

การพัฒนาระบบการตรวจวัดการหลุดตัวของอุโมงค์



นายสุวิทย์ ทิพย์ยาน

ศูนย์วิทยพัทยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF TUNNEL SETTLEMENT MONITORING SYSTEM



Mr.Suwit Thipyan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

สุวิทย์ ทัพย์ยาน : การพัฒนาระบบการตรวจวัดการทรุดตัวของอุโมงค์ (DEVELOPMENT OF TUNNEL SETTLEMENT MONITORING SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.จิรวัดร บุญญะฐิติ, 83 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องมือสำหรับการตรวจวัดการทรุดตัวในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทรุดตัวในงานอุโมงค์ โดยในการออกแบบได้คำนึงถึงราคาต้นทุนและคุณสมบัติจะต้องเพียงพอต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้สำหรับตรวจวัดการทรุดตัวในงานอื่นๆภายในขอบเขตการทำงานที่จำกัดของเครื่องมือ เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องมือระบบไฮดรอลิก ทำงานโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในแนวดิ่ง การวัดค่าการทรุดตัวของเครื่องมือจะให้ได้เฉพาะค่าระดับสัมพัทธ์ (Relative Elevation) ระหว่างจุด 2 จุดเท่านั้น (จุดอ้างอิงกับจุดที่ต้องการทราบค่าการทรุดตัว) หากต้องการทราบค่าทรุดตัวสมบูรณ์ จะต้องทำการวัดค่าระดับของหมุดหลักฐานด้วย เครื่องมือที่พัฒนามีคุณสมบัติดังนี้ ความละเอียด (Resolution) = 0.015 มม. ความถูกต้องของระบบ (System Accuracy) = 0.10 มม. พิสัย (Range) = 30 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดได้ในช่วงที่แคบกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนั้น วัดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ ช่วงของการวัดจึงจำกัดอยู่เท่ากับความสูงของอุปกรณ์ แต่เครื่องมือจากต่างประเทศวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ ดังนั้นจึงวัดได้ในช่วงที่กว้างกว่าขนาดของอุปกรณ์เอง สำหรับความละเอียดนั้น เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีความละเอียดมากกว่าเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศเนื่องจากการทำงานที่แคบกว่า และหากพิจารณาทางด้านราคาพบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีราคาถูกกว่าประมาณ 15 เท่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
.....

4870536421: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: TUNNEL / INSTRUMENT / MONITORING / SETTLEMENT/ RESOLUTION

SUWIT THIPYAN: DEVELOPMENT OF TUNNEL SETTLEMENT MONITORING SYSTEM. ADVISOR: ASSOC PROF. TIRAWAT BOONYATEE, D.ENG, 83 pp.

This research aims to develop an instrument for settlement in tunnels monitoring. However the instrument can be adapted to other geotechnical work. The instrument measures the relative elevation of liquid between two points. Since it can measure only the vertical movement and the relative elevation (between two points) the measurement must be referred to the elevation of the benchmark in order obtains the absolute settlement. The resolution, accuracy and range of instrument are 0.015 mm. 0.10 mm. and 30 mm, respectively. By comparison with a commercial sensor, the developed one has narrower range because of the difference in design since the commercial one measures the change of pressure not the surface level of the fluid, the range of measurement is not limited to the height of casing. The developed instrument has a better resolution because of smaller range. As the developed sensor costs 15 times lower than the commercial one, it can be considered as a cost effective choice for future work.



Department:..... Civil Engineering Student's Signature..... *[Signature]*.....
 Field of Study:..... Civil Engineering Advisor's Signature..... *[Signature]*.....
 Academic Year: 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงสำเร็จลงไม่ได้หากไม่มีบุคคลดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตถ์ บุญญะฐิติ อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งนอกจากให้คำแนะนำตีๆในงานวิจัยนี้แล้วยังให้คำแนะนำในการทำงานและให้โอกาสในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณ อรรถนพ ตียะจามร ผู้จัดการฝ่ายสำรวจ-ออกแบบ บริษัท เอส ที เอส ที่คอยให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน และ คอยช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินกุล, รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ ธิขิตเลอสรวง ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำรวมทั้งให้ข้อคิดเห็น ที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสาทความรู้จนมีทุกวันนี้

ขอขอบคุณ คุณ กวิน หัยกิจโกศล , คุณ รุ่งวิทย์ ไชวจริยาพิทักษ์, คุณ วิรุฬห์ คำชุม นิสิตปริญญาตรีที่มีส่วนช่วยในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ นายก๊กฮอย ซาน นิสิตปริญญาเอก ที่คอยให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่น้อง สาขาวิศวกรรมปฐพี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้กำลังใจและเป็นมิตรที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ คงมีวันนี้ไม่ได้หากไม่มีบุคคลทั้งสองท่านนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บุญคุณของ บิดา – มารดา ที่ให้การสนับสนุนและอดทนส่งลูกเรียนด้วยความยากลำบาก

คุณธีรภัทรพิทักษ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์.....	4
2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soil Stiffness กับระดับการเสียรูป.....	4
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการทรุดตัวของดินในงานอุโมงค์.....	5
2.2.1 คุณสมบัติของดิน.....	5
2.2.2 สติฟเนสของ Segment.....	7
2.2.3 ลักษณะของแนวชุดเจาะของอุโมงค์.....	7
2.2.4 วิธีการก่อสร้าง.....	8
2.3 การคาดคะเนการทรุดตัวของดินเนื่องจากการชุดเจาะอุโมงค์.....	8
2.3.1 การคาดคะเนการทรุดตัวที่ผิวดิน.....	8
2.3.2 การประเมินค่า width parameter (i).....	9
2.3.3 การคาดคะเนการทรุดตัวใต้ผิวดิน.....	12
2.4 การตรวจวัด (Monitoring).....	13

2.4.1	ความสำคัญของการตรวจวัด.....	13
2.4.2	วัตถุประสงค์ของการตรวจวัด.....	14
2.4.3	ระบบการตรวจวัด.....	14
2.4.4	ประโยชน์ของการตรวจวัดและการควบคุม.....	15
2.5	ลักษณะการทำงานของระบบการตรวจวัด.....	16
2.5.1	การตรวจวัดระดับ.....	16
2.5.2	การตรวจวัดความเครียดและแรง.....	18
2.6	คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องมือวัดที่ต้องการ.....	20
2.7	สเตรนเกจ (Strain Gauge).....	21
2.8	งานวิจัยในอดีต.....	22
บทที่ 3	การวัดการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของดินในงานอุโมงค์.....	24
3.1	บทนำ.....	24
3.2	ความสำคัญและประโยชน์ของการตรวจวัด.....	24
3.3	การวัดการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของดิน.....	25
3.3.1	ช่วงเวลาพิจารณาเครื่องมือวัด.....	25
3.3.2	เครื่องมือทางธรณีเทคนิคที่ใช้วัดการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของงานดิน.....	26
3.3.3	ระดับการระวังของค่าการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของดิน.....	33
3.4	ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดในงานอุโมงค์.....	34
3.4.1	ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือทั่วไป.....	34
3.4.2	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เครื่องมือในกรณีที่มีอุโมงค์ตัดผ่านกัน.....	35
บทที่ 4	การออกแบบระบบตรวจวัดการทรุดตัวของอุโมงค์.....	38
4.1	ขั้นตอนในการออกแบบ.....	38
4.2	รายละเอียดของการออกแบบ.....	38
4.2.1	ระบบการทำงานและอุปกรณ์หลักของระบบ.....	38
4.2.2	หลักการพื้นฐานของการออกแบบเครื่องมือ.....	41
4.2.3	หลักการพิจารณาออกแบบชิ้นส่วนรับแรง.....	43
4.2.4	รูปแบบการเลือกใช้วัสดุ.....	44

4.3	สรุปรูปแบบการทำงานของเครื่องมือและการเลือกใช้วัสดุ.....	51
4.3.1	ระบบการทำงานของเครื่องมือ.....	51
4.3.2	ข้อกำหนดของชิ้นส่วนอุปกรณ์.....	53
4.4	การสอบเทียบเครื่องมือ.....	54
4.4.1	วิธีการสอบเทียบ.....	54
4.5	โปรแกรม LabVIEW.....	56
4.5.1	การทำงานของโปรแกรม.....	56
4.6	การจำลองการทดสอบระบบการทำงานเสมือนจริง.....	57
4.7	เครื่องมือต้นแบบ.....	58
4.7.1	รูปแบบของเครื่องมือต้นแบบ.....	58
4.8	การทดสอบเครื่องมือต้นแบบ.....	59
4.8.1	ข้อกำหนดและคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือที่ทำการเปรียบเทียบ.....	59
4.8.2	ส่วนประกอบของระบบ.....	60
4.8.3	การคำนวณค่าการหลุดตัวของเครื่องมือที่นำมาเปรียบเทียบ.....	61
4.8.4	ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือ.....	62
4.8.5	การเปรียบเทียบเครื่องมือ.....	62
บทที่ 5	การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	64
5.1	บทนำ.....	64
5.2	ผลการคัดเลือกวัสดุเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด.....	64
5.3	ผลการสอบเทียบ.....	65
5.3.1	ผลการสอบเทียบเครื่องมือ.....	65
5.3.2	สรุปสูตรสำหรับคำนวณหาค่าการหลุดตัวของเครื่องมือแต่ละตำแหน่ง.....	69
5.4	ผลการทดสอบระบบการทำงานเสมือนจริง.....	70
5.5	ผลการทดสอบเครื่องมือต้นแบบ.....	71
5.5.1	ความละเอียด และความถูกต้องของเครื่องมือ.....	76
5.6	ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือ.....	77
5.6.1	ขนาดของเครื่องมือ.....	77
5.6.2	เปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือ.....	78

บทที่ 6 สรุปผลการการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	79
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
6.2 สรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบเครื่องมือ.....	79
6.4 ข้อเสนอในการศึกษาเพิ่มเติม.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	83



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ข้อกำหนดของชิ้นส่วนอุปกรณ์.....	53
4.2 ข้อกำหนดทั่วไปของเครื่องมือที่นำมาเปรียบเทียบ.....	60
5.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 1.....	65
5.2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 2.....	66
5.3 ผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 3.....	67
5.4 ผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 4.....	68
5.5 สรุปสูตรคำนวณหาค่าการหลุดตัว.....	69
5.6 ค่าการหลุดตัวจากการทดสอบการทำงานเสมือนจริง.....	70
5.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC01 กับ SSG.....	72
5.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC02 กับ SSG.....	73
5.9 ผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC03 กับ SSG.....	74
5.10 ผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC04 กับ SSG.....	75
5.11 ความละเอียดของเครื่องมือแต่ละตำแหน่ง.....	76
5.12 ขนาดกับ SC กับ SSG.....	77
5.13 เปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือ.....	78
6.1 สรุปผลคุณสมบัติของเครื่องมือ.....	79

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 แสดงค่า Stiffness ของดินกับระดับการเสียรูป.....	4
2.2 ค่าปรับแก้ μ ของ Bjerrum(1972) สำหรับ Geonor Vane.....	6
2.3 ลักษณะการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์.....	9
2.4 กราฟสำหรับประมาณค่า I (เสนอโดย Peck 1969).....	10
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอุโมงค์ กับระยะถึงจุดดัดกลับของหน้าตัดที่ทรุดตัว.....	10
2.6 แสดงหน้าตัดการทรุดตัวที่ความลึกต่างๆจากการขุดอุโมงค์.....	12
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรุดตัวมากที่สุดที่ระดับความลึกต่างๆกับขนาดอุโมงค์.....	13
2.8 แผนผังของระบบการตรวจวัด.....	14
2.9 การทำงานของสวิตช์ลูกลอย.....	17
2.10 การทำงานของการวัดระดับทางเสียงหรือแสง.....	17
2.11 แสดงการทำงานของ การตรวจวัดระดับแบบการแทนที่ของวัตถุด้วยของเหลว.....	18
2.12 แสดงลักษณะการเกิดความเค้นและความเครียด.....	20
2.13 ลักษณะทั่วไปของสเตรนเกจ (Strain Gauge).....	21
2.14 ภาพแสดงลักษณะการตรวจวัดการทรุดตัวของอุโมงค์ของ Cheekiralla.....	23
3.1 ภาพแสดง Ground Settlement Marker Type 1.....	27
3.2 ภาพแสดง Ground Settlement Marker Type 2.....	28
3.3 ภาพแสดง Ground Settlement Marker Type 3.....	28
3.4 ภาพแสดง Surface Extensometer.....	29
3.5 Magnetic Probe Extensometer และ Spider Magnetic.....	30
3.6 Incliner.....	31
3.7 ตัวอย่างตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือในงานอุโมงค์.....	34
3.8 ตัวอย่างตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือในงานอุโมงค์(ต่อ).....	35
3.9 บริเวณตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือ.....	36
3.10 บริเวณตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือ(ต่อ).....	36
3.11 ภาพแสดง EL-Beam.....	37
3.12 ภาพแสดงการติดตั้ง EL-Beam.....	37
4.1 ภาพแสดง สเตรนเกจ (Strain Gauge).....	39

ภาพประกอบที่	หน้า
4.2 ภาพแสดง Data Logger รุ่น SC 2345.....	39
4.3 ภาพแสดง การ์ด DAQ รุ่น 6036 E.....	40
4.4 ภาพแสดง คอมพิวเตอร์ Note Book.....	40
4.5 แผนผังระบบการตรวจวัด.....	41
4.6 แสดงหลักการของคุณสมบัติของของเหลว.....	41
4.7 แสดงหลักการของแรงลอยตัว.....	42
4.8 แสดงพฤติกรรมของวัสดุ.....	42
4.9 แสดงลักษณะอุปกรณ์แบบที่ 1.....	45
4.10 แสดงอุปกรณ์แบบที่ 1.....	45
4.11 ภาพแสดงการทดสอบการตอบสนองของอุปกรณ์.....	46
4.12 กราฟแสดงการตอบสนองของอุปกรณ์แบบที่ 1.....	46
4.13 แสดงลักษณะอุปกรณ์แบบที่ 2.....	47
4.14 แสดงอุปกรณ์แบบที่ 2.....	48
4.15 กราฟแสดงการตอบสนองของอุปกรณ์แบบที่ 2.....	48
4.16 แสดงลักษณะอุปกรณ์แบบที่ 3.....	49
4.17 แสดงอุปกรณ์แบบที่ 3.....	50
4.18 กราฟแสดงการตอบสนองของอุปกรณ์แบบที่ 3.....	51
4.19 กราฟแสดงการตอบสนองของอุปกรณ์ทั้ง 3 แบบที่.....	51
4.20 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบขั้นตอนที่ 1.....	52
4.21 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบขั้นตอนที่ 2.....	52
4.22 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบขั้นตอนที่ 3.....	53
4.23 ภาพแสดง Dial Gauge.....	54
4.24 ภาพแสดงการสอบเทียบเครื่องมือ.....	55
4.25 การใช้โปรแกรม LabVIEW.....	57
4.26 แสดงการทดสอบการทำงานเสมือนจริง.....	58
4.27 แสดงเครื่องมือต้นแบบ.....	59
4.28 แสดงเครื่องมือที่นำมาเปรียบเทียบ.....	61
4.29 แสดง Read Out.....	61
4.30 แสดงการติดตั้งเครื่องมือ.....	62

ภาพประกอบที่	หน้า
4.31 แสดงการติดตั้งเครื่องมือที่ตำแหน่งเดียวกัน.....	63
4.32 แสดงการเปรียบเทียบเครื่องมือ.....	63
5.1 กราฟการตอบสนองของอุปกรณ์ทั้ง 3 แบบ.....	64
5.2 กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 1.....	65
5.3 กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 2.....	66
5.4 กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 3.....	67
5.5 กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 4.....	68
5.6 กราฟแสดงผลการทำงานเสมือนจริง.....	71
5.7 กราฟแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC01 กับ SSG.....	72
5.8 กราฟแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC02 กับ SSG.....	73
5.9 กราฟแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC03 กับ SSG.....	74
5.10 กราฟแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC04 กับ SSG.....	75
5.8 แสดงขนาดของเครื่องมือ.....	77

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A = พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (Area)

E_u = โมดูลัสของดินแบบสภาพไม่ระบายน้ำ

F = แรงที่กระทำต่อวัตถุ (Force)

l = ความยาวเดิมของวัตถุ

σ_1 = ความเค้นหลัก (Major Principle Stress)

σ_3 = ความเค้นรอง (Minor Principle Stress)

σ = ความเค้น (Stress)

ε = ความเครียด (Strain)

μ = ค่าปรับแก้ของ Bjerrum

Δl = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป

S = ปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ระยะ X ใดๆ จากศูนย์กลางของแวนคูโมิงค์

SC = เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาใช้ชื่อเรียกว่า Settlement Cell

S_{max} = ปริมาณการทรุดตัวที่มากที่สุดที่ศูนย์กลางของแวนคูโมิงค์

SSG = เครื่องมือตรวจวัดการทรุดตัวนำเข้าจากต่างประเทศ (Soil Settlement Gauge)

SPT = การทดสอบค่าการตอกทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test)

S_u = กำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)

$S_{u_{Field}}$ = กำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำในสนาม

$S_{u_{FV}}$ = กำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบแบบเวนในสนาม

$S_{u_{SPT}}$ = กำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำจากการทดสอบการตอกทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน

W = น้ำหนักของวัตถุเมื่อชั่งในอากาศ

w = น้ำหนักของวัตถุเมื่อชั่งในน้ำ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุโมงค์ (Tunnel) เป็นโครงสร้างใต้ดินที่มีความสำคัญทางด้านสาธารณูปโภคโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศที่ค่อนข้างพัฒนาแล้วมีการใช้อุโมงค์กันอย่างหลากหลายประเภท ทั้งงานส่งน้ำประปา งานระบายน้ำ หรืองานขนส่งมวลชน และเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของประเทศซึ่งคาดว่าอนาคตประเทศไทยจะมีการก่อสร้างอุโมงค์เพิ่มขึ้นอีก ปัญหาสิ่งกีดขวางหรือสิ่งก่อสร้างเดิมบริเวณแนวขุดเจาะอุโมงค์ เป็นปัญหาหนึ่งที่มีมักจะพบในการก่อสร้างอุโมงค์ โดยเฉพาะเมื่อเส้นทางอุโมงค์มีการผ่านไปแนวชุมชนซึ่งการเคลื่อนตัวของดินตามแนวการขุดเจาะอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างบริเวณใกล้เคียงที่มีอยู่เดิม ซึ่งลักษณะปัญหาดังกล่าวเช่น การขุดเจาะอุโมงค์ลอดผ่านอาคารบ้านเรือน การขุดเจาะอุโมงค์ทะลุผ่านแนวเสาเข็ม ตลอดจนจนถึงแนวอุโมงค์มีการตัดผ่านหรือเข้าใกล้แนวอุโมงค์เดิมที่ได้มีการก่อสร้างไว้ก่อนแล้ว เป็นต้น

ในการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้มาตรฐานนั้น จะต้องมีการติดตั้งเครื่องมือ (Instrument) ตรวจสอบบริเวณที่สำคัญหรือที่คาดว่าจะจะเป็นปัญหาเพราะข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด (Monitoring) จะเป็นข้อมูลที่ดีที่สุดและน่าเชื่อถือกว่าข้อมูลที่ได้จากการประเมินโดยวิธีอื่น ซึ่งการตรวจสอบพฤติกรรมของอุโมงค์ด้วยการติดตั้งเครื่องมือวัด มิใช่เฉพาะในระหว่างการก่อสร้างเท่านั้นแต่รวมไปถึงระยะเวลาหลังการก่อสร้างจบจนถึงอายุการใช้งานของอุโมงค์เพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานซึ่งหากพบพฤติกรรมของอุโมงค์ที่ผิดปกติแล้วจะสามารถหามาตรการแก้ไขได้ทันก่อนภัยพิบัติจะเกิดขึ้น

