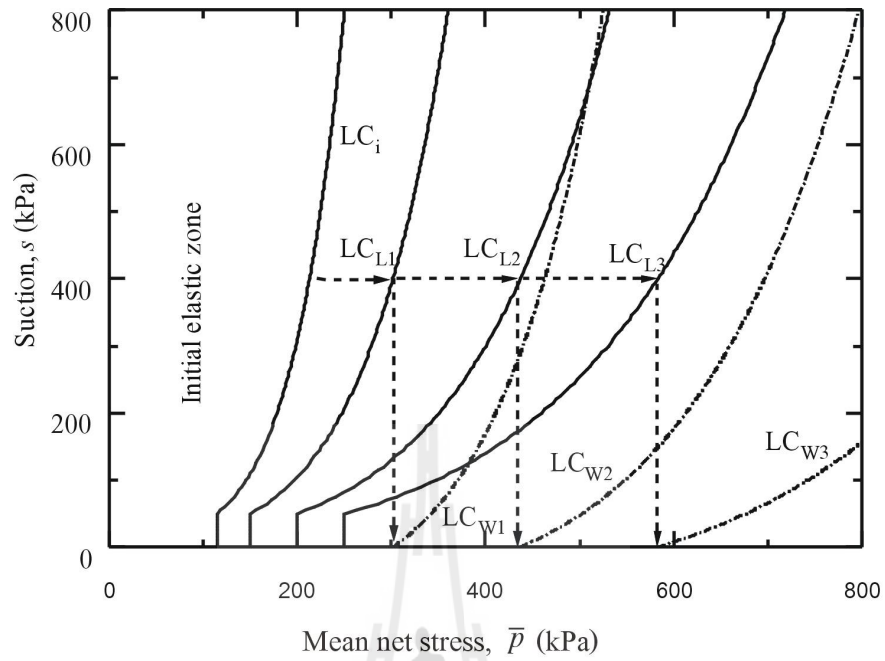




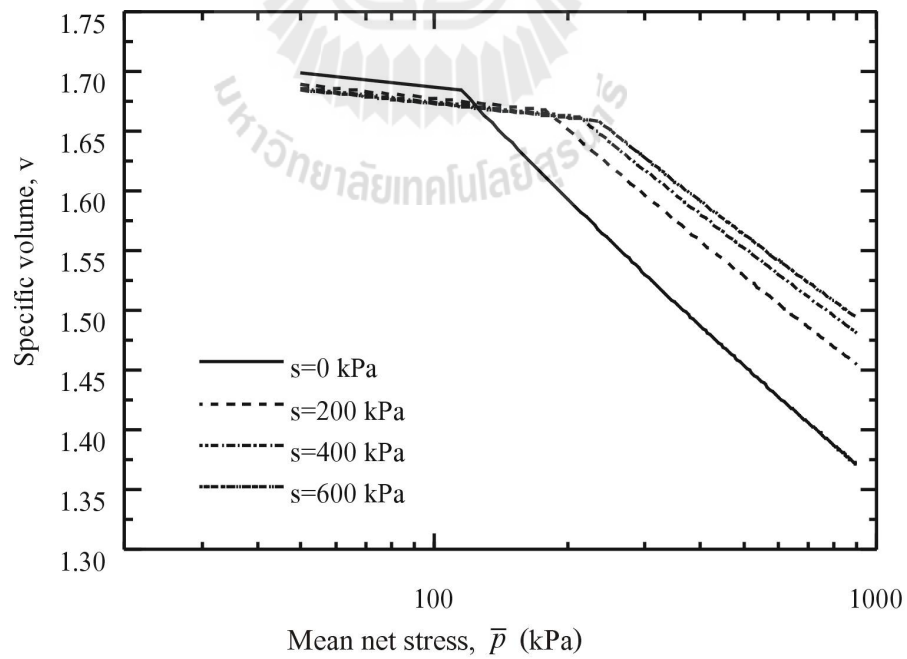
รูปที่ 4.18 Normalize LC curve เริ่มต้นของตัวอย่างดินเมื่อเพิ่มแรงดึงน้ำ 800 kPa



