



การพัฒนาอุปกรณ์อัตโนมัติสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็ว
Development of an Automatic Apparatus for Rapid Consolidation Testing

มารุต เรืองจตุพิพิธพาน
Marut Rungjutipoparn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering (Geotechnical Engineering)
Prince of Songkla University**

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาอุปกรณ์อัตโนมัติสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็ว
ผู้เขียน นายมารุต เรืองจตุโพธิ์พาน
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตัญญ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)

.....
(รองศาสตราจารย์บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา)

.....กรรมการ
(ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
โยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์อัตโนมัติสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็ว
ผู้เขียน	นายมารุต เรืองจตุโพธิ์พาน
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ □

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ลดระยะเวลาในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว การศึกษาเริ่มจากการสร้างเครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำขึ้นมาใหม่ โดยนำเอาอุปกรณ์ทางด้านเซนเซอร์มาประยุกต์ใช้ ควบคุมผ่านโปรแกรมทดสอบจากคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบถูกเขียนขึ้นมาทั้งหมด 3 โปรแกรม คือ โปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมอัตโนมัติ, โปรแกรม Differential settlement Algorithm และโปรแกรม Asaoka Algorithm การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมทั้งสามจะถูกตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำกับวิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมด้วยดินเหนียวอ่อนอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ค่าที่นำมาใช้เปรียบเทียบในการตรวจสอบความถูกต้องครั้งนี้ได้แก่ ค่า Compression Index, ค่า Over Consolidation Ratio และค่า Maximum Past Pressure

ผลการศึกษาประสิทธิภาพพบว่า โปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบรวดเร็วโดยใช้ โปรแกรม Differential settlement Algorithm และโปรแกรม Asaoka Algorithm ให้ผลการทดสอบที่ยอมรับได้โดยมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบแบบดั้งเดิมไม่มากกว่า 10% โดยโปรแกรม Differential settlement Algorithm ใช้เวลาในการทดสอบ 4-6 ชั่วโมงต่อน้ำหนักกด ในขณะที่โปรแกรม Asaoka Algorithm ใช้เวลาเพียง 2-4 ชั่วโมงต่อน้ำหนักกด

คำหลัก: □การอัดตัวคายน้ำอัตโนมัติ, การอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็ว □

Thesis Title Development of an Automatic Apparatus for Rapid Consolidation Testing
Test Author Mr. Marut Rungjutipoparn
Major Program Civil Engineering (Engineering Geotechnics)
Academic Year 2009

ABSTRACT

This research aims to develop an automatic testing apparatus such that the testing time for consolidation test can be reduced. A new automatic consolidation testing apparatus developed was equipped with transducers and computer-controlled via LabView.

Three testing programs were developed for this apparatus namely: automatic consolidation, differential settlement algorithm and Asaoka algorithm. The two latter programs were designed for rapid consolidation test. Performances of these three programs were tested and compared with conventional consolidation test results using compression index, over consolidation ratio and maximum past pressure values.

Experimental results indicated that both rapid consolidation test programs provided acceptable testing results comparing with the conventional one with less than 10% error. In addition, testing times for differential settlement algorithm can be reduced to 4-6 hours where as those for asaoka algorithm were 2-4 hours.

Key word Automatic consolidation, Rapid Consolidation

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เถлимยานนท์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางแก่ผู้วิจัย ตลอดการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลีมกตัญญู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ดร.เชื้อเทียน โฮ Mr. Xiaodong Wang ที่ได้ให้คำปรึกษาพร้อมคำแนะนำเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆและน้องๆ นักศึกษาปริญญาโท อาจารย์สมมาตร สวัสดิ์ และอีกหลายๆท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญที่สุด ที่ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ พระคุณของเตี่ย-แม่ และสมาชิกทุกคนในครอบครัวและ คุณชลดา กาญจนกุล ที่ผลักดันจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา และข้าพเจ้าจะระลึกถึงอยู่เสมอ

มารุต เรืองจตุโพธิ์พาน

สารบัญ

หน้า

สารบัญ

รายการตาราง

รายการภาพประกอบ

บทที่

1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 หลักการและแนวคิดในการออกแบบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ	1
1.3 แนวคิดการทดลองการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็ว	3
1.4 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.5 ขอบเขตการศึกษา	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	4

2 การทบทวนเอกสาร

2.1 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว (Consolidation test)	6
2.1.1 ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation theory)	6
2.1.2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินแบบดั้งเดิม (Conventional consolidation test)	7
2.1.3 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ	8
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ	11
2.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ (Sensors) และ Labview	12
2.2.1 เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์	12
2.3 LabVIEW	21
2.3.1 Front Panel	22
2.3.2 Block Diagram	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 การทบทวนเอกสาร(ต่อ)	
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 หลักการออกแบบ	33
3.2 การออกแบบและสร้าง Hardware	35
3.3 การพัฒนา Software	44
3.3.1 โปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบรวดเร็ว	44
3.3.2 Differential settlement Algorithm	45
3.3.3 Asaoka Algorithm	45
3.3.4 ผลการพัฒนา Software	46
4 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือ	
4.1 วิธีการตรวจสอบความน่าเชื่อถือ	55
4.1.1 การเตรียมดินเหนียวตัวอย่างสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน	55
4.1.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการทดสอบที่พัฒนาขึ้นมา	57
4.2 ผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือ	58
4.2.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัด โนมัติ (โปรแกรมอัด โนมัติ 24 ชั่วโมง)	58
4.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัด โนมัติ Differential settlement Algorithm โปรแกรม Asaoka Algorithm	60
4.2.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัด โนมัติ Asaoka Algorithm	63
4.2.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว (โปรแกรมอัด โนมัติ 24 ชั่วโมง, โปรแกรม Differential settlement Algorithm และ โปรแกรม Asaoka lgorithm)	65

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการศึกษา	
สรุปผลการวิจัย	67
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	
ก. วิธีประกอบเครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายนํ้าอัตโนมัติ	71
ข. วิธีใช้เครื่องทดสอบ	81
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	
ก. การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ	98
ข. การเผยแพร่ในรูปแบบของบทความวารสาร	104
ประวัติผู้เขียน	111

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Sensor/Transducer ที่มีใช้กันอยู่ในงานวิศวกรรม	15
2.2 ลักษณะของเส้น wire เมื่อใช้เชื่อมต่อระหว่างข้อมูลแต่ละชนิด	25
4.1 จำนวนหลุมเจาะและระดับความลึกของดินตัวอย่างของ ดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช	55
4.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่าง อำเภอปากพนัง จังหวัด นครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร	58
4.3 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรม Differential settlement Algorithm	62
4.4 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรม Asaoka Algorithm	64
4.5 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของวิธีการทดสอบ 4 วิธีของดินตัวอย่าง อำเภอ ปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร	66

รายการภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่	
1.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ทดสอบการอัดตัวคายนํ้าของดินแบบ (a) ดั้งเดิมและ (b) อุปกรณ์แบบอัตโนมัติขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	3
1.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	5
2.1 กระบวนการอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียว	9
2.2 กราฟการอัดตัวได้ (Compression curve) ของดินเหนียวอัดตัวด้วยนํ้า	10
2.3 ระบบรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยคอมพิวเตอร์	13
2.4 ทรานสดิวเซอร์วัดค่าการเคลื่อนไหว (Displacement Transducer)	16
2.5 อุปกรณ์วัดค่าแรง (Load cell, S-beam)	16
2.6 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันแบบนิวแมติกส์ (Electro-pneumatic Regulator)	16
2.7 อุปกรณ์ SCXI (Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation) ของบริษัท National Instrument	17
2.8 ส่วนประกอบ Strain Gage ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน	19
2.9 ส่วนประกอบ The Wheatston bridge Circuit	21
2.10 Front Panel (ก) และ Block Diagram (ข) รวมทั้ง Tools, Functions และ Controls ต่าง ๆ ในโปรแกรม LabVIEW	22
2.11 สัญลักษณ์คำสั่ง Control ในโปรแกรม LabVIEW	23
2.12 สัญลักษณ์คำสั่ง Indicators ในโปรแกรม LabVIEW	23
2.13 ลักษณะของ Node และ Terminal ที่บรรจุอยู่ภายใน Block Diagram ในโปรแกรม LabVIEW	25
2.14 Icon และ Connector ของ VI ในโปรแกรม LabVIEW	26
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_v/U และ T_v ของ Terzaghi	28
2.16 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ (C_v , σ_v') ของดินเหนียวคงสภาพที่ระดับความลึก 3 เมตร จากการทดสอบแบบดั้งเดิมและอย่างรวดเร็ว	29
2.17 กราฟของทฤษฎี Asaoka Method ของการทรุดตัวในแนวดิ่ง (Asaoka, 1978)	30
2.18 กราฟประกอบทฤษฎี Asaoka Method ของการทรุดตัวในแนวดิ่ง กรณีดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันและน้ำหนักกดไม่คงที่ (Holtz et al. 1991)	31

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 เครื่องทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบอัด โนมัติ	32
2.20 ผังการทำงานของเครื่องทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบอัด โนมัติ	32
2.21 โปรแกรมใช้ในการควบคุมการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบอัด โนมัติโดยใช้โปรแกรม LabVIEW	32
3.1 ผังการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าของเครื่องต้นแบบ	34
3.2 อุปกรณ์หลัก 10 ชิ้นของเครื่องทดสอบ	35
3.3 NI-DAQ รุ่น NI DAQPad-6015	36
3.4 วิธีการใช้งานอุปกรณ์ NI-DAQ รุ่น NI DAQPad-6015	36
3.5 Signal Conditioning Unit	37
3.6 Electro Pneumatic Regulator	38
3.7 Air Cylinder หรือกระบอกลม	39
3.8 Load Cell	39
3.9 การต่อเชื่อมต่อระหว่าง Air cylinder กับ Load cell	40
3.10 อุปกรณ์ใช้ยึดระหว่าง Air cylinder กับ Load cell	41
3.11 อุปกรณ์อ้างอิงในการวัดค่าการทรุดตัวของดิน	41
3.12 อุปกรณ์ใช้ยึดระหว่าง Load cell กับแผ่นสังกะสี	41
3.13 อุปกรณ์ Displacement Transducer พร้อมแท่นจับแม่เหล็ก	42
3.14 Steel Fram	42
3.15 ขนาดของSteel Fram	43
3.16 อุปกรณ์พร้อมสายต่อพ่วง	43
3.17 เครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS)	44
3.18 แผนผังการทำงานของโปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบดั้งเดิมอัด โนมัติ	47
3.19 แผนผังการทำงานของโปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบ Differential settlement Algorithm	48
3.20 แผนผังการทำงานของโปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบ Asaoka Algorithm	49
3.21 โปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายนํ้าอย่างรวดเร็วหน้าที่ 1 (Setup)	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 หน้าต่างแสดงผลการทดสอบ (Testing Monitor)	50
3.23 ภาพรวมแสดงความสัมพันธ์ของการทำงานของโปรแกรมการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็ว	51
3.24 ฟังก์ชันในโปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมอัตโนมัติ	52
3.25 ฟังก์ชันในโปรแกรม Differential settlement Algorithm	53
3.26 ฟังก์ชันในโปรแกรม Asaoka Algorithm	54
4.1 ดินเหนียวกรุงเทพที่นำมาปั้นขึ้นรูปที่แรงดันต่างๆ	56
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวของดินอำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร ด้วยวิธีการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว (โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง)	59
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าอัตราส่วนช่องว่างของดินอำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร ด้วยวิธีการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว (โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง)	59
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินอำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร ด้วยวิธีการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว (โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง)	60
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวของดินอำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร การอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัตโนมัติ Differential settlement Algorithm	61
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินอำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร การอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัตโนมัติ Differential settlement Algorithm	61
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวของดินอำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตรการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว Asaoka Algorithm	63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตรการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัดโนมัติ Asaoka Algorithm	65
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตรการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิม, โปรแกรมอัดโนมัติ 24 ชั่วโมง, โปรแกรม Differential settlement Algorithm และ โปรแกรม Asaoka algorithm	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ฐานรากของสิ่งปลูกสร้างบนชั้นดินเหนียวจำเป็นต้องมีความมั่นคงแข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักของโครงสร้างได้ นอกจากนั้นแล้วฐานรากของโครงสร้างเหล่านี้จะต้องไม่ทรุดตัวจนเกิดการพิบัติของโครงสร้าง การคำนวณการทรุดตัวของโครงสร้างสามารถทำได้ โดยนำดินใต้ฐานรากที่ไม่ถูกรบกวนไปทำการทดสอบหาคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) แล้วนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้เช่น ค่าอัตราซีการอัดตัวและค่าสัมประสิทธิ์ของการยุบตัวของดินไปทำการคำนวณหาค่าการทรุดตัวของฐานราก

กระบวนการอัดตัวคายน้ำเป็นกระบวนการที่เมื่อดินเหนียวรับแรงภายนอกในช่วงเริ่มต้นของการรับแรง แรงภายนอกจะถูกปรับโดยน้ำในดินเรียกว่า แรงดันน้ำส่วนเกิน เมื่อเวลาผ่านไปแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆหายไป เนื่องจากมีการไหลออกของน้ำจากมวลดินทำให้ความดันประสิทธิผล (Effective Stress) ของดินมีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดการทรุดตัวของดิน

วิธีการทดสอบดินเพื่อหาค่าการทรุดตัวแบบดั้งเดิมนั้น เรียกว่า “การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน” (Consolidation Test, ASTM D2435) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่วิธีการทดสอบดังกล่าวจะใช้เวลานานไม่น้อยกว่า 1 สัปดาห์ นอกจากนี้วิธีการทดสอบแบบดั้งเดิมนี้ใช้เครื่องมือมาตรฐานที่พัฒนามานานแล้ว การขึ้นน้ำหนักและการบันทึกค่าการทรุดตัวทำโดยใช้คน

การศึกษาครั้งนี้ต้องการพัฒนาเครื่องมือการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบอัตโนมัติ ซึ่งใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมและอ่านค่าต่างๆ ทำให้การทดสอบการอัดตัวคายน้ำง่ายยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้ยังพยายามพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อจะลดระยะเวลาในการทดสอบลงโดยยังคงให้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบที่ถูกต้องเหมือนกับวิธีดั้งเดิม

1.2 หลักการและแนวคิดในการออกแบบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

การออกแบบของเครื่องต้นแบบการอัดตัวคายน้ำแบบอัตโนมัติจะนำอุปกรณ์ทางด้านทรานสดิวเซอร์มาประยุกต์ใช้ อาทิ การอ่านค่าการทรุดตัว, อ่านค่าแรงกดและควบคุมปริมาณในการเพิ่ม Stress ในการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีแนวคิดในการออกแบบอุปกรณ์รวมไปถึงการพัฒนากระบวนการ

ทดสอบเพื่อที่จะลดระยะเวลาในการทดสอบลงให้ได้มากที่สุด แต่ยังคงให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องตามหลักการและทฤษฎีการอัดตัวคายนํ้า

1.2.1 การเพิ่มนํ้าหนัก

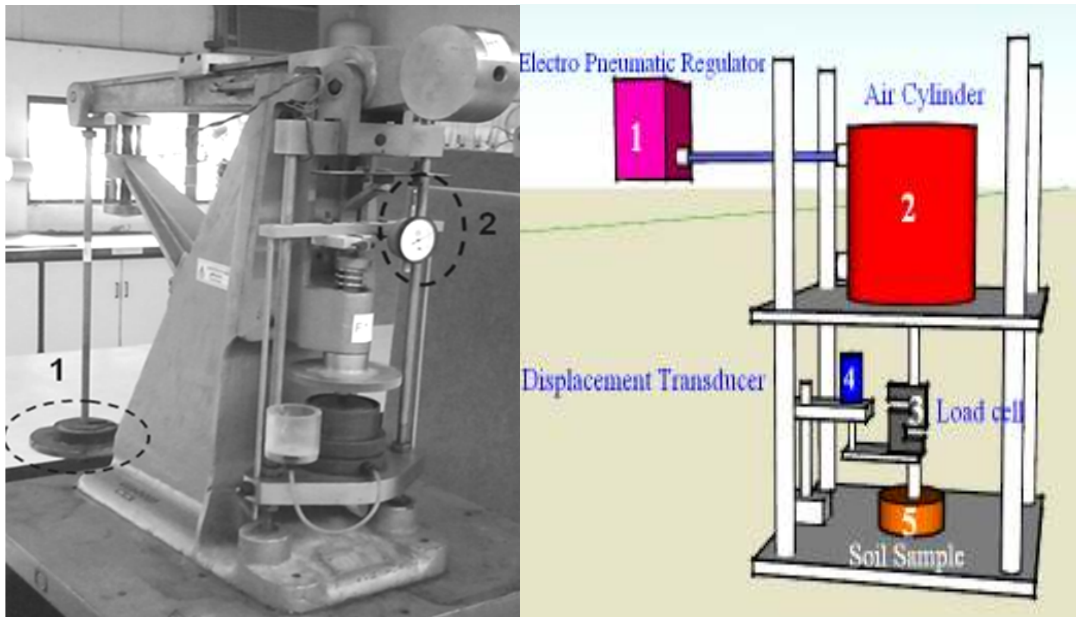
สำหรับการเพิ่มนํ้าหนักของการทดสอบแบบวิธีดั้งเดิมใช้ก้อนนํ้าหนักเป็นตัวถ่วงนํ้าหนักกดผ่านอุปกรณ์คานกระดก ทำให้เกิด Stress ในดินตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 1.1a (หมายเลข 1) โดยผู้ทดสอบเป็นผู้เปลี่ยนนํ้าหนักกดทับทุกๆ 24 ชั่วโมง ส่วนเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นใช้แรงดันของลมผ่านอุปกรณ์ 3 ชั้นเพื่อให้เกิด Stress ขึ้นในดินตัวอย่าง อุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นมาชั้นแรกคือ อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (Electro-pneumatic Regulator) ดังแสดงในภาพที่ 1.1b (หมายเลข 1) เป็นตัวควบคุมแรงดันของลมที่ส่งมาจากปั๊มลม อุปกรณ์ชั้นนี้สามารถควบคุมได้จากคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW เมื่อแรงดันผ่านอุปกรณ์ควบคุมแรงดันมายังกระบอกลม (Pneumatic cylinder) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชั้นที่ 2 (แสดงในภาพที่ 1.1b หมายเลข 2) ซึ่งทำหน้าที่ส่งต่อแรงดันผ่านอุปกรณ์ชั้นที่ 3 คือ Load cell ดังแสดงในภาพที่ 1.1b หมายเลขที่ 4 ไปยังตัวอย่างดิน (แสดงในภาพที่ 1.1b หมายเลข 5)

1.2.2 การอ่านค่าการทรุดตัวและบันทึกผล

การทดสอบแบบวิธีดั้งเดิมผู้ทำการทดสอบจะต้องเป็นผู้อ่านค่าการทรุดตัวจาก Dial gauge ดังแสดงในภาพที่ 1.1a (หมายเลข 2) และบันทึกค่าการทรุดตัว เพื่อลดการทำงานของคน เครื่องต้นแบบจะใช้ อุปกรณ์วัดค่าการทรุดตัวแบบอัตโนมัติและสามารถบันทึกค่าการทรุดตัวพร้อมกัน อุปกรณ์ที่เลือกนำมาใช้คือ Displacement Transducer เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า คุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถวัดค่าการทรุดตัวและบันทึกค่าเก็บไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ได้แบบอัตโนมัติผ่านโปรแกรม LabVIEW ดังแสดงในภาพที่ 1.1b (หมายเลข 4)

1.2.3 การวัดแรงกด

การวัดแรงกดเป็นการวัดที่เพิ่มขึ้นมาจากการทดสอบแบบดั้งเดิม โดยใช้ Load Cell Transducer หรืออุปกรณ์วัดค่าแรงกดทางไฟฟ้า (แสดงในภาพที่ 1.1b หมายเลข 3) นำมาใช้วัดค่า Stress ที่ Pneumatic Cylinder กระทำต่อดินตัวอย่าง โดยติดตั้ง Load cell กับ Pneumatic Cylinder



(a)

(b)

ภาพประกอบที่ 1.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินแบบ (a) ดั้งเดิมและ (b) อุปกรณ์แบบอัตโนมัติ

1.3 แนวคิดการทดลองการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็ว

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิม (ASTM D-2435) ที่ใช้เวลาในการตั้งน้ำหนักไว้ 24 ชั่วโมงนั้น การทรุดตัวที่ได้จะรวมทั้ง Primary consolidation และ Secondary consolidation ในเวลาที่ทำให้เกิด End of primary consolidation น่าจะมีค่าน้อยกว่า 4 ชั่วโมง ซึ่งถ้ามีการขึ้นน้ำหนักหลักจาก End of primary consolidation แล้วก็จะทำให้เวลาในการทดสอบลดลง ในขณะที่ยังคงได้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องและพอเพียง เทคนิคอย่างง่ายสำหรับการหาเวลาที่ End of primary consolidation จะถูกศึกษาและนำมาใช้ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

1.4 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังนี้

1. พัฒนาอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบอัตโนมัติ
2. พัฒนาวิธีการทดสอบแบบ Rapid consolidation โดยใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตการศึกษามีดังต่อไปนี้

1. พัฒนาอุปกรณ์ทดสอบอัตโนมัติที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมโดยโปรแกรม LabVIEW เพื่อช่วยลดแรงงานคนและระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน
2. ดินที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นได้แก่ ดินเหนียวกรุงเทพฯ ดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

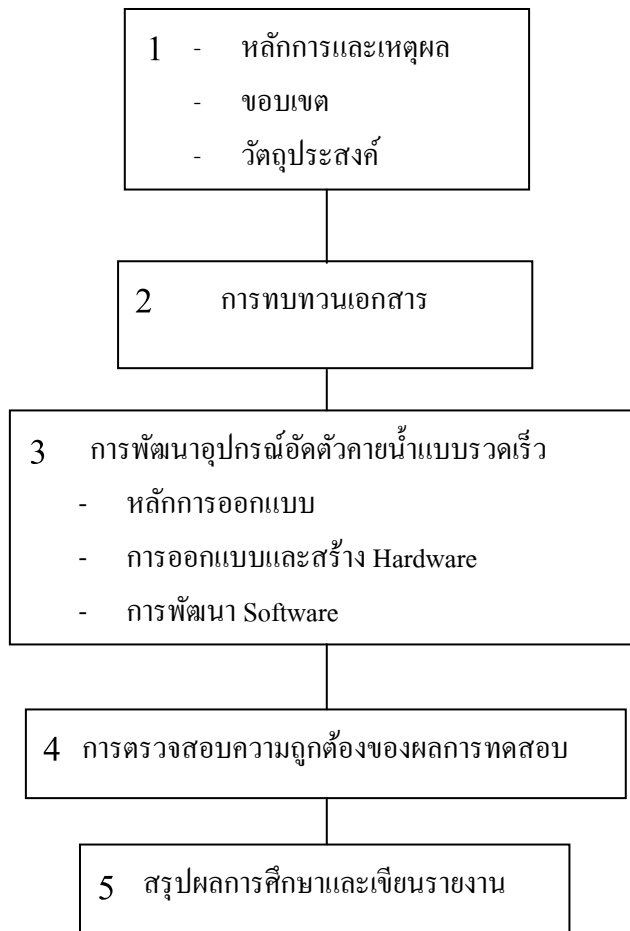
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ สามารถพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินแบบอัตโนมัติเพื่อลดการใช้แรงงานคนในการทดสอบและลดระยะเวลาในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน โดยยังได้ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดตัวคายน้ำ ที่มีความน่าเชื่อถือเหมือนกับวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิม

1.7 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาดังแสดงในรูป 1.2 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

หลักการและเหตุผล ขอบเขตและวัตถุประสงค์, การทบทวนเอกสาร, การพัฒนาอุปกรณ์, การตรวจสอบความถูกต้อง, สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงาน



ภาพประกอบที่ 1.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 2

การทบทวนเอกสาร

การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทบทวนทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง และส่วนที่สองเป็นการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียว (Consolidation)

การทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

2.1.1 ทฤษฎีการอัดตัวคายนํ้า (Consolidation theory)

การอัดตัวคายนํ้าของดินสามารถอธิบายโดยใช้ชั้นดินสมมุติ ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งเป็นชั้นของดินเหนียวชุ่มนํ้า อยู่ระหว่างชั้นของทรายข้างล่างและข้างบน สมมุติให้ระดับนํ้าใต้ดินปกติ (Static ground water level) อยู่ที่ผิวดินในรูป (a) เมื่อมีนํ้าหนักภายนอกกระทำที่ผิวดิน (q) ทันทีทันใดระดับนํ้าในชั้นดินเหนียวก็จะสูงขึ้นเท่ากับ u_0 เรียกว่า Initial excess pore pressure เมื่อเปรียบเทียบกับระดับนํ้าในชั้นทรายซึ่งจะลดลงสู่สมดุลโดยเร็ว นํ้าในชั้นของดินเหนียวก็จะพยายามไหลออกไปสู่ชั้นทรายซึ่งมีความดันต่ำกว่า และเมื่อเวลาผ่านไปนํ้าในชั้นดินเหนียวบางส่วนได้ไหลออกไป, Excess pore pressure ก็จะต่ำลง ดังแสดงในรูป (b) ต่อมาเมื่อเวลาผ่านไปนานพอ ($t = t = \infty$) ความดันในชั้นดินเหนียวก็จะคืนเข้าสู่ความดันปกติ แต่เนื่องจากมวลดินเหนียวอยู่ในสภาพชุ่มนํ้า (Saturated) เพราะฉะนั้นมวลดินรวมก็จะประกอบด้วยเม็ดดิน (Solid) และนํ้าระหว่างเม็ดดินเท่านั้น เมื่อนํ้าจำนวนหนึ่งไหลออกไปจึงทำให้เกิดการลดปริมาตรของมวลดินรวมขึ้น คือการลดความหนาของชั้นดินเหนียวหรือการทรุดตัวนั่นเอง

Terzaghi's (1934) อธิบายการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ส่วนเกินเทียบกับเวลาในหนึ่งมิติ (ดังสมการที่ 2.1) โดยเสนออยู่ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ u = แรงดันนํ้าส่วนเกิน
 C_v = สัมประสิทธิ์การยุบตัวของดิน
 t = เวลา

z = ทิศทาง, ที่พิจารณา

โดยสมการนี้จะจริงเมื่อดินเหนียวมีสมมติฐานดังนี้

1. ดินนั้นเป็นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated)
 2. น้ำและเม็ดดินไม่มีการยุบตัว (Incompressible)
 3. ปริมาตรของดินที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นเนื่องจากการคายน้ำของดินออกมาจากช่องว่าง (Void) ในเม็ดดิน
 4. พฤติกรรมการไหลของน้ำในตัวอย่างดินเป็นไปตามกฎของดาร์ซี (Darcy Law)
 5. พิจารณาการอัดตัวในแนวตั้งที่มีความดันกระทำเพียงทิศทางเดียว(One-Dimensional)
 6. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างดิน(k)มีค่าคงที่ในระหว่างการอัดตัวคายน้ำ
- ผลเฉลยของสมการ 2.1 มีดังต่อไปนี้

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{1}{H} \int_{z=0}^{z=2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(\frac{-c_v t n^2 \pi^2}{4H^2} \right)$$

เมื่อ H = ความหนาของดินตัวอย่าง

2.1.2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินแบบดั้งเดิม (Conventional consolidation test)

วิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน ASTM D-2435 โดยมีขั้นตอนพอสังเขปดังต่อไปนี้

1. นำแหวนที่ใส่ตัวอย่างดินวางลงบน Consolidate Cell โดยมีกระดาษกรองและแผ่น Porous Stones ปิดบนล่าง เอาเซลล์วางบนเครื่องกด ใส่ น้ำในเซลล์ให้ท่วมตัวอย่างดิน จัดเครื่องกดให้อยู่ในลักษณะจะเริ่มกด คือผิวของแกนกดเริ่มสัมผัสเซลล์ จากนั้นก็ปรับหน้าปัดของ Dial Gauge หรือ Displacement Transducers ให้ชี้ที่ศูนย์
2. วัดระยะของ Lever Arms ที่ช่วงใส่น้ำหนักกับช่วงที่จะกดลงบนตัวอย่าง กำหนดอัตราเพิ่มของน้ำหนักที่จะกดบนตัวอย่างดิน ใส่น้ำหนักบนเสาแทรกโดยการเพิ่มน้ำหนักแต่ละครั้งจะเป็นไปตามค่าอัตราส่วนการเพิ่มกدنน้ำหนัก (Load Increment Ratio, LI) ที่คำนวณไว้ จะเข้าน้ำหนักทิ้งไว้จน 24 ชั่วโมง หรือการทรุดตัวถึง 90% ตามแต่กำหนด ก่อนที่จะเพิ่มน้ำหนักใหม่ น้ำหนักที่ใส่จะต้องให้หน่วยน้ำหนักไม่น้อยกว่าที่ตัวอย่างดินจะรับจริงในสนาม
3. อ่านค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดิน ที่เวลา 0.1 , 0.25 , 0.50 , 1 , 1.25 , 2.25 , 4 , 6.25 , 9 , 12.25 , 16 , 25 , 36 , 49 , 64 , 81 , 100 นาที และ 3, 6, 12 , จนถึง 24 ชั่วโมงหรือจนการทรุดตัวถึง 90 % หรือตามที่ออกแบบไว้ แล้วจึงจะเพิ่มน้ำหนักใหม่และจึงเริ่มอ่านค่าที่เวลาต่างๆตามเดิม เพิ่มน้ำหนักและอ่านค่าไปจนเสร็จ

4. ทำการถอดน้ำหนักรอก (Rebound) โดยเว้น 1 ชั้นน้ำหนักรอก ทุกครั้งที่ถอดน้ำหนักรอกเพียงแค่จดค่าบนมาตรหน้าปัด (Dial Gauge) ก่อนจะถอดน้ำหนักรอกชั้นต่อไปเท่านั้น จนกระทั่งถอดน้ำหนักรอกหมด
5. หลังจากเสร็จการทดสอบแล้ว ถอดตัวอย่างออก เหน้าให้แห้ง ถอดกระดาษกรองออก ชั่งน้ำหนักรอกตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างดินเข้าอบแห้งหาความชื้น

2.1.3 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวของดิน

ผลการทดสอบการอัดตัวของดินสามารถนำไปหาพารามิเตอร์สำคัญๆที่ใช้ในการคำนวณการทรุดตัวของดินเหนียวดังต่อไปนี้

a. การหาค่าความดันอัดตัวสูงสุดในอดีตที่ดินเคยรับ (Maximum Past Pressure, σ'_{mp}) Casagrande (1964) ได้เสนอวิธีการหาค่า σ'_{mp} เมื่อเราทำการ Plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) กับค่า Log ของแรงดัน ประสิทธิภาพ (σ') ก็สามารถที่จะหาแรงดันสูงสุดที่เคยรับมาในอดีตได้ ดังภาพที่ 2.2

b. ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการยุบตัว (Coefficient of Compressibility, m_v) เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน สามารถหาได้ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$m_v = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad (2.2)$$

