

การพัฒนาชุดทดสอบการขยายตัวแบบแรงอัดสามแกน  
Development of Triaxial Swell Test Setup

เอกรินทร์ วัฒนสันติเจริญ

Ekarin Watanasanticharoen

บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด

151 อาคารทีม ถนนพหลโยธิน แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม กรุงเทพมหานคร 10230

โทร. 0-2298-5844-5 โทรสาร 0-2298-5846

E-mail: [ekarin5@yahoo.com](mailto:ekarin5@yahoo.com)

คุณมาศ พันธุ์เตชะ

Koonnamas Punthutaecha

สำนักบำรุงรักษาและอำนวยความสะดวกงานทาง กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม

เลขที่ 301 ถนนพหลโยธิน แขวงอนุสาวรีย์ชัย เขตบางเขน กทม. 10220

โทร. 0-2972-9548 โทรสาร 0-2972-9319

E-mail: [koonnamas@yahoo.com](mailto:koonnamas@yahoo.com)

สมเกียรติ ขวัญพุกษ์

Somkiat khwanpruk

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทร. 0-2739-2410 โทรสาร 0-2739-2411

E-mail: [kksomkia@kmitl.ac.th](mailto:kksomkia@kmitl.ac.th)

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอชุดเครื่องมือทดสอบการขยายตัวของดินแบบแรงอัดสามแกนภายใต้สถานะ  $K_0$  ซึ่งสามารถทำการวัดความเค้นทั้งในแนวตั้งและแนวราบ โดยอยู่ภายใต้การควบคุมความเครียดอย่างอิสระรอบทิศทาง จากการศึกษาดังกล่าวดินที่ได้จากรรรมชาติและดินที่ผสมขึ้นระหว่างอิลไลต์ในปริมาณ 30% และดินตะกอนในปริมาณ 70% พบว่าอุปกรณ์ทดสอบชุดนี้ให้ผลถูกต้องเป็นที่น่าพอใจและเชื่อถือได้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบที่เคยมีมา นอกจากนี้ในบทความยังได้แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจากการทดสอบ

โดยอาศัยหลักทางสถิติร่วมกับหน่วยแรงกดอัดรอบทิศทาง และปริมาณความชื้นในดิน อีกทั้งได้กล่าวถึงข้อเสนอแนะและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

Abstract

This paper presents the triaxial swell test setup under  $K_0$  stress state, which can be used to measure both vertical and horizontal swell strains of soil specimens at different confining pressures. In this study, two types of expansive soils including natural and artificial clays, which composed of 30%

RECEIVED 5 April, 2005

ACCEPTED 29 July, 2005

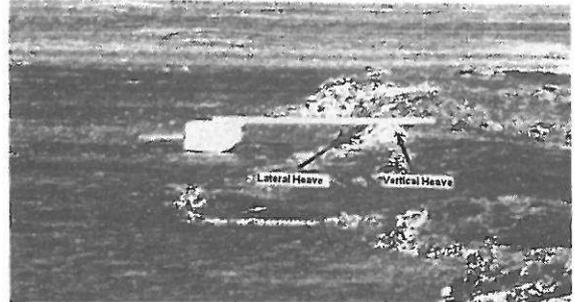
illite and 70% silt, were used as compacted soil samples. In this study, test results show the repeatability and reliability of test setup over conventional setups. An empirical model also developed by analyzing via stochastic approach with moisture content and confining pressure. Suggestions and potential advantages of the present test setup are also explained.

## 1. คำนำ

ดินขยายตัวเป็นดินที่พบอยู่โดยทั่วไปในเขตพื้นที่แห้งแล้งหรือกึ่งแห้งแล้ง ดังเช่น ออสเตรเลีย แคนาดา จีน อินเดีย อิสราเอล แอฟริกาใต้ และสหรัฐอเมริกา โดยส่วนใหญ่จะมีค่าดัชนีพลาสติก (PI) ปานกลางถึงสูง มีความแข็งแรงต่ำถึงปานกลาง และมีค่าการขยายตัวและหดตัวสูง ซึ่งก่อให้เกิดการแตกร้าวของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ข้างบน เช่น บ้าน ถนน และกำแพงกันดิน ส่งผลให้ค่าก่อสร้างและค่าทำนุบำรุงรักษาสูงถึง พันล้านเหรียญดอลลาร์สหรัฐต่อปี [1,5,14] อย่างไรก็ตามการหลีกเลี่ยงที่จะทำการก่อสร้างบนพื้นที่ดังกล่าวเป็นไปได้ยาก ดังนั้นวิศวกรปฐพีจึงเริ่มให้ความสนใจมากขึ้นต่อการศึกษาพฤติกรรมของดินขยายตัวในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา

จากการศึกษาได้นำไปสู่ดัชนีที่อาศัยพฤติกรรม การขยายตัวควบคู่ไปกับแรงดันในการขยายตัวของตัวอย่างดินสำหรับการบ่งชี้ลักษณะความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้การทดสอบการขยายตัวและแรงดันในการขยายตัวจึงเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญ [11,14,18,20] อย่างไรก็ตามการทดสอบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่มีข้อจำกัดอยู่ 2 ประการ กล่าวคือ 1) ไม่สามารถกำหนด Lateral Confining Pressure ให้สอดคล้องกับความเป็นจริงในธรรมชาติ การทดสอบส่วนใหญ่มักติดตั้งไว้ในชุดทดสอบที่ไม่ทราบค่า Lateral Confining Pressure หรืออยู่ภายใต้ Lateral Confining Pressure ที่ต่ำหรือไม่มีเลย ดังตัวอย่างเช่น การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4546 ให้ผลการทดสอบมีค่าเกินกว่าในสนามเกือบ 3 เท่า [6,10]

2) ไม่สามารถใช้แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวระนาบ ทั้งที่การขยายตัวของดินสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในแนวตั้ง และแนวระนาบอันเป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 [12,16]