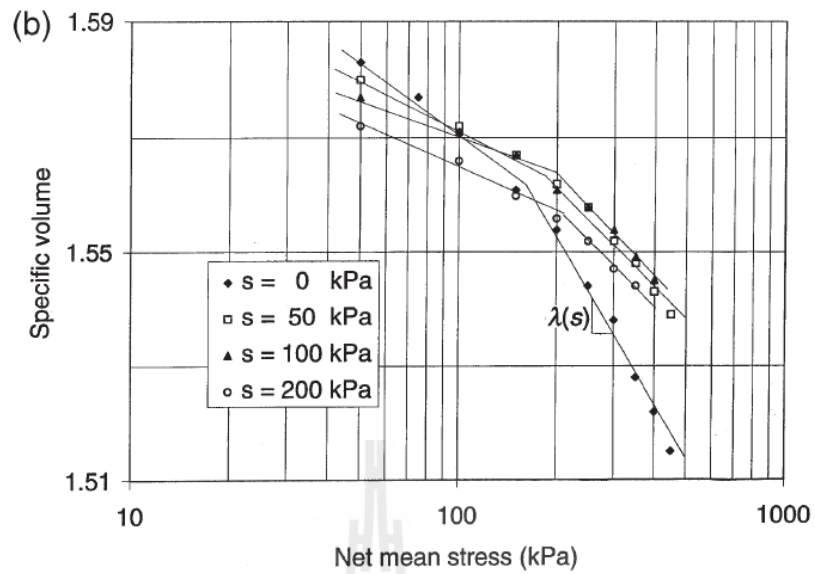
รูปที่ 4.19 LC curve เริ่มต้นของตัวอย่างดิน



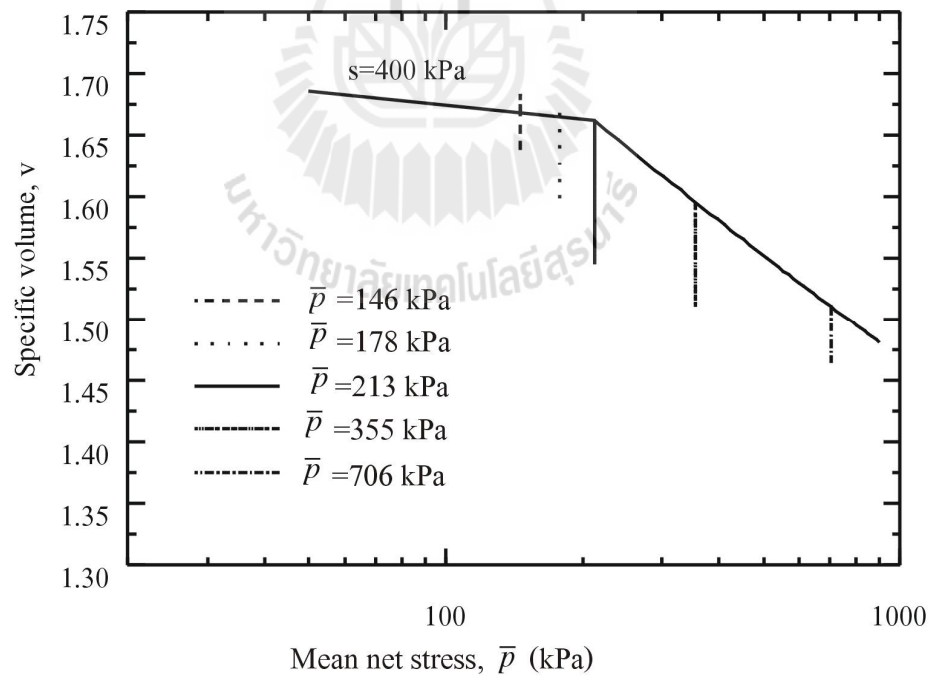
รูปที่ 4.20 LC curve ต่อเนื่องของตัวอย่างดิน