การที่จะได้ข้อมูลที่มีความละเอียด (Resolution) และน่าเชื่อถือ (Believe) นั้นต้องใช้ต้นทุนในการตรวจวัดสูง โดยเฉพาะเมื่อต้องนำเข้าอุปกรณ์หลักจากต่างประเทศโดยเชื่อว่ามีคุณภาพและความแม่นยำสูงแต่โดยหลักการพื้นฐานของเครื่องมือแล้วสามารถพัฒนาขึ้นมาใช้เองได้ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำเอาหลักการพื้นฐานดังกล่าวมาพัฒนาระบบตรวจวัดค่าการทรุดตัวของอุโมงค์เพื่อเพิ่มทางเลือกและลดต้นทุนในการตรวจวัดการทรุดตัวของโครงสร้างอุโมงค์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาและประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดค่าการหลุดตัวของอุโมงค์
- 1.2.2 เพื่อลดต้นทุนในการใช้เครื่องมือในการตรวจวัดค่าการหลุดตัวของอุโมงค์
- 1.2.3 เพื่อนำวัสดุที่หาได้ทั่วไปมาใช้ให้เกิดประโยชน์
- 1.2.4 เพื่อนำเครื่องมือที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าการหลุดตัวของโครงสร้างอื่น ๆ ต่อไป
- 1.2.5 เพื่อนำค่าที่ได้จากการหลุดตัวจริง ไปวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆเพื่อปรับปรุงการคาดคะเนการหลุดตัวให้ถูกต้องต่อไปในอนาคต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเอาความรู้และหลักการพื้นฐานทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์มาประยุกต์เพื่อการออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์รวมถึงหลักการทำงานของเครื่องมือสำหรับตรวจวัดการหลุดตัว โดยใช้สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ตรวจจู้ (Sensor) ใช้เครื่อง NC 2345 ของ National Instrument เป็นตัวปรับปรุงคุณภาพสัญญาณ (Signal Condition) และใช้งานร่วมกับโปรแกรม Lab View เพื่อทำการแสดงผลการตรวจวัด โดยจะทำการเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องมือที่พัฒนากับเครื่องมือของต่างประเทศ Hydrostatic Settlement Cell (Model SSG) ของ RocTest

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพื่อนำเครื่องมือที่ได้ไปใช้ในการหาค่าการหลุดตัวของอุโมงค์ที่จะมีการก่อสร้างขึ้นในอนาคต
- 1.4.2 เป็นการลดต้นทุนในส่วนของการหาค่าการหลุดตัวของอุโมงค์ที่ต้องใช้เครื่องมือจากต่างประเทศ
- 1.4.3 สามารถประยุกต์ใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นไปหาค่าการหลุดตัวของโครงสร้างอื่นๆ

1.4.4 ในอนาคตสามารถนำเครื่องมือที่ได้ไปหาค่าการหลุดตัวเพื่อทำการวิเคราะห์กลับในการหาค่าตัวแปรต่างๆของชั้นดิน

1.4.5 เพื่อเป็นแนวทางของการพัฒนาทางด้านวิศวกรรมโยธา ในการที่จะประยุกต์ และประดิษฐ์เครื่องมือทดสอบอื่น ๆ มาใช้เอง

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาการหลุดตัวของอุโมงค์ รวมถึงการวัดค่าการหลุดตัวด้วยวิธีการต่าง ๆ

1.5.2 ออกแบบเครื่องมือโดยคำนึงถึงหลักการทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

1.5.3 ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมในการทำชิ้นส่วนของเครื่องมือ

1.5.4 ทำแบบจำลอง พร้อมทั้งทดสอบระบบการทำงาน

1.5.5 สร้างเครื่องมือต้นแบบพร้อมทั้งทดสอบ และสรุปผลที่ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

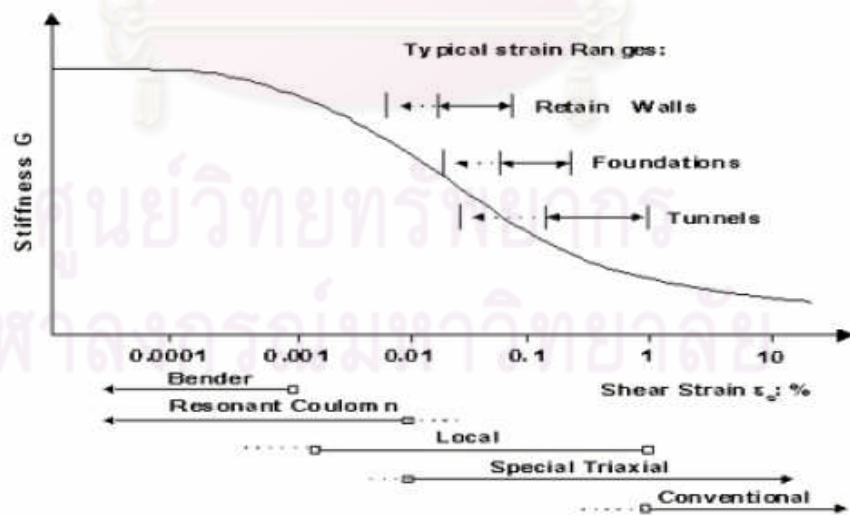
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์

2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soil Stiffness กับระดับการเสียรูป

การศึกษาพฤติกรรมศาสตร์การเสียรูปของดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หักกลับ (Back Analysis) ตัวปัญหาที่เราสนใจ เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากสนาม (Field Instrumentation) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินซึ่งโดยปกติจะใช้ในรูปของ Young's Modulus กับกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ ซึ่งพบว่าความแข็งแรงของดิน (Soil Stiffness) จะไม่คงที่สำหรับโครงสร้างในดิน ทั้งนี้ขึ้นกับระดับการเคลื่อนตัวหรือเสียรูป (Strain Level) โดย Mair (1993) เปรียบเทียบสตีฟเนสของดินกับระดับการเสียรูปสำหรับแต่ละชนิดของงานก่อสร้างใต้ดินต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.1 งานขุดเจาะอุโมงค์ มีระดับการเสียรูปอยู่ในช่วง 0.1 - 1 %



รูปที่ 2.1 แสดงค่า Stiffness ของดินกับระดับการเสียรูป, Mair (1993)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการทรุดตัวของดินในงานอุโมงค์

2.2.1 คุณสมบัติของดิน (Properties of Soil)

1) กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Untrained Shear Strength)

กำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (S_u) จะมีผลในการวิเคราะห์การทรุดตัวของที่ผิวดินเนื่องจากชุดเจาะอุโมงค์ โดยค่า S_u ต่ำ ค่าทรุดตัวที่ผิวดินจะเกิดขึ้นสูง ดังนั้นการเลือกใช้ค่า S_u จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน จึงเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาการทรุดตัว เพื่อให้ได้ผลการทรุดตัวของดินถูกต้อง

Bishop และ Skempton (1954) ได้ให้คำจำกัดความของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) โดยได้พิจารณาผลจากการทดสอบ Undrained Test ว่าดินมีกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Strength) เท่ากับ

$$S_u = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) f_{\max}}{2}$$

ในการวิเคราะห์การทรุดตัว กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ฯ จะใช้กำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบ Field Vane Shear Test และกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแข็งขั้นแรกจะพิจารณาจากการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test) ดังนี้

- Field Vane Shear Test ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง (Soft medium clay) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบแบบเวนในสนาม (S_{UV}) หลังจากปรับแก้แล้ว จะให้ค่า S_u ที่เหมาะสมเนื่องจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ฯ มีความไว (Sensitivity) สูงมากจากการทดสอบ FV จะมีผลกระทบการรบกวนของโครงสร้างดินน้อยกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้จะต้องถูกตรวจสอบว่าให้ค่าที่เหมาะสมหรือไม่

Bjerrum (1972) ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้กำลังรับแรงเฉือน เป็นฟังก์ชันกับค่า Plasticity Index (PI) ของดินดังนี้

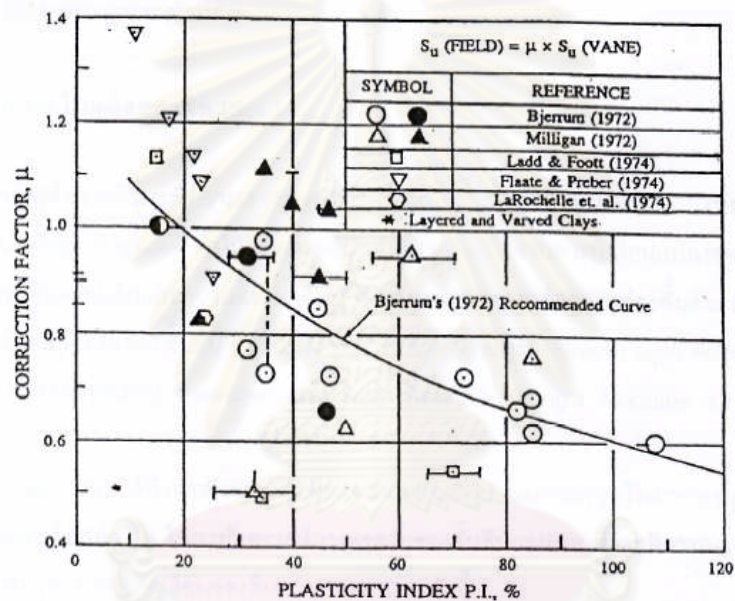
$$S_{U_{\text{Field}}} = \mu S_{UV}$$

เมื่อ $S_{U_{\text{Field}}} =$ ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสนาม

$S_{U_{FV}}$ = ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่วัดได้จากการทดสอบแบบเวนในสนาม

μ = ค่าปรับแก้ของ Bjerrum

ค่า μ ของดินกรุงเทพฯ อยู่ระหว่าง 0.70 - 0.85 และกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนจากการทดสอบ FV ให้ค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นค่า $S_{U_{Field}}$ ที่ปรับแก้แล้วจะใช้เป็นตัว Normalized โมดูลัสของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ หรือ E_u/S_u ดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 2.2 ค่าปรับแก้ μ ของ Bjerrum (1972) สำหรับ Geonor Vane

- Standard Penetration Test ในชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to very stiff clay) ได้มีการทดสอบหาค่าการทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน (SPT - N value) ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือน ($S_{U_{SPT}}$) ซึ่งเสนอโดยวีระนันท์ (2526) มีรายละเอียดดังนี้

สำหรับดินเหนียวที่มีพลาสติกสูง (CH)

$$S_u = 0.685 N \text{ ตัน/ม.}^2$$

สำหรับดินเหนียวที่มีพลาสติกต่ำถึงปานกลาง (CL)

$$S_u = 0.520 \text{ N ตัน/ม.}^2$$

เมื่อ $N =$ ค่าการทดสอบการตอกทะลุทะลวงมาตรฐาน (ครั้ง / ฟุต)

ค่า N จากการทดสอบไม่ต้องปรับแก้เนื่องจาก In - Situ Effective Vertical Stress และ ชนิดของดินแบ่งประเภทโดยอาศัยหลักการของ Unified Soil Classification System ซึ่งค่า S_u จะนำไปหาความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่าง E_u/S_u ของชั้นดินเหนียวชั้นแรก เพื่อใช้วิเคราะห์การทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ต่อไป

2) โมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

ค่าโมดูลัสของดินจะมีความสำคัญต่อการพิจารณาค่าการทรุดตัวโดยตรง เนื่องจากมีชั้นดินแตกต่างกันเหนือระดับอุโมงค์ ทำให้โมดูลัสของชั้นดินไม่เท่ากันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในดินที่แต่ละระดับความลึกและความดันน้ำใต้ดิน จึงส่งผลต่อการทรุดตัวของแต่ละชั้นดินนอกจากนี้การเลือกใช้ค่าโมดูลัสของแต่ละชั้นดิน จะต้องพิจารณาระดับการเสียรูป (Strain Level) ของแต่ละลักษณะโครงสร้าง

2.2.2 สติฟเนสของ Segment (Stiffness of Concrete Segment ,EI)

การเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นในดินเนื่องจากดินที่ขุดเจาะออกไป จะส่งผลต่อโครงสร้างอุโมงค์ โดย Segment ที่ประกอบเป็นผนังอุโมงค์จะต้องสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักดินที่กดทับเหนืออุโมงค์กับความดันน้ำใต้ดิน ดังนั้น สติฟเนสของ Segment จะมีผลต่อการทรุดตัวของดินเหนืออุโมงค์และการแอ่นตัวของ Crown Tunnel ในส่วนโครงสร้าง โดยโครงสร้างของอุโมงค์หรือ Segment เป็น Linear Elastic material โดยจะพิจารณาเป็น Beam Structure และค่า EI ของผนังอุโมงค์จะถูกพิจารณาในลักษณะ Plane Strain

2.2.3 ลักษณะของแนวขุดเจาะของอุโมงค์ (Characteristic of Tunnelling)

แนวขุดเจาะอุโมงค์จะแสดงถึงขนาดของอุโมงค์ ระดับความลึกของอุโมงค์ ลักษณะของแนวการขุดเจาะอุโมงค์จะมีผลต่อการทรุดตัวที่ผิวผิวดินดังนี้

1) ขนาดของอุโมงค์ จะแสดงถึงปริมาณดินที่ถูกขุดเจาะออกไป โดยจะเท่ากับปริมาณดินที่สูญเสียหรือเท่ากับปริมาณดินผิวดินที่ทรุดลงมา

2) ความลึกของอุโมงค์ ถ้าระดับของกึ่งกลางอุโมงค์อยู่ลึกจากผิวดินมาก ก็จะทำให้ช่วงของการทรุดตัวที่ผิวดินกว้างเมื่อพิจารณาแนวตัดขวางกับแนวขุดเจาะ อย่างไรก็ตาม ปริมาณและช่องกว้างของการทรุดตัวที่ผิวดินจะขึ้นกับชนิดของดินที่ได้ขุดเจาะ

3) ลักษณะของแนวการขุดเจาะอุโมงค์ ตัวอย่างเช่น โครงการรถไฟฟ้ามหานคร ได้มีการขุดเจาะอุโมงค์เป็นสองลักษณะ คือ แนวอุโมงค์วางคู่ขนานในระดับความลึกเท่ากัน และแนวอุโมงค์วางซ้อนกันในแนวตั้งซึ่งการทรุดตัวในผิวดินแต่ละลักษณะจะเกิดไม่เท่ากัน

4) ระยะห่างระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง ถ้าระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของอุโมงค์ทั้งสองห่างกันไม่มาก จะพิจารณาเสมือนเป็นอุโมงค์เดี่ยว โดยรัศมีจะเท่ากับระยะห่างระหว่างอุโมงค์ทั้งสองหารสอง แต่ถ้าระยะห่างระหว่างอุโมงค์ห่างกันมากจะต้องพิจารณาการทรุดตัวการขุดเจาะของแต่ละอุโมงค์

2.2.4 วิธีการก่อสร้าง (Method of Construction)

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์จะมีผลต่อการทรุดตัวของดินเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อโครงสร้างดิน เช่น การควบคุมทิศทางการขุดเจาะ , การทำ Backfill Grouting ตลอดจนความต่อเนื่องของการขุดเจาะ

2.3 การคาดคะเนการทรุดตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์

2.3.1 การคาดคะเนการทรุดตัวที่ผิวดิน

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลภาคสนามในอดีตพบว่า การขุดเจาะอุโมงค์มีผลให้ดินในบริเวณใกล้เคียงแนวอุโมงค์เกิดการเคลื่อนและทรุดตัวเป็นรูปประฆังหงายโดยมีค่าการทรุดตัวสูงสุดที่บริเวณเหนือศูนย์กลางแนวอุโมงค์ ดังรูปที่ 2.3

Peck (1969) พบว่าข้อมูลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีการกระจายแบบ inverse Gaussian และสามารถอธิบายได้ด้วย error function (probability function) โดยปริมาณการทรุดตัวที่ระยะ x ไต ๆ มีค่าดังนี้

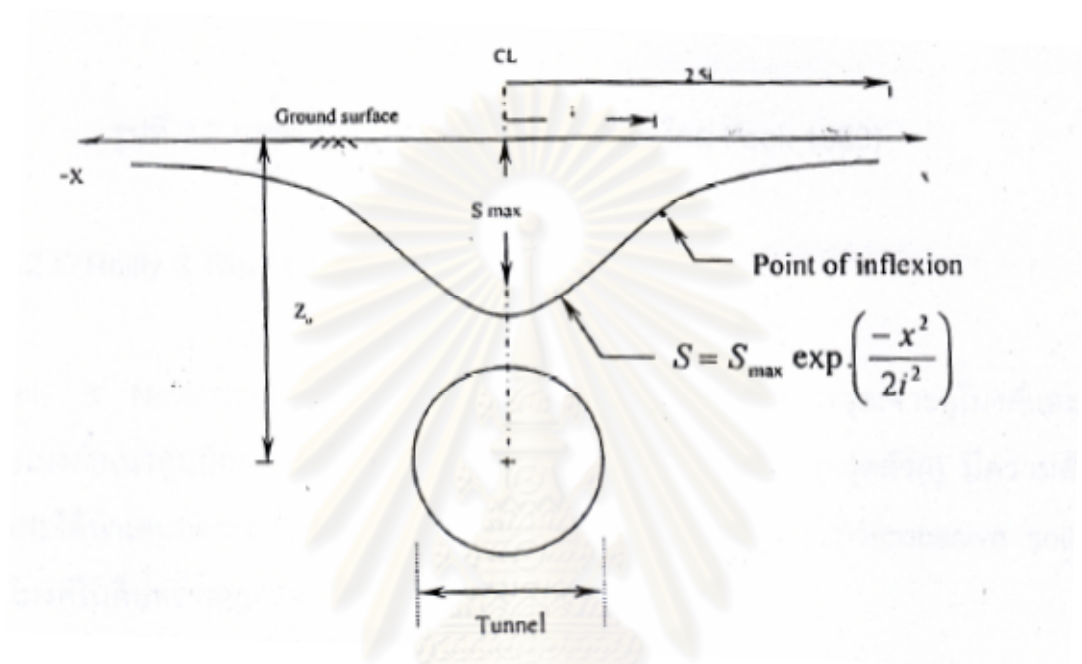
$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

เมื่อ S ปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดิน ณ ระยะ X ใด ๆ ในแนวราบจากแนวกลางของอุโมงค์ (m)

S_{max} ปริมาณการทรุดตัวมากที่สุดที่ศูนย์กลางอุโมงค์ (mm.)

X ระยะในแนวราบจากศูนย์กลางของอุโมงค์ (m.)

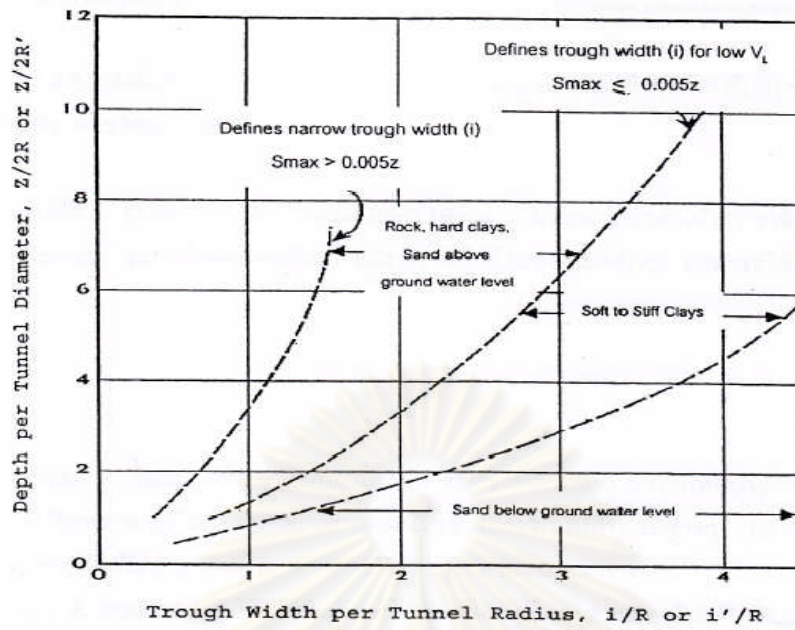
l ระยะจากกึ่งกลางแนวอุโมงค์ถึงจุดเปลี่ยนเว้า (inflection point, m.)