รูปที่ 1 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวอนของดินขยายตัวที่เกิดจากการขยายตัว

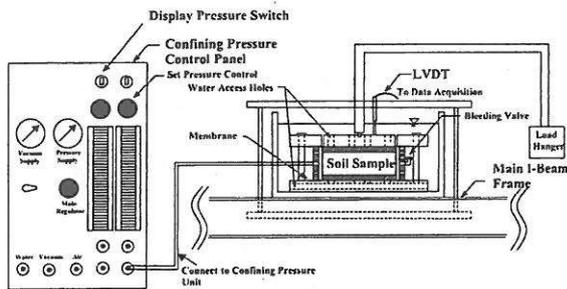
จนกระทั่งในปี 1993 เขียวได้พัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบการขยายตัวที่สามารถกำหนด Lateral Confining Pressure โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลางสำหรับถ่ายแรงดันสู่ตัวอย่างดิน แม้ว่าเขียวจะประสบความสำเร็จอย่างสูง แต่เขียวก็ได้แสดงถึงข้อจำกัดของชุดทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้น ได้แก่ ความยากในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ ความยากในการวัดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบและจำกัดการทดสอบอยู่ภายใต้กรณี Isotropic เพียงเท่านั้น [19]

อาศัยแนวความคิดและข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับเขียว นำไปสู่ความสำเร็จในการพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบสำหรับการขยายตัว (Triaxial Swell Test Setup) ภายในห้องปฏิบัติการของ The University of Texas at Arlington (UTA)

ดังนั้นในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอรายละเอียดของชุดเครื่องมือทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งวิธีการติดตั้ง วิธีการเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบ รวมถึงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดินสองชนิด (ดินธรรมชาติและดินผสม) ภายใต้ Confining Pressure ที่แตกต่างกัน

2. รายละเอียดของชุดเครื่องมือทดสอบ

ชุดทดสอบการขยายตัวที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วย Swell Cell, Control Pressure Panel และ Loading Unit ทั้งสามส่วนถูกประกอบเข้าด้วยกัน โดยมี Control Pressure Panel เป็นตัวควบคุมแรงดันที่กระทำต่อตัวอย่างดินอย่างต่อเนื่อง รายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้



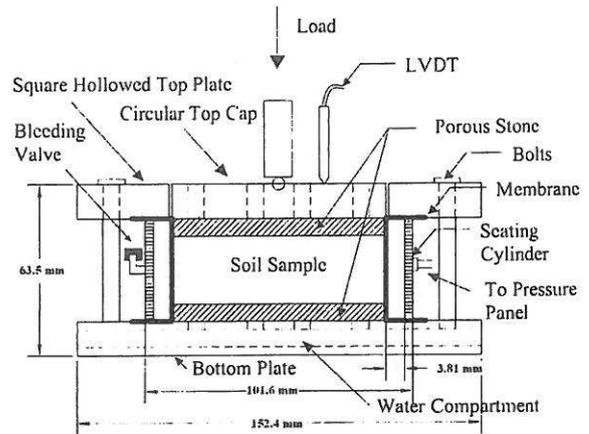
รูปที่ 2 Schematic Diagram of the Swell Cell, Loading Unit and Control Panel Assembly

2.1 Swell Cell

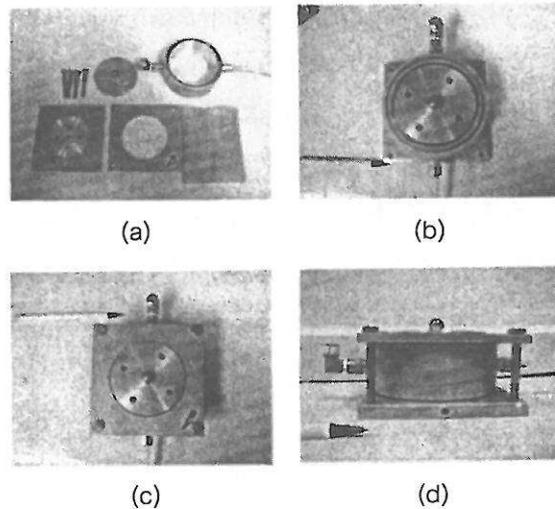
Swell Cell (รูปที่ 3) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 88.9 มม. (3.5 นิ้ว) และสูง 38.1 มม. (1.5 นิ้ว) สามารถทำการบรรจุตัวอย่างดินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 71.1 มม. (2.8 นิ้ว) และสูง 25.4 มม. (1 นิ้ว) ซึ่งเตรียมโดยการบดอัด ความแตกต่างของเส้นรอบวงภายในของ Cell และตัวอย่างดินก่อให้เกิดช่องว่างเพียงพอสำหรับเติมน้ำที่ไม่มีอากาศสำหรับการสร้าง Confining Pressure ให้กับตัวอย่างดิน Swell Cell ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 3 ชิ้น คือ Top Plate (รวมถึง Top Cap), Seating Cylinder, และ Bottom Plate

Circular Steel Top Cap หรือ Top Cap เป็นตัวช่วยในการกระจายแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดินในแนวตั้ง โดยได้ทำการเจาะรูไว้ 4 ตำแหน่งสำหรับอนุญาตให้น้ำเข้าสู่ตัวอย่างดินระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเกรชันในขณะทำการทดสอบ สำหรับ Top Plate ได้ทำการเจาะรูไว้ 4 ตำแหน่งเช่นเดียวกับ Top Circular Steel Cap แต่มีไว้เพื่อทำการยึด Swell Cell เข้ากับ Bottom Plate รูปที่ 4 แสดงภาพถ่าย

ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของ Swell Cell รวมถึงมุมมองทั้งด้านบนและด้านข้างของ Swell Cell