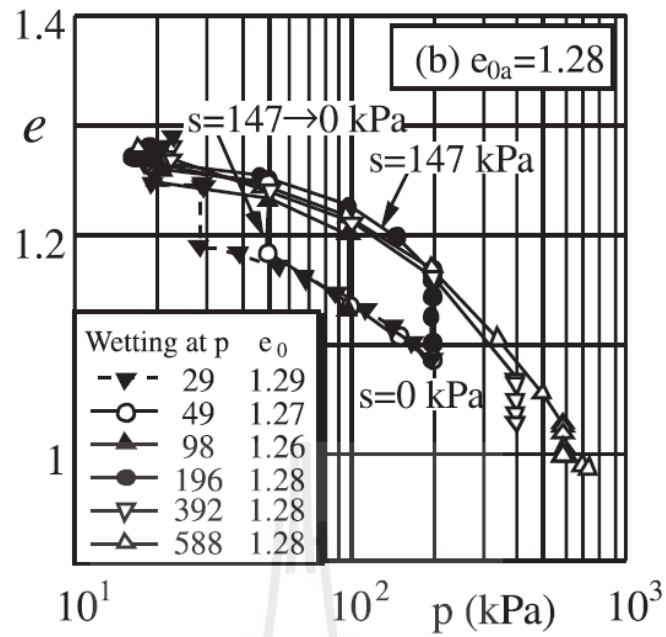
รูปที่ 4.21 เส้นการอัดตัวของตัวอย่างดิน ภายใต้ระดับแรงดึงน้ำ 0 200 400 และ 600 kPa



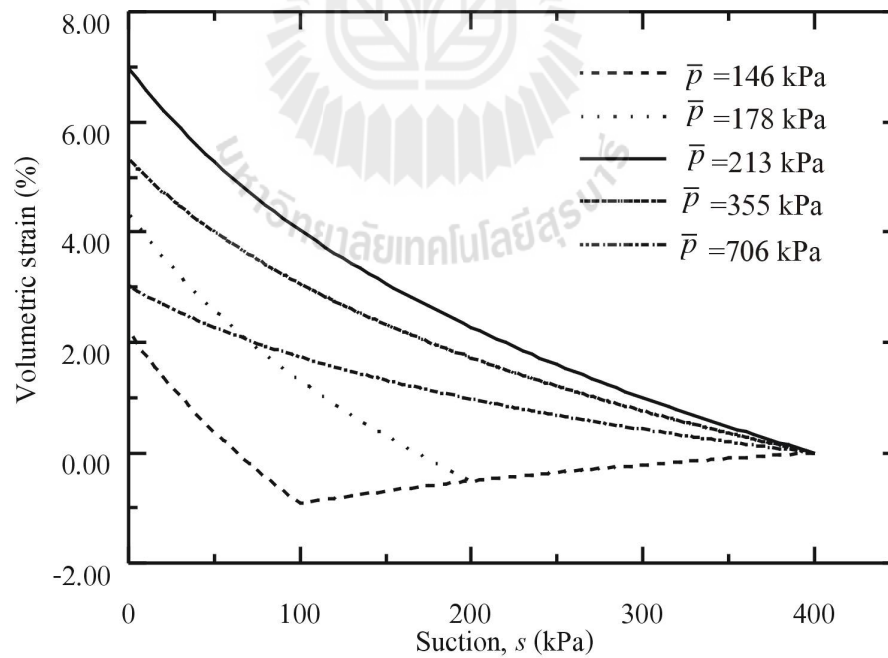
รูปที่ 4.22 เส้นการอัดตัวแบบไอโซโทรปิกของดินถมหอบสีเหลืองบดอัด (Chen et al., 1999)



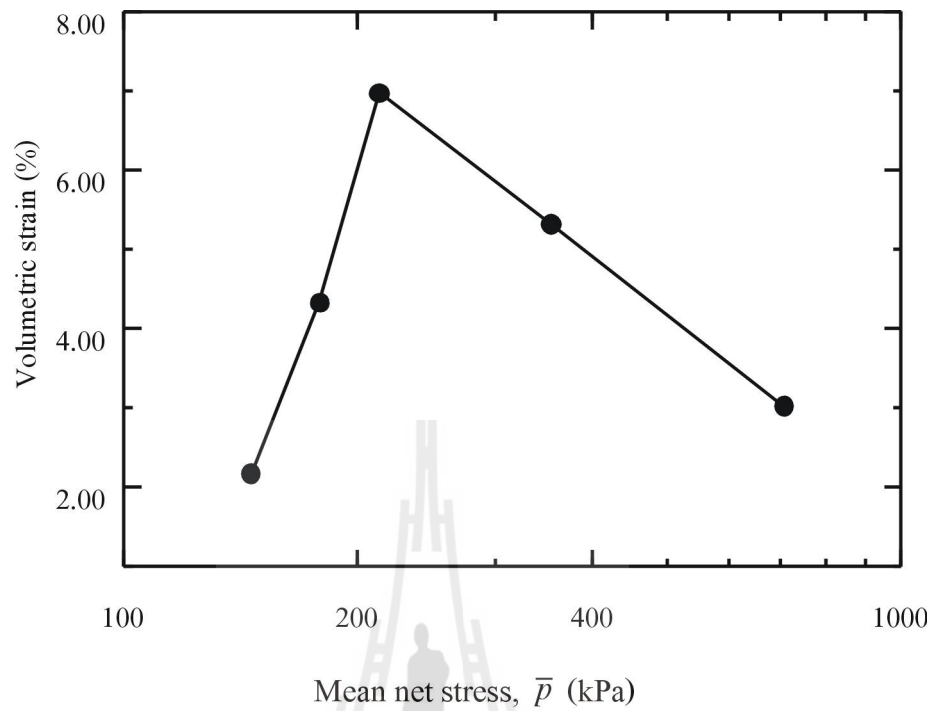
รูปที่ 4.23 เส้นการพังตัวของดินภายใต้หน่วยแรงสุทธิต่าง ๆ