รูปที่ 2.3 ลักษณะการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Peck 1969)

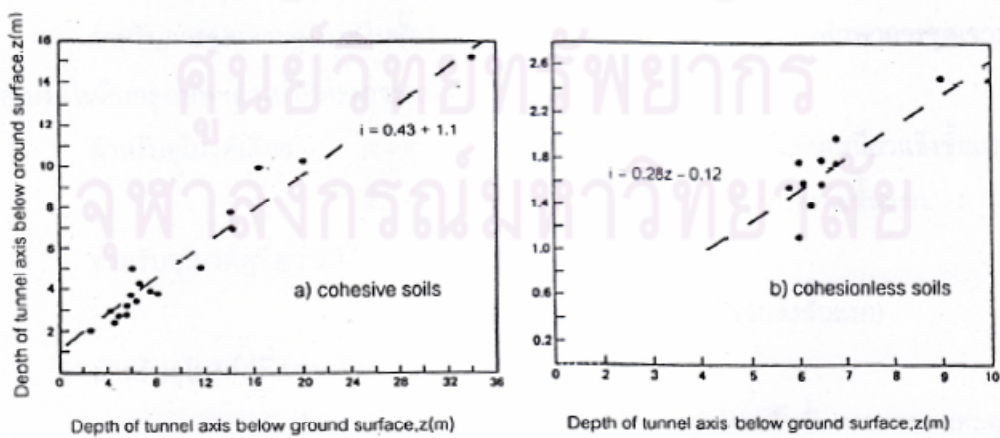
2.3.2 การประเมินค่า width parameter (i)

1) Peck (1969) ได้รวบรวมข้อมูลที่ได้จริงในสนามและนำมาเสนอกราฟความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างความลึกจากผิวดินถึงศูนย์กลางอุโมงค์ต่อขนาดของอุโมงค์ ($Z_0/2R$) และความกว้างของแนวการทรุดตัว (l/R) สำหรับดินชนิดต่างๆ เพื่อใช้ในการประมาณหาค่า l ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟสำหรับประมาณค่า i (เสนอโดย Peck 1969)

2) O'Reilly & New (1982) ได้ทำการศึกษาข้อมูลการทรุดตัวของการขุดเจาะอุโมงค์และพบว่าความลึกของอุโมงค์ (แนวศูนย์กลางอุโมงค์) กับระยะถึงจุดเปลี่ยนเว้าของการทรุดตัว (i) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง และได้นำเสนอความสัมพันธ์ทั้งกรณีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินเหนียว (cohesive soil) และการขุดเจาะอุโมงค์ในดินทราย (granular soil) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอุโมงค์ (Z_0) กับระยะถึงจุดดัดกลับ (i) ของหน้าตัด ทรุดตัว (O'Reilly & New 1982)

อย่างไรก็ดี O'Reilly & New (1982 , 1983) ได้แนะนำว่าสำหรับการใช้งานโดยทั่วไป ความสัมพันธ์ระหว่างระยะถึงจุดตัดกลับ (i) และความลึกถึงแนวอุโมงค์ (Z_0) สามารถใช้ความสัมพันธ์อย่างง่ายได้ว่า

$$I = KZ$$

โดยค่าของ K ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และมีค่าระหว่าง 0.4 – 0.7 (ดินเหนียวแข็ง – ดินเหนียวอ่อน) สำหรับดินทรายจะมีผลความลึกของแนวกลางและความไม่ปกติต่างๆอย่างไรก็ดี สำหรับอุโมงค์ในดินทรายที่ลึกไม่เกิน 10 เมตร ค่า K จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.3

Kimura & Mair (1981) ได้ทำการศึกษาแบบ Centrifuge สำหรับอุโมงค์ในดินเหนียว พบว่าที่ค่า $K = 0.5$ ความกว้างของแนวการทรุดตัวไม่ขึ้นกับระดับของการค้ำยันภายในอุโมงค์ในขณะเดียวกันก็ไม่ขึ้นกับวิธีการก่อสร้าง (construction technique) ด้วย

จากงานวิจัยต่างๆ ในอดีต อาทิ Rankin (1988) , O'Reilly & New (1982) , Yeates(1985) ซึ่งได้ทำการรวบรวมข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้จากทั้งในอังกฤษและทั่วโลก ได้ให้ค่า K โดยประมาณสำหรับดินชนิดต่าง ๆ ดังนี้

K มีค่าประมาณ 0.4 – 0.7 สำหรับดินเหนียว (นิยมใช้ $K = 0.5$)

K มีค่าประมาณ 0.2 – 0.3 สำหรับดินที่เป็นทรายหรือกรวด (นิยมใช้ $K = 0.25$)

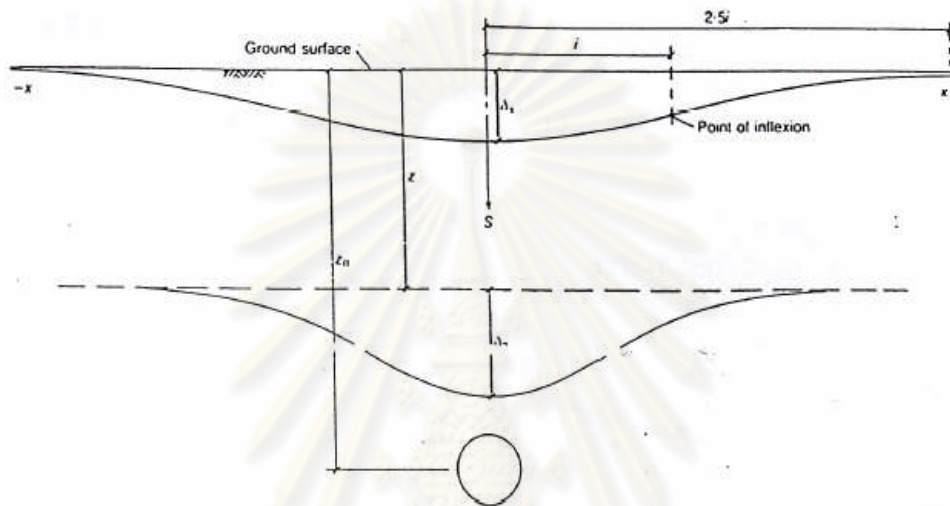
ค่า K ข้างต้นมีความเหมาะสมในการใช้งานพอสมควรอย่างไรก็ดีเราพบว่านอกจากชนิดของดินแล้ว ค่า K ยังขึ้นอยู่กับความลึกของอุโมงค์ด้วย สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในกรุงเทพฯ

ชินวุฒิ (2543) ได้ทำการศึกษาการขุดเจาะอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯ สำหรับโครงการรถไฟฟ้า ได้ค้นพบว่าสำหรับอุโมงค์เดี่ยว $K=0.45-0.55$ สำหรับการขุดเจาะในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก และ $K=0.35-0.40$ สำหรับการขุดเจาะในชั้นทรายชั้นแรกสำหรับอุโมงค์คู่ที่มีระดับความลึกระดับเดียวกัน $K = 0.70 - 0.80$ (ขุดเจาะในดินเหนียวแข็งชั้นแรก) สำหรับอุโมงค์คู่ที่มีความลึกต่างกัน $K = 0.42 - 0.48$ (อุโมงค์ตัวแรกขุดเจาะในชั้นทรายแรกและอุโมงค์ตัวที่สองในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก)

วิรัช (2544) ทำการศึกษาการขุดเจาะอุโมงค์สำหรับโครงการอุโมงค์ผันน้ำคลองเปรมประชากรซึ่งทำการก่อสร้างในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก พบว่าค่า K สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์มีค่า 0.34 – 0.50

2.3.3 การคาดคะเนการทรุดตัวใต้ผิวดิน

จากการวัดและเก็บข้อมูลการทรุดตัวใต้ผิวดินในสนาม เพื่อให้ได้ความกว้างและแนวของการทรุดตัว (Settlement troughs) จะนิยมถือว่า ลักษณะการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายการกระจายแบบเกาส์ (Gaussian distribution) คล้ายกับการเกิดขึ้นที่ผิวดินดังรูป 2.6



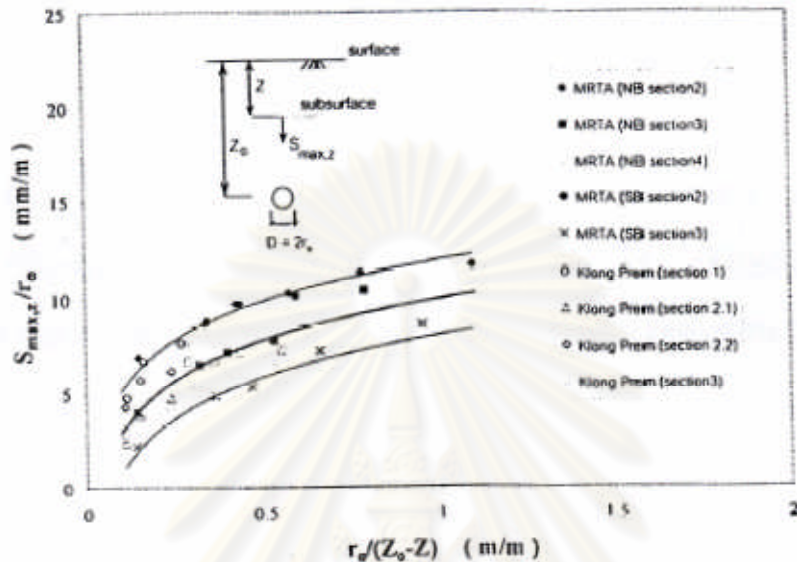
รูปที่ 2.6 แสดงหน้าตัดการทรุดตัวที่ความลึกต่างๆ จากการขุดอุโมงค์

ในการหาการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ ใต้ผิวดิน (Subsurface settlement) เนื่องจากนิยมตั้งสมมติฐานว่า การทรุดตัวที่ความลึกต่างๆ ใต้ผิวดินนี้ มีรูปร่างคล้ายกับการทรุดตัวที่ผิวดิน คือมีการกระจายตัวแบบเกาส์ (Gaussian distribution) ดังนั้นหากต้องการทราบค่าทรุดตัวสูงสุดที่ระดับความลึก Z ใดๆ จากผิวดินจึงทำได้โดยการแทนค่า Z_0 ด้วย $Z_0 - Z$

วิรัช (2544) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์และการเคลื่อนตัวของดินบริเวณข้างเคียงในชั้นดินกรุงเทพฯ ๙ จากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยแรงดันดินสมดุล ที่มีขนาดอุโมงค์ระหว่าง 4 - 6.5 เมตร และมีค่าสูญเสียมวลดินที่ผิวดินประมาณ 1- 3% พบว่าค่า K ของ Mair ไม่เหมาะสมสำหรับดินกรุงเทพฯ ๙ และได้เสนอความสัมพันธ์สำหรับประมาณค่าการทรุดตัวมากที่สุดที่ระดับความลึกต่างๆ ดังนี้

$$\frac{S_{\max,z}}{r_0} = 3.04 \ln\left(\frac{r_0}{Z_0 - Z}\right) + 9.93$$

Subsurface settlement above tunnel center line in stiff Bangkok Clay



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรุดตัวมากที่สุดที่ระดับความลึกต่าง ๆ กับขนาดของอุโมงค์

วิรัช (2544)

2.4 การตรวจวัด (Monitoring)

2.4.1 ความสำคัญของการตรวจวัด

การตรวจวัด เกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดสำหรับชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งได้มีการพัฒนา รูปแบบและหลักการของการตรวจวัดมาจากอดีตพร้อมๆ กับวิวัฒนาการของมนุษยชาติที่มีการ ค้นพบหรือศึกษาปรากฏการณ์ทางธรรมชาติต่างๆ เพื่อตัดแปลงหรือพยายามควบคุมธรรมชาติให้ เอื้ออำนวยต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์

ความสำคัญในการพัฒนางานทางด้านการตรวจวัด และ ควบคุมก็เพราะงานดังกล่าวได้ เข้ามามีบทบาทแทบจะทุกพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีทุกระดับ ซึ่งโดยความเป็นจริงแล้วระบบการวัดและควบคุมมีความสำคัญต่อ อุตสาหกรรมและงานก่อสร้างสมัยใหม่อย่างมาก ซึ่งรวมถึงงานก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินที่เกิดขึ้นใน ประเทศไทยที่จะต้องมีการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของอุโมงค์เพื่อไม่ให้เกินค่าที่อาจจะเป็นอันตราย ต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนได้

2.4.2 วัตถุประสงค์ของการตรวจวัด

1.) การวัดเพื่อให้ได้มาซึ่งความรู้ จะเห็นได้ว่าความรู้ต่างๆ ที่เกี่ยวกับโลกทางกายภาพนั้น เราได้รับโดยผ่านขั้นตอนทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งความรู้ดังกล่าวจะแทนคุณสมบัติของวัตถุหรือเหตุการณ์ที่ถูกรวัด หากมีการรวบรวมจัดลำดับหมวดหมู่ก็สามารถที่จะทำการทดลองครั้งแล้วครั้งเล่าได้ ความเข้าใจและมั่นใจจะทำให้เกิดผลที่แสดงในรูปกฎทางวิทยาศาสตร์

2.) การวัดเพื่อควบคุม การวัดจะช่วยในการควบคุมระบบซึ่งในกรณีนี้จะต้องทำการวัดในลักษณะซ้ำ ๆ หรือต่อเนื่องและบ่อยครั้งโดยอัตโนมัติ ระบบดังกล่าวได้เพิ่มจำนวนของการใช้ ตั้งแต่การควบคุมกระบวนการ เราจะเห็นว่าในอุตสาหกรรมสมัยใหม่จะใช้อุปกรณ์ในการวัดและระบบตรวจวัดจำนวนมากขึ้นตามลำดับ

2.4.3 ระบบการตรวจวัด

ระบบการตรวจวัดโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนด้วยกันคือ

1.) อุปกรณ์ตรวจจับและเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงาน (Sensor & Transducer)

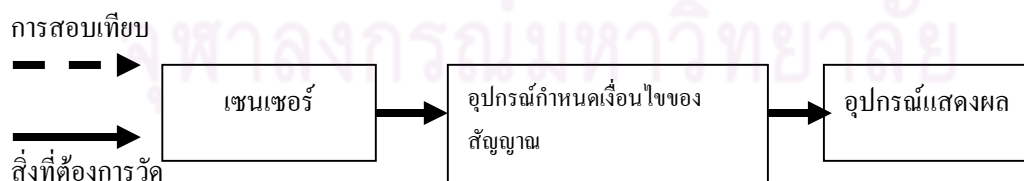
เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับ ส่วนนี้จะเป็นส่วนแรกของระบบการตรวจวัด โดยจะมีหน้าที่ในการวัดคุณสมบัติทางวิทยาศาสตร์ของสิ่งที่ต้องการวัด แล้วเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของพลังงานหรือสัญญาณและส่งไปยังส่วนต่อไป

2.) อุปกรณ์กำหนดเงื่อนไขของสัญญาณ (Signal Conditioner)

ข้อมูลหรือสัญญาณจากส่วนแรกจะส่งมาที่นี่ เพื่อทำการปรับปรุงและกำหนดเงื่อนไขของสัญญาณก่อนที่จะส่งให้กับส่วนที่สามต่อไป ตัวอย่างเช่น หากสัญญาณมีระดับต่ำเกินไปในส่วนนี้จะทำการขยายสัญญาณให้มีระดับเพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น

3.) ส่วนของการนำเสนอ (Terminating Read Out)

เป็นส่วนที่ทำให้การตรวจวัดบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่เรากำลังกล่าวคือการวัดเพื่อให้ได้มาซึ่งความรู้และการวัดเพื่อการควบคุม



รูปที่ 2.8 แผนผังของระบบการตรวจวัด

2.4.4 ประโยชน์ของการตรวจวัดและการควบคุม

1.) การวัดเป็นการแสดงตัวแปรซึ่งเป็นรายละเอียดของระบบ หน้าที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบการวัดคือ การแสดงตัวแปร (parameter) หรือรายละเอียด (information) ของระบบหรือกระบวนการ อาจจะมีอยู่ในรูปของการบอกค่าที่แสดงให้เห็น เก็บค่าไว้ บันทึกค่า หรือแสดงค่าแล้วส่งเป็นสัญญาณที่เหมาะสมไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการในระบบ ในความเป็นจริง ค่าในสถานะของระบบพื้นฐาน (condition-base system) ของการปฏิบัติงานจะมีใช้กันอย่างกว้างขวาง

2.) เพื่อควบคุมความแน่นอนในการปฏิบัติงานหรือกระบวนการ ระบบดังกล่าวอยู่ในระบบการควบคุมอัตโนมัติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบรวม ในการควบคุมดังกล่าวจะทำหน้าที่ปรับกระบวนการเพื่อให้ระบบเข้าสู่ เซ็ตพอยต์ (เป้าหมาย) หรือเปลี่ยนไปตามโปรแกรมที่เซตไว้ หลักการของการตรวจวัดคือ เปรียบเทียบค่าจริงกับค่าที่ต้องการจะปฏิบัติงานพบว่าความแน่นอนในการวัดตัวแปรทางกายภาพใด ๆ ในกระบวนการหรือการปฏิบัติงานจะเกี่ยวข้องกับระบบของการตรวจวัดและ อุปกรณ์การวัดค่าโดยตรง โดยทั่วไประบบการควบคุมแบบอัตโนมัติใช้งานอุตสาหกรรมมากมาย เช่น การกลั่นน้ำมัน โรงงานเคมี เป็นต้น ตัวแปรทางกายภาพที่เราวัดและควบคุมอาจจะเป็น ความดัน อัตราการไหลและตัวแปรอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบในระบบการควบคุมซึ่งใช้ปรัชญาการควบคุมสมัยใหม่ เช่น งานควบคุมการบินของเครื่องบิน การควบคุมพื้นที่การบินของท่าอากาศยาน หรือการควบคุมไม่ให้เกิดค่าหลุดตัวของโครงสร้างต่างๆ เกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งค่าต่าง ๆ เหล่านี้จำเป็นต้องมีกระบวนการวัดคุมทั้งสิ้น

3.) การจำลองสภาพของระบบ ในบางครั้งจำเป็นต้องทำการจำลองระบบการทดลอง เนื่องจากการทดลองโดยใช้ของจริงนั้นอาจมีความยุ่งยากและสลับซับซ้อน ในการหาสภาพที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของระบบจริงภายใต้การครอบคลุมสภาพที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งโดยทั่วไปเราจะใช้โมเดล แทนสเกลของของจริง เช่นการวิเคราะห์ มิติเพื่อทำการแปลงผลการทดลองจากโมเดลไปเป็นต้นแบบ (prototype) ในงานอากาศพลศาสตร์ ซึ่งต้องมีการทดลอง ยก ดิ่ง หรือทำอย่างหนึ่งอย่างใดที่ใกล้เคียงกับงานจริงกับวัตถุที่ทดสอบเพื่อหาโมเดลของการควบคุม เช่น การดูผลจากกระแสลมในอุโมงค์ที่จำลองสภาพการไหลของอากาศ เป็นต้น