รูปที่ 3 Schematic Diagram of the Triaxial Swell Cell Setup



รูปที่ 4 (a) ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของ swell cell (b) มุมมองด้านบนของ Cell กับ O-Ring และ Membrane (c) มุมมองด้านบนของ Cell กับ Circular Top Cap และ Square Top Plate (d) มุมมองด้านข้างของ Cell กับส่วนเชื่อมต่อ Control Pressure Panel

Seating Cylinder คือ ชิ้นส่วนที่ยึดติดกับตัวอย่างดินที่มี Membrane ห่อหุ้มโดยรอบ ซึ่ง Seating Cylinder มีจุดเชื่อมต่อสองตำแหน่ง จุดแรกจะเชื่อมต่อกับ Control Pressure Panel สำหรับการควบคุมแรงดัน

(Confining Pressure) และจุดที่สองต่อกับวาล์วเปิดปิด สำหรับปลดปล่อยฟองอากาศในน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของ Swell Cell กับตัวอย่างดิน (รูปที่ 4d)

Bottom Plate ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ Top Plate กล่าวคือไว้สำหรับยึด Seating Cylinder และ Membrane ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม สำหรับ Bottom Plate ได้ทำการเจาะรู 5 ตำแหน่งด้านบน และ 4 ตำแหน่งด้านข้าง เพื่อให้ให้น้ำผ่านเข้าสู่ดินในขณะทำการทดสอบ

2.2 Loading Unit

ลักษณะของ Loading Unit แสดงในรูปที่ 2 สำหรับการเพิ่มแรงดันในแนวตั้งสามารถกระทำได้โดยการเพิ่มน้ำหนักที่ปลาย Lever Arm เช่นเดียวกับการทดสอบการยุบอัดตัวของดินหรือ Consolidation Test ซึ่ง Loading Unit สามารถเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่กระทำในแนวตั้งได้โดยอิสระเพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะจริงที่เกิดขึ้นในสนาม รวมถึงที่อยู่ภายใต้ในสภาวะ  $K_0$ , Active และ Passive ตามแต่ความต้องการ

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้กำหนดให้แรงดันที่กระทำต่อตัวอย่างดินในแนวตั้งมีค่า  $K_0$  เท่ากับ 0.5 ซึ่งหมายความว่า แรงดันที่กระทำต่อตัวอย่างดินในแนวตั้งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของ Lateral Confining Pressure ที่กระทำต่อตัวอย่างดินเดียวกัน

2.3 Control Pressure Panel

Control Pressure Panel หรือแผงควบคุมแรงดัน (Lateral Confining Pressure) ใช้สำหรับการปรับเปลี่ยน Lateral Confining Pressure ที่กระทำต่อตัวอย่างดิน (รูปที่ 2) ซึ่งคล้ายกับแผงควบคุมแรงดันที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) สำหรับแรงดันสูงสุดที่สามารถสร้างขึ้นได้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีค่ามากถึง 1.2 MPa

3. วิธีการศึกษา

3.1 ตัวแปรในการทดสอบ

เพื่อที่จะทำการทดสอบชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น จึงได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินหลากหลายชนิดในสถานะที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลกระทบของ Confining Pressures ต่อความเค้นในการขยายตัวที่เกิดขึ้น ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ชนิดของดิน ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างดินรวมถึงปริมาณความชื้นในดิน และค่า Confining Pressure ดังสรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขของตัวแปรในการทดสอบ

รายละเอียด	ตัวแปร
ชนิดของดิน	2 (ดินธรรมชาติ และดินผสม)
ควาหนาแน่นและปริมาณความชื้นในดิน	2 (ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และ 95% ในด้านเปียกของความหนาแน่นแห้งสูงสุด)
Confining Pressure	3 (0, 21, และ 42 kPa)

ตัวอย่างดินที่ใช้มี 2 ชนิด ชนิดแรกเป็นดินธรรมชาติ (NC: Natural Clay) ที่มาจากบริเวณพื้นที่ในเมืองอาร์ลิงตัน มลรัฐเท็กซัส โดยมีแร่ Montmorillonite เป็นองค์ประกอบหลัก ดินชนิดที่สองเป็นดินที่มาจากการผลิตผสมกันของ Illite กับดินตะกอนในอัตราส่วน 3 ต่อ 7 (AC: Artificial Clay) คุณสมบัติของดินทั้งสองชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน AC และ NC

คุณสมบัติ	AC	NC
Passing#200 (%)	98	80
Specific Gravity	2.64	2.65
Liquid Limit (%)	29	37
Plastic Index (%)	15	17
Natural Moisture Content (%)	2.6	5.7
pH	7.7	7.8
AASHTO Classification	A-6	A-6
USCS Classification	CL	CL

การบดอัดดินได้ทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่ทำให้ระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดและที่ปริมาณความชื้นทางด้านเปียกที่ทำให้ระดับความหนาแน่นแห้ง 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด สำหรับ Confining Pressure มีอยู่ด้วยกัน 3 ระดับ คือ 0, 21, และ 42 kPa (0, 3, และ 6 psi)

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างดิน

ในการเตรียมตัวอย่างดินได้จัดทำแบบหล่อขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ และทำการบดอัดด้วยค้อนเหล็กซึ่งหนัก 24.4 นิวตัน (5.5 ปอนด์) เนื่องจากขนาดของแบบหล่อที่จัดทำขึ้นและค้อนเหล็กไม่ได้เป็นไปตามขนาดมาตรฐานการทดสอบ ASTM ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบเพื่อหาจำนวนครั้งในการบดอัดโดยอาศัยหลักทางสถิติในการวิเคราะห์ห้ประเมินผล โดยพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นในดินมีค่า  $0.01 \text{ kN/m}^3$  (0.1 pcf) และ 0.2% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่พอใจ หลังจากนั้นได้นำตัวอย่างดินที่ทำการบดอัดออกจากแบบหล่อและติดตั้งอย่างระมัดระวังสำหรับการทดสอบการขยายตัวด้วยชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากมีตัวอย่างจำนวนมากจึงได้มีการกำหนดสัญลักษณ์เพื่อใช้ในการกำกับตัวอย่างแต่ละก้อน สัญลักษณ์ที่ใช้อยู่ในรูปแบบของดัชนีสามชุด โดยดัชนีตัวแรกแสดงถึงชนิดของดิน ดัชนีตัวที่สองแสดงถึงปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัด และดัชนีตัวสุดท้ายแสดงถึง Lateral Confining Pressure ในหน่วยของ kPa เช่น NC-Opt-P0 หมายถึง ตัวอย่างดินที่มาจากดินธรรมชาติซึ่งได้ทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่ทำให้ระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทำการทดสอบโดยกำหนดให้ Lateral Confining Pressure เท่ากับ 0 kPa

### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ชุดเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการวัดความเค้นทั้งในแนวตั้งและแนวราบ รวมถึงค่าแรงดันในการขยายตัว ภายใต้ Confining Pressure ที่

กำหนด การทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้เสมือนกับการนำเอาการทดสอบการขยายตัวและการทดสอบวัดแรงดันการขยายตัวภายใต้ Confining Pressure ที่แตกต่างกันเข้าด้วยกัน โดยรายละเอียดของขั้นตอนในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. นำ Membrane มาห่อหุ้มตัวอย่างดินที่ได้ทำการบดอัดเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นนำไปติดตั้งใน Seating Cylinder Unit
2. วาง O-rings ในช่องบริเวณสันของ Seating Cylinder ด้านบนและด้านล่าง จากนั้นจึง Membrane มาปิด O-rings ทั้งนี้เพื่อช่วยลดการรั่วซึมและรักษาระดับของ Lateral Confining Pressure บริเวณรอบ Seating Cylinder
3. ยึด Top Cap และ Bottom Cap ด้วยน็อตสกรูให้แน่น
4. นำ Swell Cell วางในภาชนะบรรจุที่เป็นพลาสติกและต่อสายเชื่อมต่อระหว่าง Swell Cell กับ Control Pressure Panel
5. ติดตั้ง Loading Unit บนส่วนบนของ Swell Cell เพื่อสำหรับการเพิ่ม Vertical Load ตามต้องการระหว่างการทดสอบ
6. เพิ่มน้ำหนักแขวนบน Lever Arm เพื่อเพิ่มแรงดันในแนวตั้ง โดยให้ความเครียดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ  $K_0$  เท่าของ Lateral Confining Pressure
7. ปรับ Lateral Confining Pressure ให้กระทำต่อตัวอย่างดินตามที่ต้องการด้วยแฉกควบคุมแรงดัน
8. กล่าวโดยสรุปในการทดสอบครั้งนี้ได้กำหนดให้ Lateral Stress เป็น Major Principal Stress และ Vertical Stress เป็น Minor Principal Stress ถ้ามีการสลับเปลี่ยนกัน การขยายตัวที่บันทึกได้จะอยู่ในทิศทางที่ขนานไปกับแนวระนาบ เนื่องจากมี Lateral Stress ที่ต่ำ แต่ผลที่ได้รับอาจมีการขยายตัวที่น้อยกว่าที่ควรจะเป็น เพราะพื้นที่รอบตัวอย่างดินมีอยู่อย่างจำกัด สำหรับการทดสอบในครั้งนี้ได้กำหนดให้  $K_0$  มี

ค่าเท่ากับ 0.5 แต่ในความเป็นจริงควรที่จะเลือกใช้ค่า  $K_0$  ตามหลักการของ Jaky's formula [9] เพื่อที่จะให้การทดสอบเป็นไปตามเงื่อนไขที่แท้จริง

9. ค่าการขยายตัวในแนวตั้งสามารถบันทึกโดยอาศัย LVDT ที่ติดตั้งบนตัวอย่างดินซึ่งสามารถบันทึกผลการทดสอบได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับในแนวระนาบจะทำการบันทึกภายหลังจากการทดสอบว่ามีการขยายตัวเท่าใด การทดสอบจะหยุดเมื่อตัวอย่างดินไม่ได้แสดงการขยายตัวแต่อย่างใดเป็นระยะเวลาจนถึง 24 ชม.
10. ในกรณีของการทดสอบเพื่อวัดแรงดันในการขยายตัว สามารถกระทำตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาในข้อ 1 ถึง 9 แต่จะทำการบันทึกค่าน้ำหนักที่เพิ่มทุกช่วงเพื่อบังคับให้ความเค้นเกิดขึ้นในแนวตั้งกลับสู่ภาวะปกติควบคู่ไปด้วย
11. การทดสอบเพื่อวัดแรงดันในการขยายตัวจะหยุดเมื่อตัวอย่างดินไม่แสดงการขยายตัว ค่าน้ำหนักสุดท้ายจะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณค่าแรงดันในการขยายตัว

ในบทความนี้เน้นไปในเรื่องของ การตรวจสอบความเค้นที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวภายใต้ Confining Pressure ที่แตกต่างกัน ดังนั้นในที่นี้จึงรายงานแต่ผลของความเค้นที่บันทึกได้เพียงเท่านั้น

#### 4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

##### 4.1 Repeatability Assessment

เพื่อยืนยันถึงผลที่ได้ จึงกำหนดให้มีการทดสอบ 3 ตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงของการขยายตัวถูกสังเกตและบันทึกเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยผลการทดสอบที่ได้รวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและสัมประสิทธิ์ค่าความแปรปรวนแสดงไว้ในตารางที่ 3 และ 4

จากตารางที่ 3 และ 4 พบว่าความเค้นในการขยายตัวของดินทั้งสองชนิดให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความแปรปรวนที่ต่ำ ซึ่งแสดงว่าชุดเครื่องมือทดสอบที่

ได้พัฒนาขึ้น ให้ผลที่ค่อนข้างแน่นอนไม่ว่าจะทำการทดลองซ้ำกี่ครั้งก็ตาม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน AC