เมื่อ m_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการยุบตัว

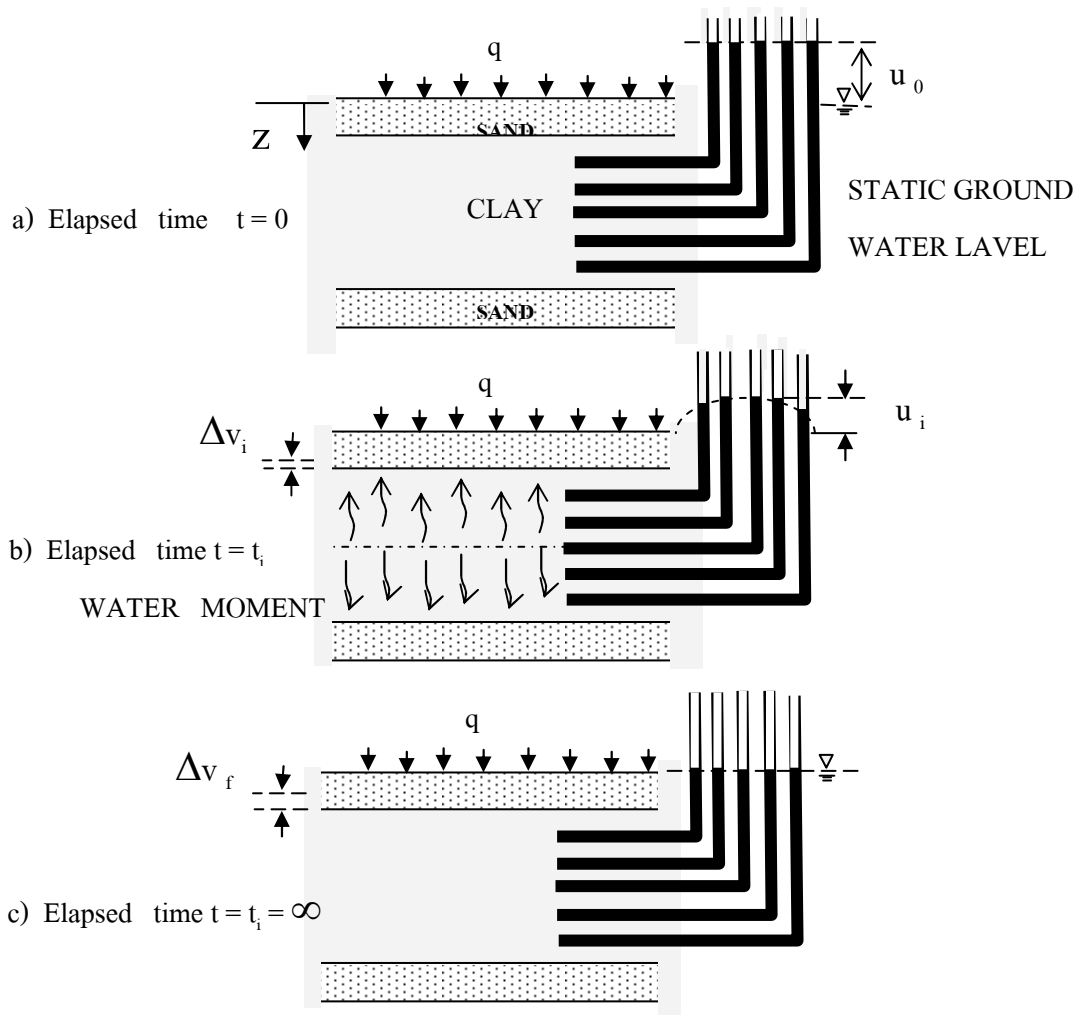
ΔV = ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของดิน

ΔP = หน่วยแรงกดที่เพิ่มขึ้นที่กระทำต่อดิน

c. ดัชนีการอัดตัว (Compression Index, C_c) คือ ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและแรงกดอัดที่กระทำบนดิน (รูปที่ 2.2) ค่าดัชนีการอัดตัวสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.3

$$C_c = \frac{e_0 - e}{\text{Log} \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}} \quad (2.3)$$

เมื่อ C_c = ดัชนีการอัดตัว
 e = อัตราส่วนช่องว่างที่ความดัน σ'
 e_0 = อัตราส่วนช่องว่างที่ความดัน σ'_0

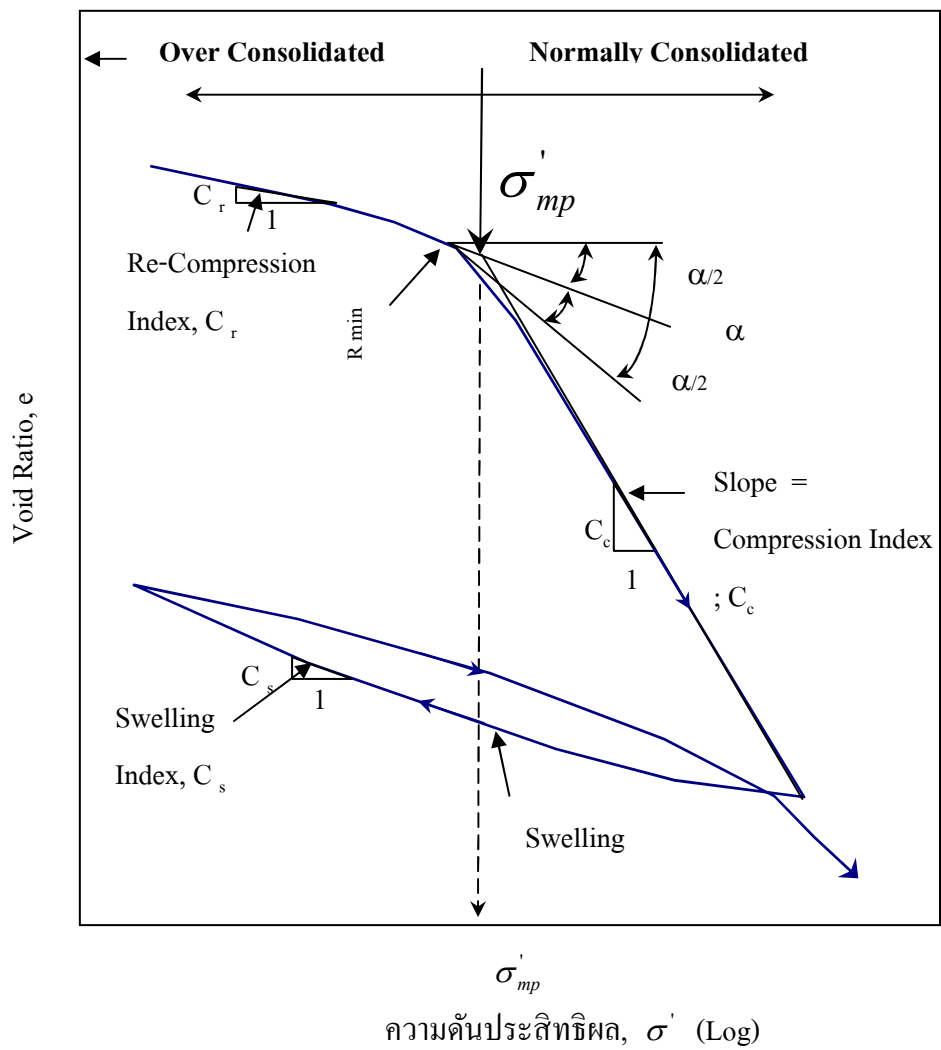


ภาพประกอบที่ 2.1 กระบวนการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว (วารากร ไม้เรียง และคณะ ,2525)

d. ระดับขั้นการยุบตัวของดิน (Degree of Consolidation, U) เป็นการหาค่าเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวทั้งหมดในช่วงเวลา t หาได้จากสมการที่ 2.4

$$U = \frac{S_t}{S_c} \times 100\% \quad (2.4)$$

- เมื่อ U = ดัชนีการอัดตัว
 S_t = การทรุดตัวในช่วงเวลา t
 S_c = การทรุดตัวทั้งหมด



ภาพประกอบที่ 2.2 กราฟการอัดตัวได้ (Compression curve) ของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ

e. **องค์ประกอบของเวลา** (Time Factor, T_v) เป็นค่าที่สามารถหาได้จากระดับขั้นการยุบตัวของดินได้จากสมการที่ 2.5 และ 2.6

เมื่อค่า $U < 60\%$

$$\text{ค่า } T_v = \frac{\pi}{4} U_v^2 \quad (2.5)$$

$U > 60\%$

$$\text{ค่า } T_v = -0.933 \log(1 - U_v) - 0.0851 \quad (2.6)$$

f. **ค่าสัมประสิทธิ์ของการยุบตัวของดิน** (Coefficient of Consolidation, C_v) เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการยุบตัวของดิน (m_v) และค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำในดินสามารถหาได้ 2 วิธีดังนี้

1. **วิธี Semi log Plot** (Casagrande , 1936) สามารถหาค่าค่าสัมประสิทธิ์ของการยุบตัวของดินจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log ของเวลากับค่าการทรุดตัวของดิน หาได้จากสมการ 2.7

$$C_v = \frac{0.197 H_d^2}{t_{50}} \quad (2.7)$$

เมื่อ H_d = ความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างดิน (cm)

t_{50} = ค่าที่ได้จากการใช้วิธี Semi log Plot ของ Casagrande

2. **วิธี \sqrt{t} Plot** (Taylor , 1942) สามารถหาค่าค่าสัมประสิทธิ์ของการยุบตัวของดินจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง \sqrt{t} ของเวลากับค่าการทรุดตัวของดิน หาได้จากสมการ 2.8

$$C_v = \frac{0.848 H_d^2}{t_{90}} \quad (2.8)$$

เมื่อ H_d = ความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างดิน (cm)

t_{90} = ค่าที่ได้จากการใช้วิธี \sqrt{t} Plot ของ Taylor

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบการอัดตัวของดิน

ปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการทดสอบการอัดตัวของดินมีอยู่ด้วยกันดังนี้

1. อัตราส่วนการเพิ่มกคน้ำหนัก (Load Increment Ratio)

อัตราส่วนการกคน้ำหนักมีผลต่อกราฟผลการทดสอบการอัดตัวของดิน เพื่อกำหนดให้เป็นมาตรฐาน นิยมใช้อัตราส่วนเพิ่มกคน้ำหนักมีค่าเป็น 1.0 เช่น น้ำหนักกคก่อนเดิมมีค่า 5 กก. จะต้องเพิ่มกคน้ำหนักขึ้นต่อไปอีกเป็น 1 เท่าตัวคือเพิ่มขึ้น 10 กก. ค่าอัตราส่วนการเพิ่มกคน้ำหนัก (Load Increment Ratio, LI) = $\frac{10-5}{5} = 1.0$ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในบางช่วงของการกคน้ำหนักเพื่อจะให้ค่าในกราฟละเอียดเช่นในส่วนโค้งใกล้ค่าความดันประสิทธิผลเหนือระดับ (Overburden Pressure, σ'_{vo}) ที่จะต้องหาค่าความดันอัดตัวสูงสุดในอดีต (Maximum Past Pressure) ด้วยวิธีของ แคสซาแกรนด์ (Casagrande) อาจใช้อัตราส่วนเพิ่มกคน้ำหนัก (LI) มีค่าเป็น 0.5 ก็ได้

2. ระยะเวลาการกคทดสอบ (Load Duration)

ปกติการกคน้ำหนักระยะเวลา 24 ชั่วโมง (1 วัน) สำหรับตัวอย่างที่หนา 20 มม. ก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดการอัดตัวเสร็จสมบูรณ์ (Complete Consolidation) ดังนั้น การกคน้ำหนักแต่ละขั้นจะทิ้งน้ำหนักไว้ 1 วัน (ในความเป็นจริงเราสามารถลดระยะเวลาลงเหลือเพียง 2-4 ชั่วโมงเท่านั้น, Sridharan 1999) ก่อนที่จะเพิ่มน้ำหนักขึ้นต่อไป

สำหรับการทดสอบพิเศษ เช่นการทดสอบหาสัมประสิทธิ์การอัดตัวรอง (Coefficient of Secondary compression) , c_α อาจจะต้องกคน้ำหนักทิ้งไว้ถึง 7 วัน ขึ้นไป หรือในช่วงกคซ้ำ (Recompression) ในช่วงเริ่มแรกที่ใช้ความดันต่ำ ดินเคยถูกน้ำหนักกคมาก่อนแล้ว (เป็นช่วง OCC) ก็สามารถจะกคน้ำหนักเพียงแค่ขั้นละ 2-3 ชั่วโมง (เขียนกราฟตรวจสอบเปอร์เซ็นต์การทรุดตัววิธี \sqrt{t} ตามไปด้วย) การทรุดตัวก็จะเสร็จสมบูรณ์ ทำให้สามารถย่นระยะเวลาการทดสอบทั้งหมดไปได้ 2-3 วัน เพื่อสะดวกในการถอดกราฟที่ 2 สำหรับพล็อตค่า \sqrt{t} จึงควรอ่านค่าการทรุดตัวตามระยะเวลา 0, ¼, 1, 2¼, 4, 6¼, 9, 12¼, 16, 25, 36, 49, 64, 100 นาที และหลังจากนั้นเพิ่มเวลาอ่านต่อไปประมาณเท่าตัว

2.2 เซนเซอร์ และ Labview

2.2.1 เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์

ความรู้ทางด้าน Sensor นำมาใช้ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพใดๆ เพื่อให้ออกมาเป็นปริมาณทางกายภาพที่สามารถตรวจจับได้ เช่นเราวัดอุณหภูมิของน้ำโดยอาศัยการขยายตัวของปรอท ก็จะทำให้ปรอททำหน้าที่เป็นตัวรับความรู้สึกหรือ Sensor เป็นต้น ส่วน Transducer หมายถึง

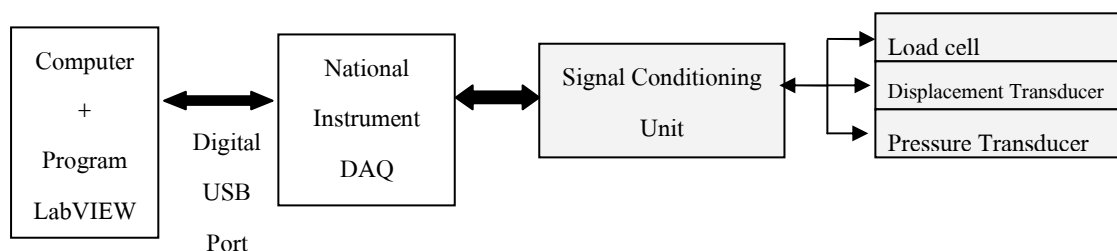
อุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใดๆ ออกมาอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าหรือความต้านทาน สามารถนำมาทำการวัดได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยประมวลผลและจัดวางระบบ DAQ ขึ้นมาเมื่อใด Sensor จะต้องมี Transducer ประกอบอยู่ด้วยเสมอ หรือไม่เช่นนั้น Sensor จะทำหน้าที่เป็น Transducer ไปพร้อมกันเพราะเครื่องวัดเหล่านั้นจะทำให้การเปลี่ยนแปลงในรูปของปริมาณทางไฟฟ้าอยู่แล้ว ทำให้อุปกรณ์การวัดหลายชนิดเป็นทั้ง Sensor และ Transducer ในตัวเดียวกัน การที่ต้องเปลี่ยนปริมาณทางกายภาพใดๆ ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าในระบบการวัดของเรา เนื่องจากว่าเราได้จำกัดระบบการวัดของเราไว้เป็นระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์และเนื่องจากสิ่งที่คอมพิวเตอร์สามารถตรวจจับได้ก็จะเป็นปริมาณทางด้านไฟฟ้าเท่านั้น

Sensor และ Transducer เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้กันในงานทางด้านวิศวกรรมเช่น การวัดแรง วัดอุณหภูมิและอื่นๆ และปรับสภาพสัญญาณที่จำเป็นสำหรับเครื่องมือวัดแต่ละแบบ โดยเริ่มต้นจากการทำความเข้าใจกับการวัดและการปรับสภาพสัญญาณ รู้จักกับอุปกรณ์ในด้านกรวัดแบบต่างๆ และการปรับสภาพสัญญาณที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์แต่ละแบบ ทำความเข้าใจกับ Strain Gage และกฎพื้นฐานที่นำมาใช้เพื่อการวัดดังนี้

2.2.1.1 Measurement System Component

ส่วนประกอบของระบบการวัดและรวบรวมข้อมูลซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ จะประกอบด้วย Sensor/Transducer, Signal Conditioner, Data Acquisition Device และ Computer Software ดังในภาพที่ 2.3

คอมพิวเตอร์ในงานทางด้านวิศวกรรมในช่วงเวลาที่ผ่านมา การวัดและเครื่องมือวัดมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ระบบการวัดในปัจจุบันนี้ ไม่ใช่การวัดเพื่อต้องการทราบค่าเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่เป็นการวัดเพื่อต้องการทราบค่าอย่างละเอียดและนำค่าที่ได้เพื่อไปใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติ ดังนั้นจะกล่าวถึงในระบบการวัดที่ต้องนำข้อมูลส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการประเมินผลและควบคุมอุปกรณ์อื่นๆในระบบ ส่วนประกอบของระบบเครื่องมือวัดในปัจจุบันมีดังนี้



ภาพประกอบที่ 2.3 ระบบรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยคอมพิวเตอร์

a) Sensor/Transducer

Sensor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับหรือรับรู้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพใดๆ เพื่อให้ออกมาเป็นปริมาณทางกายภาพที่สามารถตรวจจับได้ เช่นการวัดอุณหภูมิของน้ำโดยอาศัยการขยายตัวของปรอท ก็จะทำให้ปรอททำหน้าที่เป็นตัวรับความรู้สึกหรือ Sensor เป็นต้น ส่วน Transducer หมายถึงอุปกรณ์ใดๆก็ตามที่เปลี่ยนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใดๆออกมาอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าหรือความต้านทาน

เมื่อทำการวัดโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยประมวลผลและจัดวางระบบ DAQ Sensor จะต้องมี Transducer ประกอบอยู่ด้วยเสมอ หรือไม่ Sensor จะต้องทำหน้าที่เป็น Transducer ไปพร้อมกัน เพราะเครื่องวัดเหล่านั้นจะให้การเปลี่ยนแปลงในรูปของปริมาณทางไฟฟ้าอยู่แล้ว ทำให้อุปกรณ์การวัดหลายชนิดเป็นทั้ง Sensor และ Transducer ในตัวเดียวกัน

การที่ต้องเปลี่ยนปริมาณทางกายภาพใดๆให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าในระบบการวัด เนื่องจากได้จำกัดระบบการวัดไว้เป็นระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์ และเนื่องจากสิ่งที่คอมพิวเตอร์สามารถตรวจจับได้ก็จะเป็นปริมาณทางไฟฟ้าเท่านั้น

สำหรับรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับ Sensor/Transducer ที่มีใช้กันอยู่ในงานวิศวกรรมนี้ ดังอย่างแสดงในตารางที่ 2.1

ตัวอย่างทรานสดิวเซอร์ทำหน้าที่แปลงค่าสัญญาณทางกายภาพของการเคลื่อนไหว ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดและแปลงเป็นสัญญาณ Digital ที่จัดเก็บข้อมูลโดย Computer มีด้วยกัน 3 ชนิดดังต่อไปนี้

1. ทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) (แสดงในภาพที่ 2.4) ตัวทรานสดิวเซอร์ต้องอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจาก Signal Conditioning Unit เป็นตัวขับเคลื่อนการทำงานเพื่อที่จะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ อุปกรณ์ชิ้นนี้ เพื่อใช้วัดค่าการทรุดตัวของดินพร้อมบันทึกค่าเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ในขณะที่ทำการทดสอบการอัดตัวคาน้ำแทนการใช้คนเป็นผู้อ่านและบันทึก

2. อุปกรณ์วัดค่าแรง (Load cell) Load cell (ดังภาพที่ 2.5) เป็นอุปกรณ์ Strain Gauge ชนิดหนึ่งที่ใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวของ Load cell ไม่ว่าจะเป็แรงกดหรือแรงดึงส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็น mV/V โดยที่ Load cell จะมีสายสัญญาณ 4 และ 6 เส้นแล้วแต่ผู้ผลิต และการใช้งาน แบ่งเป็น EX+, EX-, Sig+, Sig-, Sen+ และ Sen- ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนไปมากหรือน้อยตามขนาดแรงกด ทำให้วงจร Bridge ไม่ Balance ทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้า เรานำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปแปลงเป็นค่าน้ำหนัก สัญญาณที่ได้จาก Load cell เป็นสัญญาณไฟฟ้า Analog ค่าที่ได้เป็น Volt แรงดันต่ำมาก (mili volt) ส่งผ่านสายนำสัญญาณเข้าสู่ Indicator ซึ่ง Indicator จะ

แปลง Volt ให้เป็นค่า digital ค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ได้จาก Stain gage อุปกรณ์ชิ้นนี้นำมาใช้วัดค่าแรงกดที่กระทำต่อดินตัวอย่างพร้อมบันทึกค่าได้โดยคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.1 Sensor/Transducer ที่มีใช้กันอยู่ในงานวิศวกรรม (ภุชงค์ สังฆะวงค์ 2551)

ปริมาณทางฟิสิกส์	Sensor/Transducer
อุณหภูมิ	Thermocouple Resistance Temperature Detector Thermistor Integrated Circuit Sensor
แสง	Photomultiplier Tube Photoconductive Cell
แรงและความดัน	Strain Gauge Piezoelectric Transducer Load Cell
เสียง	Microphone
ตำแหน่งหรือการขจัด	Potentiometer Linear Voltage Differential Transformers (LVDT) Optical Encoder
การไหลของของไหล	Differential Pressure Flow meter Rotational Flow meter Ultrasonic Flow meter Laser Dropper Anemometer
pH	pH Electrode

2. อุปกรณ์ควบคุมแรงดันแบบนิวแมติกส์ (Electro-pneumatic Regulator) เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันลม (ดังแสดงในภาพที่ 2.6) รับสัญญาณเป็นระบบ Digital สามารถรับแรงดันสูงสุด 9 ksc. ตัว Electro-pneumatic Regulator นั้นต้องอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจาก Signal Conditioning Unit เป็นตัวขับเคลื่อนการทำงานเพื่อที่จะควบคุมแรงดันให้เป็นไปตามคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ชิ้นนี้ใช้คู่กับปั๊มลมในการเพิ่มแรงดัน



ภาพประกอบที่ 2.4 ทรานสดิวเซอร์วัดค่าการเคลื่อนไหวน (Displacement Transducer)



ภาพประกอบที่ 2.5 อุปกรณ์วัดค่าแรง (Load cell, S beam)



ภาพประกอบที่ 2.6 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันแบบนิวแมติกส์ (Electro-pneumatic Regulator)

b) Signal Conditioning

อุปกรณ์เหล่านี้เมื่อรับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพแล้วจะเปลี่ยนค่าเหล่านั้นออกมาในรูปของ สัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical Signal) และโดยส่วนใหญ่แล้วสัญญาณนั้นจะออกมาอยู่ในรูปของความต่างศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์บางประเภทจะให้ปริมาณที่สามารถตรวจวัดได้ทันที แต่บางอุปกรณ์ประเภทจะไม่ได้ให้สัญญาณในลักษณะที่สามารถวัดค่าได้ด้วยเครื่องมือพื้นฐานทันที หรือในการเดินทางของสัญญาณเหล่านี้เข้าสู่เครื่องมือวัดอาจผ่านสิ่งแวดล้อมที่มีการรบกวนสัญญาณอยู่ทำให้ไม่สามารถที่จะใช้เครื่องมือวัดสัญญาณที่แท้จริงได้ทันที ด้วยสาเหตุดังกล่าวเราจำเป็นต้องมีการปรับสภาพสัญญาณเหล่านั้นก่อน

ดังนั้นในกรณีจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมในการวัด อุปกรณ์นี้เรียกว่า อุปกรณ์ปรับสัญญาณ (Signal Conditioner) ความต้องของอุปกรณ์ชิ้นนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบการวัด ถ้าที่ไม่มีความต้องการความละเอียดสูง หรือสัญญาณที่มีขนาดใหญ่เพียงพอและไม่มีการรบกวนสัญญาณมากนัก อาจไม่ต้องการอุปกรณ์นี้ก็ได้ ซึ่งจะเป็นการลดความยุ่งยาก

สำหรับการวัดสัญญาณที่ต้องการความละเอียดสูง และไม่ต้องการให้มีการรบกวนสัญญาณในการวัด เราอาจใช้อุปกรณ์ราคาสูง เช่น SCXI (Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation) ของบริษัท National Instrument ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีหน้าที่ปรับแต่งสภาพสัญญาณให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้เมื่อส่งเข้าสู่ DAQ

SCXI นี้จะประกอบด้วยตัวเรือนที่ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ และจะมี โมดูลที่เหมาะสมต่อเข้ากับตัวเรือนอีกครั้งหนึ่ง การเลือกโมดูลก็ขึ้นอยู่กับว่าเราจะใช้ Transducer ประเภทใด และต้องการวัดสัญญาณประเภทใด ลักษณะของ SCXI แสดงในรูป 2.7



ภาพประกอบที่ 2.7 อุปกรณ์ SCXI (Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation) ของบริษัท National Instrument

SCXI ที่ประกอบด้วยโมดูลวัด Thermocouple, Strain Gage, RTD, Relay Circuit เป็นต้น สำหรับชนิดของการปรับสัญญาณต่างๆ ไปนั้นจะประกอบด้วย

- การขยายสัญญาณ (Amplification)
- การเพิ่มกำลังให้ Transducer (Transducer excitation)
- การปรับให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)
- การป้องกันสัญญาณ (Isolation)
- การกรองสัญญาณ (Filtering)

การปรับสภาพสัญญาณในบางกรณี จำเป็นต้องพิจารณาความต้องการความแม่นยำของสัญญาณมากน้อยเพียงใด เพราะในงานวิศวกรรมบางประเภท อาจไม่มีความต้องการสัญญาณที่แท้จริงและถูกต้อง 100% หากลดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าครึ่งหนึ่งแล้ววัดสัญญาณได้ถูกต้อง 95% ดังนั้นจำเป็นต้องทราบว่าข้อมูลที่วัดนั้นมีความต้องการเพื่อไปใช้ในงานด้านใด และมีความต้องการความแม่นยำมากน้อยเพียงใด

สำหรับในหัวข้อต่อไปนี้จะเป็นการนำเสนอ Sensor แบบต่างๆ รวมถึงการปรับสภาพสัญญาณที่ได้จาก Sensor/Transducer แบบนั้นๆ ด้วย

2.2.1.2 Strain Gauge

Sensor/Transducer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเครียด หรือ Strain Gage ซึ่ง Strain Gage นี้เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและใช้เป็นเครื่องมือวัดหลายๆ แบบ เริ่มจากการทำความเข้าใจเรื่องของความเครียด

ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain, ϵ) สำหรับวัสดุที่อยู่ภายใต้ภาระแบบธรรมดา นิยามว่าเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุต่อหน่วยความยาวเดิม ดังนั้นในบางกรณีได้ยืนยันว่ามีผู้เรียกว่า unit strain สำหรับความเครียดตามแนวแกน ϵ_α สามารถเขียนเป็นสมการที่ 2.9 ได้อยู่ในรูป

$$\epsilon_\alpha = \frac{dL}{L} \approx \frac{L_2 - L_1}{L_1} = \frac{\Delta L}{L_1} \quad (2.9)$$

- เมื่อ
- ϵ_α = axial strain
 - L_1 = linear dimension
 - L_2 = final linear dimension

จากสมการ (2.8) จะเห็นว่าค่าความเครียดนั้นจะเป็นปริมาณที่ไม่มีมิติ แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับทางวิศวกรรมนั้น ส่วนใหญ่จะให้ความสนใจกับวัสดุที่มีการยืดตัวไม่มากหรืออยู่ในช่วง Elastic Limit ซึ่งก็จะทำให้ค่าความเครียดเป็นตัวเลขที่มีค่าน้อยมาก ดังนั้นในบางกรณีนิยมที่จะคูณค่าตัวเลขที่ได้ นั้นด้วย 10^6 แล้วเรียกค่าที่ได้ว่าเป็น micro-strain (μ -strain, $\mu\epsilon$ หรืออาจเขียน μ -m/m)

ดังนั้นเมื่อทราบค่าความเครียดก็จะสามารถหาค่าความเค้นได้ ทำให้ Strain Gage เป็น อุปกรณ์ที่สำคัญมากแบบหนึ่งในทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการวัดและเครื่องมือวัดซึ่ง สามารถนำไปประยุกต์ต่อการวัดการเคลื่อนที่, ความดัน, แรง, โมเมนต์ ฯลฯ.