4.) เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการออกแบบ โดยปกติในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ นั้น ต้องมีการลองผิดลองถูก (trial and error) ในการลองผิดลองถูกนั้นต้องอ้างอิงจากความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ ข้อมูลจากคู่มือ มาตรฐานในการปฏิบัติครั้งก่อน ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ โดยใช้สมการการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ ดังนั้นในงานลักษณะนี้ บางครั้งจึงต้องทำการทดลองศึกษาออกแบบวิธีใหม่ ๆ เพื่อรองรับและพัฒนาแบบใหม่ ๆ ตัวอย่างเช่น ทีมงานออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบเครื่องบิน ซึ่ง

ต้องกำหนดจำนวนปีของประสบการณ์ในการสร้างต้นแบบเครื่องบิน โดยที่ต้นแบบนี้กำหนดได้จากการทดสอบผลการทดสอบผลการบินเพื่อหาตัวแปรในการปฏิบัติงานหลาย ๆ ตัว หลังจากนั้นจึงทดสอบข้อมูลของต้นแบบเพื่อแก้ไขสูตรการออกแบบและปรับปรุงต้นแบบที่จะผลิต ดังนั้นการศึกษาทดลองการออกแบบ จึงมีบทบาทสำคัญในการออกแบบ และพัฒนาผลิตภัณฑ์หรือระบบใหม่ ๆ

5.) เพื่อใช้ในการปรับกระบวนการ มีตัวปฏิบัติงานหลายตัวที่ใช้ในการปรับกระบวนการ เช่น ตัวรวมสัญญาณ ตัวปรับสภาพสัญญาณให้เป็นเชิงเส้น ตัวสุ่มสัญญาณ ตัวเฉลี่ยสัญญาณ ตัวควบคุมอัตราส่วน เป็นต้น

6.) เพื่อทดสอบวัสดุ ศึกษามาตรฐาน และกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ ในหลาย ๆ ประเทศจะมีองค์การมาตรฐานที่กำหนดของวัสดุและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการวัดการทดสอบ

7.) เพื่อยืนยันปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์/ทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ บ่อยครั้งที่การทดลองข้อมูลจะเป็นการสร้างหรือกำเนิดปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ใหม่ ๆ เช่น ในบางครั้งการศึกษาการทดลองจะมีกฎที่ใช้ในการตั้งสูตรที่แน่นอน แต่หากว่าความสัมพันธ์ทางทฤษฎีมีไม่เพียงพอ ตัวอย่างเช่น ค่าประกอบของแรงเสียดทานในท่อ (ซึ่งใช้ผลทางทฤษฎีอย่างเดียวไม่เพียงพอ) ก็จำเป็นต้องมีการตั้งค่าคงที่หรือตัวแปรขึ้นมาค่าหนึ่ง โดยคำนวณหรือหาได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้น ๆ การศึกษาทดลองนี้ เป็นความหวังในการที่จะพัฒนาทฤษฎีใหม่ ๆ เพื่อครอบคลุมปรากฏการณ์ใหม่ ๆ ที่เกิดขึ้น

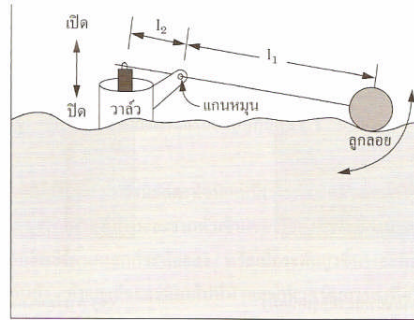
2.5 ลักษณะการทำงานของระบบตรวจวัด

การตรวจวัดสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานได้ดังนี้ คือ การตรวจวัดอุณหภูมิ , การตรวจวัดตำแหน่งและการเคลื่อนที่ , การตรวจวัดความเครียดและน้ำหนัก , การตรวจวัดความดัน , การตรวจวัดระดับ , การตรวจวัดอัตราการไหล , การตรวจวัดแสงและเสียง ซึ่งบางครั้งการตรวจวัดจะมีลักษณะการทำงานร่วมกัน และในงานวิจัยนี้มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวัดสองชนิดคือ การตรวจวัดระดับ และ การตรวจวัดความเครียด ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

2.5.1 การตรวจวัดระดับ

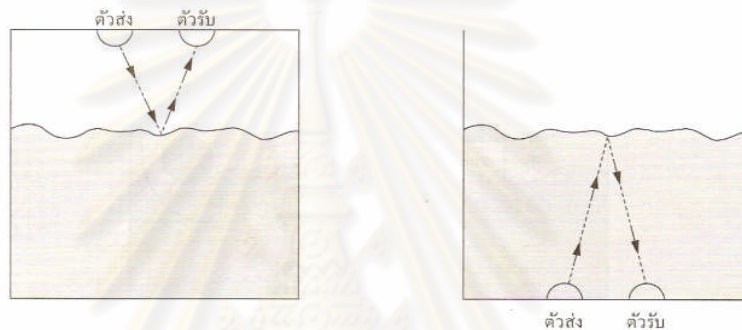
2.5.1.1 การแบ่งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามหลักการทางกายภาพ

1.) อุปกรณ์วัดระดับทางกล (Mechanical Sensor) ที่เห็นกันทั่วไปได้แก่สวิตช์ลูกกลอย



รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานของสวิทช์ลูกลอย

2.) อุปกรณ์วัดระดับทางเสียงหรือแสง (Ultrasonic or Photo Detection)



รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของ การวัดระดับทางเสียงหรือแสง

3.) อุปกรณ์วัดระดับแบบใช้หลักการของความดัน ในการควบคุมกระบวนการ ส่วนใหญ่ ระบบการวัด จะต้องมีความเที่ยงตรง หรือการบอกระดับในถังที่เป็นเชิงเส้น เราพบว่า ความดันที่ก้นถังจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระดับของเหลวในถัง ที่เรียกว่า “เฮด” (pressure head static head) ดังนั้นเราจึงสามารถวัดระดับของของเหลวในถังได้โดยการวัด ความดันที่ก้นถัง ข้อควรพิจารณาในการวัดระดับแบบดังกล่าวคือ

- ของเหลวจะต้องมีอุณหภูมิเดียวกันตลอด (uniform) นั่นคือความหนาแน่นต้องคงที่

- หากไม่สามารถติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ก้นถังได้ จะต้องใช้วงจรปรับสภาพสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทำการบวกหรือลบค่าออฟเซตบางตัวออก เพื่อให้ได้จุดศูนย์ที่ถูกต้อง

4.) การวัดระดับแบบใช้การแทนที่ของวัตถุด้วยของเหลว เป็นการวัดระดับโดยอาศัยหลักการของ อาร์คิมิดีส โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงพยุง (buoyancy) ที่กระทำต่อวัตถุ วัตถุที่ใช้เป็นตัวตรวจจذبต่อแรงพยุง (displacer) จะมีลักษณะเป็นทางกระบอกอยู่ในของเหลววัตถุ

รูปทรงกระบอกนี้เมื่อชั่งในอากาศจะมีน้ำหนัก W เมื่อนำเอาวัตถุเดียวกันไปชั่งในน้ำจะมีน้ำหนักลดลงเหลือ w ดังนั้นแรงที่ทำให้น้ำหนักของวัตถุอันนี้ลดลงก็คือ แรงพยุง ดังนั้นแรงพยุงก็จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกวัตถุนี้แทนที่นั่นเอง

$$F = W - w$$

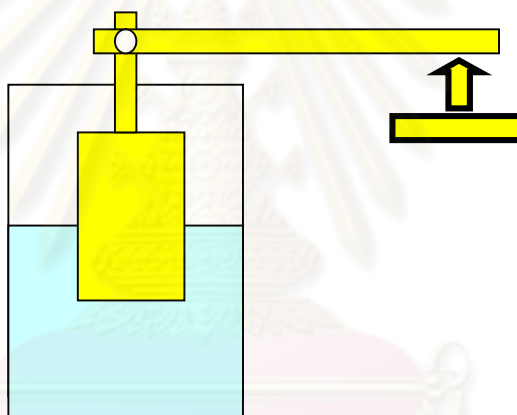
เมื่อ

$$F = \text{แรงพยุง}$$

$$W = \text{น้ำหนักของวัตถุเมื่อชั่งในอากาศ}$$

$$w = \text{น้ำหนักของวัตถุเมื่อชั่งในน้ำ}$$

วัตถุทรงกระบอกต้องมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าของเหลวในระบบที่ต้องการวัด ในการใช้งานวัตถุรูปทรงกระบอกจะถูกบรรจุอยู่ในท่อซึ่งสร้างเพื่อใช้วัดระดับโดยเฉพาะผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงจะออกมาในรูปแบบของแรงมากกว่าการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.11 แสดงการทำงานของกรวัดระดับแบบการแทนที่ของวัตถุด้วยของเหลว

ตำแหน่งของวัตถุทรงกระบอกตามรูป จะขึ้นอยู่กับระดับของของเหลวในภาชนะอันเนื่องมาจากแรงพยุง ดังนั้นเมื่อระดับของของเหลวเพิ่มสูงขึ้นวัตถุทรงกระบอกก็จะขยับตำแหน่งเพิ่มขึ้นไปด้วย

2.5.2 การตรวจวัดความเครียดและแรง (Strain and Force sensors)

ในระบบควบคุมกระบวนการ การวัดแรงนับได้ว่ามีความสำคัญอยู่ไม่น้อย เช่น ในการอธิบายปรากฏการณ์ทางด้านวิศวกรรม (การทดลองวิเคราะห์ความเค้น) เหตุผลที่แท้จริงในการวัดความเครียดของวัตถุแข็งในกระบวนการควบคุม ไม่เพียงแต่ใช้วัดความเครียดอย่างเดียว แต่ยังสามารถขยายผลเป็นตัวแปรตัวที่สองได้แก่ การไหล ความดัน น้ำหนัก และความเร่ง นอกจากนี้ยังสามารถวัดแรงโดยทางอ้อมได้อีกด้วย ในความเป็นจริงการวัดแรงเป็นตัวแปรที่ยาก

ต่อการวัดทางตรง แรงก็คือการวัดมวลของวัตถุนั้นเอง ดังนั้นเซ็นเซอร์วัดแรงจึงสามารถใช้วัดได้ทั้งน้ำหนักและจำนวนของวัตถุในถัง (ระดับ) ความดันในระบบไฮดรอลิกและนิวเมติก (แรงต่อหน่วยพื้นที่นั่นเอง) เป็นต้น

2.5.2.1 ความเครียดและความเค้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นหลักการเบื้องต้นอันหนึ่งในการศึกษาพลศาสตร์ของวัตถุ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.) ความเครียด (Strain) หากเราจ่ายแรงให้กับวัตถุ (อาจจะเป็นแรงดึงหรือแรงกดอัด) ค่าหนึ่งจะทำให้วัตถุนั้นเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (วัตถุอาจจะยาวขึ้นหรือสั้นลง) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างนี้หมายถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่คิดต่อหน่วยความยาว หรือต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว ซึ่งก็คือ ε กำหนดได้เป็น

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

เมื่อ Δl = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป

l = ความยาวเดิมของวัตถุ

จะเห็นว่าความเครียดในทางปฏิบัติจะมีค่าน้อยมาก ปกติจะแสดงในหน่วย micro-strain นั่นคือมีค่าเป็น $\varepsilon \times 10^6$

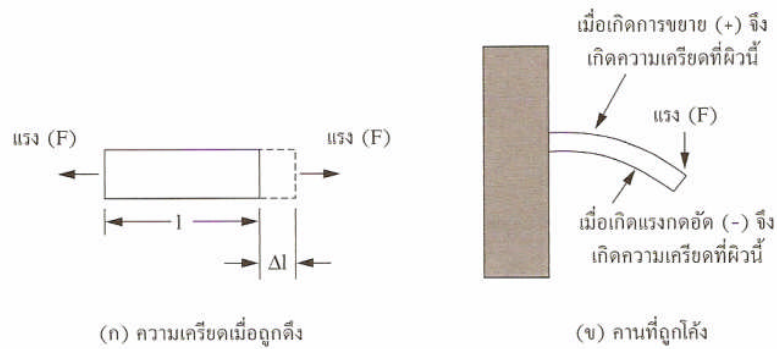
2.) ความเค้น (Stress) คือ เทอมที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ผลจากการจ่ายโหลดให้กับวัตถุ โดยที่วัตถุสามารถยังคงรักษาโหลดนั้นเอาไว้ได้ ความเค้นอ้างอิงให้เป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่บนแปลนของวัตถุกำหนดเป็น σ นั่นคือ

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

เมื่อ F = แรงที่จ่ายให้กับวัตถุ

A = พื้นที่ภาคตัดของวัตถุ

ทั้งค่าความเครียดและความเค้นนี้สามารถจะเกิดได้ทั้งแรงดึง หรือ แรงกด



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเกิดความเค้นและความเครียด

2.6 คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องมือวัดที่ต้องการ

1.) พิสัย (Range) เป็นการกำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุดที่คาดว่าเครื่องมือวัดนั้นจะวัดได้ ผู้ออกแบบทั่วไป มักจะกำหนดค่าพิสัยให้สูงไว้ก่อน

2.) ความละเอียด (Resolution) เป็นการเปลี่ยนแปลงที่น้อยที่สุดที่จะแสดงบนอุปกรณ์อ่านค่า ซึ่งความละเอียดมักจะลดลงถ้าพิสัยของเครื่องมือวัดกว้างขึ้น การกำหนดสมรรถนะของเครื่องมือในบางครั้ง อาจจะใช้ความถูกต้องแทนความละเอียด แต่โดยทั่วๆ ไปแล้ว การกำหนดสมรรถนะด้วยความละเอียดจะได้ผลดีกว่าความถูกต้อง และจะไม่แสดงในลักษณะของค่า \pm

3.) ความถูกต้อง (Accuracy) เป็นการกำหนดระดับความสามารถของเครื่องมือวัดที่จะวัดค่าพารามิเตอร์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงเพียงใด การกำหนดความถูกต้อง จะอยู่ในลักษณะของค่า \pm เช่น ± 1 มิลลิเมตร หรือ ± 1 เปอร์เซ็นต์ ของค่าที่อ่านได้ หรือ ± 1 เปอร์เซ็นต์ ของมาตราส่วนเต็ม

4.) ความเที่ยงตรง (Precision) หรือ ความสามารถในการอ่านค่าซ้ำ (Repeatability) เป็นการกำหนดระดับความสามารถในการวัดค่าเดียวกันหลายๆ ครั้งว่าจะได้ผลใกล้เคียงกันเพียงใด ในกรณีของการอ่านค่าของการเปลี่ยนแปลง (Change) แทนค่าสัมบูรณ์ (Absolute Value) ความเที่ยงตรงจะมีความสำคัญกว่าความถูกต้อง การแสดงความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด จะอยู่ในลักษณะของค่า \pm เพื่อแสดงว่าค่าที่อ่านซ้ำๆ กัน จะเข้าใกล้กับค่าเฉลี่ยเพียงใด

5.) ความไวตัว (Sensitivity) หมายถึง ปริมาณของเอาต์พุทของเครื่องมือวัดเมื่อมีค่าอินพุทเข้าไปในปริมาณหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การวัดการเคลื่อนตัวด้วย Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) ซึ่งมีความไวตัวเท่ากับ 1,000 มิลลิโวลต์ต่อมิลลิเมตร หมายความว่า เมื่อเครื่องมือวัดดังกล่าววัดการเคลื่อนตัวได้ 1 มิลลิเมตร จะส่งเอาต์พุทเป็นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1,000 มิลลิโวลต์ เพื่อส่งไปยังอุปกรณ์อ่านสัญญาณเพื่อแปลงค่าเป็นตัวเลขที่แสดงการเคลื่อนตัวอีกครั้งหนึ่ง

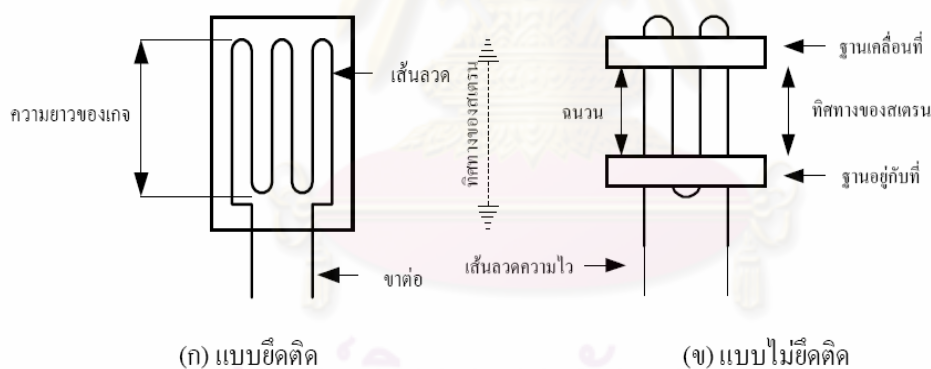
6.) ความเป็นแนวตรง (Linearity) หมายถึง การแสดงค่าของเครื่องมือวัดที่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าที่วัดได้

2.7 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

สเตรนเกจ (Strain Gauge) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเครียดโดยใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในเส้นลวดเพื่อการตรวจวัดความเครียด ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวด สเตรนเกจมีการนำไปตรวจวัดได้อย่างกว้างขวาง เช่น การวัดน้ำหนัก (Load cell) ความดัน (Pressure) แรงเชิงกล (Force) หรือการแทนที่ (Displacement). โดย สเตรนเกจ มีให้เลือกใช้ 2 แบบคือ

1. แบบยึดติด (Bonded Strain Gauge)
2. แบบไม่ยึดติด (Unbonded Strain Gauge)

โดยสเตรนเกจทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะของโครงสร้างและการทำงานที่คล้ายกันคือทำด้วยเส้นลวดเล็กๆ ขดไปมาดังรูป และนำไปยึดติดกับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดความเครียด



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะทั่วไปของสเตรนเกจ

การทำงานของสเตรนเกจเมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออก ความยาว (l) ของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่หน้าตัด (A) จะลดลงผลทำให้ความต้านทานของเส้นลวดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานของโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงกับความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด จากรูปที่ 2.13 (ก) แสดงโครงสร้างของสเตรนเกจแบบยึดติดที่ทำมาจากเส้นลวดเล็กๆ ขดไปมายึดติดไว้บน แผ่นกระดาษหรือพลาสติกบาง ๆ โดยทั่วไปเส้นลวดนี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยประมาณ 0.001 นิ้วและมีค่าความต้านทาน 120 โอห์ม และรูปที่ 2.13 (ข) เป็นแบบไม่ยึด

ติด ลวดตัวนำเป็นแบบเดียวกับแบบไม่ยึดติดแต่จะมีส่วนของฐานที่เคลื่อนที่ Movable และอยู่กับที่ Fixed ติดอยู่กับวัตถุที่ต้องการตรวจจับ

การใช้สเตรนเกจในการตรวจวัดความเครียดของวัตถุนั้นจะต้องพิจารณาถึงปริมาณทางกายภาพของสองสิ่งคือ ค่าความต้านทานของเกจ (Gage Resistance) ที่เปลี่ยนแปลงและค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองนี้จะแสดงในรูปอัตราส่วนที่เรียกว่า “เกจแฟกเตอร์ (Gage Factor)”