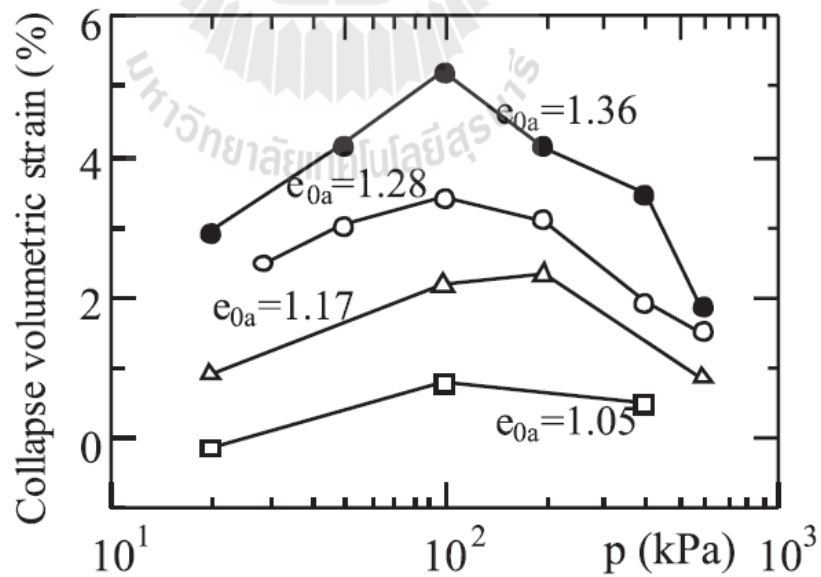
รูปที่ 4.24 การพังตัวของดินเมื่ออัตราส่วนโพรงเริ่มต้นเท่ากับ 1.28 (Sun et al, 2007c)



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงน้ำและความเครียดเชิงปริมาตร



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงสุทธิและความเครียดเชิงปริมาตร



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการพังตัวกับหน่วยแรงสุทธิของภายใต้อัตราส่วนโพรงเริ่มต้นต่าง ๆ (Sun et al, 2007c)

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษา แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่นำเสนอ จะสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลง LC curve ของดิน พร้อมทั้งการเสีรูปร่างของดินที่สัมพันธ์กับเส้นทางดินหน่วยแรง 3 แบบ คือ

การเพิ่มแรงดึงน้ำจะใช้การพิจารณาโครงสร้างดินนิยาม LC curve เริ่มต้น เพื่อใช้สำหรับศึกษา LC curve ต่อเนื่อง ซึ่ง LC curve เริ่มต้นที่ได้จะมีรูปร่างที่แน่นอน แบ่งพฤติกรรมออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงดินอิ่มตัวด้วยน้ำหน่วยแรงครากสุทธิตั้งที่ และดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำหน่วยแรงครากจะเพิ่มขึ้นตามแรงดึงน้ำที่เพิ่มขึ้น