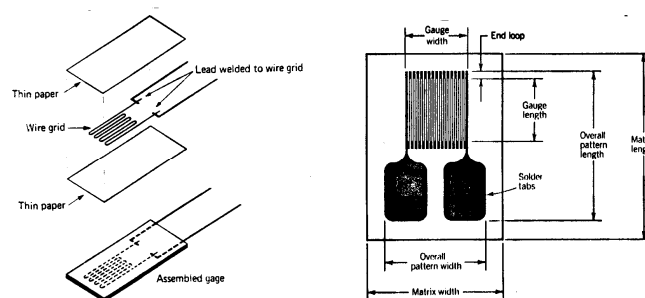
a) การวัดความเครียด

การวัดความเครียดนั้นวัดได้ทั้งแบบโดยตรงและทางอ้อม การวัดโดยตรงก็คือค่าที่ อ่านได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเลย สำหรับ Strain Gage นั้นเป็นการวัด ความเครียดโดยตรงนั้นคือค่าที่อ่านได้จาก Strain Gage จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดที่เกิดขึ้น โดยระยะยืดที่วัดได้สามารถนำไปหาค่าความเครียด

อุปกรณ์วัดความเครียดโดยตรงนั้นมีหลายแบบ เช่นแบบที่ใช้หลักการทางไฟฟ้า ซึ่ง โดยปกติจะใช้หลักการของ Resistive, Capacitance, Inductive หรือ Photoelectric สำหรับ Strain Gage ที่ นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางและอาจกล่าวได้ว่ากว้างขวางที่สุดจะเป็นแบบ Resistive คือวัดการเปลี่ยนแปลง ของความต้านทานไฟฟ้า ส่วนอุปกรณ์วัดความเครียดแบบอื่นๆนั้นก็ใช้หลักการของ Optical เช่น photoelasticity, Moire technique, และ holographic interferometry เป็นต้น

b) Electrical Resistance Strain Gage

ความต้านทานไฟฟ้าของลวดทองแดง และลวดเหล็กนั้น จะเปลี่ยนแปลงเมื่อตกอยู่ภายใต้ ความเครียด โดยใช้ Wheatstone Bridge Circuit และ Galvanometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อ เทคโนโลยีของวัสดุพัฒนาขึ้น Strain Gage ก็ได้รับการพัฒนาเรื่อยมา รูปที่ 2.8 แสดงถึงส่วนประกอบ Strain Gage ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน



ภาพประกอบที่ 2.8 ส่วนประกอบ Strain Gage ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

c) Resistance Strain Gage ที่เป็น โลหะ

ทฤษฎีและหลักการของ Resistance Strain Gage เริ่มจากหลักการที่เมื่อลวดนั้นถูกดึง จะทำให้ความยาวเพิ่มขึ้นและพื้นที่หน้าตัดลดลง ยังผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป ถ้าลวดนั้น อยู่ติดกับชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานเปลี่ยนขนาดไปลวดก็จะเปลี่ยนแปลงขนาดตามไปด้วย ดังนั้นการวัดการ เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของเส้นลวดก็จะเป็นสัดส่วนกับความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน

ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลของวัสดุนั้น สามารถหา ได้ดังต่อไปนี้ สมมุติว่าลวดตัวนำมีความยาวเริ่มต้น L พื้นที่หน้าตัด CD^2 (เส้นลวดไม่จำเป็นต้องมีหน้าตัด เป็นวงกลม โดย D จะเป็นมิติความยาวของหน้าตัด และ C เป็นค่าคงที่ ในกรณีของวงกลม D จะเป็นเส้น ผ่านศูนย์กลางและ $C = \pi/4$ ส่วนในกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส D เป็นด้านด้านหนึ่ง และ $C = 1$ เป็นต้น) เมื่อลวด ตัวนำอยู่ภายใต้แรงดึง ความยาวจะเพิ่มขึ้น ส่วนพื้นที่หน้าตัดจะลดลงตาม Poisson's ratio

จากหลักการไฟฟ้าเบื้องต้น

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{CD^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω) และ ρ คือ Resistivity ของวัสดุ ($\Omega \text{ m}$) เมื่อเส้นลวด ยึดตัวออกนั้น

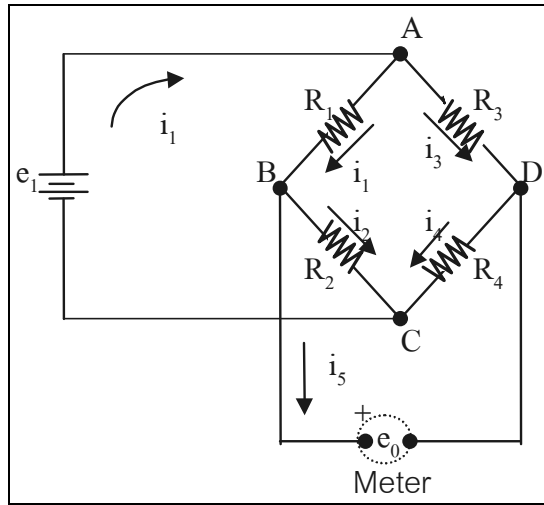
d) วงจรไฟฟ้าเพื่อใช้ปรับสภาพสัญญาณที่ใช้กับ Strain Gage

วงจรไฟฟ้าที่จะใช้กับ Strain Gage นั้นจะต้องเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีความไวสูงมาก เพราะ Strain Gage เองมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างต่ำ สำหรับวงจรไฟฟ้าที่ใช้สำหรับ Strain Gage มีด้วยกันหลายวงจร ยกตัวอย่างเช่นวงจร Wheatston Bridge แบบความต่างศักย์คงที่เท่านั้น เพราะจัดว่าเป็นวงจรที่นิยมใช้กับ Strain Gage มากที่สุด

1. The Wheatston bridge Circuit

สำหรับวงจรไฟฟ้ามาตรฐานนี้ท่านคงจะได้เรียนมาในวิชาวงจรไฟฟ้าเบื้องต้นแล้ว จากรูปที่ 2.9 ถ้าว่าวงจรไฟฟ้านี้สมดุลนั้นคือ ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมิเตอร์ หรือ $i_g = 0$ สำหรับกรณีนี้ จะได้ $i_1 = i_2$ และ $i_3 = i_4$ แต่ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมิเตอร์ก็จะต้องเป็นศูนย์เช่นกันดังนั้น $i_1 R_1 = i_3 R_3$ และ $i_2 R_2 = i_4 R_4$ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้ว่า

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{หรือ} \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (2.11)$$



ภาพประกอบที่ 2.9 ส่วนประกอบ The Wheatston bridge Circuit

2.3 LabVIEW®

LabVIEW® เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกสร้างเพื่อนำมาใช้ในงานด้านการวัดและเครื่องมือวัด สำหรับงานทางวิศวกรรม LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench หมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม จุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรม คือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ และภายในของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ใช้ช่วยในการวัดมากมาย โปรแกรมนี้มีประโยชน์อย่างมากเมื่อนำมาใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่างๆ

LabVIEW แตกต่างจากโปรแกรมอื่นอย่างเห็นได้ชัดที่สุดคือ LabVIEW เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) โดยสมบูรณ์ ไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใดๆ ทั้งสิ้น ที่สำคัญภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้อาจเรียกว่าเป็น ภาษารูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่าภาษา G (Graphical Language) ซึ่งจะแทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดแบบภาษาพื้นฐาน เช่น C, BASIC หรือ FORTRAN ด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด LabVIEW มีความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนโปรแกรมลงได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อใช้ในการวัดและการควบคุม

LabVIEW บรรจุโปรแกรมจำนวนมาก หรือ Libraries ไว้ไม่ว่าอุปกรณ์การเชื่อมต่อจะเป็น DAQ (Data Acquisition), GPIB (General Purpose Interface Bus หรือ Hewlett Packard Interface Bus, HP-IB), พอร์ตอนุกรม หรือ Serial Port เพื่อใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ส่งผ่านข้อมูลแบบอนุกรม (Serial Instrument) รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ด้วยวิธีการต่างๆ นอกจากนี้ใน Libraries เหล่านี้ยังบรรจุฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญอีกหลายประการเช่น signal generation, signal processing, filters, สถิติ, พีชคณิต และ

คณิตศาสตร์อื่นๆ ดังนั้น LabVIEW จึงทำให้การวัดและการใช้เครื่องมือวัดกลายเป็นเรื่องง่ายและทำให้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเป็นเครื่องมือทางด้านกรวัดหลายชนิดอยู่ในเครื่องเดียว

การควบคุมอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันนั้นจะใช้ LabVIEW เป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องมือทั้งหมด LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อสร้างโปรแกรมสำหรับการเก็บข้อมูล, การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดต่าง ๆ และการควบคุมระบบต่างเพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถนำมาสร้างโปรแกรมสำหรับงานประยุกต์ต่าง ๆ เช่น loops, case statements, arrays, string, file I/O, data acquisition, instrument control, analysis tools เป็นต้น โปรแกรม LabVIEW โดยปกติจะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Front Panel (ภาพประกอบที่ 2.10 (a)) และ Block Diagram (ภาพประกอบที่ 2.10 (b))



(a)

(b)

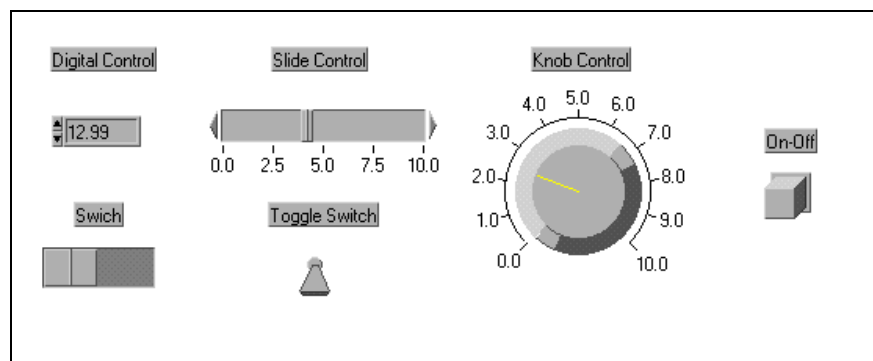
ภาพประกอบที่ 2.10 Front Panel (ก) และ Block Diagram (ข) รวมทั้ง Tools, Functions และ Controls ต่าง ๆ ในโปรแกรม LabVIEW

2.3.1 Front Panel

Front Panel เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานใช้สำหรับใส่ค่า (input) และแสดงผล (output) ของตัวโปรแกรมที่สร้างขึ้นมา โดย input เรียกว่า "control" และ ส่วน output เรียกว่า "indicator" ตัว control และ indicator ที่ถูกนำมาใช้ใน Front Panel มีจุดต่อเชื่อมปรากฏอยู่ที่ Block Diagram ด้วย เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงานตัว control ที่ Front Panel จะทำการส่งข้อมูลผ่านไปยัง Block Diagram และตัว output ก็จะส่งค่าจาก Block Diagram กลับมาแสดงผลที่ Front Panel ผ่านตัว indicator ที่กำหนดไว้ข้อมูลที่ใส่ในตัว control และ indicator มีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น ตัวเลข (Numeric), เงื่อนไข (Booleans) และ ตัวอักษร (Strings) Front Panel ของ LabVIEW จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2

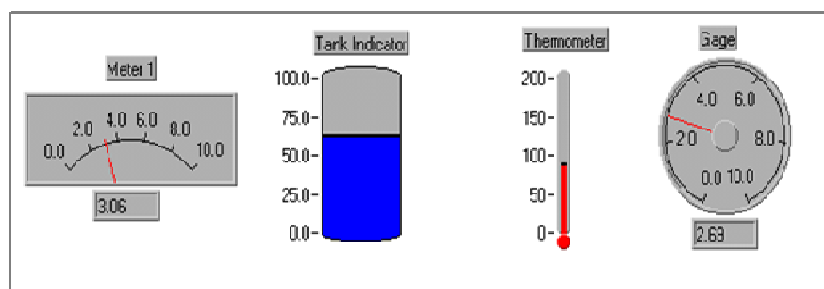
แบบ คือ ตัวควบคุม (Controlled) และ ตัวแสดงผล (Indicator) ซึ่งส่วนประกอบทั้ง 2 จะมีการทำงานต่างกันและหน้าที่ตรงกันข้ามกัน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. **Controls** มีหน้าที่เป็นตัวควบคุมคือ ให้ค่าหรือ Input จากผู้ใช้ ลักษณะของ Controls เช่น ปุ่มปรับค่า, สะพานปิด – เปิดไฟ, แท่งเลื่อนเพื่อปรับค่า, การให้ค่าด้วยตัวเลข Digital หรืออื่นๆ ดังนั้นจากหลักการของ Controls หมายความว่า เป็นการกำหนดค่าหรือแหล่ง (source) ของข้อมูล โดยปกติจะไม่สามารถนำข้อมูลมาแสดงผลที่ Controls ได้ และถ้าหากพยายามที่จะให้ Control แสดงผลข้อมูลก็จะเกิดความผิดพลาดขึ้นใน VI ทั้งนี้ ตัวอย่างของ Object ที่ปกติแล้วจะทำหน้าที่เป็น Controls บน Front Panel บางประเภท จะแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพประกอบที่ 2.11 สัญลักษณ์คำสั่ง Control ในโปรแกรม LabVIEW

2. **Indicators** มีหน้าที่เป็นตัวแสดงผลเพียงอย่างเดียว โดยจะรับค่าที่ได้จากแหล่งข้อมูลมาแสดงผลซึ่งอาจปรากฏในรูปของกราฟ, เข็มชี้, ระดับของเหลว หรืออื่นๆ Indicator นี้เปรียบเสมือน output เพื่อให้ผู้ใช้ได้ทราบค่าสิ่งที่กำลังวิเคราะห์หรืออยู่ และผู้ใช้ไม่สามารถปรับค่าบน indicator ได้โดยตรงแต่จะต้องมีแหล่งข้อมูลที่ส่งให้กับ Indicators ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2.12



ภาพประกอบที่ 2.12 สัญลักษณ์คำสั่ง Indicators ในโปรแกรม LabVIEW

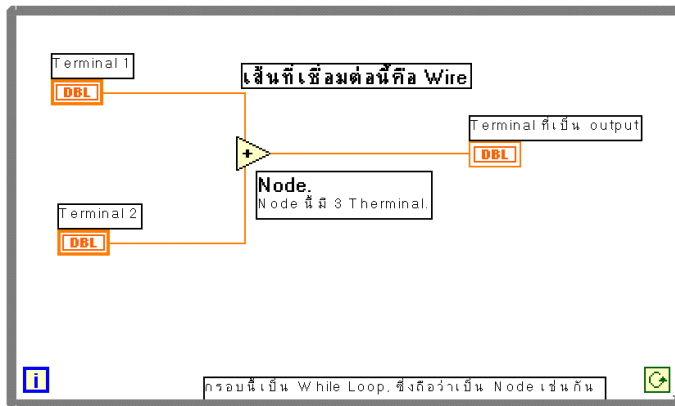
2.3.2 Block Diagram

Block Diagram เป็นส่วนที่เก็บ "Source Code" ของโปรแกรม LabVIEW ซึ่งตัวโปรแกรมใน LabVIEW จะเรียกว่า "VI" ตัว Code ในโปรแกรม LabVIEW เป็นกราฟิกที่เรียกกันว่า G(Graphical) programming หลักการของโปรแกรมจะเชื่อมต่อตัวจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ เข้าด้วยกันแทนที่จะเขียนโดยใช้คำสั่งต่าง ๆ ดังที่ใช้ทั่วไปในโปรแกรมอื่น ๆ เช่น C/C++, Visual C++ ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่า LabVIEW ใช้หลักการเดียวกันกับการเขียน flow chart

Block Diagram จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ Terminal, Node, Wire, Icon และ Connector มีหน้าที่หลักคือการควบคุมการส่งผ่านหรืออาจเรียกว่า การไหลของข้อมูล (Data Flow) และกำหนดถึงวิธีการประมวลผลข้อมูล

a) **Terminal** ทุกครั้งที่สร้าง Control หรือ Indicator บน Front Panel ใน Window ของ Block Diagram จะปรากฏ Terminal ขึ้น Terminal ก็คล้ายกับสถานีของข้อมูลก็จะเป็นทั้งสถานีต้นทางของข้อมูล ถ้า Terminal นั้นเป็น Terminal ของ Controls และขณะเดียวกันจะเป็นทั้งสถานีปลายทางของข้อมูลถ้า Terminal นั้นเป็น Terminal ของ Indicator ข้อที่ควรเข้าใจอย่างหนึ่งก็คือ Object นี้เกิดขึ้นจากการเขียนขึ้นบน Front Panel ดังนั้นจะไม่สามารถลบ Terminal ออกจาก Block Diagram ได้ และถ้าหากจะลบ Control หรือ Indicator นั้นออกไปจาก Front Panel แล้ว Terminal เหล่านี้ก็จะหายไปจาก Block Diagram เช่นกัน

b). **Node** เป็นคำที่ใช้เรียก object ที่กรรมวิธีใดๆ เพื่อประมวลผลข้อมูลใน Block Diagram เช่นเดียวกับที่เขียน Flow Chart แล้วใช้สัญลักษณ์ต่างๆแทนวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล เมื่อมีข้อมูลเข้าสู่ node สิ่งที่เกิดขึ้นภายใน node ก็จะขึ้นอยู่กับว่าจะกำหนดให้ข้อมูลที่ส่งเข้าไปนั้น จะมีการประมวลผลอย่างไร ซึ่งอาจจะเป็นการบวก ลบ คูณ หาร หาค่าเฉลี่ย หรือเป็นประเภทการเปรียบเทียบข้อมูล ว่ามากหรือน้อยกว่า หรืออื่นๆ ซึ่งจะเป็นการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ทั่วไป นอกเหนือจากนั้น node นี้จะมีส่วนที่เรียกว่า Function แบบต่างๆ ซึ่งจะเหมือนกับ Function สำเร็จรูปเช่น sine, cosine, log เป็นต้น ซึ่งก็จะเหมือนกับในภาษาที่เป็นตัวอักษรต่างๆไป ภาพที่ 2.13 แสดงถึงลักษณะของ Node และ Terminal ที่บรรจุอยู่ภายใน Block Diagram ของ LabVIEW



ภาพประกอบที่ 2.13 ลักษณะของ Node และ Terminal ที่บรรจุอยู่ภายใน Block Diagram ใน โปรแกรม LabVIEW

c). **Wires** เมื่อมีที่มาของข้อมูล ส่วนประมวลหรือปรับแต่งข้อมูล และส่วนแสดงผล ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะต้องสามารถควบคุมการส่งผ่านข้อมูลให้เป็นไปตามที่ต้องการ อุปกรณ์ที่ใช้ใน LabVIEW คือ การต่อสาย หรือ Wires ซึ่งจะเป็นการเชื่อมการส่งข้อมูลเส้นทางของข้อมูลว่าเมื่อออกจาก terminal หนึ่งแล้ว จะกำหนดการไหลไปที่ node ใดบ้าง มีลำดับเป็นอย่างไร และสุดท้ายจะให้แสดงผลที่ terminal ใด ซึ่งการเชื่อมต่อสายนี้จะทำให้เข้าใจถึงหลักการของ Data Flow Programming ได้ดีขึ้น


เนื่องจากข้อมูลนั้นมีหลายแบบไม่ว่าจะเป็นเลขทศนิยม, เลขจำนวนจริง, ตัวอักษร หรือค่าจริง-เท็จ (Boolean) ดังนั้นเพื่อแสดงถึงความแตกต่างของข้อมูลแต่ละแบบ LabVIEW จึงได้กำหนดให้ลักษณะของ wires สำหรับข้อมูลแต่ละแบบมีลักษณะของเส้นและสีที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ข้อมูลแต่ละแบบดังกล่าวยังมีลักษณะเป็น scalars, 1-D array, 2-D array ได้ซึ่งลักษณะของเส้นของข้อมูลแต่ละแบบก็จะแตกต่างออกไปอีก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของเส้น wire เมื่อใช้เชื่อมต่อระหว่างข้อมูลแต่ละชนิด

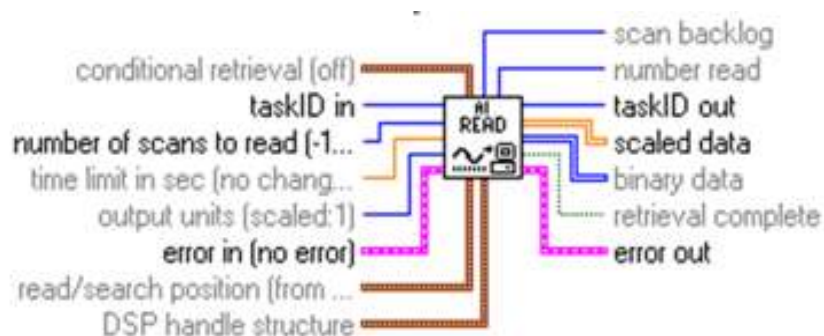
	Scalars	1-D Array	2-D Array	สี
เลขทศนิยม				ส้ม
เลขจำนวนเต็ม				น้ำเงิน
Boolean				เขียว
ตัวอักษร				ชมพู

โดยปกติการต่อข้อมูลระหว่าง Node หรือ Terminal จะกำหนดแน่นอนว่าต้องการข้อมูลลักษณะใด เช่นถ้า Node ต้องการตัวเลขจำเป็นต่อสายตัวเลขเข้ากับ Node นั้น ถ้าหากต่อสายจากตัวอักษรเข้าใน terminal ที่ต้องการตัวเลข สายต่อนั้นจะกลายเป็นสายต่อเสีย หรือ Bad Wire และโปรแกรมก็จะไม่สามารถทำงานต่อไปได้

d) **Icon และ Connector** การเขียนโปรแกรมเป็นตัวอักษร คือเขียนโปรแกรมย่อยขึ้นมาเพื่อใช้ร่วมกับโปรแกรมหลัก โดยการเขียนโปรแกรมย่อยหรือ Subroutine นี้มีประโยชน์มากในกรณีที่จะต้องทำการประมวลผลบ่อย ในภาษารูปภาพก็เช่นกันสามารถที่จะสร้าง Subroutine ขึ้นมาได้ ซึ่งเรียกว่า subVI โดย สำหรับข้อดีของการเขียนด้วยภาษารูปภาพนี้ก็คือ ทุก VI ที่เขียนขึ้นมาสามารถทำหน้าที่เป็น subVI ได้ แต่เนื่องจากจำเป็นจะต้องกำหนดลักษณะของ subVI ให้เป็นรูปภาพ และมีช่องที่จะต้องส่งเข้าสู่ subVI นั้นจึงได้กำหนด Icon และ Connector ขึ้น

เมื่อทำการเปิดโปรแกรม LabVIEW ใหม่ขึ้นมาจะสามารถสังเกตเห็นรูปของ Icon  ที่ LabVIEW กำหนดขึ้นมาได้ โดยรูปของ icon จะปรากฏอยู่ที่มุมบนด้านซ้ายได้ Title Bar ของทั้งหน้าต่าง Block Diagram และ Front Panel

เมื่อนำ VI นี้ ไปใช้เพื่อเป็น subVI สามารถที่จะกำหนดให้มี Input และ Output ที่จะเข้าและออกจาก VI ได้ ซึ่งการเข้าและออกของข้อมูลสู่ subVI นั้นจะผ่านทาง Connector ซึ่งหากจะเปรียบเทียบกับภาษาตัวอักษรที่เราคุ้นเคยแล้ว การใช้ Connector ก็เหมือนกับการใช้คำสั่ง parameter ในภาษา C หรือการใช้คำสั่ง Function ในภาษา FORTRAN นั่นคือการกำหนดว่าข้อมูลใดเป็นข้อมูลที่ส่งไปสู่ Subroutine และข้อมูลใดเป็นข้อมูลที่จะรับกลับออกมาจาก Subroutine ทำนองเดียวกันกับใน LabVIEW ก็คือจะส่งข้อมูลเข้าสู่ Icon หรือ subVI โดยผ่านทาง Input connector เมื่อข้อมูลได้รับการประมวลใน subVI แล้วก็ส่งกลับมาจาก Output Connector Terminal ภาพที่ 2.14 แสดง Icon และ Connector ของ VI หนึ่งซึ่งเป็นส่วนที่มาพร้อมกับ LabVIEW ส่วนที่เป็นรูปตรงกลางเรียกว่า Icon และส่วนที่เป็นสายต่อต่างๆ เรียกว่า Connector



ภาพประกอบที่ 2.14 Icon และ Connector ของ VI ในโปรแกรม LabVIEW

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบการอัดตัวของดินโดยวิธีของ ASTM D2435 นั้นใช้เวลาในการทดสอบนานนับสัปดาห์ จึงมีงานวิจัยที่ออกมาช่วยหาวิธีการลดระยะเวลาในการทดสอบไม่ว่าจะเป็นทั้งทางด้านการพัฒนาวิธีการใหม่ๆหรือผลิตอุปกรณ์สำหรับการทดสอบอัตโนมัติออกมามีรายละเอียดต่อไปนี้

A.Sridharan (1999) เสนอการประยุกต์ใช้ทฤษฎีสำหรับการลดระยะเวลาในการทดสอบการอัดตัวของดิน เรียกว่า Rectangular hyperbola (RH) method โดยอาศัยจากการสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอัดตัวเฉลี่ย (U) และ แฟกเตอร์ของเวลา (Time factor, T_v) จะพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบไฮเพอร์โบลา จากนั้นทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T_v/U และ T_v จะปรากฏเส้นโค้งในช่วงที่ $U < 60\%$ และเส้นตรงในช่วงที่ $60\% \leq U \leq 90\%$ ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง T_v/U และ T_v สามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\frac{T_v}{U} = \alpha T_v + C \quad (2.12)$$

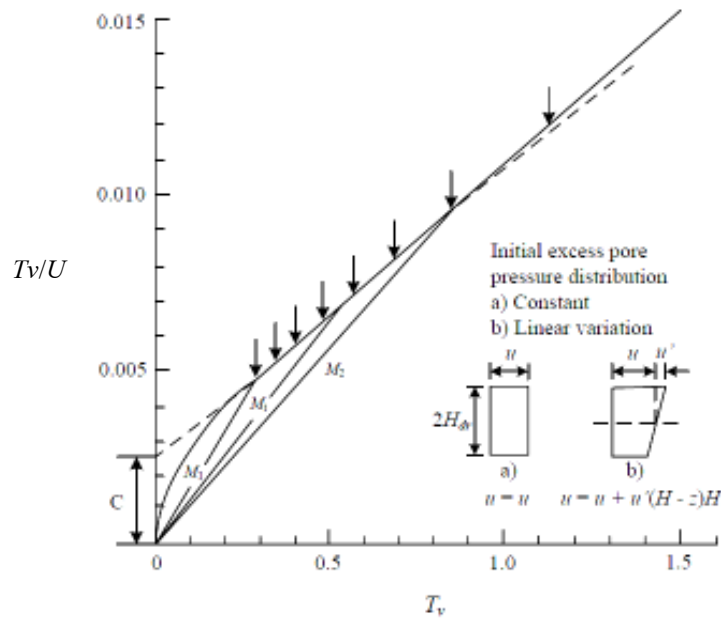
เมื่อ α มีค่าเท่ากับ 8.208×10^{-3} และ C มีค่าเท่ากับ 2.44×10^{-3}

ในทำนองเดียวกันถ้าทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/d (เมื่อ t คือเวลาที่ใช้ในการอัดตัวคายน้ำ และ d คือค่าการทรุดตัวของดิน) เราจะได้ความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในช่วงที่ $60\% \leq U \leq 90\%$ ได้เสนอสมการเชิงประสกรณ์สำหรับประมาณค่า C_v ดังนี้

$$C_v = 0.24x \left[\frac{H^2 dr \cdot m}{D} \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ m เท่ากับค่าความชันของเส้นกราฟ

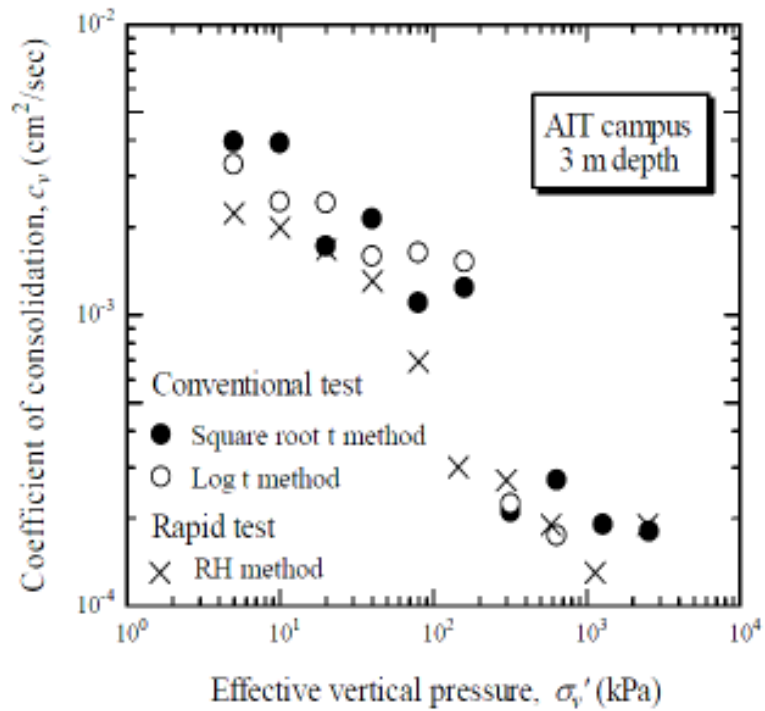
D เท่ากับค่าของระยะตัดแกน Y



ภาพประกอบที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_v/U และ T_v ของ Terzaghi

สุภสันต์ หอพิบูลสุข (2548) ได้ทำการศึกษาการทดสอบอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็วของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยวิธีการวางน้ำหนักบรรทุกถัดไปทันทีที่ระดับการอัดตัวคายน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 60 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้จากการจะประมาณค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจากวิธีไฮเปอร์บอลิกของ Sridharan et al. (1991) นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความเค้นประสิทธิผลที่เวลาใดๆ โดยอาศัยทฤษฎีของ Terzaghi ดินตัวอย่างถูกใช้ในการทดสอบเพื่อพิสูจน์เป็น ดินเหนียวกรุงเทพฯไร้พันธะเชื่อมประสาน (Uncommented Bangkok clay) และดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Cemented Bangkok clay)

ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากราฟการอัดตัวคายน้ำและพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมและอย่างรวดเร็วมีค่าใกล้เคียงกันมาก (ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.16) ในทางปฏิบัติ วิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็วสามารถถูกนำมาใช้ ซึ่งสามารถช่วยประหยัดเวลาในการทดสอบอย่างมากสามารถใช้แทนการทดสอบแบบดั้งเดิม ซึ่งกินเวลาในการทดสอบประมาณ 1-2 สัปดาห์ วิธีการทดสอบนี้เริ่มจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (C_v) โดยวิธีไฮเปอร์บอลิกซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาค่าระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยและความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลในที่สุด โดยอาศัยวิธีการนี้ เราสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำ (C_c) รวมทั้งสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิมมาก ในเวลาอันสั้น



ภาพประกอบที่ 2.16 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ (C_v , σ'_v) ของดินเหนียววงสภาพที่ระดับความลึก 3 เมตร จากการทดสอบแบบดั้งเดิมและอย่างรวดเร็ว

Asaoka (1978) เสนอทฤษฎีสำหรับทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุดสำหรับกระบวนการอัดตัวคายน้ำที่สมบูรณ์ โดยอาศัยการวัดการทรุดตัวของดินในภาคสนาม (S) เทียบกับเวลา Asaoka method เริ่มจากการ Plot ค่าการทรุดตัว ครั้งที่ n (S_n) กับค่าการทรุดตัวครั้งก่อนหน้า (S_{n-1}) ดังภาพที่ 2.23 จากกราฟที่ได้จะมีค่าความชันของกราฟ (β_1) และค่าจุดตัดแกน y (β_0) จะพบความสัมพันธ์ของเส้นกราฟดังสมการนี้

$$S_n = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{n-1} \quad (2.14)$$

- เมื่อ
- S_i = ค่าการทรุดตัวในการวัดครั้งที่ i ในการวัดทั้งหมด n ครั้ง
 - β_0 = จุดตัดแกน Y ของสมการเส้นตรง
 - β_1 = ค่าความชันของสมการเส้นตรง

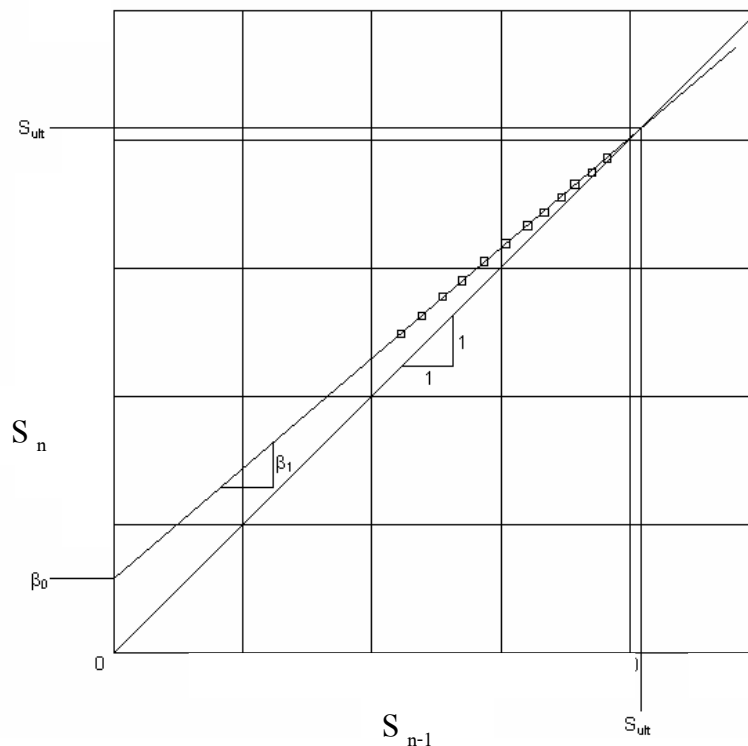
จากนั้นทำการลากเส้นตรง 45 องศาบนกราฟจะเกิดจุดตัดของเส้นกราฟการทรุดตัวและเส้นตรง 45 องศา ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{ult}) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ $S_n = S_{n-1}$ ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2.17 จุดที่มีค่าการทรุดตัวสูงสุดดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้จากสมการ ดังนี้

$$S_{ult} = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (2.15)$$

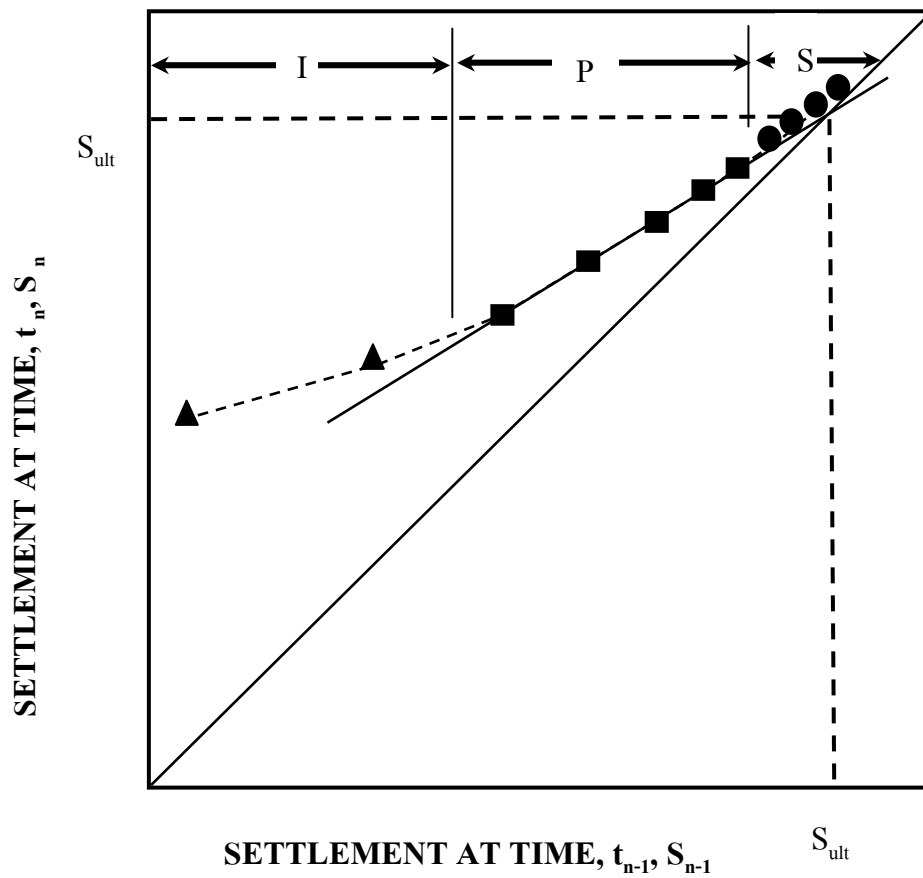
เมื่อ S_{ult} = ค่าการทรุดตัวสูงสุด

การนำเสนอของ Asaoka ในการทดสอบการอัดตัวคาน้ำ ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าค่าน้ำหนักกดคงที่และดินเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด แต่ถ้าตัวอย่างดินที่นำมาใช้ไม่เป็นไปตามสมมติฐานข้างต้นลักษณะของกราฟทางด้านหัวและท้ายที่ได้จะมีลักษณะโค้งขึ้นเหมือนดังภาพที่ 2.18