2.8 งานวิจัยในอดีต

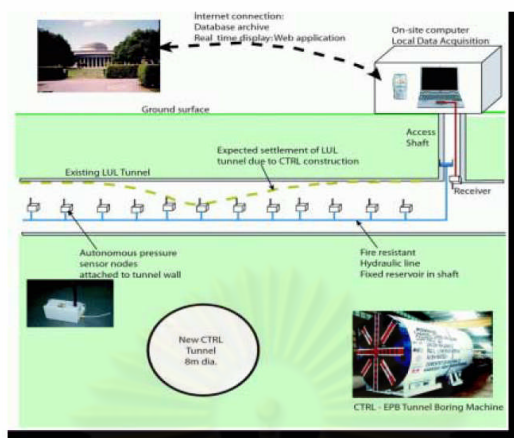
สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัวเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์นั้นได้นำเสนอในส่วนของทฤษฎีไปแล้วในบางส่วนโดยส่วนใหญ่การวิจัยจะเป็นการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ผิวดินหรือการวิเคราะห์การทรุดตัวใต้ผิวดินเป็นหลักแต่ในกรณีการทรุดตัวของอุโมงค์โดยมีสิ่งก่อสร้างอื่นกีดขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทรุดตัวของอุโมงค์กรณีที่มีโครงสร้างของอุโมงค์เก่าอยู่ชั้นมีอยู่ค่อนข้างน้อยซึ่งผู้วิจัยได้นำมาเรียบเรียงและพอที่จะสรุปได้ดังนี้

กิจพล (2547) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรม และแนวทางการคาดคะเนการทรุดตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ผ่านแนวอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวงบริเวณสามย่าน โดยทำการศึกษาจากขั้นตอนการก่อสร้างและข้อมูลที่จัดเก็บจากสนาม เปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Analysis , FDA) และใช้กฎการวิบัติแบบ Mohr-Coulomb โดยทำการจำลองเสมือนการขุดเจาะแบบสามมิติ จากผลการจำลองการขุดเจาะด้วยวิธี FDA พบว่า วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์อุโมงค์เดี่ยว โดยสามารถนำไปคาดคะเนการทรุดตัวได้ดีสำหรับอุโมงค์ล่าง แต่ไม่สามารถใช้แบบจำลองต่อเนื่องอุโมงค์ชั้นบน ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยในการขุดเจาะและการควบคุมงานขุดเจาะที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ อุโมงค์บน อยู่ในระดับที่ตื้นมากเพียง 10.50 เมตร อีกทั้งเป็นการวางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน

อย่างไรก็ดีงานวิจัยชิ้นนี้ยังไม่สามารถที่จะบ่งชี้ค่าการทรุดตัวของอุโมงค์ที่เป็นผลมาจากอุโมงค์เดิมได้มากนักเพราะเครื่องมือที่ทำการติดตั้งในสนามนั้นไม่ได้ติดตั้งตามแนวอุโมงค์ทำให้ไม่สามารถหาค่าทรุดตัวที่แท้จริงของอุโมงค์บนได้

Cheekiralla (2004) ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวของอุโมงค์โดยการส่งสัญญาณด้วยระบบ wireless sensor network (WSN) ในการตรวจวัดการทรุดตัวของอาคารก่อสร้าง

รถไฟฟ้าใต้ดินในกรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ซึ่งอุโมงค์ใหม่ที่สร้างนั้นได้สร้างพาดผ่านอุโมงค์เดิมที่มีอยู่ก่อนแล้ว



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการตรวจวัดการทรุดตัวของอุโมงค์ของ Cheekiralla (2004)

งานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบ sensors โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความดันของ ของเหลวเพื่อนำมาหาค่าการทรุดตัว โดยหลักการคือ จะมีจุดที่เป็นจุดอ้างอิงโดยต้องมั่นใจว่าจุดนั้นไม่มีการทรุดตัวหรือมีการทรุดตัวน้อยที่สุด และเมื่อมีการทรุดตัวเกิดขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของของไหลและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันซึ่งตัวตรวจวัดจะส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลจากผลของงานวิจัยชิ้นนี้พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลของการก่อสร้างซึ่งวิธีนี้ง่ายต่อการติดตั้ง และการดูแลรักษา

งานวิจัยของ Cheekiralla ได้ใช้หลักการพื้นฐานแบบเดียวกันกับงานวิจัยของผู้วิจัยชิ้นนี้ คือใช้การเปลี่ยนแปลงแรงดันของของเหลว จะต่างกันตรงการส่งสัญญาณและการตรวจจับสัญญาณซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ สเตรอนเกจในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 3

การวัดการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของดินในงานอุโมงค์

3.1 บทนำ

ปัญหาการทรุดตัวของอุโมงค์เป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งเหตุปัจจัยหนึ่งที่เกิดการทรุดตัวของอุโมงค์ก็คือ การขุดเจาะอุโมงค์ผ่านหรือเข้าใกล้แนวอุโมงค์เดิมที่ได้มีการก่อสร้างไว้ก่อนแล้วซึ่งในการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทยก็มีความจำเป็นที่ต้องตัดผ่านแนวอุโมงค์เดิมซึ่งเป็นอุโมงค์ส่งน้ำประปา และในอนาคตงานก่อสร้างอุโมงค์ก็อาจจะเกิดขึ้นอีกหลายโครงการเพื่อที่จะรองรับการเจริญเติบโตของประเทศ ซึ่งการทรุดตัวของอุโมงค์นั้นจะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ออกแบบไว้หรือยอมรับได้กล่าวคือจะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ทำให้เกิดการวิบัติต่อโครงสร้างหลักของอุโมงค์อันจะส่งผลกระทบต่อชีวิต และ ทรัพย์สินของประชาชนรวมถึงความเสียหายต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นทางด้านเศรษฐกิจ เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวแม้จะเป็นเรื่องธรรมดาสำหรับประเทศที่พัฒนาแล้วที่มีการใช้อุโมงค์อย่างแพร่หลายแต่จัดได้ว่าเป็นเรื่องใหม่มากสำหรับประเทศไทยซึ่งปัญหาต่างๆในการก่อสร้างจึงเป็นบทเรียนที่นักศึกษาโดยเฉพาะเมื่อมองว่าอุโมงค์เป็นโครงสร้างเพื่ออนาคตของมหานครกรุงเทพและจะมีการใช้อุโมงค์อีกมากมายทั้งเพื่อกิจการประปา งานระบายน้ำและผันน้ำและรวมไปถึงระบบขนส่งมวลชน ดังนั้นในการที่จะป้องกันและควบคุมปัญหาดังกล่าวก็คือการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของอุโมงค์

3.2 ความสำคัญและประโยชน์ของการตรวจวัด

ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าอุโมงค์เป็นสิ่งจำเป็นทางด้านสาธารณูปโภคของเมืองใหญ่ๆทั่วโลกรวมทั้ง มหานครกรุงเทพ ดังนั้นการเฝ้าระวังพฤติกรรมต่างๆของอุโมงค์ซึ่งไม่ว่าจะเป็น การทรุดตัว การเคลื่อนตัวของมวลดิน จะต้องคอยตรวจสอบและติดตามอยู่เสมอโดยจะต้องไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งความสำคัญและประโยชน์ของการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของอุโมงค์โดยหลักก็คือ เพื่อเป็นการเตือนหากเกิดสิ่งผิดปกติขึ้นกับอุโมงค์ หรือบริเวณใกล้เคียง เช่น มวลดินด้านข้างเกิดการเคลื่อนตัวผิดปกติ หรือ เกิดการทรุดตัวของอุโมงค์เกินค่าที่ออกแบบซึ่งนอกจากสาเหตุจากการเกิดการอัดตัวของน้ำของดินแล้วยังอาจเกิดจากแผ่นดินไหวจากประเทศใกล้เคียงซึ่งอาจจะส่งผลกับอุโมงค์ได้รวมถึงสาเหตุอื่นๆที่เราอาจคาดไม่ถึงอีก ดังนั้นหากมีการตรวจวัดอย่างสม่ำเสมอก็สามารถที่จะบ่งชี้ถึงสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นกับอุโมงค์เพื่อหาทางแก้ไขต่อไป

3.3 การวัดการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของดิน

3.3.1 ช่วงเวลาพิจารณางานเพื่อติดตั้งเครื่องมือวัด

โครงการก่อสร้างทางวิศวกรรมขนาดใหญ่โดยเฉพาะงานก่อสร้างภายในเมืองที่มีอาคารสิ่งปลูกสร้างมากมาย ย่อมมีผลกระทบต่อคนจำนวนมาก ดังเช่น โครงการรถไฟฟ้ามหานครซึ่งมีการขุดเจาะอุโมงค์ขนาดใหญ่ ย่อมทำให้เกิดการทรุดตัวของดิน ส่งผลต่อโครงสร้างข้างเคียงได้ ดังนั้นในระหว่างดำเนินการขุดเจาะอุโมงค์ จึงต้องมีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของชั้นดิน ทั้งแนวตั้งและแนวราบเสมอ เพื่อจะได้เป็นแนวทางควบคุมการทำงานของหัวเจาะ ตลอดจนหาแนวทางที่จะป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้ โดยติดตั้งเครื่องมือทางธรณีเทคนิคเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมและการเสียรูปของโครงสร้างอุโมงค์และดิน รวมถึงโครงสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินว่าสอดคล้องกับหรือแตกต่างจากที่คาดคะเนและออกแบบไว้มากน้อยเพียงใด โดยจะแบ่งการพิจารณางานก่อสร้างเป็น 2 เงื่อนไขดังนี้

1.) หลังสิ้นสุดงานก่อสร้างทันที (End of construction or short-term analysis) ก่อนที่จะก่อสร้างจะรั้งวัดเพื่อทำระดับผิวดินหรือผิวจราจรล่วงหน้าก่อนตลอดแนวเส้นทางของอุโมงค์และหลังจากหัวขุดเจาะอุโมงค์ได้ขุดเจาะผ่านไป ติดตั้งผนังอุโมงค์รวมทั้งอัดฉีดน้ำปูนในดินรอบ ๆ อุโมงค์แล้ว จะต้องตรวจสอบพฤติกรรมและการเสียรูปของโครงสร้างดินโดยใช้กล้องระดับและกล้องวัดมุม ว่าแตกต่างจากค่าที่ได้ประเมินไว้มากน้อยเพียงใด เพื่อจะได้แก้ไขขั้นตอนการก่อสร้าง เครื่องมือที่ติดตั้งส่วนใหญ่ได้แก่

- เครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement marker, SS)
- เครื่องมือวัดการทรุดตัวของชั้นดินแต่ละความลึก (Extensometer ,EX)
- เครื่องมือการตรวจสอบการเคลื่อนตัวด้านข้างของดิน (Inclinometer , IE)
- เครื่องวัดความดันของน้ำ (Vibrating wire piezometer , VP)

สำหรับโครงสร้างข้างเคียงที่อยู่ข้างแนวขุดเจาะอุโมงค์ จะต้องมีการบันทึกผลการทรุดตัวและสภาพสิ่งก่อสร้างทั้งก่อนและหลังขุดเจาะอุโมงค์ รวมถึงระดับของสิ่งก่อสร้างนั้นด้วย โดยใช้

- เครื่องมือวัดค่าทรุดตัวของอาคาร (Building settlement marker,BS)

2.) ระยะเวลา (Long-term analysis)

หลังจากการติดตั้งผนังอุโมงค์เสร็จแล้วตลอดแนวของการขุดเจาะในช่วงหนึ่ง ๆ จะมีการตรวจสอบการแอ่นตัวของผนังอุโมงค์ด้านบน (Tunnel crown) การวัดขนาดภายในของอุโมงค์ การตรวจหาปริมาณน้ำที่ซึมเข้ามาภายในอุโมงค์ การทรุดตัวของชั้นดินเหนืออุโมงค์เป็นต้น

3.3.2 เครื่องมือทางธรณีเทคนิคที่ใช้วัดการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของดิน

เครื่องมือวัดสำหรับวัดการเคลื่อนตัวของดินมีมากมายหลายแบบ แต่ละแบบก็มีความเหมาะสมสำหรับ งานวัดการเคลื่อนตัวที่ต่างลักษณะกันไป ซึ่งจะได้อธิบายตามลำดับต่อไปนี้ คือ

3.3.2.1 Settlement Point

Settlement Point อาจแยกได้เป็น 3 ประเภท คือ

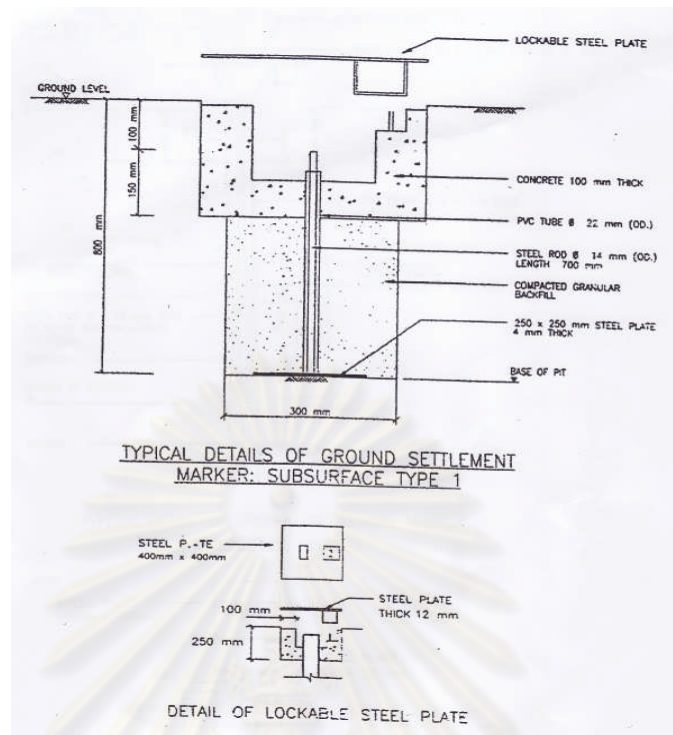
- 1.) Settlement Point ที่ใช้ในการวัดการทรุดตัวของผิวดิน
- 2.) Settlement Point ที่ใช้ในการวัดการทรุดตัวของฐานราก
- 3.) Control Stake ใช้วัดการเคลื่อนตัวจากแนวฐานที่วางไว้

Settlement Point แบบที่ง่ายที่สุด คือ เป็นแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ก็ก็เป็นแบบที่มีโอกาสถูกรบกวนจากกิจกรรมการก่อสร้างได้ง่ายที่สุดด้วย การปรับปรุงในยุคต่อมา ได้ใช้วิธีติดตั้งแท่งเหล็กไว้ที่จุดศูนย์กลางของแท่งคอนกรีต อีกวิธีที่นิยมใช้กันมาก คือ การติดตั้งท่อหรือเหล็กเส้นในหลุมเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 เซนติเมตร แล้วใส่ท่อค้ำกันเพื่อแยกเหล็กเส้นออกจากดินโดยรอบปลายล่างของเหล็กเส้นจะมีรูปแบบ เช่น Borro Point ซึ่งพัฒนาโดย Bjerrum และคณะ (1965) ซึ่งประกอบด้วยเหล็กเส้นยึดติดกันสมอลโลหะยึดหยุ่นใส่ท่อค้ำกันหุ้มด้านนอกเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานของดินโดยรอบ ในการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกส่งลงไปดินด้วยการตอกหรือหย่อนลงไป ในหลุมเจาะ เมื่อถึงระดับที่ต้องการ จะยึดท่อค้ำกันไว้ แล้วกดเหล็กเส้นลงไป สมอลที่ปลายล่างจะขยายตัวออกและฝังเข้าไปในเนื้อดิน จากนั้น จะปล่อยท่อค้ำกัน แล้วดึงขึ้นประมาณ 30 เซนติเมตร นอกจากแบบดังกล่าวแล้ว ยังมีแบบที่ได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติม เช่น ติดตั้ง Settlement Plate ไว้ กับ Settlement Point โดยให้ Plate อยู่ในระดับที่ต้องการวัดการทรุดตัวโดยที่ด้านบนของ Settlement Point ควรติดตั้งระบบป้องกันความเสียหายหลังจากการติดตั้งไว้ด้วย

รูปแบบของ Settlement Point แบ่งตามลักษณะการทำงานดังนี้

1.) Ground Settlement Marker Type 1 (G1)

เครื่องมือวัดการทรุดตัวในแนวตั้งของพื้นดินในระดับตื้น โดยจะติดตั้งลึกลงไป 50 ซม. เพื่อให้ถึงระดับพื้นดินจริง รายละเอียดของเครื่องมือประกอบด้วย แผ่นโลหะ (Lockable steel plate) ที่ปลายล่างหนา 4 มม. ประกอบติดกับแท่งโลหะ (Steel Rod) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 14 มม. ยาว 700 มม. อยู่ในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 22 มม. ปลายบนจะฝังในคอนกรีตหนา 100 มม.



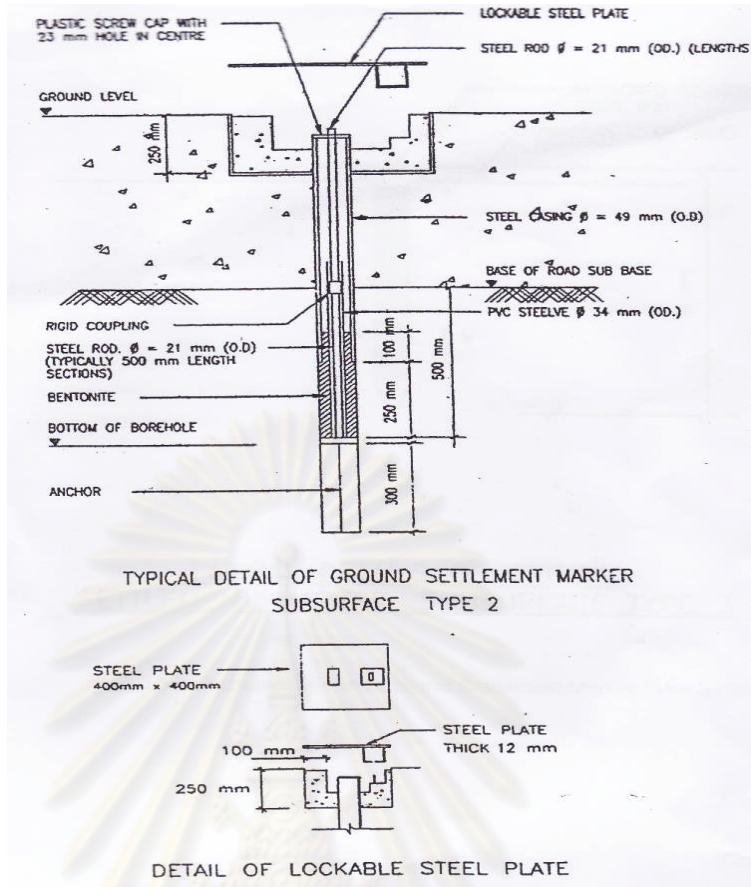
รูปที่ 3.1 แสดง Ground Settlement Marker Type 1

2.) Ground Settlement Marker Type (G2)

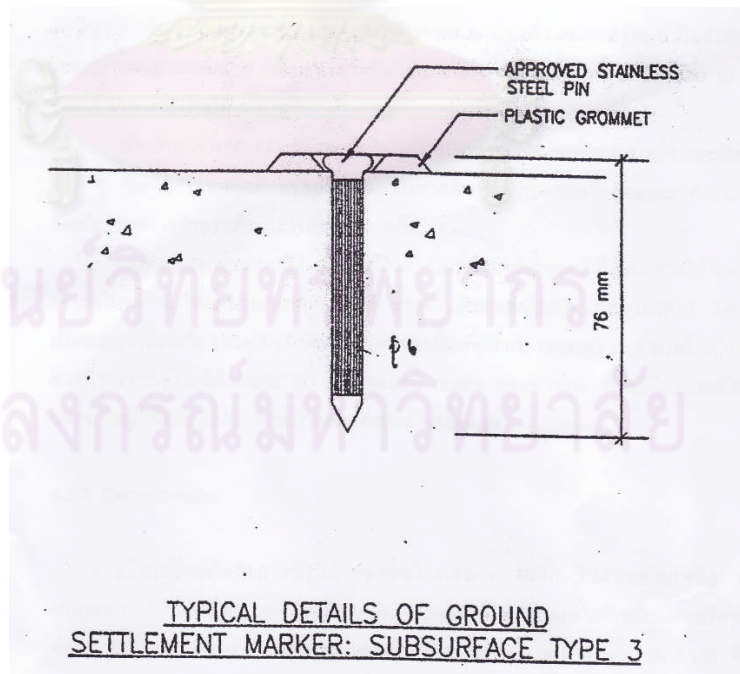
เครื่องมือวัดการทรุดตัวในแนวตั้งของพื้นผิวจราจรหรือบนทางเท้า รายละเอียดของเครื่องมือประกอบด้วยแท่งโลหะ (Steel Rod) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 21 มม. อยู่ในท่อพีวีซี Sleeve ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 34 มม. และปลอกเหล็ก Sleeve ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 49 มม. ตามลำดับ ประกอบติดกับ Anchor ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากติดตั้งที่ระดับลึกกว่า G1 จึงอัดฉีดเบนต์ไอน์ในช่องว่างระหว่างท่อพีวีซี Sleeve กับปลอกเหล็กที่บริเวณก้นหลุม เพื่อป้องกันน้ำใต้ดินซึมเข้าไปในท่อพีวีซี Sleeve ลดแรงเสียดทานระหว่างผิวในท่อพีวีซี Sleeve กับดินที่อยู่ลึกจากผิวล่างของผิวจราจรหรือทางเท้า และเพิ่มความแข็งแรงที่ปลายล่างของแท่งแม่เหล็ก