ตัวอย่าง AC	แนวตั้ง		แนวระนาบ	
	ความ เค้น (%)	SD/CV (%)	ความ เค้น (%)	SD/CV (%)
Opt-P0	12.3	0.46/3.7	1.4	0.05/3.4
Opt-P21	1.6	0.1/8.1	0.6	0.03/5
Opt-P42	0.97	0.15/17.5	0.25	0.04/16
Wet-P0	5.07	0.25/4.9	0.43	0.03/7
Wet-P21	0.0007	0.0006/*	0.02	0.02/*
Wet-P42	0	0/0	0	0

\*The value is too small to determine the coefficient of variation, SD = Standard Deviation, CD = Coefficient of Variation

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน NC

ตัวอย่าง NC	แนวตั้ง		แนวระนาบ	
	ความ เค้น (%)	SD/CV (%)	ความ เค้น (%)	SD/CV (%)
Opt-P0	28.37	0.55/1.9	3.9	0.04/1
Opt-P21	6.27	0.35/5.6	0.32	0.03/9.4
Opt-P42	2.53	0.15/9.8	0.11	0.03/*
Wet-P0	22.63	0.45/1.9	2.39	0.03/1.3
Wet-P21	2.46	0.15/6.1	0	0/0
Wet-P42	0.7	0.1/14.2	0	0/0

\*The value is too small to determine the coefficient of variation, SD = Standard Deviation, CD = Coefficient of Variation

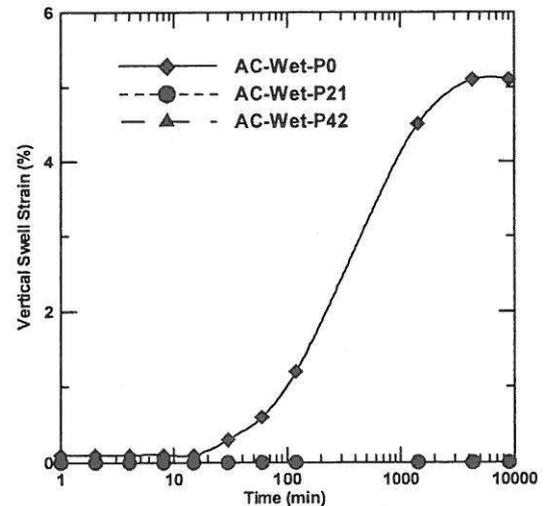
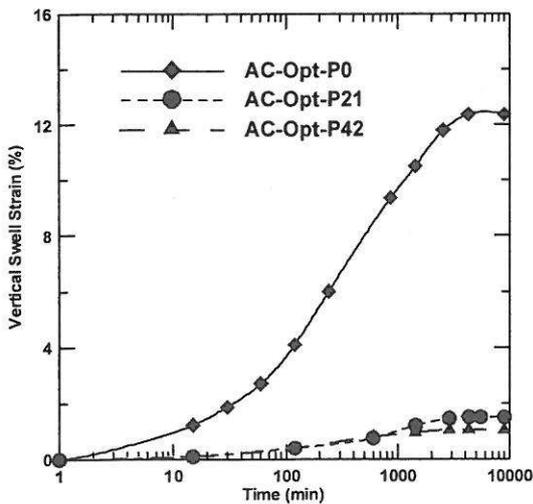
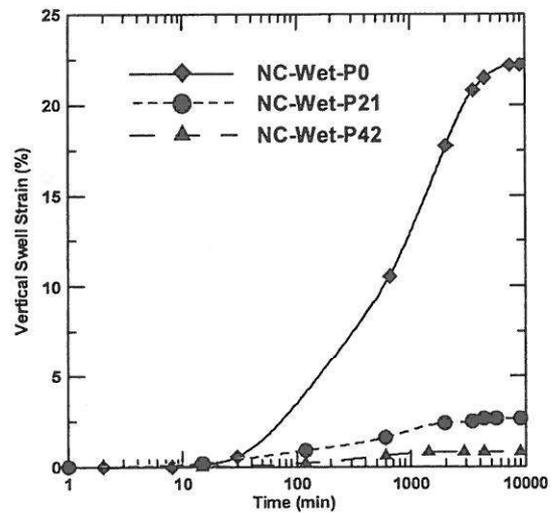
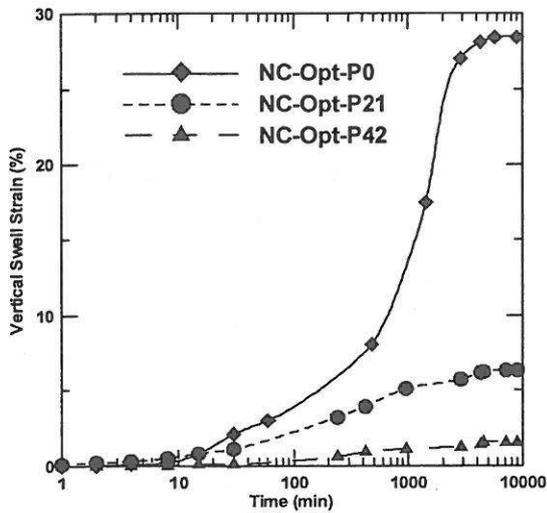
##### 4.2 ผลกระทบของตัวแปร

ค่าเฉลี่ยของความเค้นในการขยายตัวสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์กับเวลาดังรูปที่ 5 และ 6 สำหรับรูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของ Confining Pressure ต่อความ

เด่นที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าความเค้นในการขยายตัวของดินธรรมชาติ (NC) สูงกว่าดินที่ผสมชั้น (AC) ทั้งนี้เพราะดินที่ผสมชั้นนั้นมีแร่ Illite เป็นส่วนประกอบหลัก แต่ดินธรรมชาติมีแร่ Montmorillonite (MM) เป็นส่วนประกอบ แร่ MM เป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นแร่ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับโมเลกุลของน้ำมาสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางล้อมรอบแร่ดินเหนียว หรืออาจกล่าวได้ว่าดิน AC มี Illite เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งก่อให้เกิดชั้นน้ำล้อมรอบอนุภาคดินน้อยกว่า MM