N.C.State University (2006) เสนออุปกรณ์ทดสอบการอัดตัวคาน้ำของดินแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 2.19 โดยการนำอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องทดสอบให้อยู่ในรูปแบบอัตโนมัติ หลักการทำงานของเครื่องทดสอบอาศัยการสั่งการจากคอมพิวเตอร์ให้ Pressure Regulator เพิ่มแรงเพื่อยกดินตัวอย่างค้ำขึ้นพร้อมทั้งใช้เซนเซอร์ในการตรวจสอบพร้อมบันทึกค่าการทรุดตัวส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลต่อไปดังแสดงในภาพที่ 2.20 ควบคุมกระบวนการในการทดสอบทั้งหมดผ่านโปรแกรม LabVIEW ดังแสดงในภาพที่ 2.21

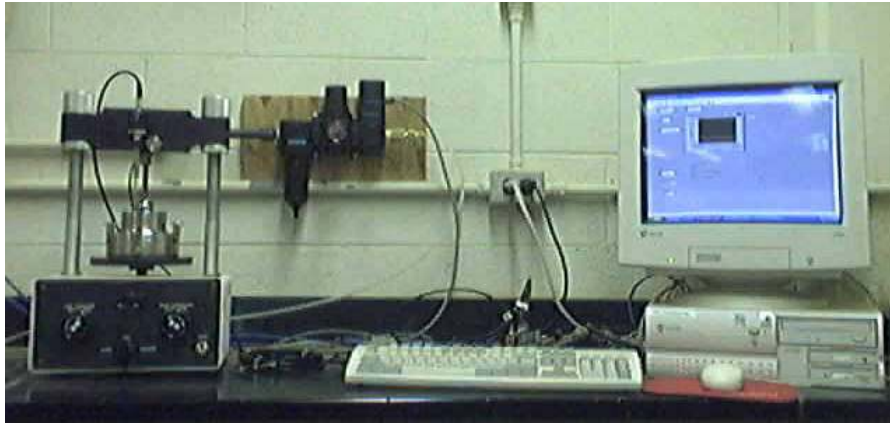


ภาพประกอบที่ 2.17 กราฟของทฤษฎี Asaoka Method ของการทรุดตัวในแนวตั้ง (Asaoka, 1978)

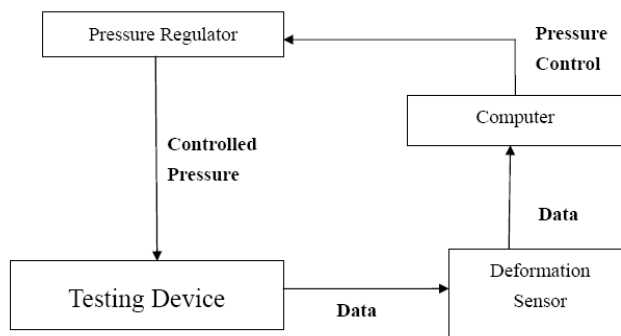


ZONE	SYMBOL	STATE
I	▲	INITIAL STAGE OF CONSOLIDATION
P	■	PRIMARY CONSOLIDATION WITH CONSTANT
S	●	SECONDARY COMPRESSION

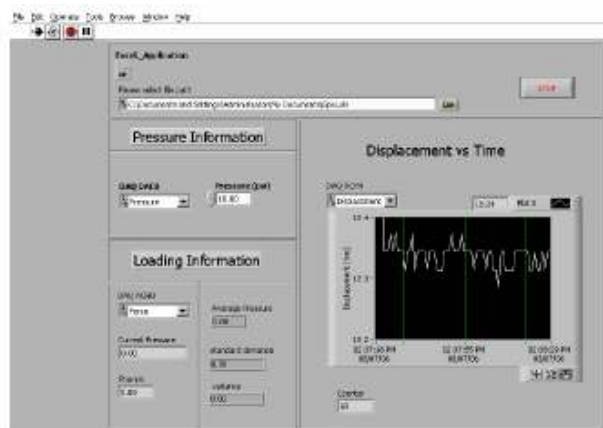
ภาพประกอบที่ 2.18 กราฟประกอบทฤษฎี Asaoka Method ของการทรุดตัวในแนวตั้ง กรณีดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันและน้ำหนักกดไม่คงที่ (Holtz et al. 1991)



ภาพประกอบที่ 2.19 เครื่องทดสอบการอัดตัวคายน้แบบอัตโนมัติ



ภาพประกอบที่ 2.20 ฟังก์ชันการทำงานของเครื่องทดสอบการอัดตัวคายน้แบบอัตโนมัติ



ภาพประกอบที่ 2.21 โปรแกรมใช้ในการควบคุมการทดสอบการอัดตัวคายน้แบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม LabVIEW

บทที่ 3

การพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบการอัดตัวคายนํ้าอย่างรวดเร็ว

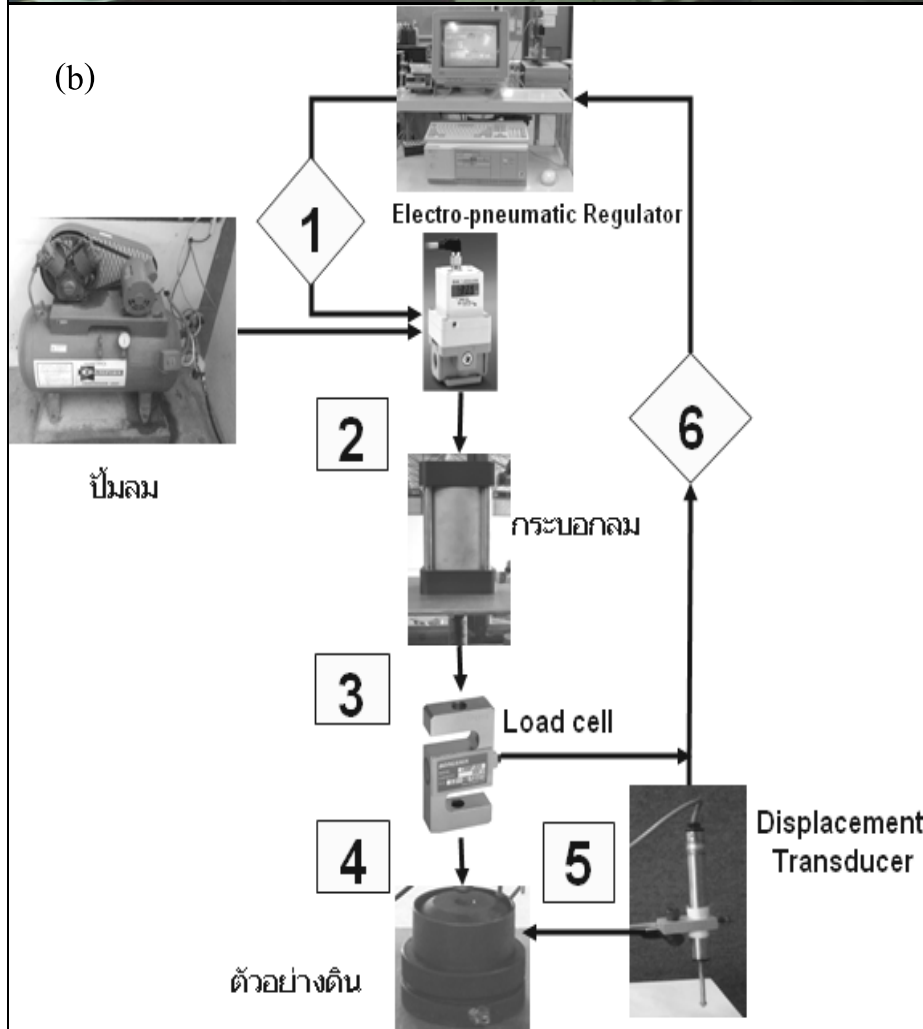
ขั้นตอนในการพัฒนาอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายนํ้าอย่างรวดเร็วประกอบด้วยสามส่วนคือ หลักการออกแบบอุปกรณ์ การออกแบบและสร้าง Hardware และการพัฒนา Software ดังมีรายละเอียดดังนี้

3.1 หลักการออกแบบอุปกรณ์

หลักการออกแบบการทำงานของเครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบดั้งเดิมอัตโนมัติ (ดังภาพที่ 3.1a) มีรายละเอียดดังนี้

1. นำดินตัวอย่างที่จะทดสอบใส่อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ
2. เปิดปั๊มลมเพื่อส่งแรงดันลมไปเก็บไว้ในอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน
3. เปิดโปรแกรมและกำหนดค่าเริ่มต้นการทดสอบจากระบบคอมพิวเตอร์
4. เมื่อเริ่มการทดสอบ คอมพิวเตอร์จะนำค่านํ้าหนักกดเริ่มต้นกำหนดไปตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (ภาพที่ 3.1b ขั้นตอนหมายเลข 1) ให้ปล่อยแรงดันส่งไปยังกระบอกลมภาพที่ 3.1b ขั้นตอนหมายเลข 2)
5. เมื่อแรงดันส่งมายังกระบอกลมจะเกิดแรงกดขึ้นในอุปกรณ์วัดแรงกด (ภาพที่ 3.1b ขั้นตอนหมายเลข 3) ผ่านไปยังดินตัวอย่าง (ภาพที่ 3.1b ขั้นตอนหมายเลข 4)
6. ขณะที่ดินตัวอย่างถูกกด อุปกรณ์วัดการเคลื่อนไหวนํ้าจะทำหน้าที่ตรวจวัดการทรุดตัวของดินตัวอย่าง ค่าแรงดันในกระบอกลม, แรงใน Load cell และค่าการทรุดตัวของดินตัวอย่างจะถูกบันทึกลงคอมพิวเตอร์ตลอดเวลาที่ต้องการ (ภาพที่ 3.1b ขั้นตอนหมายเลข 5) เมื่อครบ 24 ชั่วโมง คอมพิวเตอร์ตั้งเพิ่มนํ้าหนักขึ้นไปทันที
7. คอมพิวเตอร์จะทวนคำสั่งในข้อ 4, 5 และข้อ 6 จนกว่าจะครบตามนํ้าหนักกดทับที่กำหนด
8. เมื่อทดสอบนํ้าหนักกดครั้งสุดท้ายแล้ว จะสิ้นสุดการทดสอบของเครื่องต้นแบบ

เพื่อให้อุปกรณ์ต้นแบบทำงานได้ครบถ้วนตามหลักการออกแบบที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ Software LabVIEW โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าสามารถแบ่งได้อีก 3 ส่วนคือ โปรแกรมทดสอบแบบอัตโนมัติ (24 ชั่วโมง) โปรแกรมจับค่าการทรุดตัวและโปรแกรมทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุด โดยทั้งสามโปรแกรมวิธีทดสอบจะเหมือนกันทั้งสามวิธี แต่จะต่างกันตรงกระบวนการในตัดสินใจในการเพิ่มนํ้ากด ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



ภาพประกอบที่ 3.1 ผังการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของเครื่องต้นแบบ

3.2 การออกแบบและสร้าง Hardware

เครื่องมือการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบรวดเร็วใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมและอ่านค่าต่างๆ ทำให้การทดสอบการอัดตัวคายนํ้าง่ายและลดระยะเวลาในการทดสอบลงโดยยังคงได้พารามิเตอร์จากการทดลองที่ถูกต้อง

3.2.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์แต่ละชนิด

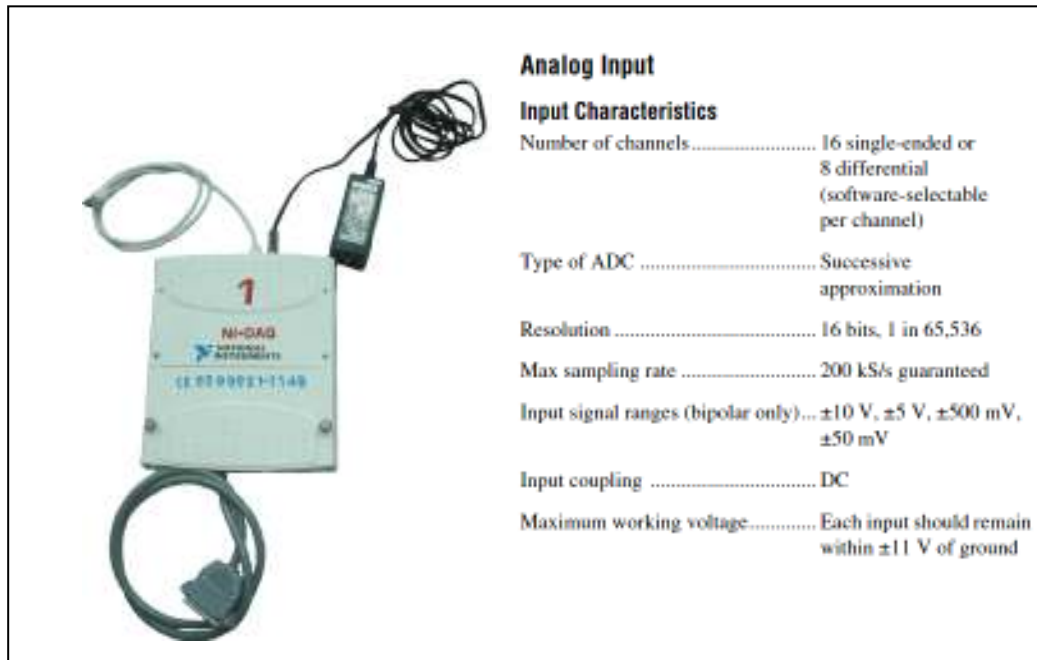
เครื่องทดสอบการอัดตัวคายนํ้าอัตโนมัติประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 10 ชิ้น ภาพที่ 3.2 ประกอบด้วย National Instrument Card (NI-DAQ), Signal Conditioning Unit, Electro Pneumatic Regulator, Air Cylinder, Load Cell Transducer, Displacement Transducer, Steel Frame, อุปกรณ์พร้อมสายต่อพ่วง, เครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) และเครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม LabVIEW โดยมีวิธีการประกอบเครื่องมือในภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิดดังต่อไปนี้



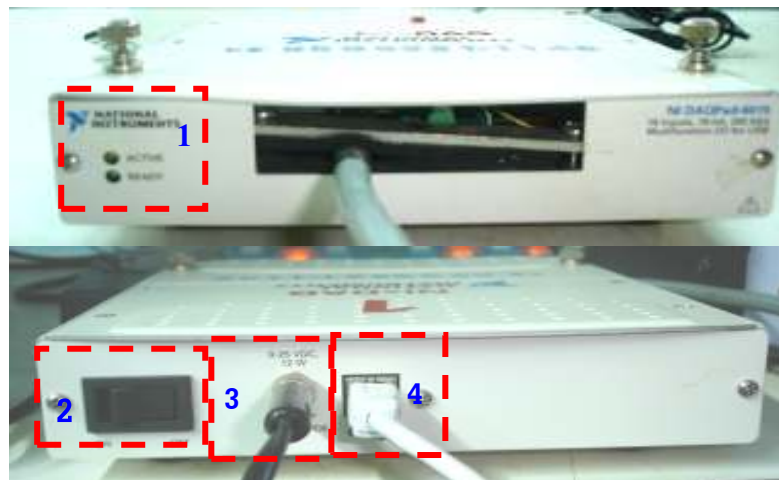
ภาพประกอบที่ 3.2 อุปกรณ์หลัก 10 ชิ้นของเครื่องทดสอบ

1. NATIONAL INSTRUMENT Card (NI-DAQ) รุ่น NI DAQPad-6015

NI-DAQ Pad-6015 (ภาพที่ 3.3) เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ โดยสามารถที่แปลงสัญญาณเข้า-สัญญาณออกเป็น Digital หรือ Analog ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์โดยทาง USB Port โดยการทำงานของอุปกรณ์ NI-DAQ Pad-6015 ดังแสดงในภาพที่ 3.4 หมายเลข 1 จะปรากฏสัญญาณไฟสีเขียวแสดงว่าอุปกรณ์พร้อมทำงานและเมื่อเริ่มทำงานจะปรากฏไฟกระพริบสีเหลือง ภาพที่ 3.4 หมายเลข 2 เป็นสวิตช์เปิด-ปิดอุปกรณ์ ภาพที่ 3.4 หมายเลข 3 เป็นช่องต่อหม้อแปลงไฟฟ้า (12W) และภาพที่ 3.4 หมายเลข 4 เป็นช่องต่อระหว่างอุปกรณ์กับคอมพิวเตอร์ (USB Port)



ภาพประกอบที่ 3.3 NI-DAQ รุ่น NI DAQPad-6015

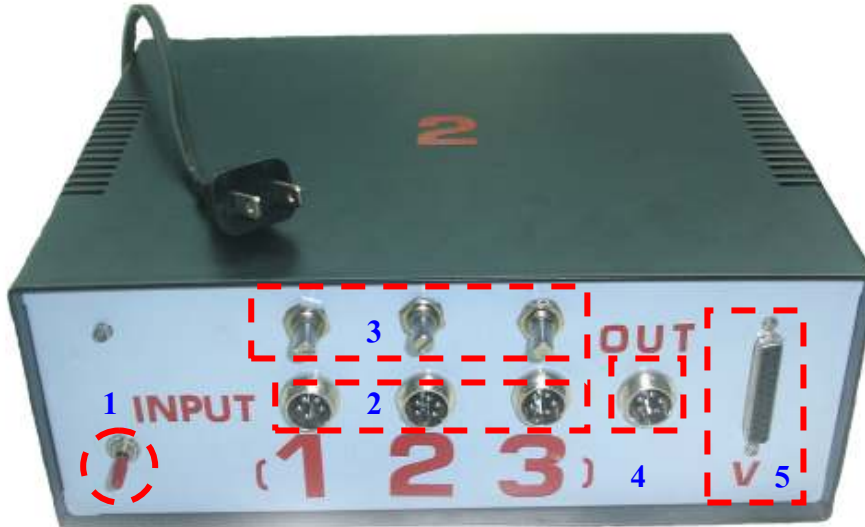


ภาพประกอบที่ 3.4 วิธีการใช้งานอุปกรณ์ NI-DAQ รุ่น NI DAQPad-6015

2. Signal Conditioning Unit

Signal Conditioning Unit เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบและผลิตขึ้นมาโดย รศ.บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา เพื่อใช้สำหรับขยายสัญญาณจาก Transducer โดยขยายเพิ่ม 50 เท่าและจ่ายไฟฟ้า (Excitation

Voltage ขนาด 10 Volt) ให้กับ Transducer ภายในมีวงจรลดสัญญาณรบกวนที่มาทับสายไฟดังแสดงในภาพที่ 3.5 โดยอุปกรณ์ของ Signal Conditioning Unit มีดังนี้



ภาพประกอบที่ 3.5 Signal Conditioning Unit

- 2.1 สวิตช์ เปิด-ปิด ดังแสดงในภาพที่ 3.5 หมายเลข 1
- 2.2 ช่องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ Transducer (Input) จำนวน 3 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 3.5 หมายเลข 2
- 2.3 ปุ่มปรับสัญญาณเข้า ดังแสดงในภาพที่ 3.5 หมายเลข 3 เพื่อปรับค่าเริ่มต้นของสัญญาณ (Zero Setting)
- 2.4 ช่องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ Transducer (Output) จำนวน 1 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 3.5 หมายเลข 4
- 2.5 ช่องต่อเข้ากับ อุปกรณ์ NI-DAQ Pad-6015 ดังแสดงในภาพที่ 3.5 หมายเลข 5

3. Electro Pneumatic Regulator รุ่น ITV 3050 SMC

Electro Pneumatic Regulator เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมแรงดัน (ดังแสดงในภาพที่ 3.6) จากบีมลมที่จะส่งต่อไปยังกระบอบอกลมโดยรับคำสั่งจากโปรแกรม LabVIEW จากคอมพิวเตอร์ส่งต่อมายัง NI-DAQ และ Signal Conditioning Unit โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 3.1 Supply pressure to 1MPa
- 3.2 Regulating pressure range 0.005 to 0.9 MPa
- 3.3 Power supply voltage 24VDC \pm 10%

3.4 Input signal Directs with 12 bit for set pressure of 0 to 100%

3.5 Output signal Responds with 12bit for output pressure of 0 to 100%

4. Air Cylinder

Air Cylinder หรือกระบอกลม (ดังภาพที่ 3.7) เป็นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนแรงดันลมที่ส่งมาจาก Electro Pneumatic Regulator ให้กลายเป็นแรงกดลงบนตัวอย่างดิน โดยมีคุณสมบัติดังนี้

4.1 ทนต่อแรงดันสูงสุด 20 ksc.

4.2 ระยะก้านกด 20 cm.

4.3 วาล์วควบคุม 2 ตัว (ภาพ 3.7a) โดยตัวบนจะเป็นวาล์วสำหรับการรับแรงดันลม (UP วาล์ว) และวาล์วด้านล่าง (RE วาล์ว) ใช้สำหรับคลายแรงดันลม



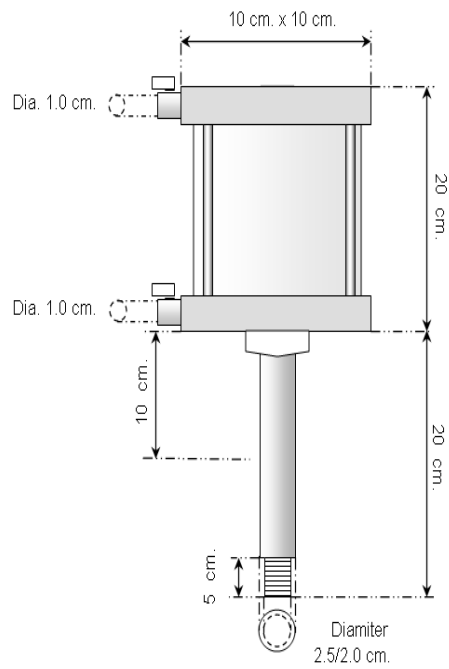
ภาพประกอบที่ 3.6 Electro Pneumatic Regulator

5. Load Cell

Load Cell เป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงกด (ดังภาพที่ 3.8) นำมาใช้วัดค่าแรงกดที่กระทำต่อดิน ตัวอย่างโดยติดอยู่กับ Air Cylinder อุปกรณ์ต่อเชื่อมต่อระหว่าง Air cylinder กับ Load cell (ดังแสดงในภาพที่ 3.9) โดยมีชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องดังนี้

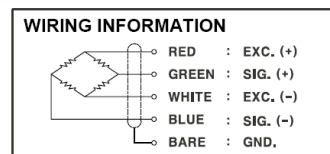
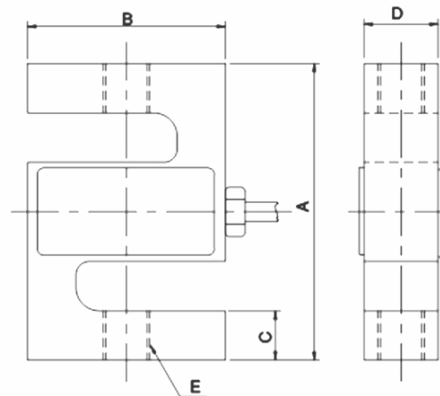


(a)



(b)

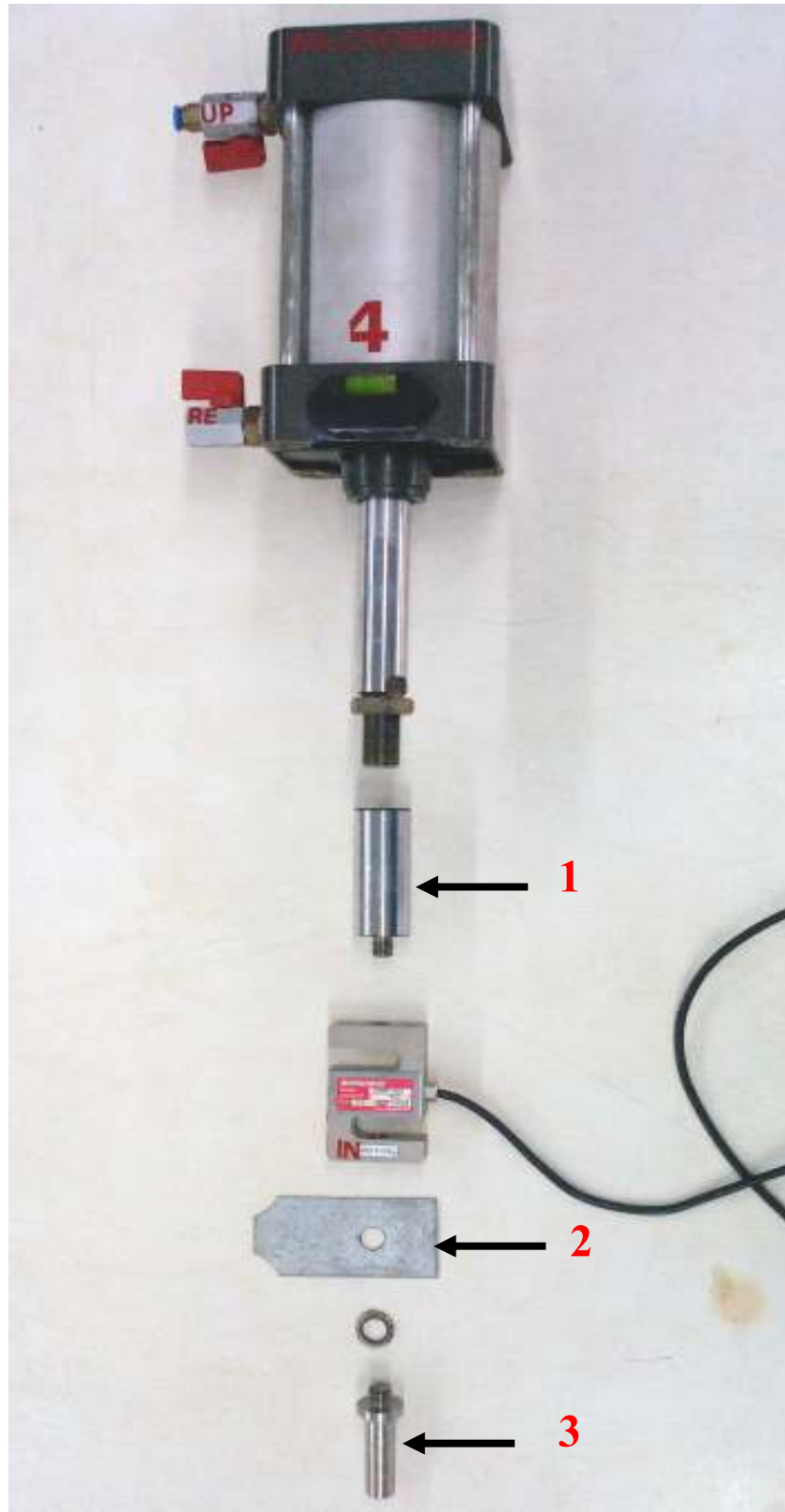
ภาพประกอบที่ 3.7 Air Cylinder หรือกระบอกลม



Dimension-mm

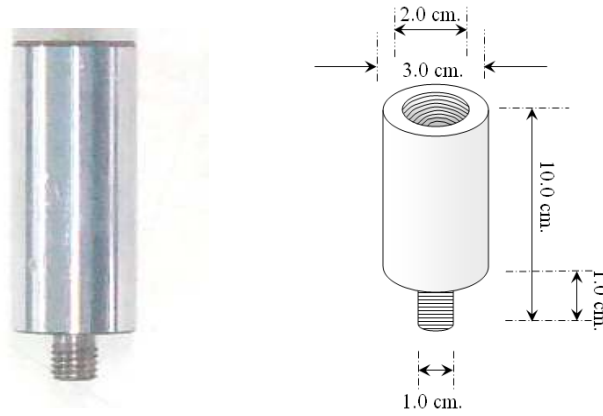
Model	Rated Capacity	A	B	C	D	E	Weight (kg)
DBBP	3~5t (29.42~49.03kN)	120.7	88.9	22.1	32.0	M24X2P	2.10

ภาพประกอบที่ 3.8 Load Cell



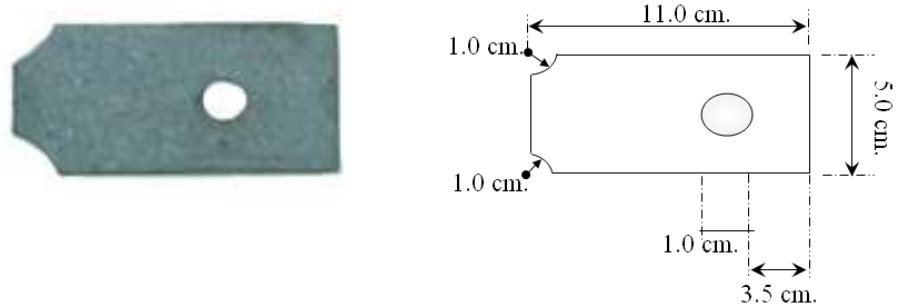
ภาพประกอบที่ 3.9 การต่อเชื่อมต่อระหว่าง Air cylinder กับ Load cell

5.1 แท่งสแตนเลสกลึงใช้ยึดระหว่าง Air cylinder กับ Load cell (ดังภาพที่ 3.10) ทำมาจาก สแตนเลส