3.) Settlement Marker Type (G3)

เครื่องมือวัดการทรุดตัวในแนวตั้งที่พื้นผิวจราจรหรือบนทางเท้า มีราคาถูก ติดตั้งง่าย แต่สามารถหลุดออกจากพื้นผิวได้ ไม่คงทนถาวร รายละเอียดของเครื่องมือประกอบด้วยหมุด Stainless steel ฝังลงไปใ้ในผิวจราจรประมาณ 76 มม. และจะมีฝาครอบเพื่อป้องกันการกระแทกกระเทือน



รูปที่ 3.2 แสดง Ground Settlement Marker Type 2



รูปที่ 3.3 แสดง Ground Settlement Marker Type 3

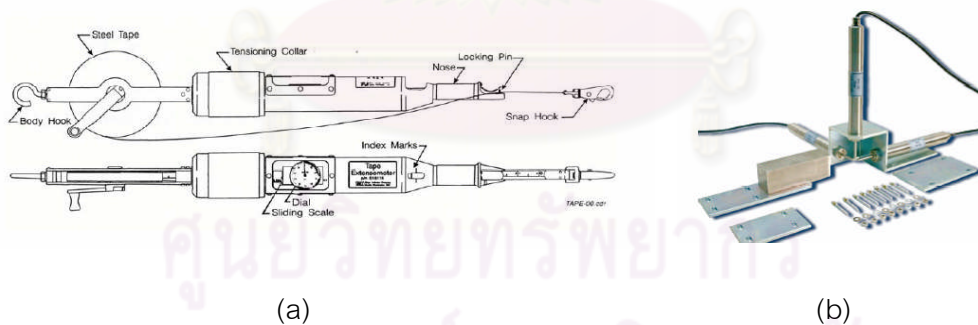
การบันทึกข้อมูล จะรังวัดค่าระดับของแต่ละจุดที่ติดตั้งเครื่องมือชนิดต่าง ๆ โดยมีวิธีการรังวัดระดับด้วยกล้องวัดระดับ ซึ่งถ่ายระดับจากยอดตึกแล้วนำเสนอข้อมูลเป็นระดับ mISD (Meter Initial Standard Datum) จากนั้นจะแปลงค่าระดับนี้เป็นค่าทวัดตัวของดิน ณ วันที่และเวลาที่ทำการรังวัดระดับนั้น ๆ เมื่อทำการรังวัดระดับหลาย ๆ ครั้งในวันหนึ่งหรืออย่างน้อยวันละ 1 ครั้ง และบันทึกข้อมูลทุก ๆ วัน จะได้ข้อมูลค่าทวัดตัวสะสมเพิ่มมากขึ้น แล้วนำเสนอในลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทวัดตัวและวันที่บันทึกข้อมูล

3.3.2.2 Surface Extensometers

Surface Extensometers เป็นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด บนผิวของงานเปิดหน้าดิน หรืองานขุดอุโมงค์ ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.) Convergence Gauge ซึ่งใช้วัดการเคลื่อนตัวเข้าหากันของจุด 2 จุด เช่น ในงานเปิดหน้าดินที่มีค้ำยัน (Braced Excavations) งานขุดอุโมงค์ งานขุดเหมืองใต้ดิน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น Tape Convergence Gauge , Wire Convergence Gauge , Rod and Tube Convergence Gauge , Ultrasonic Convergence Gauge เป็นต้น

2.) Crack meter ในบางครั้งจะเรียกว่า Crack Gauge หรือ Joint meter ใช้ในการวัดการเคลื่อนตัวของรอยร้าวขององค์อาคาร เช่น คอนกรีต ถนน ผิวอุโมงค์ รอยร้าวในเนื้อหิน เป็นต้น



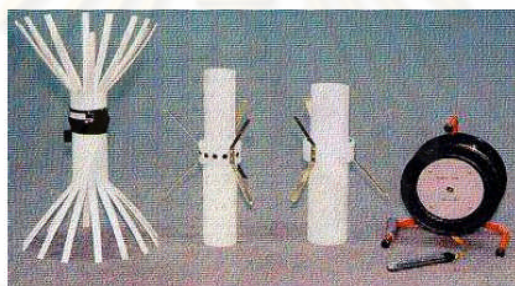
รูปที่ 3.4 แสดง Surface Extensometers

(a) Tape Extensometer

(b) Joint Meter

3.3.2.3 Extensometer

Extensometer เป็นเครื่องมือวัดการทรุดตัวของชั้นดินแต่ละความลึก เป็นแบบ Magnet/Read Switch Gage โดย Probe Extensometer ประกอบด้วยท่อเดี่ยวหรือท่อที่นำมาต่อกัน (Access Pipe) หุ้มด้วยชุดสมอเหล็กวงกลม (Circular Magnetic Anchor) จึงเรียกว่า Magnetic Probe Extensometer โดยที่ Probe Extensometer จะถูกสอดหัวผ่านลงไป ในท่อ ฝังลงในดิน ส่วนตำแหน่งความลึกจะกำหนดโดย 2 วิธี คือ วิธีทางกล และวิธีทางไฟฟ้า ระยะห่างที่ระดับความลึกต่าง ๆ จะวัดเปรียบเทียบกับตำแหน่งของหัวอ่านเสมอ



รูปที่ 3.5 Magnetic Probe Extensometer และ Spider Magnetic

3.3.2.2 Inclinometer

เป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบโดยพิจารณาการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและแนวเดียวกับแนวขุดเจาะอุโมงค์อ่านค่าจากหัวอ่านซึ่งมี Gravity Sensing Transducer วัดความเอียงจากแนวตั้ง สามารถวัดการเคลื่อนตัวของดินที่ระดับความลึกต่างๆ ในแนวราบได้ การติดตั้งจะต้องให้ใกล้เคียงกับแนวตั้งมากที่สุด เพื่อ Inclinometer สามารถอ่านค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างได้ถูกต้อง รายละเอียดของเครื่องมือประกอบด้วย 4 ส่วนดังนี้

- 1.) ท่อนำ (Access Tube) ที่ติดตั้งถาวรทำจากพลาสติก มีร่องล้อ (Tracking Grooves) สำหรับกำหนดทิศทางของหัวอ่าน
- 2.) หัวอ่าน (Probe) เป็นลักษณะ Gravity Sensing Transducer

- 3.) เครื่องอ่าน (Readout Unit) เป็นเครื่องแสดงความเคี้ยวที่อ่านได้จากหัวอ่าน และเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า
- 4.) สายไฟ (Electrical Cable) เชื่อมระหว่างหัวอ่านและเครื่องอ่านเพื่อนำกระแสไฟฟ้าไปที่หัวอ่าน

ค่าการเคลื่อนตัวที่อ่านได้จะต้องนำไปเทียบกับค่าเริ่มต้นเพื่อหาค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบจริง ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของการเคลื่อนตัวของชั้นดินได้อย่างคร่าว ๆ โดยที่ปลายล่างจะถูกทำให้คงที่ การวัดค่าจะวัดเป็นช่วง ๆ ทุกระยะ 50 ซม. ความลึกขึ้นกับชนิดของเครื่องมือแต่ละแบบอย่างต่อเนื่องจากปลายด้านล่างจนถึงปลายท่อด้านบนระยะเบี่ยงเบนจากแนวตั้ง ณ ระดับความลึกใด ๆ คือค่าระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสะสมในแต่ละตำแหน่งความลึกจากจุดคงที่ที่ปลายท่อด้านล่าง ณ วันที่และเวลาที่บันทึก



รูปที่ 3.6 Inclinometer

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำ Inclinometer และ Extensometer มาติดตั้งในหลุมเดียวกัน เพื่อวัดค่าต่าง ๆ ตามชนิดของเครื่องมือดังที่ได้กล่าวมา

3.3.2.3 Liquid Level Gauge

Liquid Level Gauges เป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง มักจะประกอบด้วย กระบอกหรือท่อบรรจุของเหลว เพื่อส่งผ่านความดันไปยังอุปกรณ์วัดค่า ซึ่งอาจอยู่ในรูปของมาโนมิเตอร์ซึ่งแสดงว่าระดับความสัมพัทธ์ หรือเครื่องอ่านระยะไกลระบบอิเล็กทรอนิกส์

โดยทั่วไป จะใช้ Liquid Level Gauges ในการวัดการทรุดตัวของคันทาง หรือฐานรากของคันทาง ซึ่งมีให้เลือกใช้หลายแบบตามความเหมาะสม เช่น Vertical Probe Extensometer , Settlement Platform , Subsurface Settlement Point เป็นต้น เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพของงาน โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้การติดตั้งระบบการทำงานก่อสร้างน้อยที่สุด Liquid Level Gauges ส่วนใหญ่จะใช้ในการเฝ้าตรวจวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่งศูนย์กลางของเครื่องมือวัด บางชนิดจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการความถูกต้องสูง เช่น งานวัดการทรุดตัวของโครงสร้าง

การวัดค่าการทรุดตัวด้วย Liquid Level Gauges จะให้ได้เฉพาะค่าระดับความสัมพัทธ์ (Relative Elevation) ระหว่างจุด 2 จุด เท่านั้น จะไม่สามารถหาค่าระดับสัมบูรณ์ (Absolute Elevation) ได้โดยตรง ดังนั้น ข้อมูลที่วัดจะต้องอ้างอิงกับหมุดหลักฐานที่สร้างไว้ แล้วเปรียบเทียบวิธีงานสำรวจเพื่อตรวจสอบระดับของหมุดหลักฐานกับระบบอ้างอิงที่ถูกต้องอยู่ตลอดเวลา

โดยปกติ Liquid Level Gauges จะได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งเป็นผลให้ความแน่นของของเหลวเปลี่ยนแปลงไปด้วย ผลกระทบเนื่องจากแรงตึงผิวของของเหลว และผลกระทบจากความไม่ต่อเนื่องของของเหลวในท่อส่งผ่านความดัน การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยเลือกวัสดุ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ข้อต่อ ของท่อ ชนิดของของเหลว วิธีการเดินเส้นท่อ ที่เหมาะสมการเปลี่ยนของเหลวและการไล่อากาศอย่างสม่ำเสมอจะลดปัญหาเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของของเหลวได้

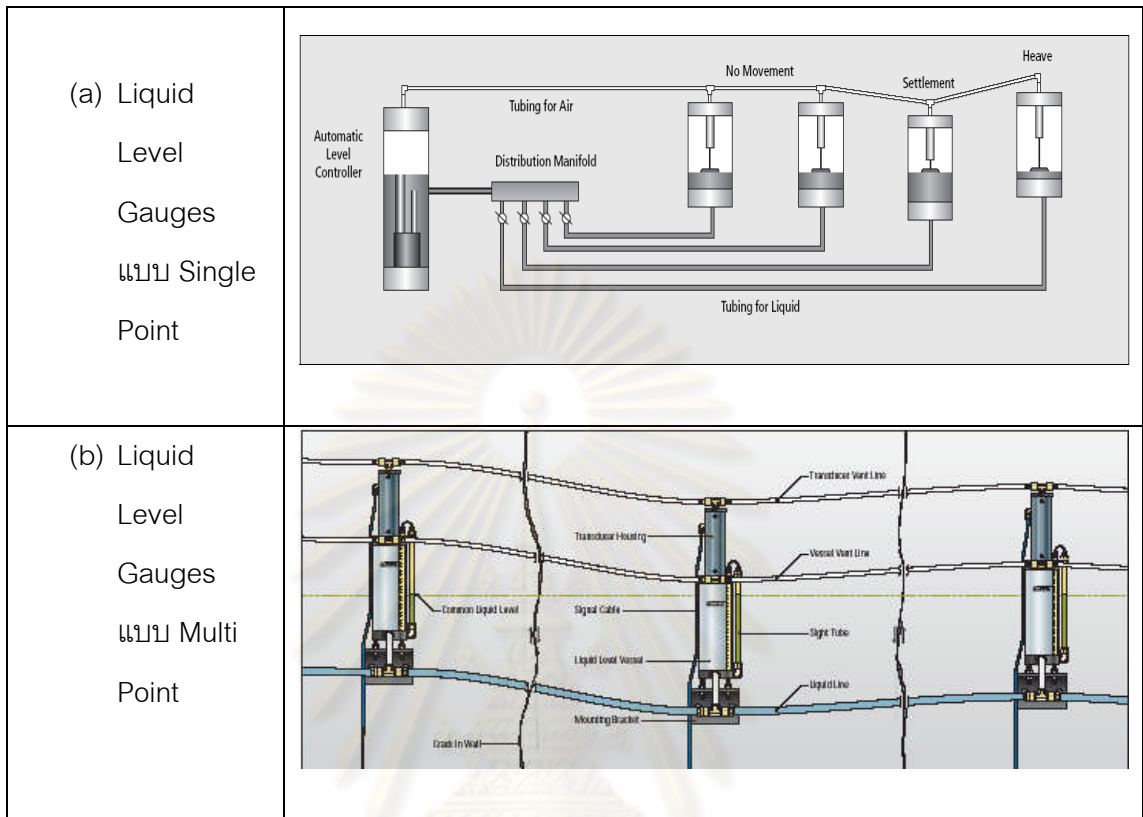
ข้อควรระวังในการใช้มาโนมิเตอร์ปรอท คือ ปรอทเป็นสารที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ และมีผลต่อสภาวะแวดล้อม นอกจากนี้ การใส่ปรอทไว้ในท่อพลาสติกเป็นเวลานาน ปรอทจะคายก๊าซทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของปรอทในท่อได้

Liquid Level Gauges อาจแบ่งตามลักษณะของระบบได้เป็น 5 ประเภท คือ

- 1.) เกจสำหรับวัดค่าที่จุดเดียวโดยปลายทั้ง 2 อยู่ทีระดับเดียวกัน (Single – Point Gauge With Both Ends at Same Elevation)
- 2.) เกจสำหรับวัดค่าที่จุดเดียวโดยอุปกรณ์อ่านค่าอยู่สูงกว่าจุดติดตั้งเครื่องมือวัด (Single Point Gauge with Readout Unit Higher than Cell)
- 3.) เกจสำหรับวัดค่าที่จุดเดียวโดยอุปกรณ์อ่านค่าอยู่ต่ำกว่าจุดติดตั้งเครื่องมือวัด (Single Point Gauge with Readout Unit Lower than Cell)
- 4.) เกจสำหรับวัดค่าหลายจุด (Multipoint Gauges)

5.) เกจสำหรับวัดค่าตลอดแนวตามยาว (Full Profile Gauges)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่าง Liquid Level Gauges



3.3.3 ระดับการระวังของค่าทรุดตัวและเคลื่อนตัวด้านข้าง (Trigger Level)

ข้อมูลพื้นฐานที่จะต้องนำมาสรุปผลเพื่อพิจารณากระดับการระวังอันจะเกิดความเสียหายจากการก่อสร้างไม่ให้เห็นกว่าค่าที่ได้ประเมินไว้ เพื่อควบคุมความปลอดภัย (Safety Control) โดยแบ่งเป็น 3 ระดับดังนี้

1.) Alert Trigger Level

เป็นระดับการระวังความเสียหายจากการก่อสร้างเมื่อค่าทรุดตัว และเคลื่อนตัวด้านข้างเกินกว่า 70 % ของค่าที่ออกแบบและประเมินไว้ ต้องแจ้งต่อผู้รับเหมาก่อสร้างเพื่อหาทางแก้ไขปัญหาและขั้นตอนก่อสร้างจะต้องถูกควบคุมอย่างระมัดระวัง

2.) Alarm Trigger Level

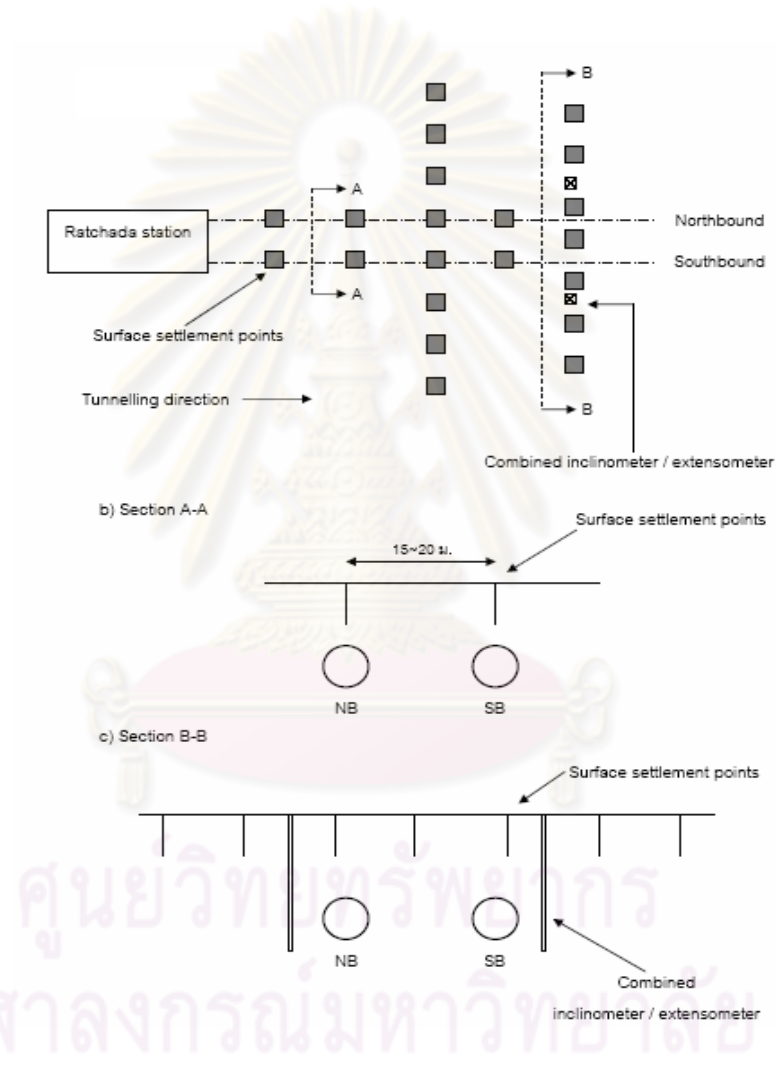
เป็นระดับการระวังความเสียหายจากการก่อสร้างเมื่อค่าทรุดตัวและเคลื่อนตัวด้านข้างเกินกว่า 80 % ของค่าที่ออกแบบไว้ ต้องแจ้งต่อผู้รับเหมาก่อสร้าง ควบคุมการก่อสร้างอย่างระมัดระวังและประชุมวางแผนถ้าเกิด Alarm Trigger Level ต่อไป