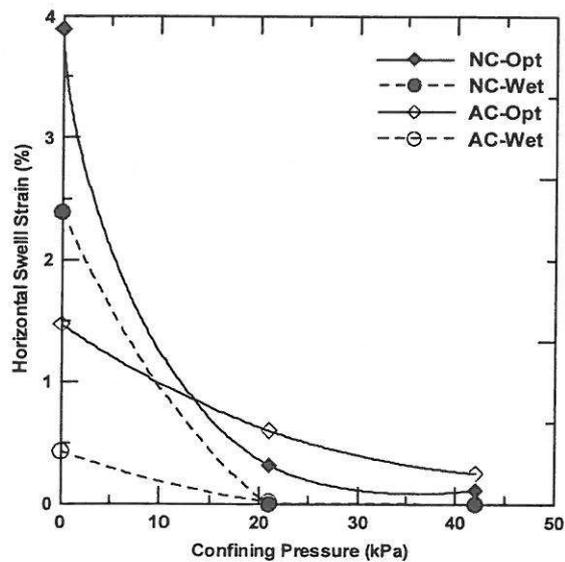
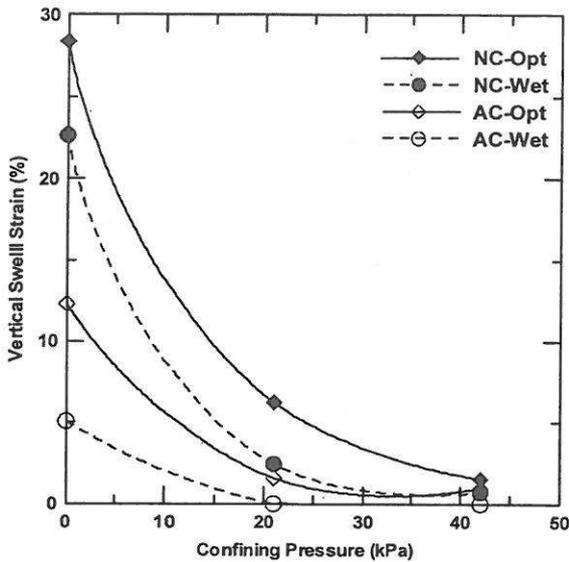
2. ตัวอย่างดินที่บดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่ให้ระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะให้ความเค้นของการขยายตัวในแนวดิ่งมากกว่าตัวอย่างดินที่ทำการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นในด้านเปียกที่ให้ระดับ 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากดินที่ระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีความอิ่มตัวโดยประมาณ 83% แต่ที่ด้านเปียกมีความอิ่มตัวเกือบ 100% สำหรับดินธรรมชาติในกรณีของดิน AC มีค่าความอิ่มตัวเท่ากับ 67% ที่ระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุด และมีค่าเกือบ 100% เมื่อทำการบดอัดด้านเปียก ค่าความแตกต่างทั้งสองระดับ



รูปที่ 5 ค่าความเค้นเฉลี่ยของดิน NC และ AC ที่ปริมาณความชื้นในระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดภายใต้ Confining Pressures 0, 21 และ 42 kPa.

รูปที่ 6 ค่าความเค้นเฉลี่ยของดิน NC และ AC ที่ปริมาณความชื้นด้านเปียกในระดับ 95% ความหนาแน่นแห้งสูงสุดภายใต้ Confining Pressures 0, 21 และ 42 kPa.

ค่อนข้างมากย่อมให้ผลการขยายตัวที่แตกต่างมากเช่นกัน อีกเหตุผลหนึ่ง คือ ดินที่ทำการบดอัดจัดอยู่ในจำพวกดินที่ไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำจะปรากฏการขยายตัวที่สูงซึ่งแปรผันตามค่า Matric Suction ที่สูง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Confining Pressure กับ ความเค้นในแนวตั้ง และความเค้นในแนวระนาบ

3. ความเค้นของการขยายตัวในแนวระนาบมีค่าโดยประมาณ 4% เมื่อไม่มี Confining Pressure และลดลงเหลือ 0.1% เมื่อมี Confining Pressure เท่ากับ 42 kPa สำหรับดิน NC ในกรณีของดิน AC มีแนวโน้ม

เช่นเดียวกัน เหตุผลของการเกิดพฤติกรรมเช่นนี้เหมือนกับ การเปลี่ยนแปลงความเค้นในแนวตั้ง

4. เมื่อเพิ่ม Lateral Confining Pressure ส่งผลให้มีการลดลงของความเค้นทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบ จากข้อสังเกตนี้สามารถชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดซึ่งเกี่ยวข้องกับ ดินชั้นฐานรากที่เป็นดินขยายตัวถึง 2 ประการ คือ ประการแรกข้อสมมุติที่กล่าวถึงค่าความเค้นในการขยายตัวมี ลักษณะแปรผันตามความลึกเพียงอย่างเดียวในแบบเชิงเส้น ประการที่สองเกี่ยวกับชุดทดสอบการยุบอัดตัวของดินที่ไม่มี Lateral Confining Pressure ทั้งสองประการส่งผลให้เกิดการประมาณความรุนแรงที่เกินจริง อันก่อให้เกิดการ ออกแบบฐานรากรวมถึงแผนงานการปรับปรุงคุณภาพที่ไม่เหมาะสมและไม่ประหยัด

5. แบบจำลองแสดงพฤติกรรมของการขยายตัว

จากข้อสังเกตดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.2 พบว่า พฤติกรรมของความเค้นของการขยายตัวที่เกิดขึ้นหรือการ พัฒนารูปแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นดัชนีในการชี้วัดไม่ได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินเพียงอย่างเดียว แต่ ยังขึ้นอยู่กับ Confining Pressure ด้วยเหตุนี้พฤติกรรม การขยายตัวจึงควรที่จะอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ 1 โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถที่จะแสดงพฤติกรรมได้อย่างแท้จริงมากกว่า สมการที่เคยมีมา

$$\frac{\Delta H}{H} = \left[ 10^{A * (\sigma_3 / \sigma_{atm}) + B} \right] \times \left[ \frac{w}{w_{opt}} \right]^n \quad (1)$$