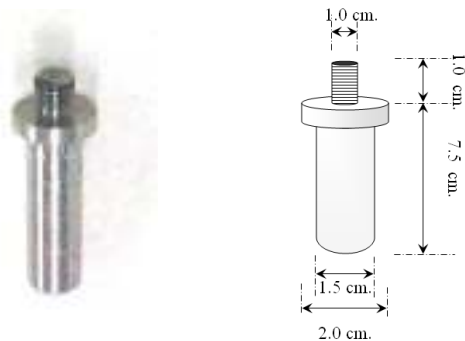
ภาพประกอบที่ 3.10 อุปกรณ์ใช้ยึดระหว่าง Air cylinder กับ Load cell

5.2 แผ่นสังกะสีใช้เป็นฐานอ้างอิงในการวัดค่าการทรุดตัวของดินตัวอย่าง (ดังภาพที่ 3.11)



ภาพประกอบที่ 3.11 อุปกรณ์อ้างอิงในการวัดค่าการทรุดตัวของดิน

5.3 แท่งสแตนเลสกลึงใช้ยึดระหว่าง Load cell กับแผ่นสังกะสี ด้านปลายใช้กดดินตัวอย่าง (ดังภาพที่ 3.12)



ภาพประกอบที่ 3.12 อุปกรณ์ใช้ยึดระหว่าง Load cell กับแผ่นสังกะสี

6. Displacement Transducer พร้อมแท่นจับแม่เหล็ก

Displacement Transducer รุ่น LSC Transducer SER No.HS50/8922 (ดังภาพที่ 3.13) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าใช้วัดค่าการทรุดตัวของดินมีระยะในการวัด 5.08 เซนติเมตร โดยข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกเก็บไว้ในระบบคอมพิวเตอร์



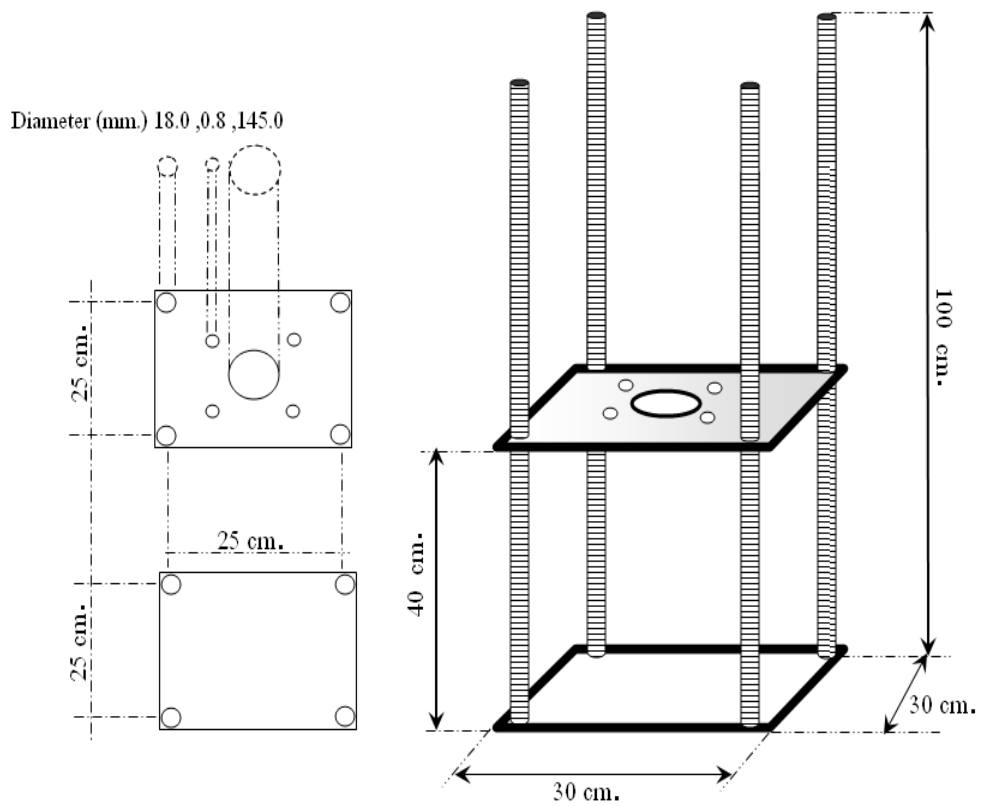
ภาพประกอบที่ 3.13 อุปกรณ์ Displacement Transducer พร้อมแท่นจับแม่เหล็ก

7. Steel Frame

Steel Frame (ดังภาพที่ 3.14) เป็นโครงของอุปกรณ์ทดสอบประกอบไปด้วยแท่งสแตนเลสยาว 1 เมตรจำนวน 4 แท่งและแผ่นเหล็กหนา 10 มิลลิเมตรจำนวน 2 แผ่นดังรูปที่ 3.15



ภาพประกอบที่ 3.14 Steel Fram



ภาพประกอบที่ 3.15 ขนาดของSteel Fram

8. อุปกรณ์พร้อมสายต่อพ่วง

อุปกรณ์พร้อมสายต่อพ่วง (ดังภาพที่ 3.16) เป็นสายต่อของอุปกรณ์ทางไฟฟ้ากรณี่ที่ต้องติดตั้งไกลๆ มี 3 ช่องสัญญาณเป็นช่องต่อสัญญาณแบบ 5 ช่องคือ E+, E-, S+, S- และกราวด์



ภาพประกอบที่ 3.16 อุปกรณ์พร้อมสายต่อพ่วง

9. เครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS)

เครื่องสำรองไฟฟ้าควรสำรองไฟฟ้า (ดังภาพที่ 3.17) ให้ยาวนานที่สุดแล้วไม่ควรน้อยกว่า 2 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการทดสอบนั้น



ภาพประกอบที่ 3.17 เครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS)

10. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม LabVIEW

ระบบคอมพิวเตอร์ควรมีระบบประมวลผล CPU ที่มีความเร็วตั้งแต่ระดับ Pentium ขึ้นไป และมีหน่วยความจำไม่น้อยกว่า 256 MB โดยมีระบบปฏิบัติการที่เป็น Windows XP ขึ้นไป ควรมีพื้นที่ว่างสำหรับติดตั้งโปรแกรมประมาณ 100 MB และมีพื้นที่ว่างสำหรับเก็บข้อมูลในบางส่วน ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW version 8.0 ขึ้นไปสำหรับใช้เปิดโปรแกรมในการทดสอบ และติดตั้งโปรแกรม Microsoft Excel สำหรับการอ่านค่าผลการทดสอบ

3.3 การพัฒนา Software

3.3.1 โปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบอัด โนมัติ

การเขียนโปรแกรมการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมอัด โนมัติจะเหมือนกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิม (ASTM D-2435) เพื่อให้เปรียบเทียบผลการทดสอบโดยใช้มาตรฐานในทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่ 24 ชั่วโมงเท่ากัน โปรแกรมอาศัยการจับเวลาที่ใช้ในการกค่น้ำหนักทดสอบ เมื่อพบว่าเวลาที่ใช้ครบ 24 ชั่วโมงให้ทำการเพิ่มน้ำหนักกดแบบอัด โนมัติทันที ดังแสดงในภาพที่ 3.18 จะเห็นกระบวนการภายในโปรแกรมเริ่มจากให้จำนวนครั้งที่ทดสอบ (n) โดยเท่ากับ 0 ต่อจากนั้น โปรแกรมจะขึ้นน้ำหนักกด (P) ครั้งที่หนึ่งตามที่กำหนดไว้ใน โปรแกรมตอนต้นพร้อมกับบันทึกค่าการทรุดตัวแบบอัด โนมัติเก็บไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ โปรแกรมจะทำการจับเวลาในการกค่น้ำหนักทดสอบ ถ้ายังไม่ครบ 24 ชั่วโมงให้นับต่อไปจนเมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้วให้ทำการขึ้นน้ำหนักต่อไปและเพิ่มค่า i เป็น $i+1$ โดยที่กำหนด ($LIR = 1$,

$P_i = P_i \times 2, i = i + 1$) เช่นกำหนดน้ำหนักรวดในครั้งที่ 1 ไว้ 1 ksc. ในการขึ้นน้ำหนักรวดครั้งต่อไปจะเป็น 2, 4, 8 และ 16 ksc. ตามลำดับ จนครบจำนวนครั้ง (N) ที่ขึ้นน้ำหนักรวดเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

3.3.2 Differential settlement Algorithm

โปรแกรมทดสอบการอัดตัวคาน้ำแบบ Differential settlement algorithm จะอาศัยผลต่างของค่าการทรุดตัวของดินเหนียวในขณะที่ทำการทดสอบค่าที่ได้จาก Displacement Transducer โดยเงื่อนไขในการขึ้นน้ำหนักรวดมีว่า เมื่อผลต่างของค่าการทรุดตัว (มิลลิเมตร) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้บนหน้าต่างของโปรแกรมตอนต้น เป็นจำนวน 20 ค่า ให้ทำขึ้นน้ำหนักรวดขึ้นไปทันที จากภาพที่ 3.19 จะเป็นแสดงกระบวนการภายในโปรแกรมเริ่มจากให้จำนวนครั้งที่กดทดสอบ (i) เท่ากับ 0 ต่อจากนั้น โปรแกรมจะขึ้นน้ำหนักรวด (P) ครั้งที่หนึ่งตามที่กำหนดไว้ในโปรแกรมตอนต้นพร้อมกับบันทึกค่าการทรุดตัวแบบอัตโนมัติเก็บไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ จากนั้น โปรแกรมจะทำการมวลผลจากค่าการทรุดตัวของดินตัวอย่าง เมื่อใดที่ผลต่างของค่าการทรุดตัว (S_i) ที่ $|S_i - S_{i+1}|$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ (ค่าที่กำหนดไว้ในโปรแกรมตอนต้น คือ ค่าความละเอียดของผลต่างการทรุดตัว (มิลลิเมตร)) จำนวน 20 ครั้ง (เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลต่างการทรุดตัวคงที่) หรือใช้ระยะเวลาในการทดสอบมากกว่าหรือเท่ากับ 24 ชั่วโมง เมื่อเงื่อนไขอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นจริงให้ทำการขึ้นน้ำหนักรวดขึ้นไปทันทีและเพิ่มค่า i เป็น i+1 โดยที่กำหนด LIR = 1, $P_i = P_i \times 2, i = i + 1$ จนครบจำนวนครั้งที่ขึ้นน้ำหนักรวดเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

ยกตัวอย่างเช่น กำหนดค่ายอมรับได้ไว้บนหน้าต่างโปรแกรมเท่ากับ 0.001 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความถี่ในการอ่านค่าการทรุดตัวของดินเหนียวทุกๆ 1 นาที เมื่อเริ่มต้นทำการทดสอบ Displacement Transducer จะทำการอ่านค่าการทรุดตัวของดิน (S_j) เหนียวและทำการเก็บข้อมูลไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ เมื่อผลต่างสัมบูรณ์ของค่าการทรุดตัวของดินเหนียว ($|S_j - S_{j+1}|$) มีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 0.001 มิลลิเมตร (ตั้งค่าที่กำหนดไว้ข้างต้น) เป็นจำนวน 20 ครั้งขึ้นไป โปรแกรมจะทำการขึ้นน้ำหนักรวดขึ้นไปทันที

3.3.3 Asaoka Algorithm

โปรแกรมทดสอบการอัดตัวคาน้ำแบบ Asaoka Algorithm เป็นการนำเอาทฤษฎีของ Asaoka (1978) มาเขียนเป็นโปรแกรมใช้ในการทดสอบการอัดตัวคาน้ำของดิน เพื่อลดระยะเวลาในการทดสอบ โดยมีแผนผังการทำงานในรูปที่ 3.20 หลักการของโปรแกรมคือ การแบ่งช่วงเวลาในการอ่านค่าการทรุดตัวออกเป็นส่วนๆเท่ากัน (Δt) นำมาพล็อตกราฟระหว่างแกน S_{i+1} กับ S_i จะได้เส้นกราฟเป็นตรง และทำการพล็อตกราฟเส้นตรง 45 องศาจากจุด Origin เป็นกราฟเส้นที่สอง เมื่อใดที่เส้นตรงของกราฟข้อมูลทั้งสองเส้นตัดกัน ให้ทำการเพิ่มน้ำหนักรวดทันที โปรแกรมเริ่มจากให้จำนวนครั้งที่กดทดสอบ (i) เท่ากับ 0

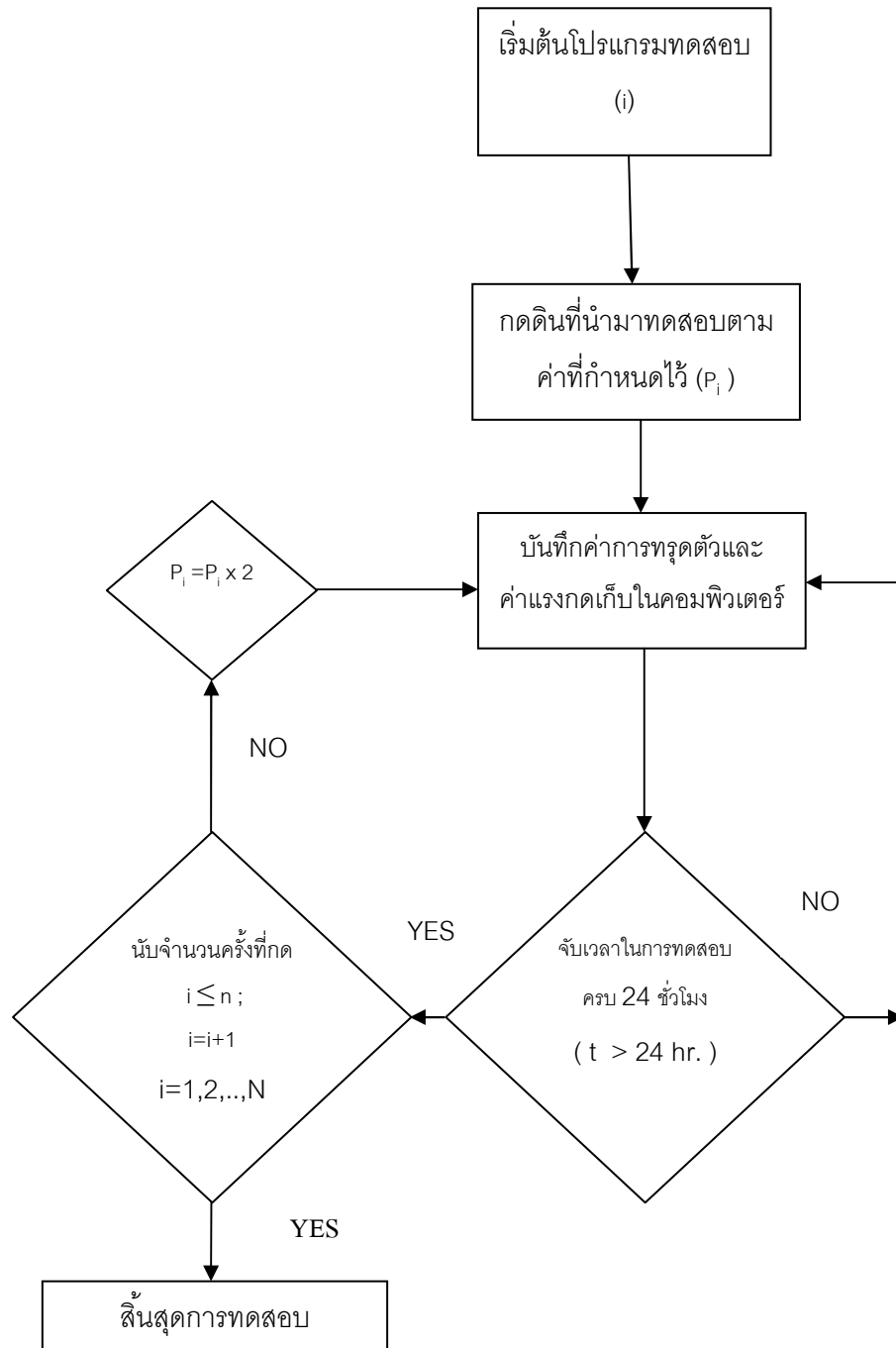
ต่อจากนั้น โปรแกรมจะขึ้นน้ำหนักกด (P_j) ครั้งที่หนึ่งตามที่กำหนดไว้ในโปรแกรมตอนต้นพร้อมกับบันทึกค่าการทรุดตัวแบบอัตโนมัติเก็บไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ จากนั้น โปรแกรมจะทำการมวลผลจากค่าการทรุดตัวของดินตัวอย่างว่าเมื่อใดที่น้ำหนักการทรุดตัว (S_j) (ดังรูปที่ 2.22) มาพล็อตกราฟระหว่างแกน S_{j-1} กับ S_j จะได้เส้นกราฟเป็นตรง (วิธีการหาเส้นกราฟเริ่มจากหาค่าความชัน (m) ข้อมูลแกน S_{j-1} กับ S_j เมื่อค่าผลต่างของความชัน (Δm) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้บนหน้าต่างของโปรแกรมตอนต้น (ในการทดสอบกำหนดอยู่ที่ 0.001) เป็นจำนวน 20 ค่า (จำนวน 20 ค่าที่ได้นำไปหาค่าความชัน (β_j) ของ Asaoka) จึงพล็อตกราฟ) และทำการพล็อตกราฟเส้นตรง 45 องศาจากจุด Origin เป็นกราฟเส้นที่สอง เมื่อเส้นตรงของกราฟข้อมูลทั้งสองเส้นตัดกัน หรือใช้ระยะเวลาในการทดสอบมากกว่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง เงื่อนไขอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นจริงให้ทำการขึ้นน้ำหนักกดขั้นต่อไปทันทีและเพิ่มค่า i เป็น $i+1$ โดยที่กำหนด ($LIR = 1, P_i = P_i \times 2, j = j + 1$) จนครบจำนวนครั้งที่ขึ้นน้ำหนักกดเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

3.3.4 ผลการพัฒนา Software

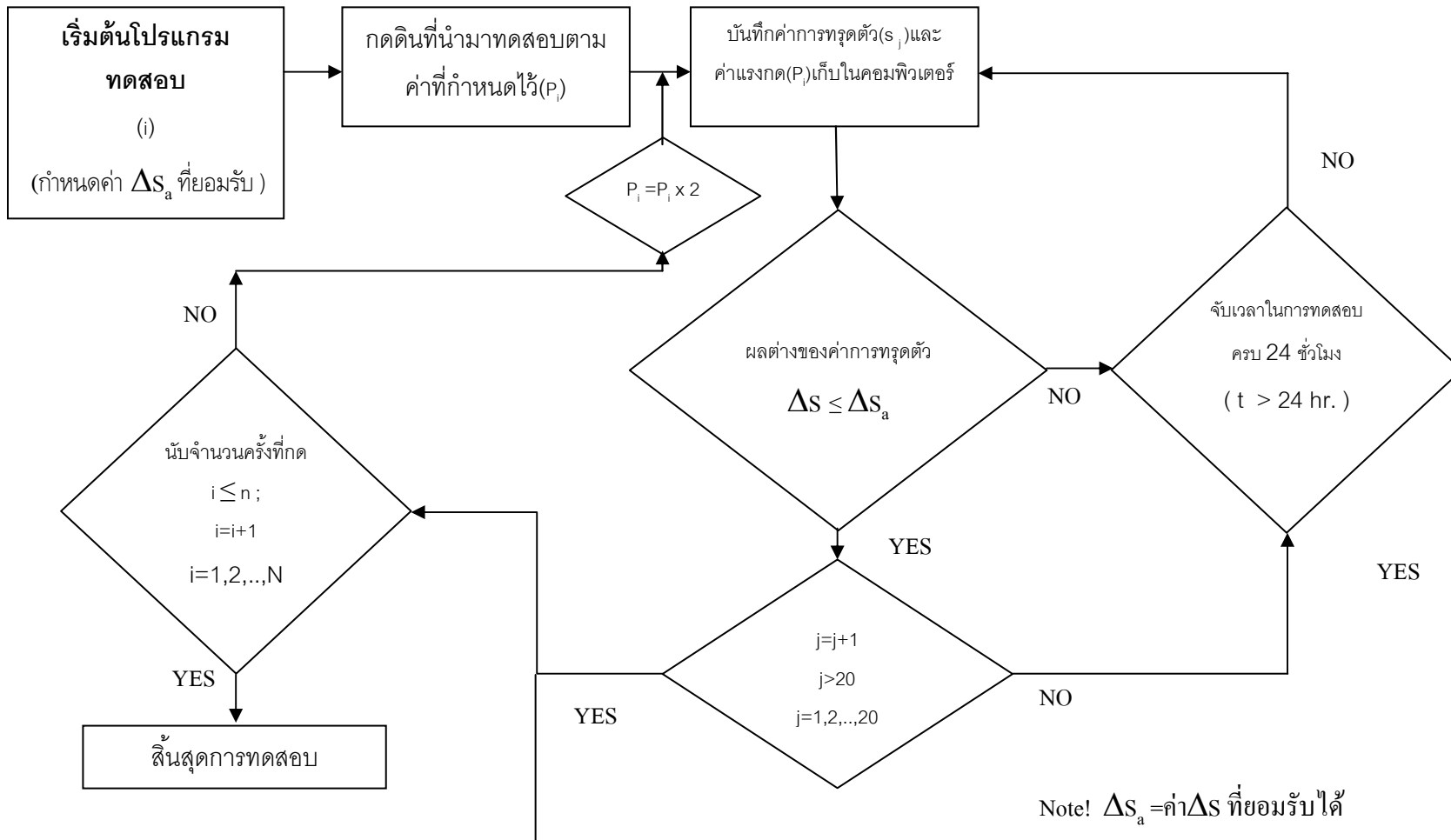
โปรแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็วพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Lab View ประกอบด้วย 2 หน้าต่างหลักได้แก่ หน้าต่างป้อนข้อมูลการทดสอบ(Setup) และหน้าต่างแสดงผลการทดสอบ (Testing monitor) โดยหน้าต่างแรกของโปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 3.21 เป็นหน้าต่างของการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการทดสอบอธิบายดังนี้ หมายเลขที่ 1 เป็นการเลือกช่องสัญญาณ ของค่าการทรุดตัว (Displacement) กับค่าน้ำหนักกด (Load cell) หมายเลขที่ 2 กำหนดความถี่ในการอ่านข้อมูล (Logging interval) ของเครื่องมือมีหน่วยเป็นวินาที หมายเลขที่ 3 เป็นช่องกำหนดจำนวนครั้งที่ใช้กดน้ำหนัก (Number of load step, N) หมายเลขที่ 4 เป็นช่องลงค่า Calibration Factor ของอุปกรณ์สามชนิดคือ อุปกรณ์วัดการทรุดตัว (Displacement Factor) อุปกรณ์วัดแรงกด (Load Factor) และอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (Pressure Factor) หมายเลขที่ 5 เป็นการกำหนดน้ำหนักกดเริ่มต้น (1^{st} Pressure) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและพื้นที่หน้าตัดของดินตัวอย่าง (Sample area) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร หมายเลข 6 เป็นช่องกำหนดกระบวนการตัดสินใจในการเพิ่มน้ำหนักกด หมายเลขที่ 7 เป็นสวิตซ์เริ่มต้นการทำงาน (Run)

หน้าต่างที่สองของโปรแกรม (Online Displacement) เป็นหน้าต่างที่ติดตามผลการทดสอบค่าที่ได้แบบอัตโนมัติดังแสดงในภาพที่ 3.22 หมายเลขที่ 1 เป็นตารางบันทึกค่าการทรุดตัวพร้อมบันทึกวันและเวลาที่ทำการทดสอบ หมายเลขที่ 2 เป็นกราฟแสดงค่าการทรุดตัวต่อเวลาโดยใช้ข้อมูลจากตารางในหมายเลขที่ 1 หมายเลขที่ 3 เป็นการแสดงค่าของแรงดันที่ใช้อยู่ในขณะนั้น และหมายเลขที่ 4 เป็นการแสดงค่าของน้ำหนักกดที่กดลงตัวอย่างดินและความดันที่วัดได้ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ โปรแกรมจะทำการเปิดตัวเองแบบอัตโนมัติ เบื้องหลังของโปรแกรมเป็นการเขียนความสัมพันธ์ของฟังก์ชันต่างๆ

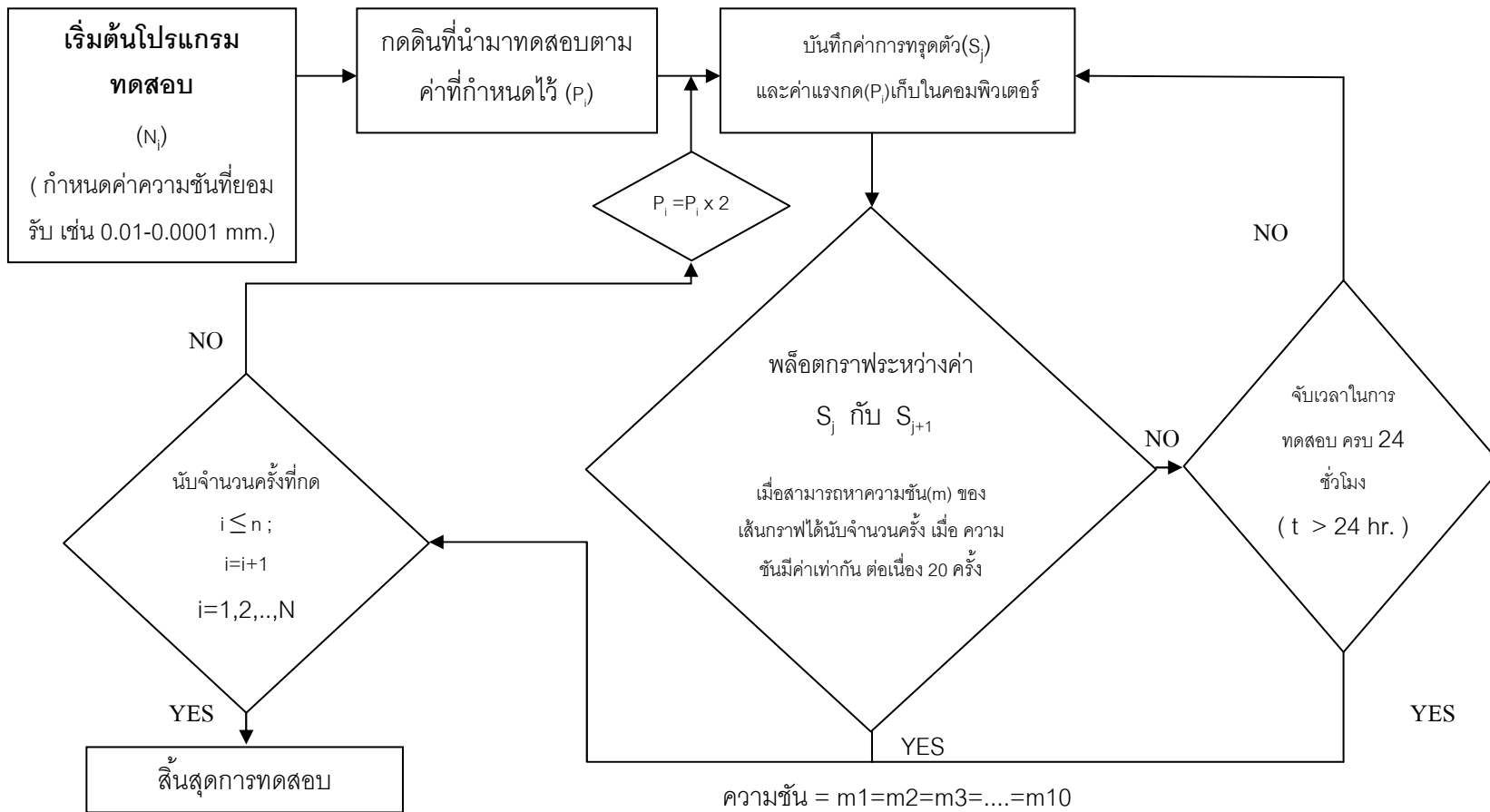
ในกระบวนการทำงานของโปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 3.23 โดยมีวิธีการใช้งานโปรแกรมอยู่ในภาคผนวก ข.