การเพิ่มหน่วยแรงสุทธิ LC curve ที่ได้จะแบ่งออกเป็นสองช่วงอย่างชัดเจนคือ ช่วงที่ดินยังแสดงพฤติกรรมอิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ หน่วยแรงครากสุทธิของดินจะคงที่ ในขณะที่ช่วงดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงครากสุทธิตามแรงดึงน้ำ จะทำให้ LC curve ในช่วงนี้มีการขยายขึ้นตามแรงดึงน้ำที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำ LC curve ไปทำนายการอัดตัวของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะได้รูปแบบที่ผายออกจากกันในช่วงการอัดตัวของดิน ซึ่งรูปแบบนี้จะสอดคล้องกับพฤติกรรมที่แท้จริงของดิน กล่าวคือ เมื่อดินมีแรงดึงน้ำเพิ่มขึ้นความแกร่ง(Stiffness)ของดินจะเพิ่มขึ้น

การลดแรงดึงน้ำจะได้ LC curve ของดิน ที่มีการขยายเมื่อลดแรงดึงน้ำลง โดยไม่มีการแบ่งช่วงพฤติกรรมของดิน เนื่องจากกระบวนการลดแรงดึงน้ำในดินจะมีค่า s_{ae} ที่ต่ำ จึงสอดคล้องกับ LC curve ที่นำเสนอ เมื่อนำไปทำนายการพังตัวของดิน จะได้ระดับการพังตัวที่ลดลงเมื่อหน่วยแรงสุทธิเพิ่มขึ้น จะได้รูปแบบที่ลู่ออกกันของเส้นการอัดตัวของดิน ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมที่แท้จริงของดิน กล่าวคือ ภายใต้อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกเพิ่มระดับการพังตัวควรมีค่าลดลง

บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา

รายงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาชุดทดสอบการทะลุทะลวงกรวยขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ทั่วไป โดยไม่ทำให้ฟังก์ชันการทำงานของชุดทดสอบเดิมเปลี่ยนแปลงไป ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้น เป็นชุดทดสอบต้นแบบที่ผู้สนใจสามารถนำไปพัฒนาใช้ในห้องปฏิบัติการได้ โดยง่าย ผลทดสอบที่ได้จากการทดสอบกับดินเหนียวอ้อมตัวด้วยน้ำ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการใช้ชุดทดสอบการทะลุทะลวงกรวยขนาดเล็กในงานวิจัยต่อไปได้ อย่างไรก็ตามชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ กล่าวคือ การทดสอบเพื่อหาค่าแรงด้านที่ปลายกรวยยังไม่ดีนัก ทั้งนี้จะเป็นเพราะการใช้ o-ring ที่หุ้มปิดด้านบน เพื่อกันน้ำไม่ให้ไหลเข้าตัวอย่างดินขณะทดสอบ ความฝืดที่เกิดขึ้นกับ o-ring และแท่งกรวยยังมีความแปรปรวนจากการทดสอบแต่ละการทดสอบค่อนข้างชัดเจน อีกทั้งตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. แสดงผลทดสอบที่ไม่มีแนวโน้มชัดเจน รวมทั้งผลทดสอบที่ได้จากตัวอย่างดินที่มีกำลังต่ำไปก็ไม่แสดงแนวโน้มที่ดีนัก

อย่างไรก็ตามพบว่าชุดทดสอบให้ผลทดสอบที่ดีสำหรับค่าแรงเสียดทานที่ปลอดภัย เมื่อทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมดังนี้ 1) การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในตัวอย่างดินเหนียว ควรใช้ตัวอย่างดินเหนียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. 2) อัตราเร็วการกดกรวยที่เหมาะสมควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.5 มม./นาที่ และ 3) ดินที่ใช้ในการทดสอบควรมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำไม่ต่ำกว่า 0.3 กก./ตร. ซม. ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นจึงมีศักยภาพในการใช้ในงานวิจัย สำหรับการทดสอบในเงื่อนไขที่เหมาะสม

บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา

รายงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาชุดทดสอบการทะลุทะลวงกรวยขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ทั่วไป โดยไม่ทำให้ฟังก์ชันการทำงานของชุดทดสอบเดิมเปลี่ยนแปลงไป ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้น เป็นชุดทดสอบต้นแบบที่ผู้สนใจสามารถนำไปพัฒนาใช้ในห้องปฏิบัติการได้โดยง่าย ผลทดสอบที่ได้จากการทดสอบกับดินเหนียวอ้อมตัวด้วยน้ำ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการใช้ชุดทดสอบการทะลุทะลวงกรวยขนาดเล็กในงานวิจัยต่อไปได้ อย่างไรก็ตามชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ กล่าวคือ การทดสอบเพื่อหาค่าแรงด้านที่ปลายกรวยยังไม่ดีนัก ทั้งนี้จะเป็นเพราะการใช้ o-ring ที่หุ้มปิดด้านบน เพื่อกันน้ำไม่ให้ไหลเข้าตัวอย่างดินขณะทดสอบ ความฝืดที่เกิดขึ้นกับ o-ring และแท่งกรวยยังมีความแปรปรวนจากการทดสอบแต่ละการทดสอบค่อนข้างชัดเจน อีกทั้งตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. แสดงผลทดสอบที่ไม่มีแนวโน้มชัดเจน รวมทั้งผลทดสอบที่ได้จากตัวอย่างดินที่มีกำลังต่ำไปก็ไม่แสดงแนวโน้มที่ดีนัก

อย่างไรก็ตามพบว่าชุดทดสอบให้ผลทดสอบที่ดีสำหรับค่าแรงเสียดทานที่ปลอดภัย เมื่อทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมดังนี้ 1) การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในตัวอย่างดินเหนียว ควรใช้ตัวอย่างดินเหนียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. 2) อัตราเร็วการกดกรวยที่เหมาะสมควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.5 มม./นาที่ และ 3) ดินที่ใช้ในการทดสอบควรมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำไม่ต่ำกว่า 0.3 กก./ตร. ซม. ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นจึงมีศักยภาพในการใช้ในงานวิจัย สำหรับการทดสอบในเงื่อนไขที่เหมาะสม

รายการอ้างอิง

- Aitchison G. D., Russam K. and Richards B. G. (1965). Engineering concepts of moisture equilibria and moisture changes in soils. In Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas (ed. G. D. Aitchison), pp. 7–21. Sidney: Butterworth.
- Alonso E.E., Gen A. and Josa A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. **Geotechnique** 40(3):405-30.
- Bishop A.W. (1959). The principle of effective stress. **Teknisk Ukeblad**; 106(39):859-63.
- Brooks R.H. and Corey A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper No. 3. Colorado State University, Fort Collins, Colo.**
- Bolzon G., Schrefler B. A. and Zienkiewicz O. C. (1996). Elastoplastic soil constitutive laws generalised to partially saturated states. **Geotechnique**, 46(2): 279–289.
- Butterfield R.A. (1979). Natural compression law of soils (an advance on $e - \ln p'$). **Geotechnique**. 29:469-480.
- Charles W.W. and Chiu C.F. (2001). Behavior of a loosely compacted unsaturated volcanic soil. **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** 127(12):1027-36
- Chen Z-H. Fredlund D.G. and Gen J.K.-M. (1999). Overall volume change, water volume change, and yield associated with an unsaturated compacted loess. **Canad Geotech J** 36(1):321-29.
- Chiu C.F. and Ng C.W.W. (2003). A state dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils. **Geotechnique**. 53(9):809–829.
- Cui Y.J. and Delage P. (1996). Yielding and plastic behaviour of unsaturated compacted silt. **Geotechnique**. 46(2):291-311.
- Fredlund D.G. and Morgenstern N.R. (1997). Stress state variables for unsaturated soil. **J Geotech Eng Division, ASCE**103(GT5):447-66
- Fredlund D. G. and Xing A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. **Canad. Geotech. J.** 31, No. 3, 521–532.

- Gallipoli D., Gens A., Sharma R. and Vaunat J. (2003). An elasto - plastic for unsaturated soil incorporating the effect of suction and degree of saturation on mechanical behavior. **Geotechnique 53(1):123-35.**
- Gens A. (2010). Soil-environment interactions in Geotechnical engineering. **Geotechnique 60(1):3-74.**
- Gili J. A. (1988). Modelo microestructural para medios granulares no saturados. **PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.**
- Hashiguchi K. (1995). On the linear relations of $v - \ln p$ and $\ln v - \ln p$ for isotropic consolidation of soils. **Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 19(3):367-376.**
- Houlsby GT. (1997). The work input to an unsaturated granular material. **Geotechnique 47(1):193-6.**
- Jenning J.E.B. and Burland J.B. (1962). Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. **Geotechnique 12(1):125-44.**
- Jommi C. (2000). Remarks on constitutive modelling of unsaturated soils. In Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils (eds A. Tarantino and C. Mancuso.), pp.139-153. **Rotterdam: Balkema.**
- Loret B. and Khalili N. (2000) A three-phase model for unsaturated soils. **Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 24(11):893-927.**
- Loret B. and Khalili N. (2002) An effective stress elasto-plastic model for unsaturated porous media. **Mech. Mater. 34(2):97-116.**
- Mancuso C., Vassallo R. and d'Onofrio A. (2002). Small Strain behavior of a silty sand in controlled-suction resonant column – torsional shear tests. **Canad Geotech J 39(1):22-31.**
- Masin D. (2005). A hypoplastic constitutive model for clay. **Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 29(4):311-336.**
- Mitchell J. K. (1991). Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice. **Geotechnique 41, No. 3, 299-340.**