โดยที่  $\frac{\Delta H}{H}$  คือ ความเค้นของการขยายตัวในแนวตั้ง;  $\Delta$  ตัวแปรคงที่ได้แก่ A, B และ n; w คือ ปริมาณความชื้นในดิน;  $w_{opt}$  คือ ปริมาณความชื้นที่ให้ระดับความหนาแน่นแห่ง สูงสุด;  $\sigma_3$  คือ Confining Pressure และ  $\sigma_{atm}$  คือ Atmospheric Pressures

เนื่องด้วยสมการที่ 1 อยู่ในรูปของ Non-Linear ที่ยากกับการวิเคราะห์ จึงทำการเปลี่ยนรูปจาก Non-Linear

เป็นสมการเชิงเส้นแบบง่ายดังสมการที่ 2 โดยอาศัย Logarithm Approach

$$\log\left[\frac{\Delta H}{H}\right] = A \times (\sigma_3 / \sigma_{atm}) + B + n \times \log\left[\frac{w}{w_{opt}}\right] \quad (2)$$

หลังจากนั้นนำสมการที่ 2 มาทำการวิเคราะห์โดยอาศัยการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จนสามารถแสดงในรูปสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3 สำหรับดิน NC และสมการที่ 4 สำหรับดิน AC ซึ่งทั้งสองสมการให้ค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.97 และ 0.73 ตามลำดับ

ดิน NC:

$$\log\left[\frac{\Delta H}{H}\right] = -3.31 \times (\sigma_3 / \sigma_{atm}) + 1.51 - 3.56 \times \log\left[\frac{w}{w_{opt}}\right] \quad (3)$$

ดิน AC:

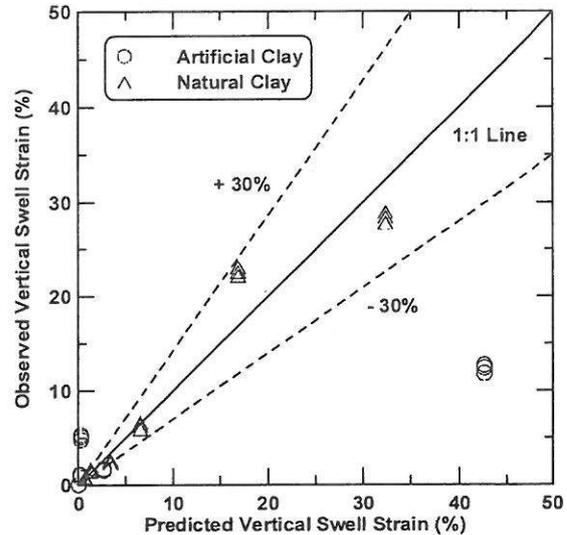
$$\log\left[\frac{\Delta H}{H}\right] = -5.73 \times (\sigma_3 / \sigma_{atm}) + 1.63 - 23.4 \times \log\left[\frac{w}{w_{opt}}\right] \quad (4)$$

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นของการขยายตัวในแนวตั้งที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการความสัมพันธ์ (สมการที่ 3 และ 4) กับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ จากรูปแสดงให้เห็นว่าผลการทำนายที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ อย่างไรก็ตามในการใช้สมการความสัมพันธ์นี้จำกัดที่ค่า K<sub>0</sub> เท่ากับ 0.5 และมีคุณสมบัติดินเช่นเดียวกับที่ได้ทำการศึกษาวิจัย ดังนั้นจึงสมควรอย่างยิ่งที่ต้องมีทดสอบกับตัวอย่างดินชนิดอื่นเพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

## 6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบการขยายตัวของดิน โดยผลการทดสอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันไม่ว่าจะทำการทดลองซ้ำกี่ครั้งก็ตาม อีกทั้ง

แบบจำลองความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการขยายตัวของดินโดยแสดงผลกระทบที่ได้จาก Lateral Confining Pressure ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดิน NC และ AC

1. ชุดเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือและเป็นที่น่าพอใจ โดยค่าการทดสอบที่บันทึกได้อยู่ในเกณฑ์ที่พอใจ
2. ความเครียดที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ K<sub>0</sub> เท่าของ Confining Pressure ซึ่งอนุญาตให้มีการขยายตัวในแนวตั้ง สำหรับการสลับเปลี่ยนกัน Major Stress กับ Minor Stress สามารถก่อให้เกิดการขยายตัวในแนวระนาบในพื้นที่จำกัดซึ่งมีสถานะเช่นเดียวกับสภาพความเป็นจริงในธรรมชาติ
3. การขยายตัวในแนวตั้งมีค่าลดลงเมื่อ Lateral Confining Pressure เพิ่มขึ้นสำหรับดินที่ทำการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่ให้ระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดในดินธรรมชาติการเพิ่มขึ้นของ Confining Pressure จาก 0 ถึง 21 kPa หรือ 42 kPa ส่งผลให้ลดความเค้นลงถึง 78% และ 94% ตามลำดับ สำหรับดินที่ผสมขึ้นให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับดินธรรมชาติซึ่งสามารถลดค่าการขยายตัวได้ถึง 86% และ 92% สำหรับการเพิ่ม Lateral

Confining Pressure จาก 0 ถึง 21 kPa หรือ 42 kPa ตามลำดับ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นด้านเปียกของระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุด ให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้หลักเกณฑ์ที่ใช้ชี้วัดความรุนแรงของดินตามความลึกในลักษณะแปรผันแบบเส้นตรงจึงเป็นการประมาณค่าที่เกินจริง