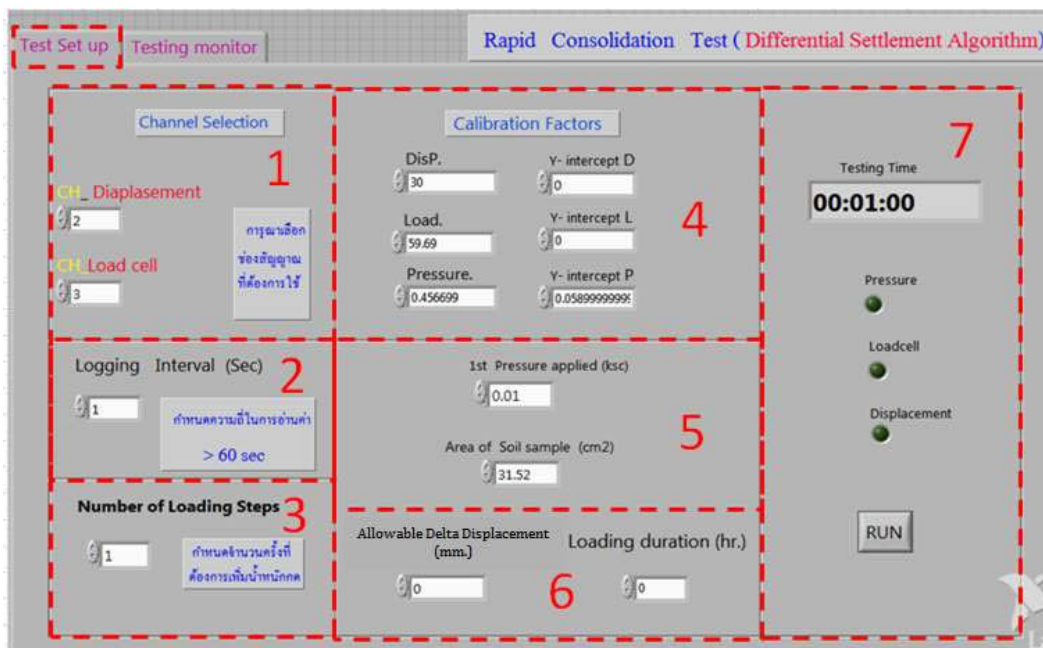
ภาพประกอบที่ 3.18 แผนผังการทำงานของโปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบตั้งเดิมอัตโนมัติ



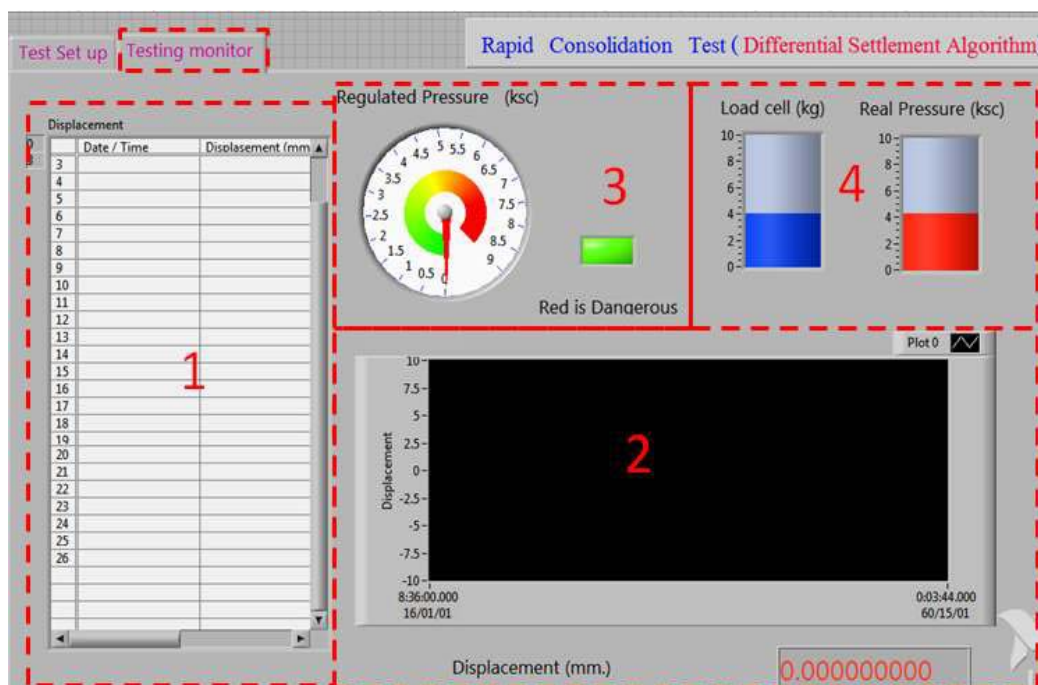
ภาพประกอบที่ 3.19 แผนผังการทำงานของ โปรแกรมทดสอบการอัดตัวคาน้ำแบบ Differential settlement Algorithm



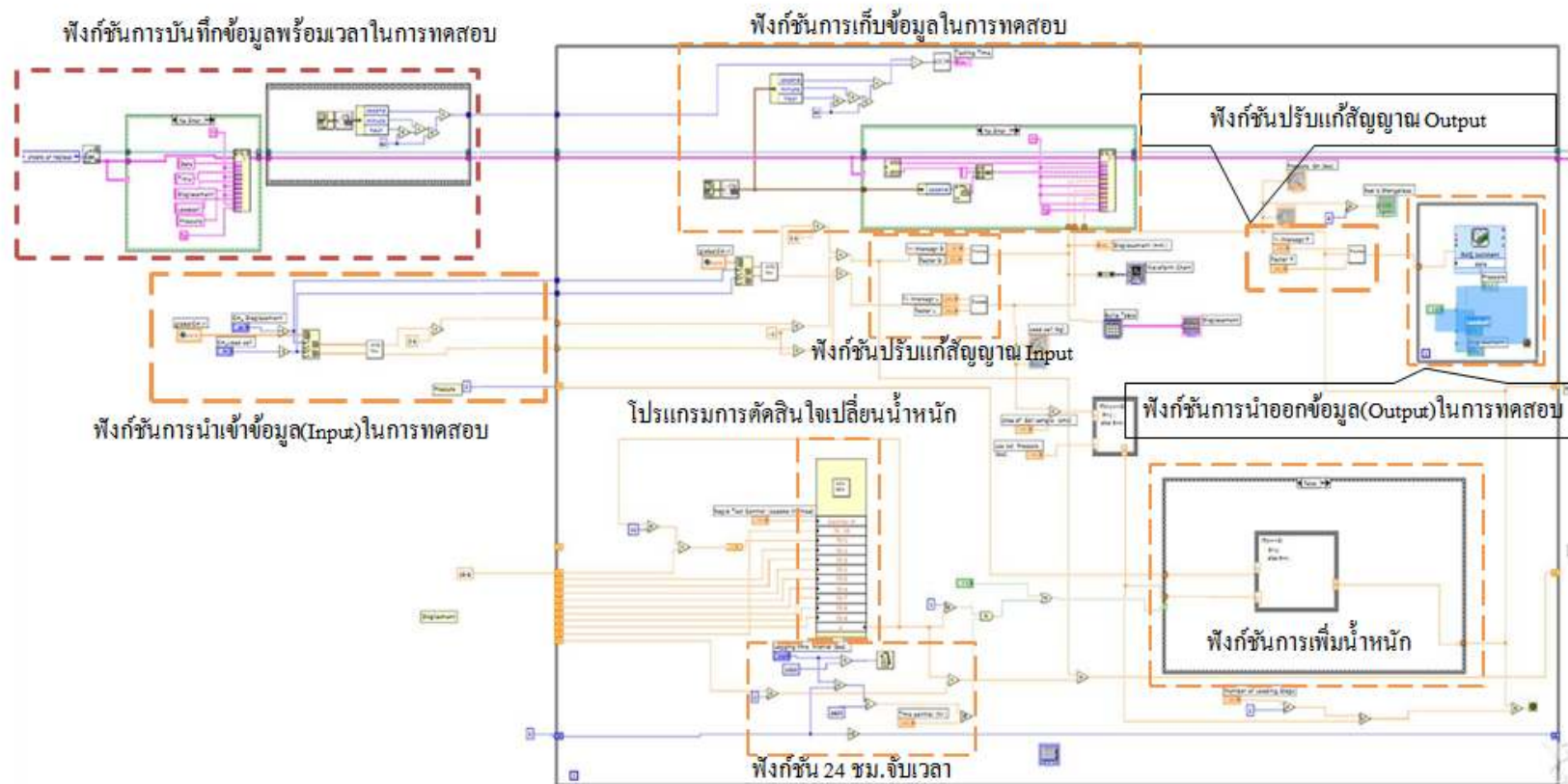
ภาพประกอบที่ 3.20 แผนผังการทำงานของโปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ Asoka Algorithm



ภาพประกอบที่ 3.21 โปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็วหน้าที่ 1 (Setup)



ภาพประกอบที่ 3.22 หน้าต่างแสดงผลการทดสอบ (Testing Monitor)

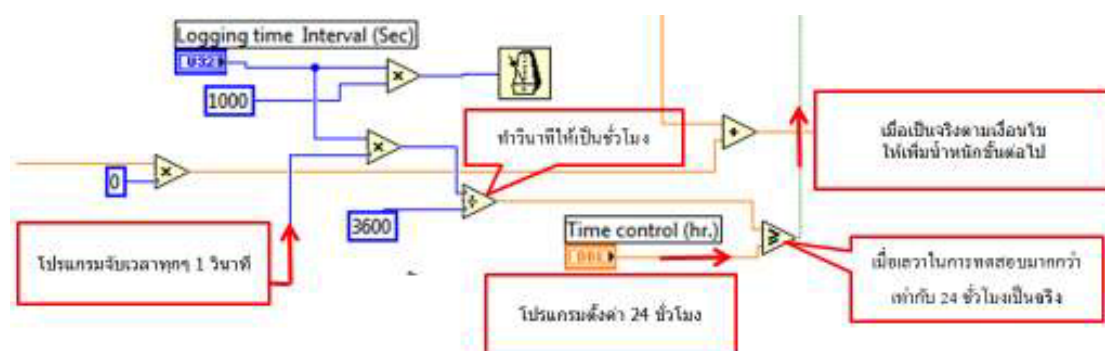


ภาพประกอบที่ 3.23 ภาพรวมแสดงความสัมพันธ์ของการทำงานของโปรแกรมการอัดตัวคายน้ำอย่างอัตโนมัติ

ในส่วนของกระบวนการตัดสินใจในการเพิ่มน้ำหนักกดแบบอัตโนมัติด้วยการทั้งหมด 3 วิธี แยกออกเป็นสองโปรแกรมดังนี้

3.3.4.1 โปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ 4 ชั่วโมงอัตโนมัติ

ข้อกำหนดเหมือนการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมทุกประการ หลักการทำงานจะใช้การจับเวลาเมื่อครบ 4 ชั่วโมงให้ทำการเพิ่มน้ำหนักกดแบบอัตโนมัติ โปรแกรมนี้จะเป็นโปรแกรมพื้นฐานของโปรแกรมทั้งหมด เนื่องจากการตัดสินใจขั้นสุดท้ายของทุกโปรแกรม คือเวลาในการกดแต่ละครั้งไม่เกิน 4 ชั่วโมงดังแสดงตัวอย่างผังชั้นกึ่งที่ใช้ในภาพที่ 3.4



ภาพประกอบที่ 3.24 ผังชั้นกึ่งในโปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมอัตโนมัติ

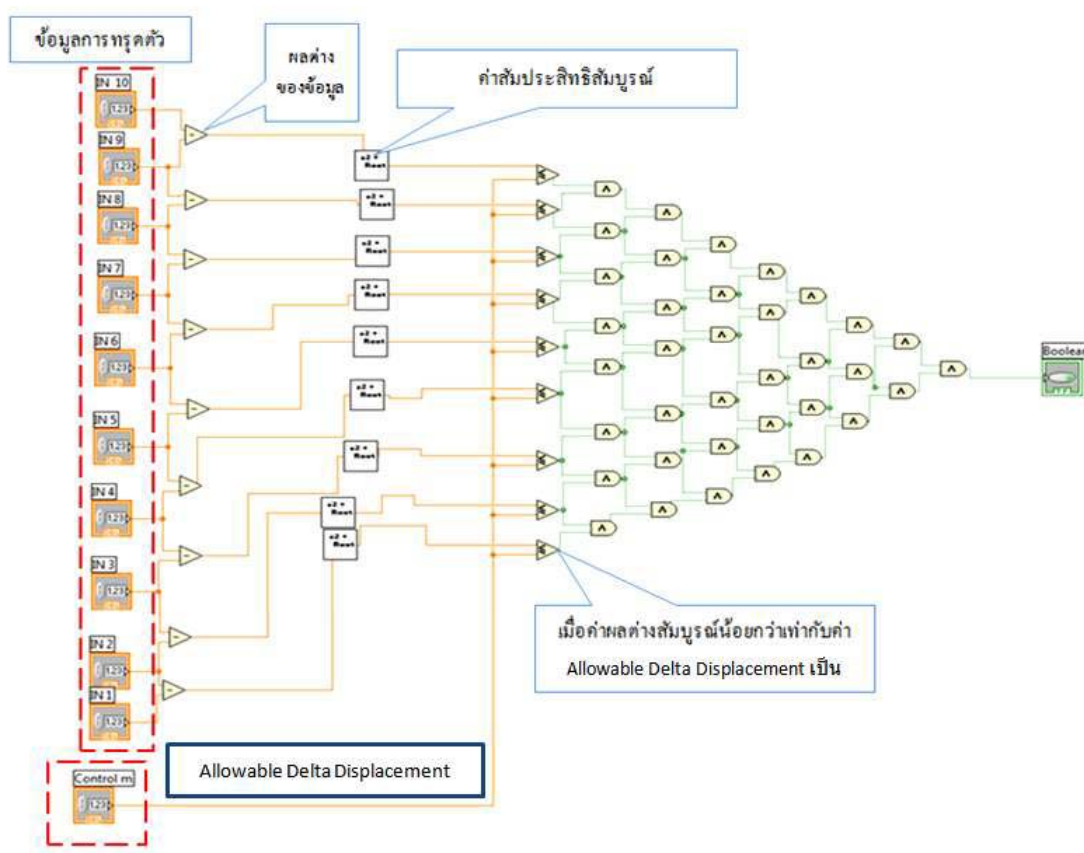
3.3.4. □ โปรแกรม Differential settlement Algorithm

โปรแกรมจะทำการประมวลผลโดยอาศัยการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบว่า เมื่อค่าการทรุดตัวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนถึงค่าที่ยอมรับ (Allowable Delta Displacement, mm.) ให้เพิ่มน้ำหนักโดยอัตโนมัติ จากภาพที่ 3.5 แสดงผังชั้นกึ่งภายในโปรแกรม LabVIEW □ เริ่มจากนำค่าการทรุดตัวที่ i กับ $i+1$ มาหาค่าผลต่างของการทรุดตัวจำนวน \square ครั้ง ถ้าผลต่างที่ได้มีน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ตอนต้นทั้ง \square ค่าให้ทำการขึ้นน้ำหนักกดขั้นต่อไปทันที แต่ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้ทวนค่าผลต่างต่อไป

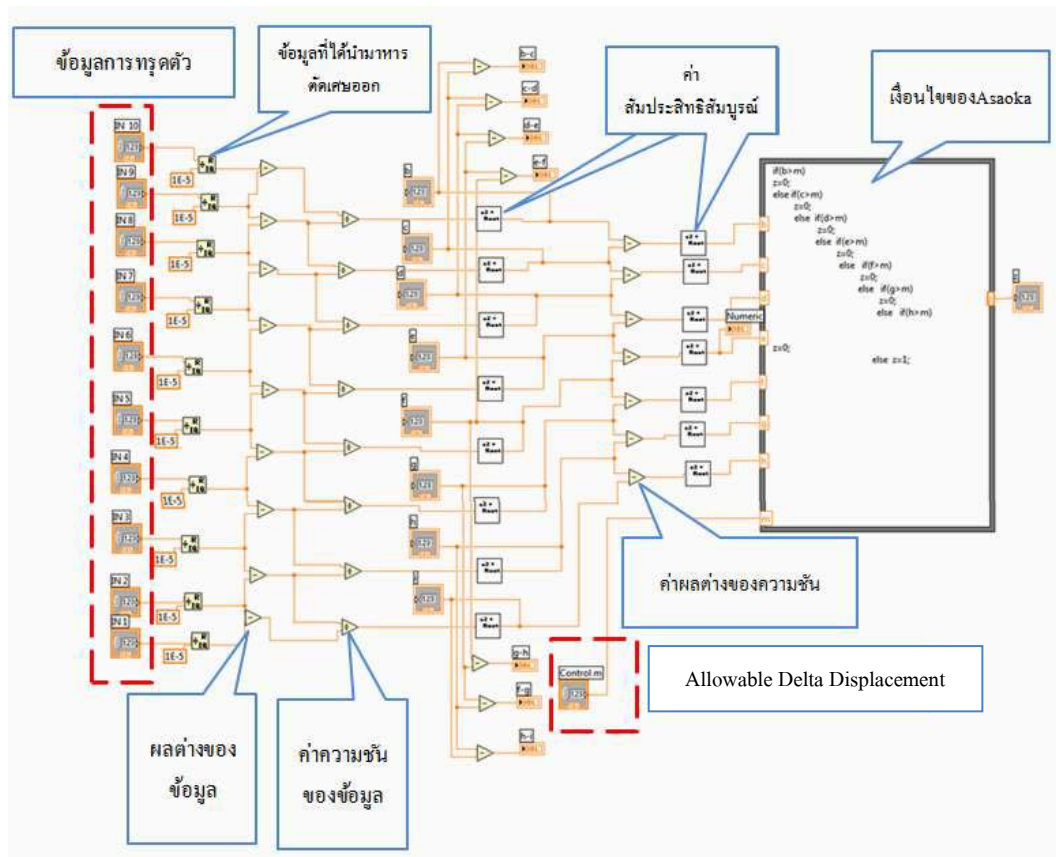
3.3.4.3 โปรแกรม Asaoka Algorithm

โปรแกรมจะทำการประมวลผลตามทฤษฎีของ Asaoka เมื่อผลการทดสอบเป็นไปตามเงื่อนไขของโปรแกรม Asaoka แล้วให้เพิ่มน้ำหนักกดแบบอัตโนมัติดังแสดงตัวอย่างผังชั้นกึ่งที่ใช้ในภาพที่ 3.6 แสดงหลักการของโปรแกรมคือ อ่านค่าการทรุดตัวในอัตราเดียวกันเช่น อ่านค่าทุกๆ 1 นาที เป็นต้น จึงทำให้ผลต่างของเวลาในการอ่านค่าการทรุดตัวเป็นส่วนๆ เท่ากัน (Δt) ค่าการทรุดตัวที่นำมาใช้จะถูกตัด

ค่าทศนิยมตำแหน่งที่ 5 ของข้อมูลออกเนื่องจากความสามารถของอุปกรณ์ในการอ่านค่าความละเอียดได้แม่นยำที่ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (ความสามารถในการอ่านค่าขึ้นอยู่กับความสามารถอุปกรณ์ที่ใช้) นำค่าการทรุดตัวที่ได้มาพล็อตกราฟระหว่างแกน S_{j-1} กับ S_j จะได้เส้นกราฟเป็นตรงทำการหาค่าความชันของข้อมูลทุกๆ 10 ค่าจะได้ค่าความชัน 10 ค่า เมื่อใดที่ค่าความชันของข้อมูลมีแนวโน้มตัดกับกราฟเส้นตรง 45 องศาจากจุด Origin ทั้ง 10 ค่าความชันให้ขึ้นน้ำหนักกดทันที



ภาพประกอบที่ 3.25 ฟังก์ชันในโปรแกรม Differential settlement Algorithm



ภาพประกอบที่ 3.26 ฟังก์ชันภายในโปรแกรม Asaoka Algorithm

บทที่ 4

การตรวจสอบความน่าเชื่อถือ

4.1 วิธีการตรวจสอบความน่าเชื่อถือ

การทดสอบของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็วที่พัฒนาขึ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถืออย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การทดสอบแบบดั้งเดิม โดยแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสำหรับการทดสอบและส่วนที่สองเป็นการทดสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมกับการทดสอบแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นมา ความเชื่อถือ สามารถบอกได้จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในรูปของการทรุดตัวกับเวลา, ค่า C_v , C_c , σ'_{mp} และอื่นๆที่สอดคล้องกันระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีที่พัฒนาขึ้น

4.1.1 การเตรียมดินเหนียวตัวอย่างสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน

ดินเหนียวตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกเป็นดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ส่วนที่สองเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯที่นำมาปั้นขึ้นรูปที่แรงดันต่างๆ ขบวนการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. ดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ดินเหนียวปากพนังมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อน ทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจำนวน 10 ตัวอย่างจากหลุมเจาะ 3 หลุมเจาะดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

หลุมเจาะ ที่	ระดับความ ลึก (เมตร)	คุณสมบัติ							
		LL	PL	PI	Natural Water Content %	Unit Weight t/m^3	Specific Gravity	USCS	S_u (USC) t/m^2
1	3.00	63.5	27.2	36.3	71.4	1.71	2.68	CH	1.27
	6.00	63.7	28.7	35	71.9	1.73	2.70	CH	1.39
	9.00	63.9	28.1	35.8	73.1	1.72	2.73	CH	1.47
	12.00	64.2	27.5	36.7	72.8	1.72	2.69	CH	2.29

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช (ต่อ)

หลุมเจาะ ที่	ระดับความ ลึก (เมตร)	คุณสมบัติ							
		LL	PL	PI	Natural Water Content %	Unit Weight t/m ³	Specific Gravity	USCS	S _u (USC) t/m ²
2	3.00	63.9	25.8	38.6	71.3	1.72	2.70	CH	1.26
	6.00	63.8	28.1	35.7	72.5	1.72	2.69	CH	1.44
	9.00	63.4	28.0	35.4	71.4	1.76	2.77	CH	1.44
3	3.00	64.9	29.2	35.2	72.8	1.76	2.69	CH	1.33
	6.00	64.1	28.8	35.3	71.9	1.72	2.73	CH	1.35
	9.00	63.7	28.4	35.3	71.9	1.76	2.71	CH	1.43

หมายเหตุ แหล่งที่มาของดินเหนียวปากพนังดังนี้ S_u

- หลุมเจาะที่ 1. ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 4016 กม.6 ต.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
- หลุมเจาะที่ 2. ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 4094 กม. 25 ต.หูล่อง อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
- หลุมเจาะที่ 3. หมู่ 1 บ้านปากคลอง ต. บ้ำใหญ่ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช

2. ดินเหนียวกรุงเทพที่นำมาปั้นขึ้นรูปที่แรงดันต่างๆตามวิธีการของ สุขสันต์ หอพิบูลสุข , (2548) ดินเหนียวกรุงเทพปั้นขึ้นรูป (Uncommented clay) เป็นดินเหนียวตัวอย่างที่เก็บมาจากกรุงเทพที่ระดับความลึก 1.5, 3 และ 6 เมตร นำมาควนด้วยเครื่องปั้นกับน้ำและขึ้นรูปในแบบหล่อโดยการให้ความเค้นกดทับในแนวตั้งเท่ากับ 0.9, 1.1, 1.4, 1.6, 1.9, 2.1, 2.4, 2.6, 2.8 และ 3.2 ksc. โดยเริ่มจากการขึ้นน้ำหนักครั้งละ 1 กิโลกรัมทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงจนกว่าจะได้คามความเค้น (ดังแสดงในภาพที่ 4.1) ที่กำหนดไว้ หลังจากนั้น จึงทำการตัดแต่งตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบต่อไป จำนวน 10 ตัวอย่าง



ภาพประกอบที่ 4.1 ดินเหนียวกรุงเทพที่นำมาปั้นขึ้นรูปที่แรงดันต่างๆ

4.1.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการทดสอบที่พัฒนาขึ้น

การทดสอบเชิงเปรียบเทียบสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบอัตโนมัติ(โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง) ส่วนที่สองเป็นการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบรวดเร็ว (Differential settlement algorithm) ส่วนที่สามเป็นการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบรวดเร็ว (Asaoka) และส่วนที่สี่เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของทั้งสามวิธี ค่าจากการทดสอบที่นำมาเปรียบเทียบได้แก่ ค่า Compression Index (C_c), ค่า Over Consolidation Ratio(OCR) และค่า Maximum Past Pressure(σ'_{mp}) ดินตัวอย่างแบ่งออกเพื่อใช้ในการทดสอบในแต่ละประเภทดังนี้

1. การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบรวดเร็ว โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง ดินเหนียวที่นำมาใช้สำหรับการทดสอบจำนวน 1 ตัวอย่างได้แก่ ดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ที่ระดับความลึก 3 เมตร

2. การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบรวดเร็ว Differential settlement algorithm ดินเหนียวที่นำมาใช้สำหรับการทดสอบจำนวน 10 ตัวอย่างได้แก่ ดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ที่ระดับความลึก 3, 6, 9 และ 12 เมตร หลุมเจาะที่ 2 ที่ระดับความลึก 3 เมตร และดินเหนียวกรุงเทพปั้นขึ้นรูปที่แรงดัน 0.9, 1.1, 1.4, 1.6 และ 1.9 ksc

3. การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบรวดเร็ว Asaoka ดินเหนียวที่นำมาใช้สำหรับการทดสอบจำนวน 10 ตัวอย่าง ได้แก่ ดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 2 ที่ระดับความลึก 6 และ 9 เมตร หลุมเจาะที่ 3 ที่ระดับความลึก 3, 6 และ 9 เมตร และดินเหนียวกรุงเทพปั้นขึ้นรูปที่แรงดัน 2.1, 2.4, 2.6, 2.8 และ 3.2 ksc

4. การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคาน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัตโนมัติ โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง, โปรแกรม Differential settlement algorithm และโปรแกรม Asaoka Method ดินเหนียวที่นำมาใช้สำหรับการทดสอบจำนวน 1 ตัวอย่าง ได้แก่ ดินเหนียวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร

4.2 ผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือ

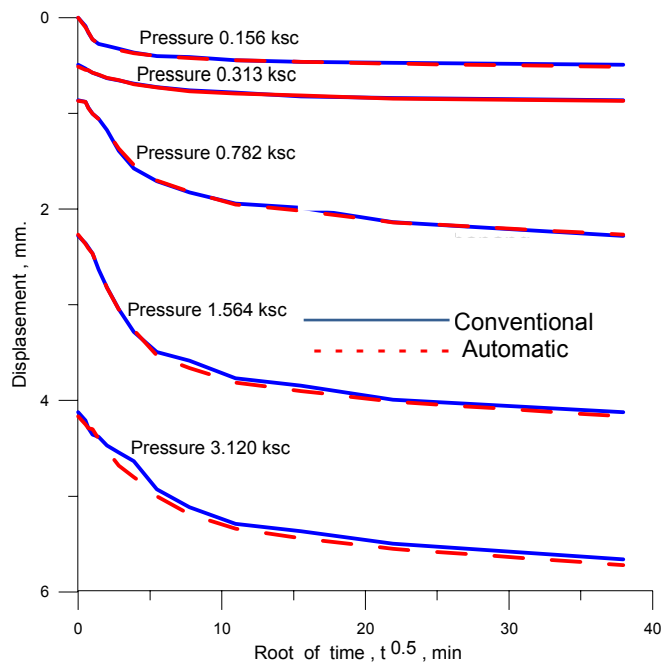
การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น โดยจะทำการทดสอบเปรียบเทียบกับการทดสอบแบบดั้งเดิมโดยแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบอัดโนมัติ(โปรแกรมอัดโนมัติ 24 ชั่วโมง) ส่วนที่สองเป็นการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบอัดโนมัติ (โปรแกรมแบบรวดเร็ว) ส่วนที่สามเป็นการเปรียบเทียบของทั้งสามวิธี ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

4.2.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัดโนมัติ (โปรแกรมอัดโนมัติ 24 ชั่วโมง)

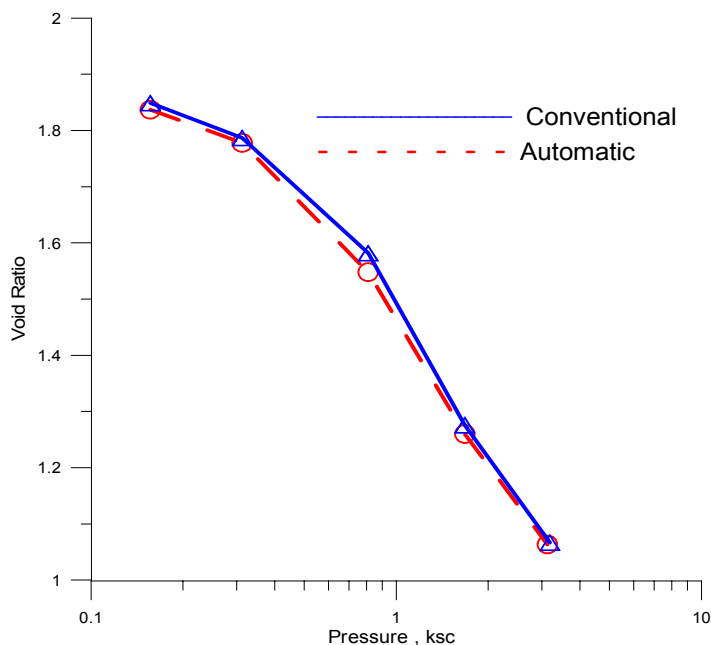
ผลการทดสอบความแม่นยำของการทดสอบแบบดั้งเดิมกับการทดสอบแบบอัดโนมัติใช้ดินเหนียวอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ที่ระดับความลึก 3 เมตร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวแสดงในภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าอัตราส่วนช่องว่างของดินแสดงในภาพที่ 4.3 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดิน (C_v) ในภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบพบว่าค่า C_c และค่า OCR มีค่าใกล้เคียงกันมากมีผลต่าง (Error) ประมาณ 1% ในขณะที่ค่า σ'_{mp} มีค่า Error = 2.56 %

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่าง อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร

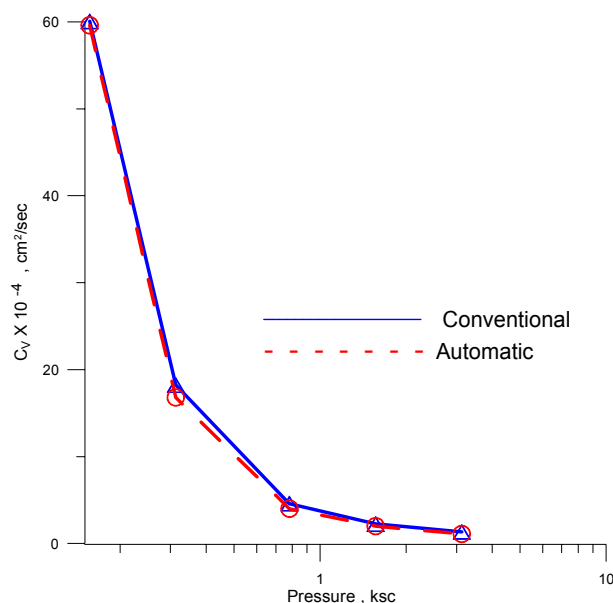
Compressibility Parameter	การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ		% Error
	แบบดั้งเดิม	แบบอัดโนมัติ	
Compression Index, C_c cm^2/sec	0.864	0.855	1.041
Over Consolidation Ratio, OCR	1.69	1.68	0.59
Max. Past Pressure, σ'_{mp} ksc.	0.39	0.38	2.56



ภาพประกอบที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวของดินอำเภopakพนัง จังหวัด นครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร ด้วยวิธีการอัดตัวคาน้ำแบบ คั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว (โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง)



ภาพประกอบที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าอัตราส่วนช่องว่างของดินอำเภopakพนัง จังหวัด นครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร ด้วยวิธีการอัดตัวคาน้ำแบบ คั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว (โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง)

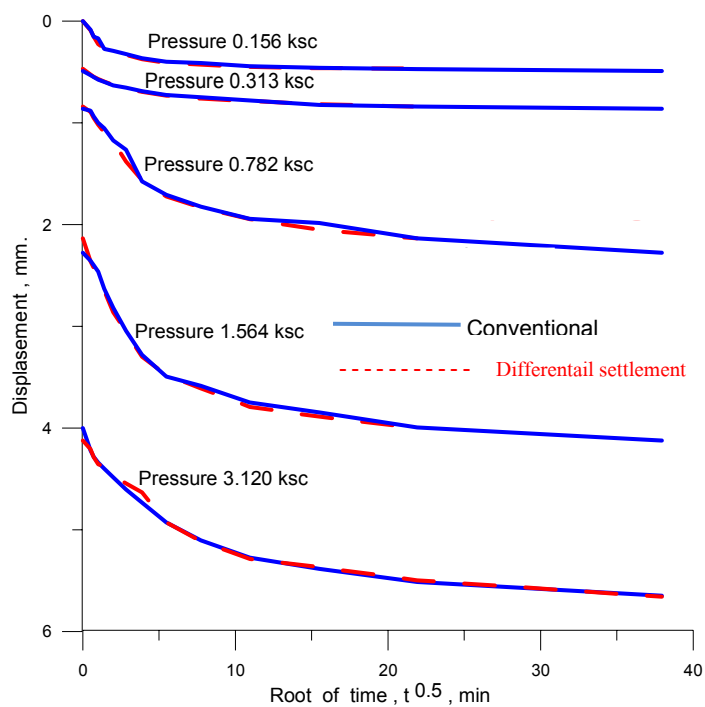


ภาพประกอบที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินอำเภอบางพลี จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร ด้วยวิธีการอัดตัวคาน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบแบบรวดเร็ว (โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง)

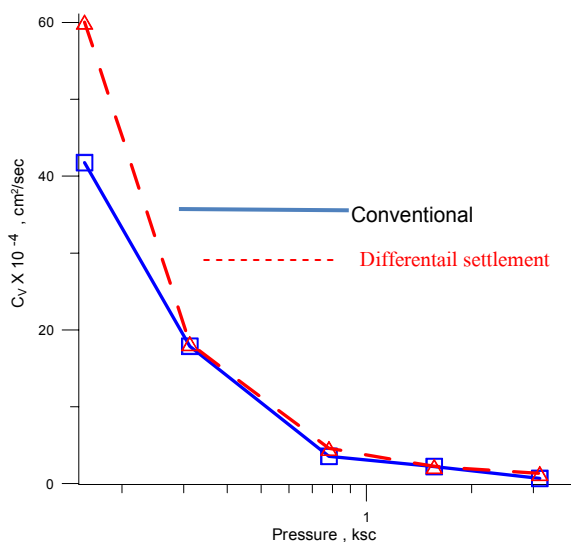
4.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคาน้ำแบบดั้งเดิมกับแบบอัตโนมัติ Differential settlement algorithm