- Rampino C., Mancuso C. and Vinale F. (1999). Laboratory testing on an unsaturated soil: equipment, procedures, and first experimental results. **Canad Geotech J** 36:1-12.
- Rampino C., Mancuso C., and Vinale F. (2000). Laboratory testing on an unsaturated soil: equipment, procedures, and first experimental results. **Canad Geotech J.** 37(4):748-763.
- Roscoe K.H. and Burland J.B. (1968). On the generalized stress-strain behavior of wet clay. **In: Heyman J, Leckie F, editors. Engineering plasticity. Cambridge: Cambridge University Press p. 535-60**
- Rouainia M. and Muir Wood D. (2000). A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure. **Geotechnique.** 50(2):153-164.
- Sheng D., Sloan S.W. and Gens A. (2004). A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects. **Comput. Mech.** 33(6):453-465.
- Sheng D., Sloan S.W. and Gens A. (2008). A new modeling approach to unsaturated soils using independent stress variables. **Canad Geotech J.** 45(4):511-534.
- Sheng D., Sloan S.W. and Gens A. (2008a). A new modeling approach to unsaturated soils using independent stress variables. **Canad Geotech J.** 45(4):511-534.
- Sivakumar V. and Wheeler S.J. (2000). Influence of compaction procedure on the mechanical behavior of unsaturated compacted clay, Part 1: Wetting and isotropic compression. **Geotechnique** 50(4):359-68.
- Steger G. (2007). Experimental and numerical investigations of unsaturated soils with application to tunneling under compressed air. **PhD thesis. Technische universitat graz. Austria.**
- Sun D.A., Matsuoka H., Yao Y.P., Xu Y.F. and Ichihara W. (2000). An elastoplastic model for unsaturated soil in three-dimensional stresses. **Soils and Foundations.** 40(3):17-28.
- Sun D.A., Matsuoka H., Cui H.B. and Xu Y.F. (2003). Three-Dimensional elasto-plastic model for unsaturated compacted soils with different initial densities. **Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.** 27(12):1079-1098.
- Sun D.A., Sheng D., Cui H.B. and Sloan S.W. (2007a). A density dependent elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated compacted soils. **Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.** 31(11):1257-1279.
- Sun D.A., Sheng D. and Sloan S.W. (2007b). Elastoplastic modeling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated soil. **Mech. Mater.** 39(3):212-221.

- Sun D. A., Sheng D. and Xu Y. (2007c). Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities. **Canad Geotech J** 44(6): 673–86.
- Sivakumar V. and Wheeler S.J. (2000). Influence of compaction procedure on the mechanical behavior of unsaturated compacted clay, Part 1: Wetting and isotropic compression. **Geotechnique** 50(4):359-68.
- Terzaghi K. (1936). The Shear Resistance of saturated soil and the angle between the planes of shear. **Proc. 1st of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, pp. 54-56.**
- Thu T.M., Rahardjo H. and Leong E.C. (2007). Soil-water characteristic curve and consolidation behavior for compacted silt. **Canad Geotech J** 44(3):266-75.
- Thu T. M., Rahardjo H. and Leong, E. C. (2007). Elastoplastic model for unsaturated soil with incorporation of the soil-water characteristic curve. **Canad Geotech. J** 44(1): 67–77.
- Vassallo R., Mancuso C. and Vinale F. (2007). Effects on net stress and suction history on the small strain stiffness of compacted clayey silt. **Canad Geotech J.** 44:446-462.
- Wheeler S.J. and Sharma R.S. (2003). Buisson MSR. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. **Geotechnique** 53(1):41-54.
- Wheeler S.J. and Sivakumar V. (1995) An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soils. **Geotechnique** 45(1):35-53.