4. ค่าความเค้นของการขยายตัวในแนวระนาบของดินธรรมชาติ (NC) มีค่าเท่ากับ 4% โดยประมาณที่ระดับ Confining Pressure เท่ากับศูนย์ และมีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับ 0.10% เมื่อ Confining Pressure เพิ่มขึ้นถึง 42 kPa สำหรับดินผสม (AC) มีแนวโน้มของพฤติกรรมเดียวกับดินธรรมชาติ (NC) ที่ค่าความเค้นลดลงจาก 1.4% เหลือ 0.20%

5. ปริมาณความชื้นในดินสำหรับการบดอัดมีอิทธิพลต่อการขยายตัวของดินทั้งสองชนิด ตัวอย่างดินที่ทำกรบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่ให้ระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดแสดงปริมาณการขยายตัวมากกว่าตัวอย่างดินที่บดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่ให้ระดับความหนาแน่นด้านเปียกของความหนาแน่นแห้งสูงสุด ความแตกต่างที่เกิดขึ้นมาจากระดับความอึดตัวในตัวอย่างดิน ที่ระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดก่อให้เกิด Martic Suction มาก อันส่งผลให้เกิดการขยายตัวสูง

6. แบบจำลองสำหรับความเค้นของการขยายตัวเป็นสมการความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นในการบดอัดและ Confining Pressure โดยเทอมของ Confining Pressure นั้นจะอยู่ในรูป Exponential และเทอมของปริมาณความชื้นจะอยู่ในรูปของ Non-Linear จากการวิเคราะห์พบว่าสมการดังกล่าวให้ค่า  $R^2$  มากกว่า 0.73 อันแสดงถึงศักยภาพของสมการในการประมาณค่าความเค้นของการขยายตัว

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ The National Science Foundation (Program Director: Dr. Richard J. Fragaszy) ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายทั้งหมดตลอดการศึกษาวิจัยภายใต้ทุน

NSF No. 0100255 และ Mr. Tom Leeds จาก The University of Texas and Arlington's Machine Shop บริษัท Boral Material Technologies, Texas ที่ทุ่มเทในการสร้างแม่แบบของชุดทดสอบในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Al-Shamrani, M. A. and Al-Mhaidib, A. I., 1999, "Prediction of Potential Vertical Swell of Expansive Soils Using a Triaxial Stress Path Cell," *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 32, pp. 45-54.
- [2] ASTM, 2001, *Annual Book of ASTM Standards*, Section 4, Construction Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- [3] Brekke, T. L., 1965, "On the Measurement of the Relative Potential Swell ability of Hydrothermal Montmorillonite Clay from Joints and Faults in Pre-Cambrian and Paleozoic Rocks in Norway," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 2, pp. 155-165.
- [4] Bucher, F., 1987, "Investigation of Swell Pressure of Highly compressed Bentonite," *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Congress on Rock Mechanics*, Vol. 3, Montreal, pp. 1496-1499.
- [5] Chen, F. H., 1998, "Foundations on Expansive Soils," *Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 12.
- [6] Dhowian, A. W., Erol, A. O., and Youssef, A., 1990, "Evaluation of Expansive Soils and Foundation Methodology in the Kingdom of Saudi Arabia," *Final Report, King Abdulaziz City for Science and Technology*, KACST, AT-5-88.
- [7] Erol, A. O., Dhowian, A., and Youssef, A., 1987, "Assessment of Oedometer Methods for Heave Prediction," *Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference on Expansive Soils*, New Delhi, India, pp. 99-103.

- [8] Franklin, J. A., 1984, "A Ring Swell Test for Measuring and Shrinkage Characteristics," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 21, pp. 113-121.
- [9] Jaky, J., 1944, "The Coefficient of Earth Pressure at Rest," *Journal for the Society of Hungarian Architects and Engineers*, Oct, pp. 355-358.
- [10] Johnson, L. D. and Snethen, D. R., 1979., "Prediction of Potential Heave of Swelling Soils," *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 1, No. 3, pp. 117-124.
- [11] Kassiff, G. and Ben-Shalom, A., 1971., "Apparatus for Measuring Swell Potential under Controlled Moisture Intake," *Journal of Materials, JMLSA*, Vol. 6, No. 1, pp. 3-15.
- [12] Kota, P., Hazlett, D., and Perrin, L. 1996. "Sulfate-bearing Soils: Problems with Calcium Based Stabilizers," *Transportation Research Record, National Research Council, Washington, D.C.*, Vol. 1546, pp. 62-69.
- [13] Murayama, S. and Yagi, N., 1966, "Swelling of Mudstone due to Sucking of Water," *Proc. 1<sup>st</sup> Congress of ISRM*, Lisbon, Vol. 1, pp. 495-498.
- [14] Nelson, D. J. and Miller, J. D., 1992, *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [15] Ozkol, S., 1965., "Swelling Characteristics of Permian Clay," Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, OK.
- [16] Perrin, L. L. 1992., "Expansion of Lime-treated Clays Containing Sulfates," *Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference on Expansive Soils*, Dallas, Texas, 503 p.
- [17] Porter, A. A. and Nelson, J. D., 1980, "Strain Controlled Testing of Expansive Soils," *Proceedings 4<sup>th</sup> International Conference on Expansive Soils*, Denver, pp. 34-44.
- [18] Vijayvergiya, V.N., and Ghazzaly, O.I., 1973. "Prediction of Swelling Potentials of Natural Clays." *Proceedings, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Expansive Soils*, Haifa, Israel, pp. 227-236.
- [19] Yesil, M. M., Pasamehmetoglu, A. G., and Bozdog T., 1993., "A Triaxial Swelling Test Apparatus," *International Journal Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 4, pp. 443-450.
- [20] Zhang, X. and Briaud, J.-L., 2003. "Predicting the Volume Change of Shrink-Swell Soils." *Proceedings, Texas Section, ASCE Fall Meeting*, Dallas, Texas.