ผลการทดสอบความแม่นยำของการทดสอบแบบดั้งเดิมกับการทดสอบแบบอัตโนมัติใช้ดินเหนียวอำเภอบางพลี จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 2 ที่ระดับความลึก 6 และ 9 เมตร หลุมเจาะที่ 3 ที่ระดับความลึก 3, 6 และ 9 เมตร และดินเหนียวกรุงเทพปิ่นขึ้นรูปที่ความเค้นกดทับในแนวตั้งเท่ากับ 0.9, 1.1, 1.4, 1.6 และ 1.9 ksc ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวในภาพที่ 4.5 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินในภาพที่ 4.6 ผลการทดสอบพบว่าค่า σ'_{mp} และค่า C_c มีค่าใกล้เคียงกันมากมีผลต่างเฉลี่ย (Error) น้อยกว่า 10% ในขณะที่ค่า OCR มีค่า Error เฉลี่ยไม่มากกว่า 10%

วิธีการทดสอบแบบ Differential settlement algorithm ให้ผลทดสอบที่น่าเชื่อถือประมาณ 90% จากการทดสอบแบบดั้งเดิม



ภาพประกอบที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวของดินอำเภอปากพนัง จังหวัด นครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร การอัดตัวคาน้ำแบบดั้งเดิม กับแบบอัตโนมัติ Differential settlement Algorithm



ภาพประกอบที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินอำเภอปากพนัง จังหวัด นครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร การอัดตัวคาน้ำแบบดั้งเดิม กับแบบอัตโนมัติ Differential settlement Algorithm

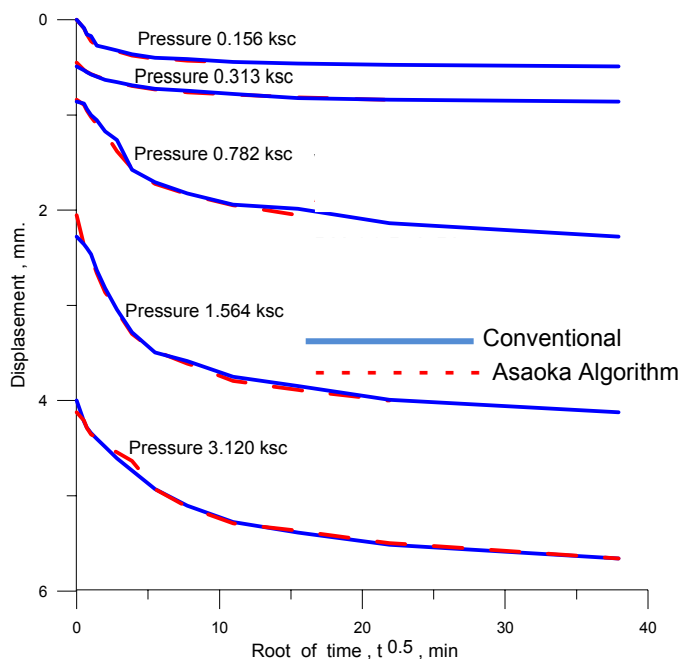
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่างโดยใช้โปรแกรม Differential settlement Algorithm

Compressibility Parameter	การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ																					% Error เฉลี่ย
	แบบดั้งเดิม										แบบอัตโนมัติ Differential settlement Algorithm											
	ดินเหนียวปากพนัง					ดินเหนียวกรุงเทพบั้งจันรูป					ดินเหนียวปากพนัง					ดินเหนียวกรุงเทพบั้งจันรูป						
	ความลึก (m)					กดที่แรงดัน (ksc)					ความลึก (m)					กดที่แรงดัน (ksc)						
	หลุมที่ 1			หลุมที่ 2							หลุมที่ 1			หลุมที่ 2								
	3	6	9	12	3	0.9	1.1	1.□	1.6	1.9	3	6	9	12	3	0.9	1.1	1.□	1.6	1.9		
$C_c, \text{cm}^2/\text{sec}$	0.□□	0.73□	0.6□	0.675	0.66□	0.731	0.631	0.59□	0.56□	0.□□	0.□□	0.795	0.795	0.69□	0.69□	0.797	0.69□	0.66□	0.56□	0.511	7.62	
OCR	1.69	1.19	1.10	0.9□	1.71	-	-	-	-	-	1.□□	1.05	1.00	0.□	1.□	-	-	-	-	-	10.□	
$\sigma'_{mp}, \text{t/m}^2$	0.39	0.□□	0.71	0.□	0.37	0.36	0.□	0.5□	0.5□	0.6	0.□	0.□	0.65	0.65	0.□	0.□	0.52	0.53	0.55	0.62	□35	

4.2.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบดั้งเดิมกับแบบอัตโนมัติ Asaoka Algorithm

ผลการทดสอบความแม่นยำของการทดสอบแบบดั้งเดิมกับการทดสอบแบบอัตโนมัติใช้ดินเหนียวอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 2 ที่ระดับความลึก 6 และ 9 เมตร หลุมเจาะที่ 3 ที่ระดับความลึก 3, 6 และ 9 เมตร และดินเหนียวกรุงเทพป็นชั้นรูปที่แรงดัน 2.1, 2.4, 2.6, 2.8 และ 3.2 ksc. ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวในภาพที่ 4.7 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินในภาพที่ 4.8 ผลการทดสอบพบว่าค่า σ'_{mp} มีค่าใกล้เคียงกันมากมีผลต่างเฉลี่ย (Error) น้อยกว่า 10% ในขณะที่ค่า OCR และค่า C_c มีค่า Error เฉลี่ยไม่มากกว่า 10 %

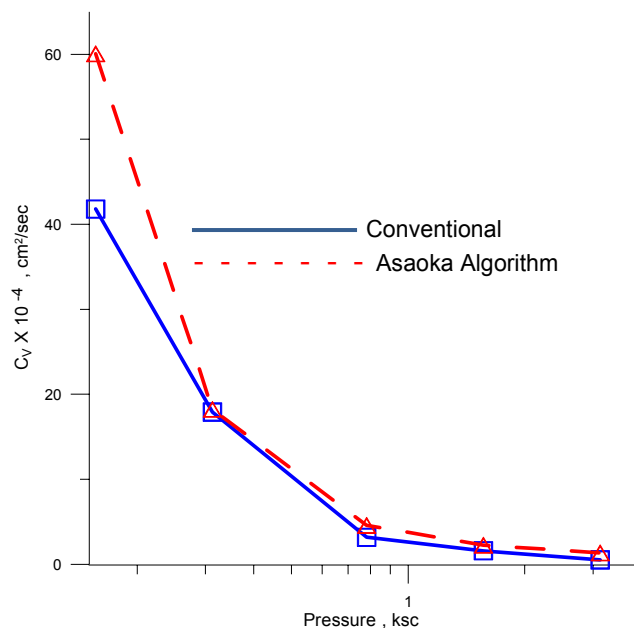
วิธีการทดสอบแบบ Asaoka algorithm ให้ผลทดสอบที่น่าเชื่อถือไม่น้อยกว่า 90% จากการทดสอบแบบดั้งเดิม



ภาพประกอบที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการทรุดตัวของดินอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตรการอัดตัวคายนํ้าแบบดั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว Asaoka Algorithm

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการอัดตัวของดินตัวอย่างโดยใช้โปรแกรม Asaoka Algorithm

Compressibility Parameter	การทดสอบการอัดตัวคาย																				% Error เฉลี่ย
	แบบดั้งเดิม										แบบอัตโนมัติ Asaoka Algorithm										
	ดินเหนียวปากพ่น					ดินเหนียวกรุงเทพฯปั้นขึ้นรูป					ดินเหนียวปากพ่น					ดินเหนียวกรุงเทพฯปั้นขึ้นรูป					
	ความลึก (m)					กดที่แรงดัน (ksc)					ความลึก (m)					กดที่แรงดัน (ksc)					
	หลุมที่ 2		หลุมที่ 3								หลุมที่ 2		หลุมที่ 3								
	6	9	3	6	9	2.1	2.□	2.6	2.□	3.2	6	9	3	6	9	2.1	2.□	2.6	2.□	3.2	
C_c , cm^2/sec	0.56□	0.□□0	0.930	0.795	0.6□1	0.□26	0.39□	0.332	0.300	0.2□1	0.511	0.□9□	0.□97	0.73□	0.6□1	0.511	0.□26	0.391	0.362	0.311	10.06
OCR	1.27	1.05	1.67	1.27	1.05	-	-	-	-	-	1.30	0.□9	2.02	1.3□	0.92	-	-	-	-	-	11.29
σ'_{mp} , t/m^2	0.55	0.72	0.3□	0.55	0.71	0.63	0.69	0.75	0.□9	0.93	0.56	0.61	0.□6	0.5□	0.63	0.63	0.6□	0.7□	0.□0	0.□5	7.6□



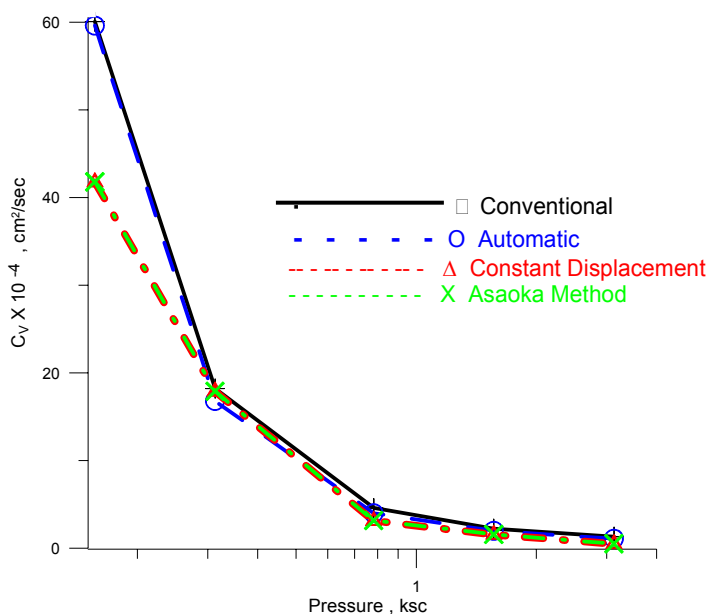
ภาพประกอบที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตรการอัดตัวคายนํ้าแบบดั้งเดิมกับแบบอัตโนมัติ Asaoka Algorithm

4.2.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบดั้งเดิมกับแบบรวดเร็ว (โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง, โปรแกรม Differential settlement Algorithm และโปรแกรม Asaoka Algorithm)

ผลการทดสอบความแม่นยำของการทดสอบแบบดั้งเดิมกับการทดสอบแบบอัตโนมัติใช้ดินเหนียวอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ที่ระดับความลึก 3 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ของค่า σ'_{mp} , ค่า OCR และค่า C_c มีค่า Error เฉลี่ยไม่มากกว่า 10% ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินดังภาพที่ 4.9 พบว่าโปรแกรม Differential settlement Algorithm และโปรแกรม Asaoka Algorithm ได้ค่า C_v น้อยกว่าวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิมและแบบอัตโนมัติในช่วงแรกของแรงดัน แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นพบว่าค่าของ C_v ของทุกวิธีการทดสอบกลับมาใกล้เคียงกันจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของวิธีการทดสอบ 4 วิธีของดินตัวอย่าง อำเภอบางพลี จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตร

Compressibility Parameter	การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ			
	แบบดั้งเดิม	แบบอัตโนมัติ		
		โปรแกรม อัตโนมัติ 24 ชั่วโมง	โปรแกรม Differential settlement Algorithm	โปรแกรม Asaoka Algorithm
Compression Index, C_c cm^2/sec	0.864	0.855	0.864	0.864
Over Consolidation Ratio, OCR	1.69	1.68	1.88	1.83
Max. Past Pressure, σ'_{mp} ksc.	0.39	0.38	0.40	0.39



ภาพประกอบที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าดัชนีการอัดตัวของดินอำเภอบางพลี จังหวัดนครศรีธรรมราช หลุมเจาะที่ 1 ระดับความลึก 3 เมตรการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิม, โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง, โปรแกรม Differential settlement Algorithm และ โปรแกรม Asaoka algorithm

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

1. เครื่องทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมาประกอบด้วย National Instrument Card (NI-DAQ) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ชนิดต่างๆที่มีหน้าที่แปลงสัญญาณเข้า-สัญญาณออก, Signal Conditioning Unit เป็นอุปกรณ์สำหรับขยายสัญญาณจาก Transducer และจ่ายไฟฟ้าให้กับ Transducer, Electro Pneumatic Regulator เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันลมโดยรับคำสั่งจากโปรแกรม LabVIEW ผ่านคอมพิวเตอร์, Air Cylinder เป็นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนแรงดันลมที่ส่งมาจาก Electro Pneumatic Regulator ให้กลายเป็นแรงกดลงบนตัวอย่างดิน, Load Cell Transducer เป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงกด, Displacement Transducer เป็นอุปกรณ์ใช้วัดค่าการทรุดตัวของดิน, Steel Frame, อุปกรณ์พร้อมสายต่อพ่วง, เครื่องสำรองไฟฟ้า, เครื่องคอมพิวเตอร์และ LabVIEW ทั้งหมดนี้เป็นส่วนประกอบของเครื่องทดสอบการอัดตัวคายนํ้าที่พัฒนาขึ้น

2. กลไกในการตัดสินใจเพิ่มนํ้าหนักกดของเครื่องทดสอบการอัดตัวคายนํ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถจำแนกออกตามโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบได้ดังนี้

2.1 โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง (ASTM D-2453) ใช้กลไกการจับเวลาในการทดสอบ เมื่อใดเวลาที่ใช้ในการทดสอบมากกว่า 24 ชั่วโมงให้ทำการเพิ่มนํ้าหนักกดทันที

2.2 โปรแกรม Differential settlement Algorithm ใช้การสังเกตผลต่างที่ได้ของค่าการทรุดตัวที่อ่านได้จาก Displacement transducer เมื่อค่าผลต่างของค่าการทรุดตัวที่ได้น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ (ค่าความละเอียดเท่ากับ 1/1000 มม.) ให้ทำการเพิ่มนํ้าหนักกดทันที

2.3 โปรแกรม Asaoka Algorithm ใช้หลักการแบ่งช่วงเวลาในการอ่านค่าการทรุดตัว (S) ออกเป็นส่วนๆเท่ากัน (Δt) นำมาพล็อตกราฟระหว่างแกน S_{i-1} กับ S_i จะได้เส้นกราฟเป็นตรง ทำการพล็อตกราฟเส้นตรง 45 องศาจากจุด Origin เป็นกราฟเส้นที่สอง เมื่อใดที่เส้นตรงของกราฟข้อมูลทั้งสองเส้นตัดกัน ให้ทำการเพิ่มนํ้าหนักกดทันที

3. การทดสอบความถูกต้อง

3.1 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบอัตโนมัติโดยเครื่องทดสอบและโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา (โปรแกรมอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง) ผลการทดสอบที่ได้ ค่า C_c , ค่า OCR และค่า σ'_{mp} จากทั้งสองวิธีให้ผลการทดสอบที่เท่ากัน (แตกต่างกันไม่เกิน 3%)

3.2 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบรวดเร็วโดยใช้ Differential settlement Algorithm ผลการทดสอบพบว่า ค่า C_c และค่า σ'_{mp} ใกล้เคียงกัน (Error น้อยกว่า 10%) ส่วนค่า OCR จะมี Error เฉลี่ยอยู่ที่ 10%

3.3 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบดั้งเดิมและการทดสอบแบบรวดเร็วโดยใช้ Asaoka Algorithm ผลการทดสอบพบว่า ค่า σ'_{mp} ใกล้เคียงกัน (Error น้อยกว่า 10%) ส่วนค่า C_c และค่า OCR จะมี Error เฉลี่ยอยู่ที่ 10%

4. การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการอัดตัวคาน้ำแบบรวดเร็วที่โดยเครื่องมือพัฒนาขึ้น ผลการทดสอบพบว่า การทดสอบโดยใช้ Differential settlement Algorithm และ Asaoka Algorithm มีผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่วิธี Asaoka Algorithm ใช้เวลาในการทดสอบน้อยกว่า โดยใช้เพียง 2-4 ชั่วโมง ในขณะที่วิธี Differential settlement Algorithm ใช้เวลาในการทดสอบ 4-6 ชั่วโมง

ข้อเสนอแนะ

1. การทดสอบการอัดตัวคาน้ำของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ต่อเนื่องและสัญญาณรบกวนต่างเป็นสิ่งที่มีอย่างมากในการทดสอบ
2. ค่าที่ยอมรับได้ที่ใช้ในการทดสอบ (Allowable Delta) เท่ากับ 1/1000 mm. (ข้อมูลที่ได้จะต้องน้อยกว่าเท่ากับค่าที่ยอมรับได้อย่างน้อยเป็นจำนวน 20 ค่า)
3. ความละเอียดของข้อมูลที่ได้จะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ Transducer เป็นสำคัญ
4. ระยะเวลาในการทดสอบที่ได้เฉพาะดินเหนียวอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช และดินเหนียวกรุงเทพป็นขึ้นรูปเท่านั้น ในดินเหนียวอื่นๆอาจใช้เวลาในการทดสอบไม่เท่ากัน

บรรณานุกรม

- Asaoka, A. 1978. Observational Procedure of Settlement Prediction. *Soils and Foundations*, Vol.18, No. 4, Dec. 1978. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. pp. 87-101.
- ASTM, 1998. Annual book of ASTM standard, West Conshohocken, PA, 1998. Copyright, American Society for Testing and Materials, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959
- A. Sridharan , H.B. Nagaraj and N. Srinivas (1999) ,Rapid method of consolidation testing ,Canadian geotechnical journal ,Volume 36 , pp.392-400
- Bruce Mihura(2001),LabVIEW™ for data Acquisition, Prentice Hall PRT, Upper Saddle River, New Jersey.
- Consolidation (ASTM D 2435), Geotechnical Laboratory Research Facilities, Civil Engineering of ArlingtonUniversity, [http://geotech.uta.edu/lab/equip/index .htm#top](http://geotech.uta.edu/lab/equip/index.htm#top))
- Lab 9 - Consolidation Test , SOIL LAB PROCEDURES , Department of Civil Engineering Southern Illinois University Edwardsville ,
(http://www.ce.siu.edu/354L/Lab%20Help%20Desk/Consolidation/Consolidation_Procedure.pdf)
- Mohammed A. Gabr(2006), Adaptation of Geotechnical Experiments for Remote Testing, N.C. State University, [http://www.ce.ncsu.edu/faculty/matzen/ Geotech_2006.pdf](http://www.ce.ncsu.edu/faculty/matzen/Geotech_2006.pdf)
- กิจไพบูรณ์ ชีวพันธุ์ศรี (2550)การออกแบบแอปพลิเคชันในระบบกราฟิกด้วย LabVIEW , กรุงเทพฯ,ซีเอ็ดดูเคชั่น
- ภูซงค์ สัจจะวงศ์(2550),Lab VIEW เบื้องต้น[http://images.sangkhawong.multiply.com /attachment/0/SD@mfAoKCEcAAAG4nmA1/CH%201%20Introduction.doc?nmid=98555931](http://images.sangkhawong.multiply.com/attachment/0/SD@mfAoKCEcAAAG4nmA1/CH%201%20Introduction.doc?nmid=98555931)
- มานะ อภิพัฒน์มนตรี (2529), วิศวกรรมปฐพีและฐานราก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่ 1
- วรากร ไม้เรียง , จิตรพัฒน์ โชติไกร และประทีป ดวงเดือน(2525), ปฐพีกลศาสตร์ ทฤษฎีและปฏิบัติการ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 2.

สุขสันต์ หอพิบูลสุข , วรรณชัย เกษกัน (2548) ,การทดสอบอัดตัวคายนํ้าอย่างรวดเร็วของดิน
เหนียวกรุงเทพ , การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10
สถาพร ภูวิจิตร(2541), ทดลองปฐพีกลศาสตร์, ไลบรารี นาย พับลิชชิ่ง.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

วิธีประกอบเครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำอัตโนมัติ

ขั้นตอนของการประกอบอุปกรณ์ทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็วมีทั้งหมด 11 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1.1 นำ Farm มาประกอบตั้งระดับน้ำดังแสดงในภาพที่ ก-1



ภาพประกอบที่ ก-1 การหาระดับน้ำของ Farm เครื่องทดสอบ

ขั้นตอนที่ 1.2 เอา Air cylinder มาประกอบเข้ากับ Fram ยึดด้วยน็อต จำนวน 4 ตัว ดังแสดงในภาพที่ ก-2



ภาพประกอบที่ ก-2 แสดงการประกอบ Air Cylinder เข้ากับ Farm

ขั้นตอนที่ 1.3 นำเอาแท่งสแตนเลสกลิ้งใส่ที่ปลาย Air cylinder เพื่อใช้ยึดกับ Load cell ดังแสดงในภาพที่ ก-3



ภาพประกอบที่ ก-3 แสดงการต่อแท่งสแตนเลสกลิ้งเข้ากับ Air cylinder

ขั้นตอนที่ 1.4 เอา Load cell ต่อกับแท่งสแตนเลสกลิ้งดังแสดงในภาพที่ ก-4



ภาพประกอบที่ ก-4 แสดงการต่อ Load cell เข้ากับแท่งกลึงสแตนเลส

ขั้นตอนที่ 1.5 นำเอาแผ่นสังกะสีพร้อมกันแท่งสแตนเลสยึดกับด้านล่างของ Load cell ดังแสดงในภาพที่ ก-5



ภาพประกอบที่ ก-5 แสดงการยึดแผ่นสังกะสีกับแท่งสแตนเลสเข้ากับ Load cell

ขั้นตอนที่ 1.6 ติดตั้ง Displacement Transducer พร้อมอุปกรณ์ปรับระดับแบบแม่เหล็กบน แผ่นสังกะสีข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ ก-6 เสร็จสิ้นขั้นตอนในการประกอบตัวอุปกรณ์จะได้อุปกรณ์ที่ ก-7



ภาพประกอบที่ ก-6 แสดงการติดตั้ง Displacement Transducer



ภาพประกอบที่ ก-7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบหลังติดตั้งแบบสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 1.7 เป็นขั้นตอนการต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เริ่มจากต่อ NI-DAQ เข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB (a-a') ต่อจากนั้นต่อเข้ากับ Signal Conditioning Unit (b-b') ดังแสดงในภาพที่ ก-8



ภาพประกอบที่ ก-8 แสดงการต่ออุปกรณ์ของคอมพิวเตอร์, NI-DAQ และ Signal Conditioning Unit เข้าด้วยกัน

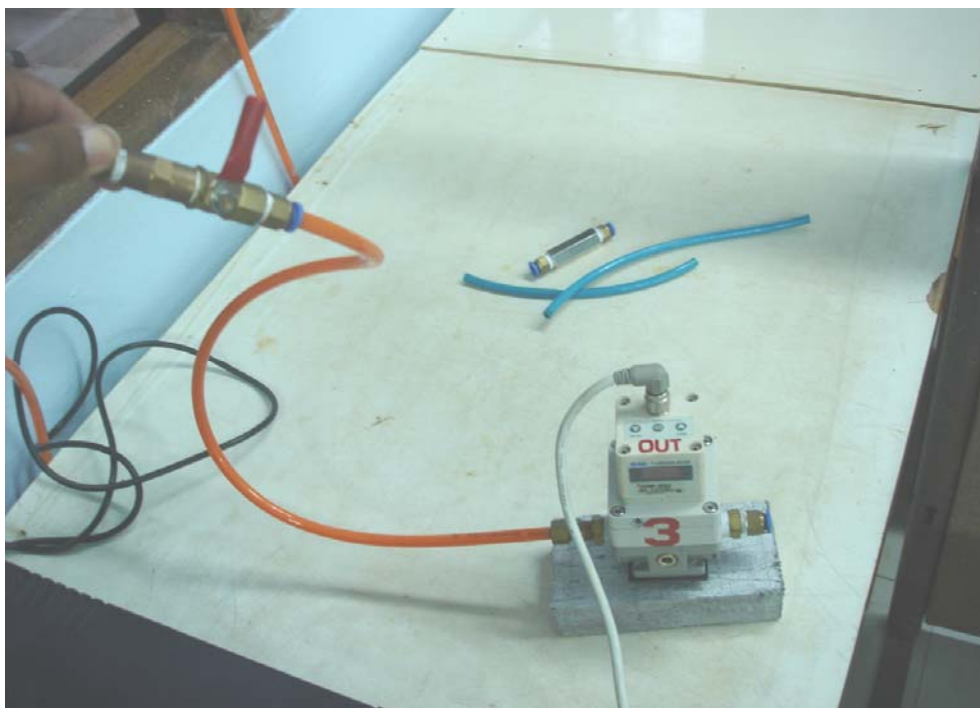
ขั้นตอนที่ 1.8 เตรียมปั๊มลม (ดังภาพที่ ก-9) ตรวจสอบแรงดันในถังลมติดตั้งอุปกรณ์ดักจับความชื้น (ดังภาพที่ ก-10) จากนั้นต่อสายลมสีส้มมายังวาล์วสำหรับเปิด-ปิดก่อนต่อเข้าสู่เครื่อง Electro Pneumatic Regulator (ดังแสดงในภาพที่ ก-11) แล้วต่อสายลมสีฟ้าจาก เครื่อง Electro Pneumatic Regulator ทางด้านออกผ่านอุปกรณ์การกันไหลย้อนของลม (ดังแสดงในภาพที่ ก-12) แล้วต่อเข้ากับ Air cylinder ที่วาล์วด้านบน (UP) ดังแสดงในภาพที่ ก-13



ภาพประกอบที่ ก-9 แสดงภาพปั๊มลมและการตรวจสอบแรงดันในถัง



ภาพประกอบที่ ก-10 แสดงภาพอุปกรณ์ดักจับความชื้นที่ต่อเข้ากับถังลม



ภาพประกอบที่ ก-11 แสดงภาพการต่อสายสีส้มจากปั๊มลมผ่านวาล์วก่อนต่อเข้ากับเครื่อง Electro Pneumatic Regulator



ภาพประกอบที่ ก-12 แสดงภาพการต่อสายสีฟ้าจากเครื่อง Electro Pneumatic Regulator ผ่านอุปกรณ์กันการไหลย้อนก่อนต่อเข้าสู่ Air cylinder



ภาพประกอบที่ ก-13 แสดงภาพการต่อสายสีฟ้าอุปกรณ์กันการไหลย้อนเข้าสู่ Air cylinder ที่วาล์วทางด้านบน (UP)

ขั้นตอนที่ 1.9 นำตัวอย่างดินเหนียวที่จะทำการทดสอบมาวางบนอุปกรณ์ทดสอบ ดังภาพที่ ก-14



ภาพประกอบที่ ก-14 แสดงภาพอุปกรณ์พร้อมตัวอย่างดิน

ขั้นตอนที่ 1.10 เป็นการต่อสายอุปกรณ์วัดค่าต่างๆเข้ากับ Signal Conditioning Unit ดังนี้ (ดังภาพที่ ก-15)

10.1 ต่อสาย Load cell ในช่องสัญญาณ Input สามารถเลือกช่องสัญญาณได้จาก 1 ถึง 3

10.2 ต่อสาย Displacement Transducer ในช่องสัญญาณ Input ที่เหลือ

10.3 ต่อสายควบคุมเครื่อง Electro Pneumatic Regulator จากช่องสัญญาณ Output



ภาพประกอบที่ ก-15 แสดงการต่อสายอุปกรณ์ในการวัดต่างๆเข้ากับ Signal Conditioning Unit

ขั้นตอนที่ 1.11 เมื่อทำตามขั้นตอนข้างต้นแล้วจะได้ดังภาพที่ ก-16 เป็นการสิ้นสุดในกระบวนการเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ แล้วเข้าสู่ขั้นตอนของการทดสอบผ่านระบบคอมพิวเตอร์ในขั้นตอนต่อไป



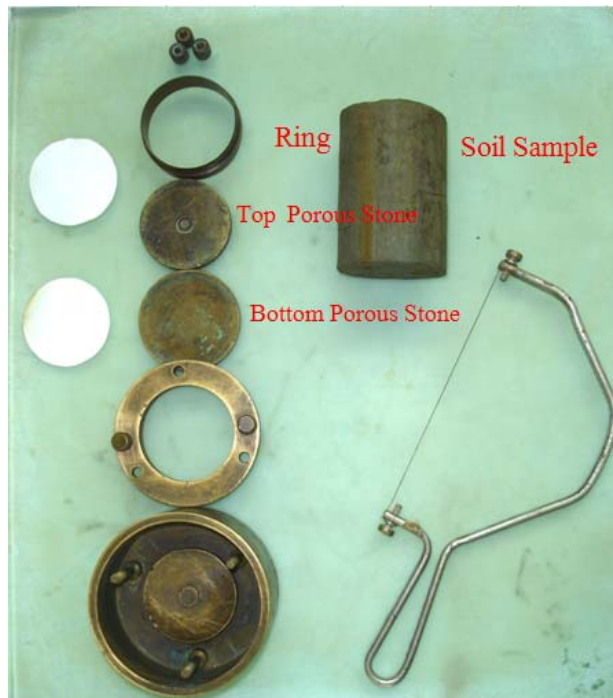
ภาพประกอบที่ ก-16 แสดงกระบวนการเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

ภาคผนวก ข.

วิธีใช้เครื่องทดสอบ

วิธีการใช้เครื่องมือประกอบด้วย การเตรียมตัวอย่าง และการนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมตัวอย่าง ประกอบด้วยที่ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการทดสอบและ Consolidation Cell ดังแสดงในภาพที่ ข-1 นำแหวน (Ring) กดลงบนดินตัวอย่างดังภาพที่ ข-2 นำกระดาษกรองมาปิดดินตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่างดังแสดงในภาพที่ ข-3 และนำมาวางลงใน Consolidate Cell โดยลำดับดังนี้ Bottom Porous Stones (ดังแสดงในภาพที่ ข-4), ดินตัวอย่าง (ดังแสดงในภาพที่ ข-5), Top Porous Stones (ดังแสดงในภาพที่ ข-6), วงแหวนล็อกชั้นด้วยน้ำ Cell (ดังแสดงในภาพที่ ข-7) และฝาปิดด้านบน Cell (ดังแสดงในภาพที่ ข-8) จากนั้นทำการใส่น้ำใน เซลล์ให้ท่วมตัวอย่างดิน (ดังแสดงในภาพที่ ข-9)



ภาพประกอบที่ ข-1 แสดงตัวอย่างดินเหนียวอ่อนและ Consolidation cell



ภาพประกอบที่ ข-2 แสดงการกดวงแหวน (Ring) ลงบนดินตัวอย่าง



ภาพประกอบที่ ข-3 แสดงการนำกระดาษกรองปิดดินตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่าง



ภาพประกอบที่ ข-4 แสดงการนำ Bottom Porous Stones วางลงใน Consolidation Cell



ภาพประกอบที่ ข-5 แสดงการนำตัวอย่างดินวางลงใน Consolidation Cell



ภาพประกอบที่ ข-6 แสดงการนำ Top Porous Stones วางลงใน Consolidation Cell



ภาพประกอบที่ ข-7 แสดงการนำวงแหวนสำหรับยึดดินตัวอย่างวางลงใน Consolidation Cell



ภาพประกอบที่ ข-8 แสดงนำฝาปิดวางลงใน Consolidation Cell



ภาพประกอบที่ ข-9 แสดงการเติมน้ำลงใน Consolidation cell จนท่วมดินตัวอย่าง

2. การเตรียมตัวอย่างบนเครื่องทดสอบ เริ่มจากการนำ Consolidation cell วางบนเครื่องทดสอบดังแสดงในภาพที่ ข-10 ทำการเปิดวาล์วของกระบอกลมทั้งวาล์วบน (UP) และล่าง (RE) ดังแสดงในภาพที่ ข-11 จากนั้นทำการดึงก้านกระบอกลมลงมาจนสัมผัส Consolidation cell ดังแสดงในภาพที่ ข-12 และทำการปิดวาล์วล่าง (RE) กระบอกลมดังแสดงในภาพที่ ข-13 นำ Displacement Transducer พร้อมแท่นยึดแม่เหล็กโดยนำปลาย Displacement Transducer วางบนแผ่นสังกะสีดังแสดงในรูปที่ ข-14



ภาพประกอบที่ ข-10 แสดงการนำ Consolidation cell วางบนเครื่องทดสอบ



ภาพประกอบที่ ข-11 แสดงการเปิดวาล์วของกระบอกลมทั้งวาล์วบน (UP) และล่าง (RE)



ภาพประกอบที่ ข-12 แสดงการติดตั้งกระบอกกลมมาสัมผัส Consolidation cell



ภาพประกอบที่ ข-13 แสดงการปิดวาล์วล่าง (RE) ของกระบอกกลม




ภาพประกอบที่ ข-14 แสดงการติดตั้ง Displacement Transducer พร้อมแท่นยึดแม่เหล็ก

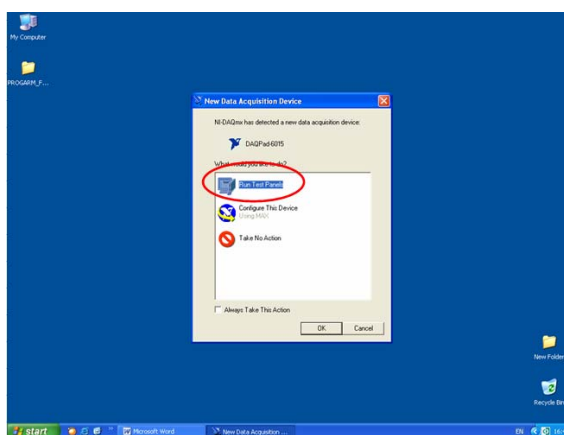
4.2.1 การใช้โปรแกรมทดสอบ

ขั้นตอนของโปรแกรมการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็วประกอบไปด้วย ขั้นตอนหลักๆประกอบด้วย การทดสอบสัญญาณของอุปกรณ์ต่างๆ, การเข้าสู่โปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน, การเปิดโปรแกรมการทดสอบเริ่มจากเปิดไฟล์ Global.vi, การเปิดไฟล์ Consolidation V4.vi, จุดสิ้นสุดการทดสอบและการเรียกไฟล์ผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้

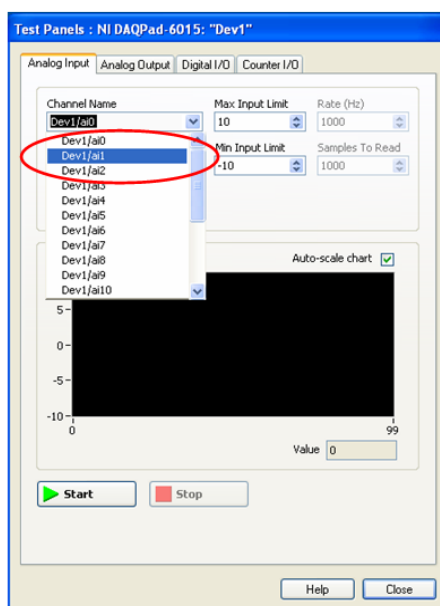
ขั้นตอนที่ 1 การทดสอบสัญญาณของอุปกรณ์ต่างๆ

เริ่มจากการเปิดโปรแกรม NI-DAQ บน Window จะปรากฏหน้าต่างดังแสดงในภาพที่ ข-15 เลือก แถบ  Run Test Panels แล้วกดปุ่ม “OK” จะปรากฏหน้าต่างชื่อ Test Panels: NI DAQPad-6015: “Dev1” จากนั้นเลือกปุ่ม Channel Name จากแถบ Analog Input ดังแสดงในภาพที่ ข-16 ในการเลือก Channel Name นั้นให้อ้างอิงกับเครื่อง Signal Conditioning Unit โดยสัญญาณ Input จากช่องสัญญาณ 1 ถึง 3 นั้น ก็คือ Channel Name “Dve1/ai1” “Dve1/ai2” และ “Dve1/ai3” ในแถบของ Analog Input ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบสัญญาณ Input โดยเลือก

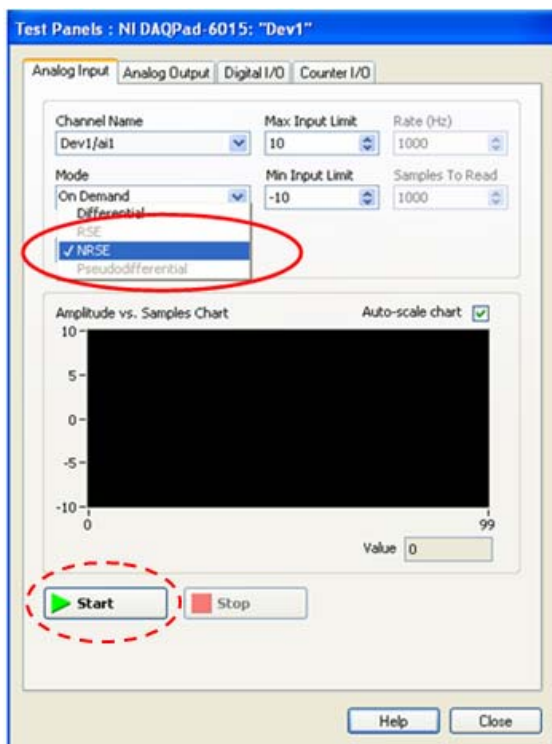
ปุ่ม Mode เลือก NRSE แล้วกดปุ่ม Start ดังแสดงในภาพที่ ข-17 จะปรากฏเส้นกราฟสัญญาณที่เราเลือก ทำการปรับขึ้น-ลงแล้วสังเกตสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปตามที่เราทำหรือไม่ดังแสดงในภาพที่ ข-18 เป็นการตรวจสอบการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์วัดกับระบบคอมพิวเตอร์หากไม่มีการเคลื่อนไหวของเส้นกราฟให้ทำการปิดและเปิดเครื่อง NI-DAQ ใหม่อีกครั้ง ส่วนการทดสอบสัญญาณ Output เป็นการทดสอบอุปกรณ์ควบคุมแรงดันลม (Electro Pneumatic Regulator) โดยเลือกแถบ Analog Output ทำการเลือกช่องสัญญาณ “Dev1/ao0” ในแถบของ Channel Name ในการทดสอบสัญญาณ Output โดยการปรับค่า Output Voltage ขึ้น-ลงแล้วกดปุ่ม “Update” ดังแสดงในภาพที่ ข-19 แล้วสังเกตอุปกรณ์ควบคุมแรงดันลมว่าเปลี่ยนแปลงไปตามที่เราทำการสั่งหรือไม่



ภาพประกอบที่ ข-15 แสดงหน้าต่างที่ปรากฏหลังจากทำการเปิดเครื่อง NI-DAQ



ภาพประกอบที่ ข-16 แสดงการเลือก Channel Name ของ Analog Input

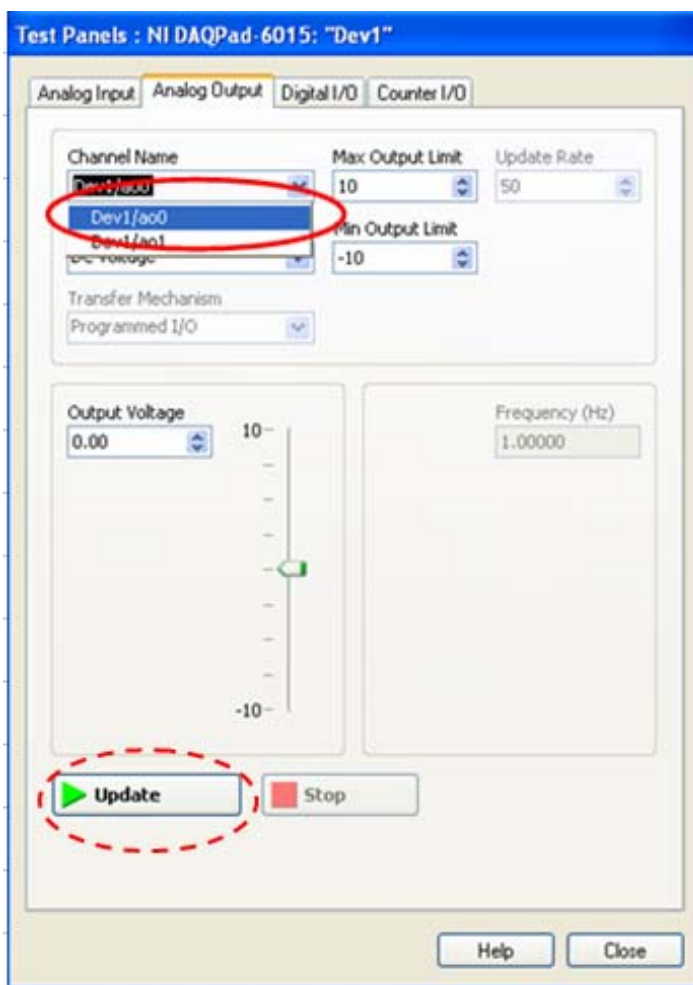


ภาพประกอบที่ ข-17 แสดงการเลือก Mode ทดสอบสัญญาณของ Analog Input



ภาพประกอบที่ ข-18 แสดงตัวอย่างกราฟเมื่อทำการทดสอบสัญญาณ Input Channel

“Dev1/ai2” Mode “NRSE”



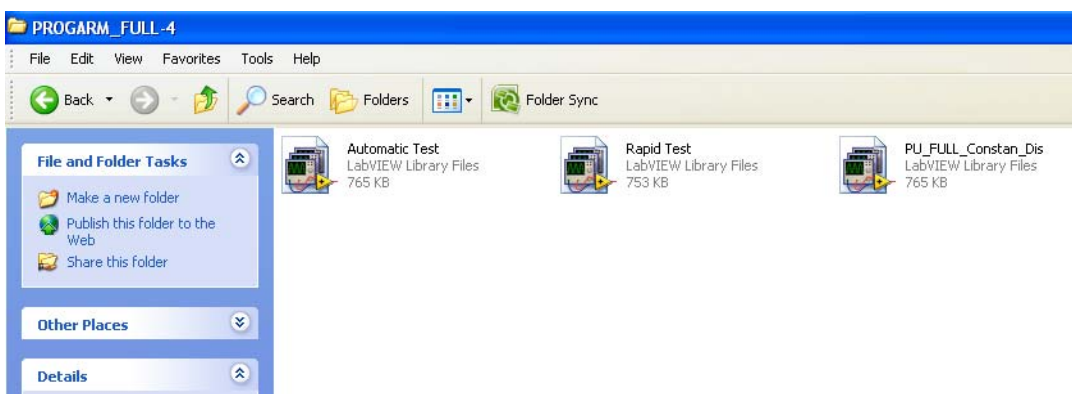
ภาพประกอบที่ ข-19 แสดงการเลือก Channel Name ของ Analog Output

ขั้นตอนที่ 2 การเข้าสู่โปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน

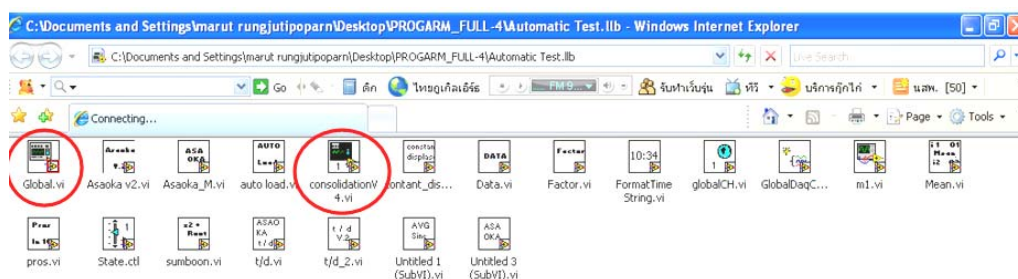
เมื่อเข้าโปรแกรมดังรูปที่ ข-20 จะปรากฏโปรแกรมในการทดสอบ 2 โปรแกรม (ดังภาพที่ ข-21) คือ โปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบอัตโนมัติ (Automatic test) และโปรแกรมการทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างรวดเร็ว (Rapid test) ในการทำงานโปรแกรมทั้งจะมีลักษณะการทำงานคล้ายกัน ต่างกันตรงกระบวนการตัดสินใจในการเพิ่มน้ำหนักกด โดยการทดสอบแบบอัตโนมัติจะเป็นการทดสอบแบบหนึ่งน้ำหนักกดใช้เวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ส่วนการทดสอบแบบรวดเร็วจะทำการเพิ่มน้ำหนักกดทันทีตามเงื่อนไขที่กำหนดค่ายอมรับได้ตามที่เรากรอกไว้ในโปรแกรม โปรแกรมนี้จะใช้เวลาในการทดสอบ 1 น้ำหนักกดอยู่ที่ 2-4 ชั่วโมง (ระยะเวลาขึ้นอยู่กับลักษณะของดินแต่ละชนิด) แต่ไม่เกิน 24 ชั่วโมงหรือจำนวนชั่วโมงที่กำหนดภายในโปรแกรมทั้งสองจะมีโปรแกรมย่อยดังภาพที่ ข-22




ภาพประกอบที่ ข-20 แสดงไอคอนของโปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

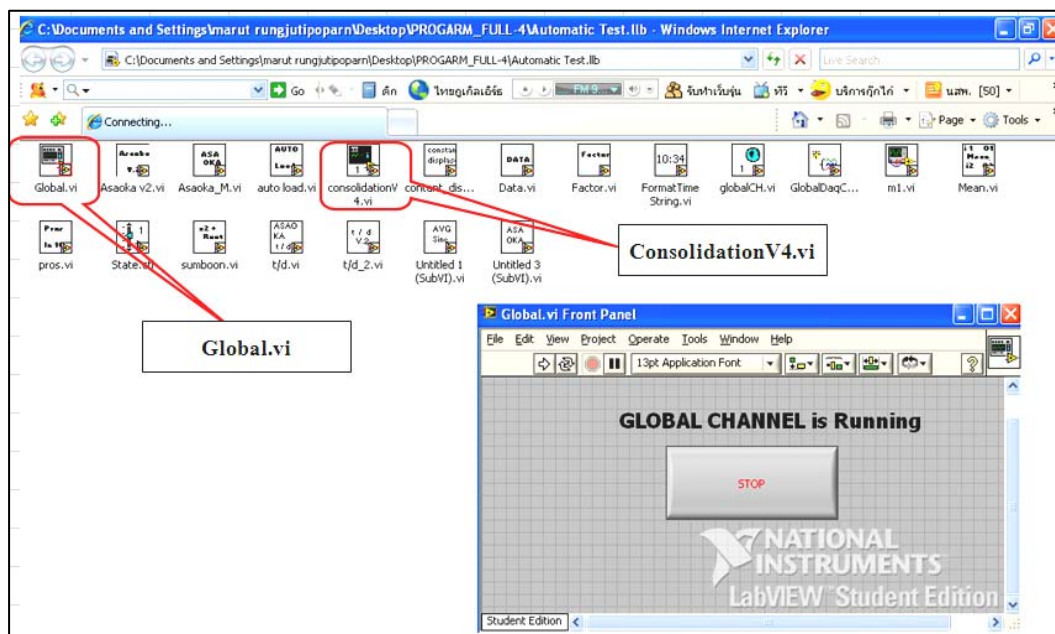


ภาพประกอบที่ ข-21 แสดงไอคอนของโปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายน้ำทั้ง 3 โปรแกรม



ภาพประกอบที่ ข-22 แสดงไอคอนภายในของโปรแกรมทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ Automatic Consolidation Test

ขั้นตอนที่ 3 ในเปิดโปรแกรมการทดสอบเริ่มจากเปิดไฟล์ “Global.vi” (ดังภาพที่ ข-23) และเริ่มดำเนินการทดสอบโดยการกดปุ่ม  บนไฟล์ “Global.vi” (ดังภาพที่ ข-24)





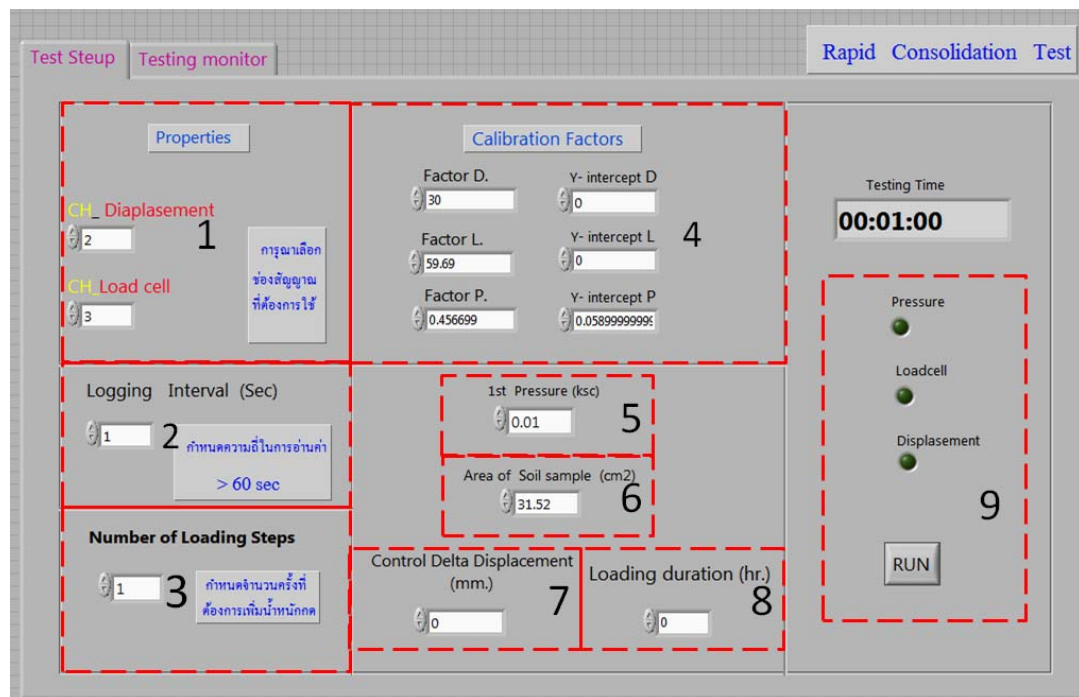
ภาพประกอบที่ ข-23 แสดงไฟล์ GLOBALDaq.vic และ ConsolidationV4.vi



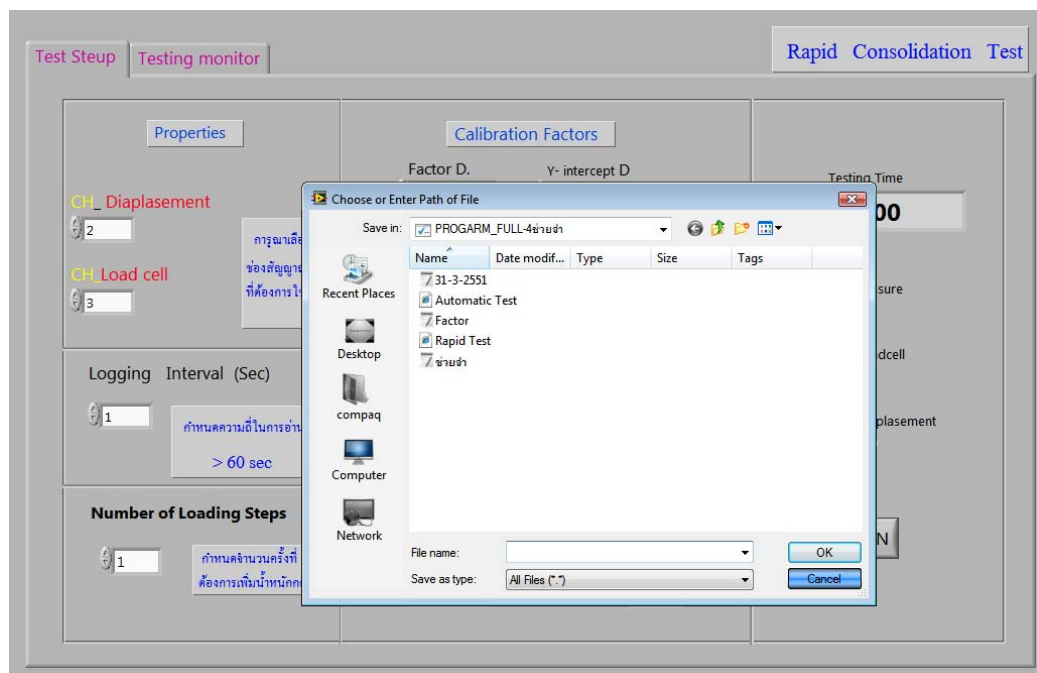
ภาพประกอบที่ ข-24 แสดงการ Run ไฟล์ GLOBALDaq.vi

ขั้นตอนที่ 4 เลือกไฟล์ Consolidation V4.vi พร้อมทำตามขั้นตอนดังนี้ (ดังภาพที่ ข-25)

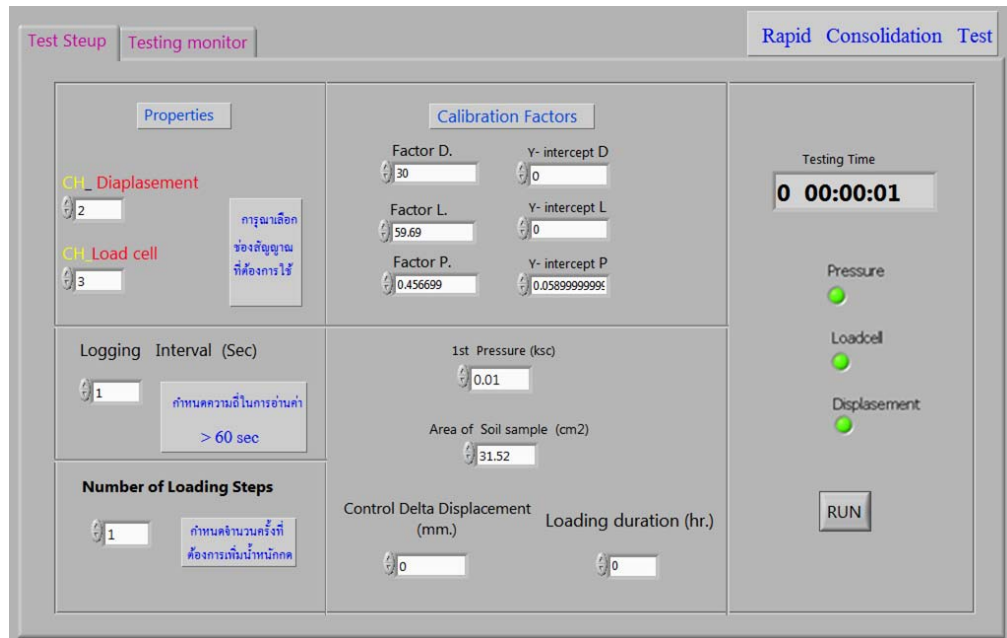
1. เลือกช่องสัญญาณ Input ของ Displacement Transducer และ Load cell ตามที่เราต่อไว้กับ Signal Conditioning Unit
2. กำหนดช่วงเวลาในการอ่านค่า (Logging time interval) (ไม่น้อยกว่า 60 วินาที ,หน่วยเป็น วินาที)
3. กำหนดจำนวนครั้งของน้ำหนักกด (Number of loading step) โดยน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนยกกำลังสองจากค่าแรก (LIR=1)
4. กรอกราคาปรับแก้ของอุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Displacement Transducer (D) , Load cell (L) และ Electro Pneumatic Regulator (P) ตามลำดับ
5. กำหนดค่าหนักกดครั้งแรก (First pressure used) (หน่วยเป็น ksc)
6. กรอกราคาพื้นที่หน้าตัดของดินเหนียวตัวอย่าง (Area of soil sample) ที่นำมาทดสอบ (หน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร , cm^2)
7. การประมวลผลแยกออกเป็นของ 2 โปรแกรมโดยโปรแกรมการทดสอบแบบรวดเร็ว (Rapid consolidation test) นั้นจะกำหนดค่าที่ยอมรับ ส่วนโปรแกรมการทดสอบแบบอัตโนมัติ (Automatic consolidation test) จะไม่มีคำสั่งนี้ เนื่องจากเป็นการทดสอบแบบใช้เวลา 24 ชั่วโมงเป็นตัวกำหนดในการเพิ่มน้ำหนักกดแบบอัตโนมัติ
8. กำหนดระยะเวลาในการทดสอบขั้นต่ำ (Time control, หน่วยเป็น ชั่วโมง) ในเพิ่มน้ำหนักกดของการทดสอบแบบรวดเร็ว สำหรับการทดสอบที่ต้องการผลในช่วงเวลาที่ต้องการ
9. เริ่มต้นการทดสอบโดยการกดปุ่ม  และ กดปุ่ม  บนไฟล์ Consolidation V4.vi
10. โปรแกรมจะถามการบันทึกข้อมูลผลการทดสอบโดยสามารถตั้งชื่อ File ที่ต้องการดังภาพที่ ข-26 เมื่อกดปุ่ม “ok” โปรแกรมจะทำการทดสอบแบบอัตโนมัติดังแสดงในภาพที่ ข-27 โดยเราสามารถติดตามผลการทดสอบได้ที่ แถบ Online Displacement บนโปรแกรม Consolidation V4 ดังแสดงในภาพที่ ข-28
11. บนหน้าต่าง Real Time ของโปรแกรม Consolidation V4 นั้นจะมีสถานการณ์ทำงานของอุปกรณ์ต่าง



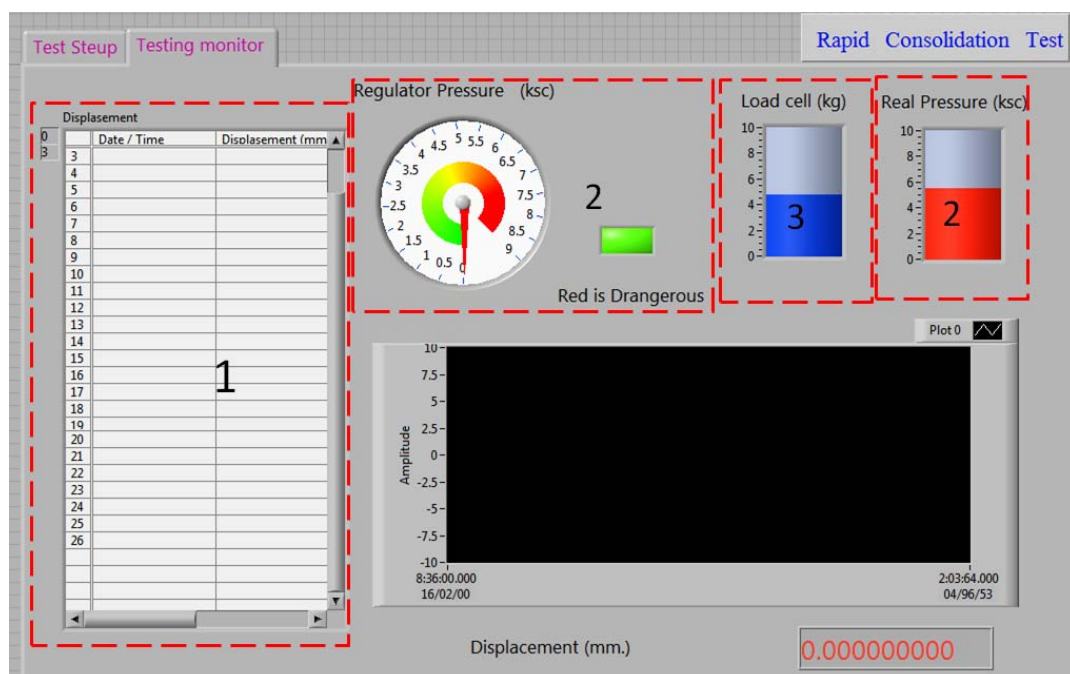
ภาพประกอบที่ ข-25 แสดงการใช้โปรแกรมการอัดตัวคายน้ำแบบรวดเร็ว (Rapid Test)



ภาพประกอบที่ ข-26 แสดงการบันทึกไฟล์การทำงานของโปรแกรม



ภาพประกอบที่ ข-27 แสดงการทำงานของหน้าต่าง Setup ภายในโปรแกรมทดสอบ



ภาพประกอบที่ ข-28 แสดงตัวอย่างภาพการทำงานของหน้าต่าง Online Displacement ของโปรแกรมทดสอบ

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อโปรแกรมเพิ่มน้ำหนักจนครบตามที่กำหนดไว้และสิ้นสุดน้ำหนักกดสุดท้าย โปรแกรมจะหยุดการทำงานโดยอัตโนมัติ

ขั้นตอนที่ 6 การเรียกไฟล์ผลการทดสอบโดยใช้ชื่อที่ตั้งไว้สามารถใช้โปรแกรม Microsoft Excel เปิดอ่านค่า ดังภาพที่ ข-29 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลต่อไป จำนวนแถวของข้อมูลจะเท่ากับค่าจำกัดของ Excel คือ 65,536 แถว

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Date	Time	Displacement	Loadcell	Pressure				
2	31/7/2551	17:01:13	0.0004	0.0024	0.01				
3	31/7/2551	17:01:14	0.0004	0.0024	0.02				
4	31/7/2551	17:01:15	0.0021	0.0034	0.02				
5	31/7/2551	17:01:16	0.0024	0.0004	0.02				
6	31/7/2551	17:01:17	0.0031	0.0015	0.02				
7	31/7/2551	17:01:18	0.0001	0.0009	0.02				
8	31/7/2551	17:01:19	0.8366	28.7228	0.02				
9	31/7/2551	17:01:20	0.8293	28.7140	0.02				
10	31/7/2551	17:01:21	0.8278	28.7033	0.02				
11	31/7/2551	17:01:22	0.8296	28.6997	0.02				
12	31/7/2551	17:01:23	0.8271	28.6932	0.02				
13	31/7/2551	17:01:24	0.8261	28.6912	0.02				
14	31/7/2551	17:01:25	0.8278	28.6901	0.02				
15	31/7/2551	17:01:26	0.8271	28.6854	0.02				
16	31/7/2551	17:01:27	0.8253	29.8557	0.02				
17	31/7/2551	17:01:28	0.8265	15.2118	0.02				
18	31/7/2551	17:01:29	0.8277	18.3057	0.02				
19	31/7/2551	17:01:30	0.8239	23.2836	0.02				
20	31/7/2551	17:01:31	0.8234	31.3326	0.02				
21	31/7/2551	17:01:32	0.8243	28.6775	0.02				
22	31/7/2551	17:01:33	0.8234	28.6782	0.02				
23	31/7/2551	17:01:34	0.8240	29.5933	0.02				
24	31/7/2551	17:01:35	0.8244	28.6751	0.02				
25	31/7/2551	17:01:36	0.8235	29.5610	0.02				
26	31/7/2551	17:01:37	0.8249	27.3744	0.02				
27	31/7/2551	17:01:38	0.8249	27.3358	0.02				
28	31/7/2551	17:01:39	0.8225	25.3389	0.02				

ภาพประกอบที่ ข-29 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายมารุต เรืองจตุโพธิ์พาน

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4812053

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2547

(วิศวกรรมโยธา)

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนเรียนศิษย์กึ่งกฤติคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2548 - 2549

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

มารุต เรืองจตุโพธิ์พาน, ธนิต เจริญพานนท์ และ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา(2551). การพัฒนาเครื่องค้นแบบสำหรับการอัดตัวคาน้ำ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, 14 - 16 พฤษภาคม 2551 โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช พัทยา จังหวัดชลบุรี