3.) Action Trigger Level

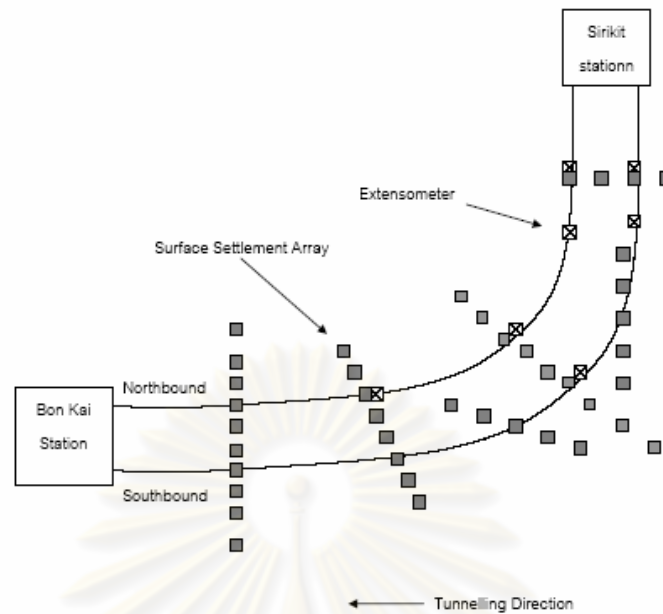
เป็นระดับการระวังความเสียหายจากการก่อสร้างเมื่อค่าทรุดตัวและเคลื่อนตัวด้านข้างเกินกว่า 90 % ของค่าที่ออกแบบไว้ ต้องแจ้งต่อผู้รับเหมาก่อสร้างและดำเนินการแก้ไขตามแผนที่ได้วางไว้ โดยการก่อสร้างทั้งหมดจะต้องหยุด แล้วหาทางแก้ไขทันที

3.4 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดในงานอุโมงค์

3.4.1 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือทั่วไป



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือในงานอุโมงค์



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือในงานอุโมงค์(ต่อ)

3.4.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เครื่องมือในกรณีที่มีอุโมงค์ตัดผ่านกัน

เมื่อไม่นานมานี้ปัญหาอุโมงค์ใหม่ตัดผ่านอุโมงค์เดิมที่มีอยู่ก่อนแล้วเป็นปัญหาใหม่ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยพอที่จะนำมาสรุปโครงการต่างๆได้ดังนี้

- 1.) อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินตัดกับอุโมงค์ส่งน้ำประปาของการประปานครหลวง บริเวณ สถานี สิริกิติ์ – บ่อนไก่ และ บริเวณ ระหว่างสถานี สามย่าน – หัวลำโพง
- 2.) อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ตัดกับอุโมงค์ท่อร้อยสาย ของการไฟฟ้านครหลวง บริเวณสถานี เพชรบุรี
- 3.) อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินตัดกับอุโมงค์ผันน้ำ บริเวณวัดช่องลมใกล้กับสถานี

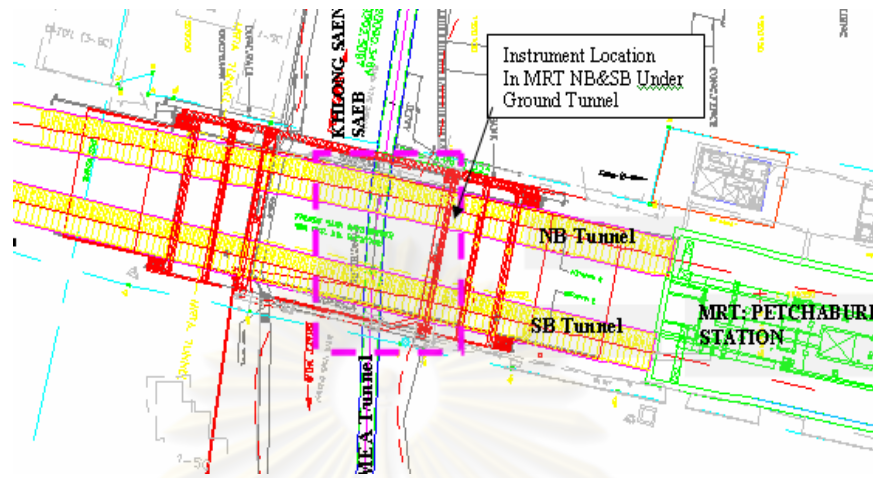
คลองเตย

จะเห็นได้ว่ามีอยู่หลายโครงการที่เกิดกรณีดังกล่าว และในอนาคตคาดว่าจะมีกรณีนี้เกิดขึ้นอีก ดังนั้นการตรวจวัดจะมีบทบาทสำคัญไม่เฉพาะขณะก่อสร้างเท่านั้นแต่ยังรวมไปถึงการตรวจวัดตลอดอายุการใช้งานของอุโมงค์ในบริเวณที่คาดว่าจะมีปัญหาดังกล่าว

ในงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างการประยุกต์ใช้เครื่องมือมาติดตั้งจากการเกิดกรณีอุโมงค์ตัดผ่านกันโดยดั่งรายละเอียดต่อไปนี้

- รายละเอียดทั่วไปของโครงการ

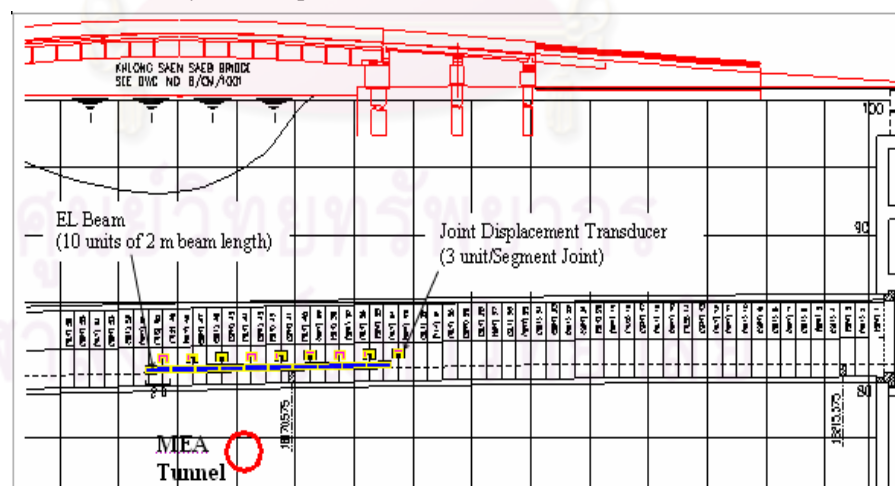
คู่มือของการไฟฟ้านครหลวงที่ก่อสร้างใหม่จะตัดผ่านใต้คู่มือรถไฟฟ้าบริเวณใกล้กับสถานี เพชรบุรี โดยที่บริเวณที่คู่มือตัดผ่านกันอาจจะมีผลกระทบต่อคู่มือรถไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งเครื่องมือในการตรวจวัดในบริเวณดังกล่าว



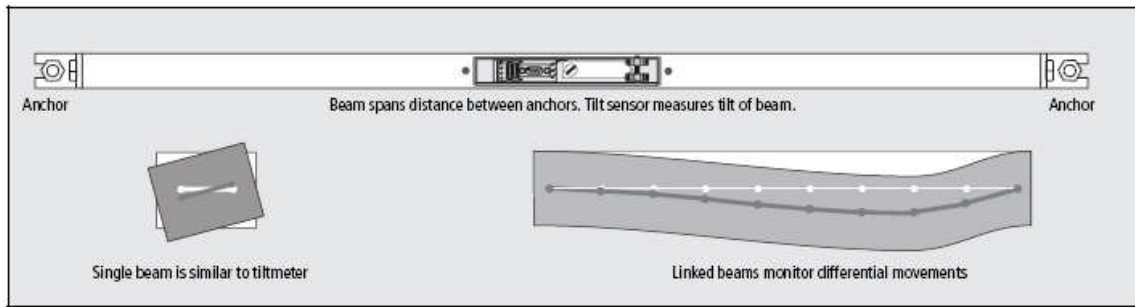
รูปที่ 3.9 บริเวณตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือ

- การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของคู่มือ

เป็นการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของคู่มือตามแนวยาวของคู่มือ โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือ คือ EL-Beam โดยการดำเนินงานของ EL-Beam จะทำการติดตั้งเชื่อมต่อกันไปบริเวณตำแหน่งที่สนใจตามความยาวคู่มือ ดังรูปแสดง



รูปที่ 3.10 บริเวณตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือ(ต่อ)



รูปที่ 3.11 EL-Beam



รูปที่ 3.12 การติดตั้ง EL-Beam

ในการตรวจวัดครั้งนี้ได้ตรวจวัดเฉพาะช่วงระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์ในช่วงเวลาที่ตัดผ่านอุโมงค์รถไฟฟ้าเท่านั้นโดยในระยะยาวยังไม่มีการตรวจวัดแต่อย่างใด

บทที่ 4

การออกแบบระบบตรวจวัดการหลุดตัวของอุโมงค์

4.1 ขั้นตอนในการออกแบบ

ในการออกแบบระบบการหลุดตัวของอุโมงค์นี้สามารถที่จะแบ่งขั้นตอนการออกแบบโดยแบ่งเป็น 8 ขั้นตอน ดังนี้

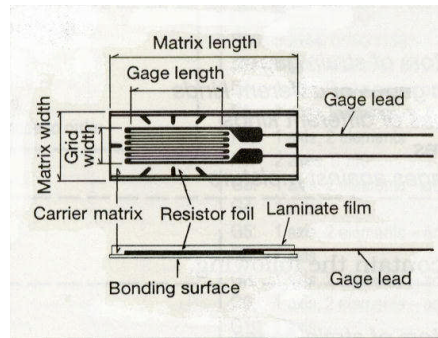
1. ศึกษาความสำคัญและทบทวนงานวิจัยในอดีต
2. ออกแบบลักษณะการทำงานของระบบ
3. คัดเลือกวัสดุที่จะนำมาทำชิ้นส่วนของเครื่องมือ
4. ทำการสอบเทียบ
5. ทำเครื่องมือต้นแบบ
6. ทดสอบการทำงานทั้งระบบโดยใช้แบบจำลองการหลุดตัว
7. ทำการเปรียบเทียบเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาเทียบกับเครื่องมือจากต่างประเทศ
8. สรุปผลจากงานวิจัย

4.2 รายละเอียดของการออกแบบ

4.2.1 ระบบการทำงานและอุปกรณ์หลักของระบบ

1.) ส่วนตรวจจับและเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงาน (Detection stage)

ส่วนนี้เป็นส่วนแรกของระบบการวัดโดยทั่วไป มีหน้าที่ในการวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งที่ต้องการตรวจวัดแล้วเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของสัญญาณที่จะส่งไปยังส่วนต่อไป ซึ่งอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สเตรอนเกจซึ่งจะเปลี่ยนสมบัติทางฟิสิกส์เป็นสัญญาณไฟฟ้า ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 สเตรอนเกจ (Strain Gauge)

2.) ส่วนปรับปรุงคุณภาพสัญญาณ (Signal conditioning stage)

ข้อมูลหรือสัญญาณส่วนแรกจะถูกส่งมาส่วนนี้ เพื่อทำการปรับปรุงและกำหนดเงื่อนไขของสัญญาณและจะส่งไปยังส่วนต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ใช้ Data Loggers ของ National Instrument (NI) รุ่น SC 2345 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับค่าจาก strain gauge ซึ่งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้ามาประมวลผล ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วยหลาย channel โดยแต่ละ channel จะสามารถวัดสายสัญญาณได้ 1 สัญญาณ ดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 Data Loggers รุ่น SC 2345

3.) ส่วนรูปแบบของการแสดงผล (Terminating readout stage)

เป็นส่วนที่ทำให้การวัดบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่เราต้องการโดยจะต่อเข้ากับอุปกรณ์แสดงผล เช่น เครื่องบันทึกค่า คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ประมวลผลควบคู่ไปกับการควบคุมซึ่งในส่วนนี้ยังมีอุปกรณ์เสริมซึ่งจะทำหน้าที่รับข้อมูล (Input) เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เนื่องจากระบบที่ใช้เป็นระบบสัญญาณทางไฟฟ้า จึงใช้การ์ด DAQ รุ่น 6036E ของ National Instrument (NI) ดังรูป 4.3



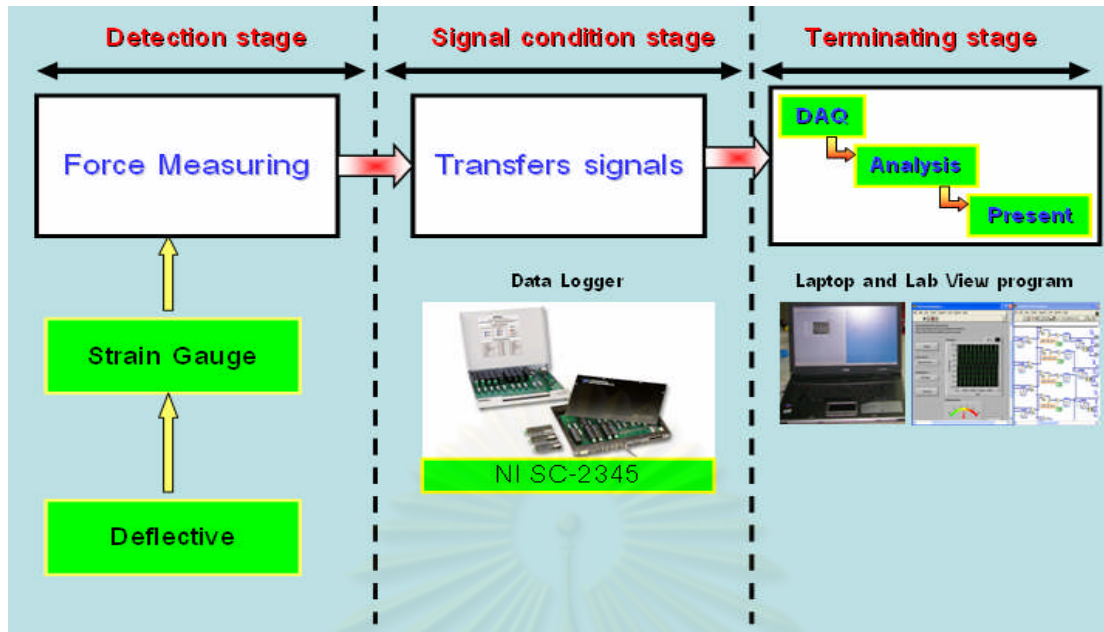
รูปที่ 4.3 การ์ด DAQ รุ่น 6036E

ในส่วนของการแสดงผลนั้นใช้คอมพิวเตอร์ Note Book โดยจะใช้งานร่วมกับ โปรแกรม LabVIEW ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.4 คอมพิวเตอร์ Note Book

แผนผังของระบบและอุปกรณ์ตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 4.5 ในส่วนแรกจะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปของโครงสร้างที่รับแรงจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์มาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยใช้สเตรนเกจเป็นตัวตรวจวัด ในส่วนปรับปรุงคุณภาพสัญญาณใช้ SC-2345 ของ National Instrument ใช้การ์ด DAQ เป็นอุปกรณ์รับข้อมูลสู่คอมพิวเตอร์โดยใช้งานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ในการนำเสนอข้อมูล

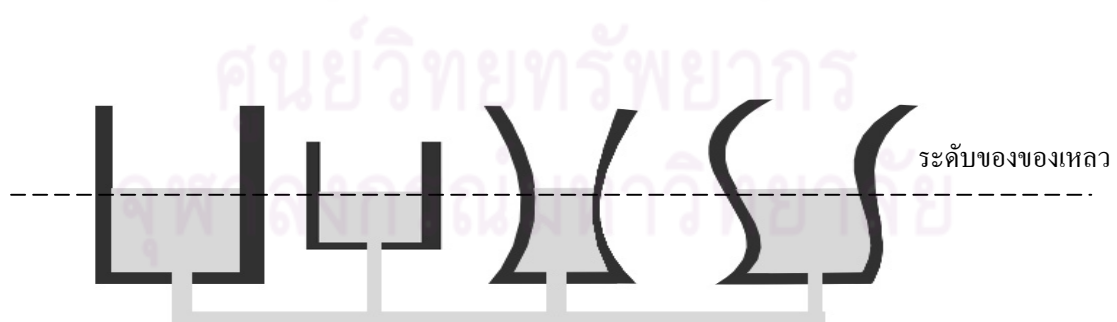


รูปที่ 4.5 แผนผังของระบบตรวจวัด

4.2.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบเครื่องมือวัด

จากการศึกษาทฤษฎีและนำมาประมวลผลพบว่าการออกแบบการทำงานของเครื่องมือวัดการทดสอบนั้นสามารถประยุกต์จากหลักการพื้นฐานทางด้านวิทยาศาสตร์โดยใช้หลักการพื้นฐานดังต่อไปนี้

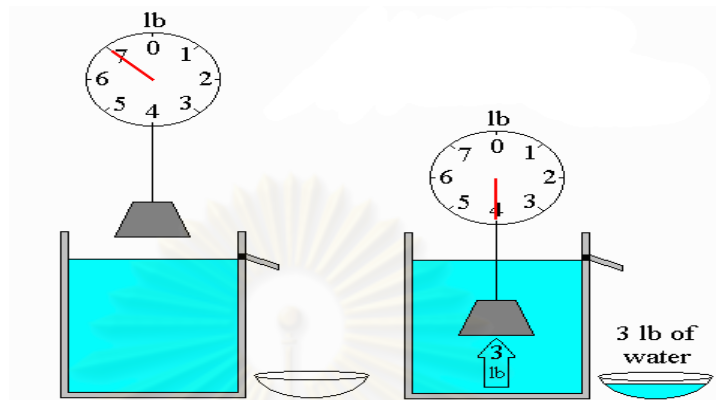
- 1) หลักการของคุณสมบัติของของเหลว (Properties of Liquids)



รูปที่ 4.6 แสดงหลักการของคุณสมบัติของของเหลว

จากรูป 4.6 อาศัยหลักการที่ว่าระดับของผิวของเหลว ณ จุดใด ๆ ที่อยู่ในระบบเดียวกัน จะรักษาระดับของของเหลวให้เท่ากันเสมอ ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ

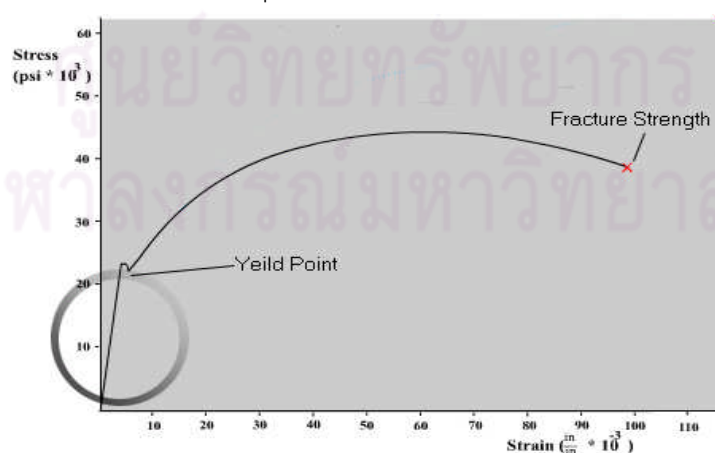
2) แรงลอยตัว (Buoyancy)



รูปที่ 4.7 แสดงหลักการของแรงลอยตัว

จากรูป 4.7 อธิบายได้ดังนี้ เมื่อส่วนหนึ่งของวัตถุจมอยู่ในของเหลว จะทำให้ระดับของเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาตรวัตถุไปแทนที่ของเหลวนั้น และจะเกิดแรงลอยตัวกระทำต้วกับวัตถุ ซึ่งแรงนี้จะมีค่าเท่ากับ น้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับส่วนที่ถูแทนที่โดยวัตถุ ถ้าหากเราทดลองโดยให้ของเหลวส่วนที่ถูแทนที่ล้นออกมาจากภาชนะดังรูป เราจะสามารถพิสูจน์ได้ว่า น้ำหนักของวัตถุที่ลดลงไปเนื่องจากแรงลอยตัว จะมีค่าเท่ากับ น้ำหนักของของเหลวส่วนที่ถูแทนที่

3) กลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanical of Materials)



รูปที่ 4.8 แสดงพฤติกรรมของวัสดุ

จากรูปที่ 4.8 อธิบายได้ว่า เมื่อทำการทดสอบโดยการให้แรงดึงแก่วัสดุ วัสดุจะมีการยืดตัวออกโดยในช่วงนี้เมื่อทำการนำแรงที่ให้ออก วัสดุยังสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ จะเรียกว่า ช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก แต่เมื่อทำการให้แรงจนเลยจุด จุดหนึ่ง วัสดุจะมีการยืดตัวอย่างถาวร และจะไม่สามารถกลับสู่สภาพเดิมได้เมื่อนำแรงที่ให้แก่วัสดุออก จะเรียกจุดนี้ว่า Yield Point และวัสดุจะเกิดพฤติกรรมแบบอินอีลาสติก ซึ่งถ้าหากให้แรงแก่วัสดุต่อไปเรื่อยๆ วัสดุจะมีการยืดตัวออกมากจนกระทั่งชิ้นวัสดุขาดออกจากกัน จะเรียกจุดนี้ว่า Fracture Strength ซึ่งถ้านำค่าเหล่านี้ไปพล็อตกราฟ จะได้ช่วงกราฟดังรูป โดยในการทดลองนี้เราจะใช้พฤติกรรมวัสดุในช่วงที่เป็นอีลาสติกเท่านั้นเพราะช่วงนี้พฤติกรรมของวัสดุเป็น Linear เพื่อที่วัดการเปลี่ยนแปลงค่า stress-strain ที่เกิดขึ้น เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยจะออกแบบให้วัสดุอยู่รับแรงอยู่เฉพาะในช่วงดังกล่าว

จากหลักการพื้นฐานดังกล่าวสามารถนำมาสรุปลักษณะของการทำงานของระบบดังนี้ คือ การทำงานของระบบจะใช้การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำโดยในช่วงเริ่มต้นระดับน้ำจะพยายามรักษาระดับที่ระดับเดียวกัน และเมื่อเกิดการหลุดตัวขึ้นระดับน้ำจะเปลี่ยนปริมาตรแต่จะยังคงรักษาระดับเดียวกันซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันที่กระทำกับอุปกรณ์ซึ่งหลักการนี้ก็คือการวัดระดับแบบใช้การแทนที่ของวัตถุด้วยของเหลวซึ่งได้กล่าวโดยละเอียดไว้ในบทที่ 2 โดยตัวเซนเซอร์จะจับความเปลี่ยนแปลงโดยการตรวจวัดแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนโครงสร้าง เทียบกับค่าเริ่มต้น

4.2.3 หลักการพิจารณาออกแบบชิ้นส่วนรับแรง

- 1.) การเสียรูปของโครงสร้างต้องอยู่ในช่วงอีลาสติก เพื่อไม่ให้โครงสร้างเสียรูปถาวร
- 2.) ขนาดของสเตรนในบริเวณที่ติดสเตรนเกจ ต้องไม่มากเกินไปจนอาจทำให้โครงสร้างเสียรูปถาวร และไม่น้อยจนไม่ทำให้โครงสร้างวัดสัญญาณได้
- 3.) การกระจายของสเตรนมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ที่ติดสเตรนเกจ เพื่อทำให้ได้สัญญาณสูงสุด
- 4.) การออกแบบให้ง่ายต่อการก่อสร้าง และง่ายต่อการติดสเตรนเกจ ในการออกแบบโครงสร้างต้องพิจารณาถึงรูปร่างที่เป็นไปได้ในการสร้างเพราะบางรูปร่างอาจจะทำได้ยากหรืออาจทำไม่ได้เลย นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความยากง่ายในการติดตั้งสเตรนเกจเนื่องจากเป็นส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์

5.) ความต้องการด้านความปลอดภัย ต้องป้องกันฝุ่นละอองหรือไอน้ำได้ เป็น
ต้น

6.) ปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ ปัจจัยที่พิจารณาประกอบด้วยอายุการใช้งาน และ
ความคงทน ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษา และวัสดุอุปกรณ์ที่จัดซื้อต้องหาได้ง่าย

4.2.4 รูปแบบและการเลือกใช้วัสดุ

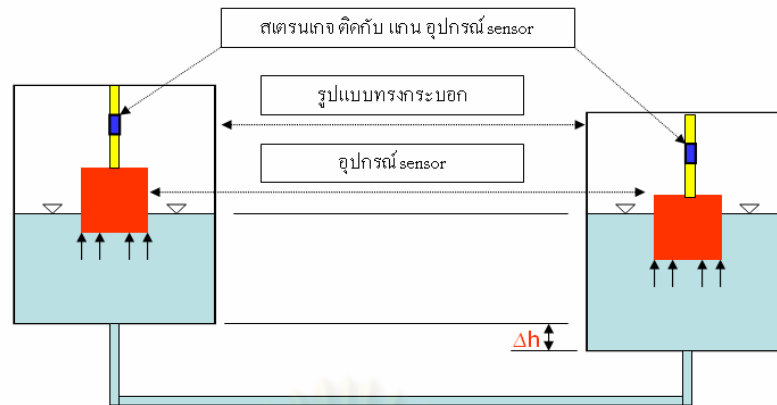
จากหลักการพื้นฐานข้างต้นสามารถที่จะกำหนดรูปแบบลักษณะการทำงานของอุปกรณ์
และทำการคัดเลือกวัสดุที่จะนำมาทำอุปกรณ์โดยในการคัดเลือกอุปกรณ์นั้นคำนึงถึงวัสดุที่หาได้
ไม่ยากนัก ต้นทุนไม่แพงเกินไปและที่สำคัญที่สุดคือมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์
โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนที่จะต้องติดกับสเตรนเกจ

ในการพิจารณาเลือกจะพิจารณาจากการตอบสนองของการทำงานของระบบกล่าวคือ
ลักษณะการหลุดตัวกับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควรจะเป็นเชิงเส้นกันมากที่สุด ดังนั้นได้
ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบเลือกวัสดุดังต่อไปนี้

4.2.4.1 ระบบเซนเซอร์ โดยการติดสเตรนเกจ ตามแนวแกน

- แนวคิดของระบบ

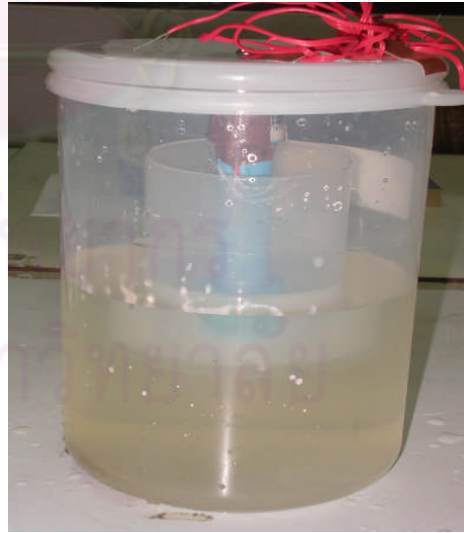
- 1.) เมื่อเกิดการหลุดตัวในระบบน้ำจะเปลี่ยนแปลงปริมาตร
- 2.) แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้หน่วยแรงที่กระทำกับอุปกรณ์ตรวจ
รู้แรงมีค่าต่างกัน
- 3.) การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดังกล่าวสามารถที่จะตรวจรู้ได้โดย
อุปกรณ์ตรวจรู้แรง (สเตรนเกจ) ซึ่งจะติดตั้งตามแนวแกน
- 4.) อุปกรณ์ตรวจรู้แรงจะส่งสัญญาณไปยัง Data Logger และพิจารณา
ผลในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของอุปกรณ์แบบที่ 1

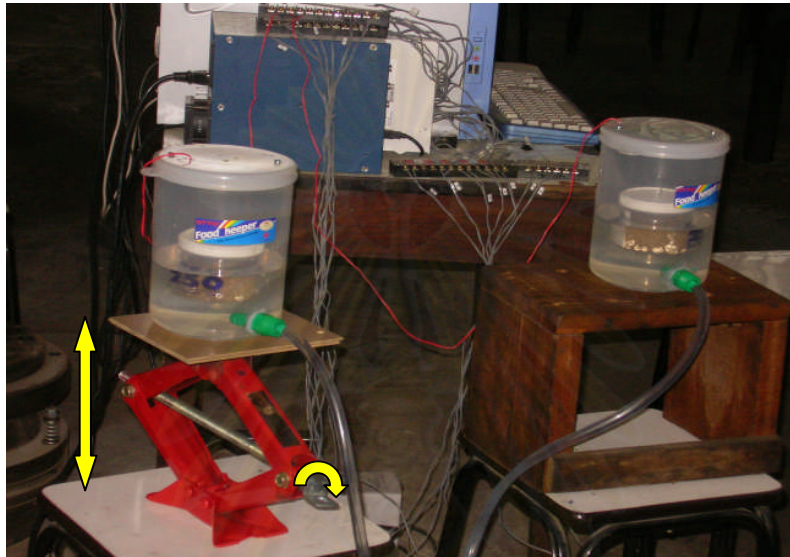
- จากรูปแบบดังที่ได้แสดงจึงได้คัดเลือกวัสดุดังนี้

- 1) รูปทรงเครื่องมือใช้กระป๋องพลาสติกขนาด ϕ 15 ซม. สูง 20 ซม.
- 2) อุปกรณ์เซนเซอร์ 2 ส่วน
 - 2.1) ส่วนที่สัมผัสกับน้ำใช้กระป๋องพลาสติก ขนาด ϕ 7 ซม. สูง 8 ซม.
 - 2.2) ส่วนที่เป็นแกนใช้ท่อ PVC ขนาด ϕ 1.80 ซม. สูง 12 ซม.
- 3) สายยางระดับน้ำเพื่อเชื่อมต่อระบบ
- 4) สเตรนเกจ

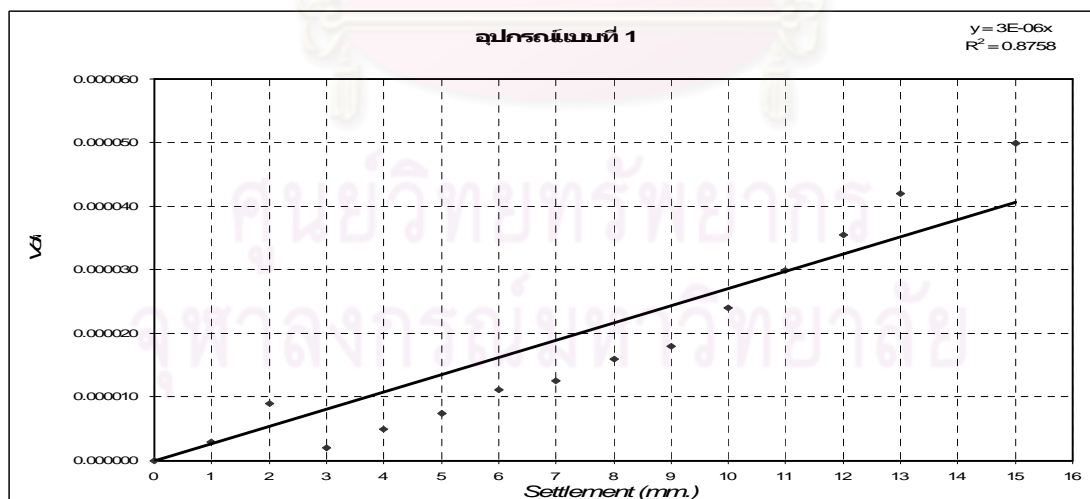


รูปที่ 4.10 แสดงอุปกรณ์แบบที่ 1

หลังจากประดิษฐ์อุปกรณ์เสร็จ ขั้นตอนต่อไปคือทำการพิจารณาการตอบสนองของอุปกรณ์เมื่อใช้งานจริง วิธีการคือ นำอุปกรณ์ไปทดสอบกับเครื่องแปลงสัญญาณ (Data Logger) โดยทำการสอบเทียบระหว่างค่าการทรุดตัวกับสัญญาณทางไฟฟ้า (Volt) ซึ่งในการควบคุมการทรุดตัวนั้นได้พิจารณาใช้แม่แรงโดยทำการปรับระดับที่ค่าการทรุดตัวต่างๆ โดยเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากจุดอ้างอิงซึ่งจากการทำการทดลองได้กราฟดังที่แสดง



รูปที่ 4.11 แสดงการทดสอบการตอบสนองของอุปกรณ์

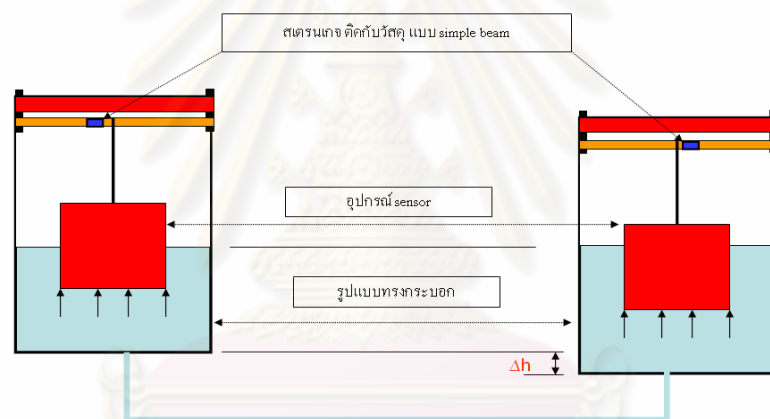


รูปที่ 4.12 กราฟการตอบสนองของอุปกรณ์แบบที่ 1

4.2.4.2 ระบบเซนเซอร์ โดยการติดตั้งเตรนเกจแบบคานอย่างง่าย(Simple Beam)

- แนวคิดของระบบ

- 1.) เมื่อเกิดการทรุดตัวในระบบน้ำจะเปลี่ยนแปลงปริมาตร
- 2.) แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้หน่วยแรงที่กระทำกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงมีค่าต่างกัน
- 3.) การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดังกล่าวสามารถที่จะตรวจรู้ได้โดย อุปกรณ์ตรวจรู้แรง (สเตรนเกจ) ซึ่งจะติดตั้งที่บริเวณประมาณกึ่งกลางของคานเพื่อตรวจค่าแรงจาก Bending Moment
- 4.) อุปกรณ์ตรวจรู้แรงจะส่งสัญญาณไปยัง Data Logger และพิจารณาผลในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของอุปกรณ์แบบที่ 2

- จากรูปแบบดังที่ได้แสดงจึงได้เลือกวัสดุดังนี้

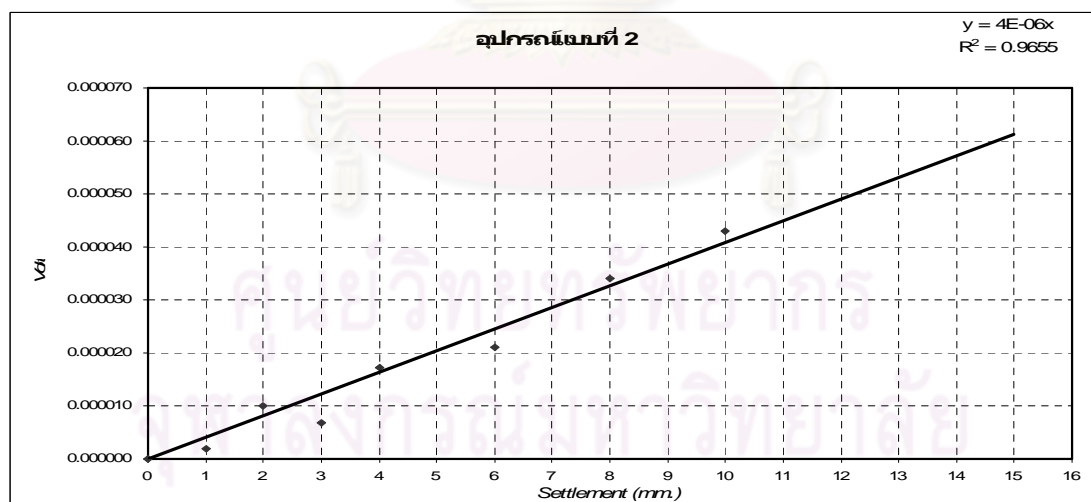
- 1) รูปทรงเครื่องมือใช้กระป๋องพลาสติกขนาด ϕ 15 ซม. สูง 20 ซม.
- 2) อุปกรณ์เซนเซอร์ 3 ส่วน
 - 2.1) ส่วนที่สัมผัสกับน้ำใช้กระป๋องพลาสติก ขนาด ϕ 6 ซม. สูง 7 ซม. น้ำหนัก 385 กรัม
 - 2.2) ส่วนที่ Simple beam ใช้แผ่นพลาสติกบาง ขนาดกว้าง 1.3 ซม. ยาว 15 ซม.หนา 0.8 ซม.
 - 2.3) สายเอ็นสำหรับดึงถ่วงกับ Simple beam ยาว 8 ซม.
- 3) สายยางระดับน้ำเพื่อเชื่อมต่อบระบบ

4) สเตรนเกจ

นำอุปกรณ์ไปทดสอบกับเครื่องแปลงสัญญาณ (Data Logger) โดยทำการสอบเทียบระหว่างค่าการทรุดตัวกับค่าสัญญาณไฟฟ้า (Volt) นำมาพล็อตกราฟได้กราฟดังรูป



รูปที่ 4.14 แสดงอุปกรณ์แบบที่ 2

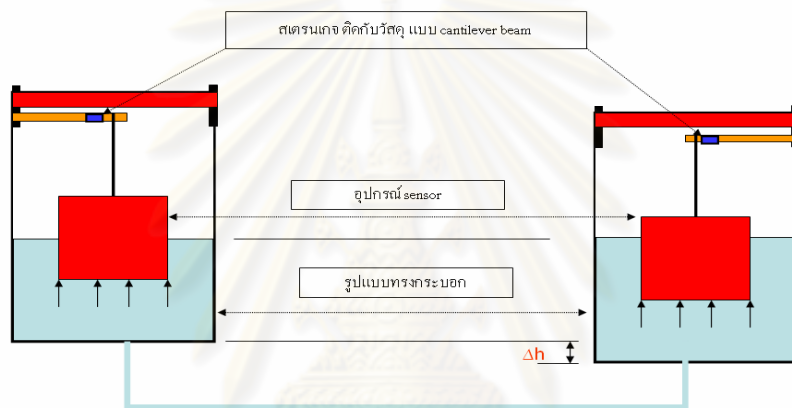


รูปที่ 4.15 กราฟการตอบสนองของอุปกรณ์แบบที่ 2

4.2.4.3 ระบบเซนเซอร์ โดยการติดสเตรนเกจแบบคานยื่น (Cantilever Beam)

- แนวคิดของระบบ

- 1.) เมื่อเกิดการหลุดตัวในระบบน้ำจะเปลี่ยนแปลงปริมาตร
- 2.) แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้หน่วยแรงที่กระทำกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงมีค่าต่างกัน
- 3.) การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดังกล่าวสามารถที่จะตรวจรู้ได้โดย อุปกรณ์ตรวจรู้แรง(สเตรนเกจ)ซึ่งจะติดตั้งที่บริเวณปลายยึดแน่นของคานเพื่อตรวจวัดค่าแรงจาก Bending Moment
- 4.) อุปกรณ์ตรวจรู้แรงจะส่งสัญญาณไปยัง Data Logger และพิจารณาผลในขั้นตอนต่อไป



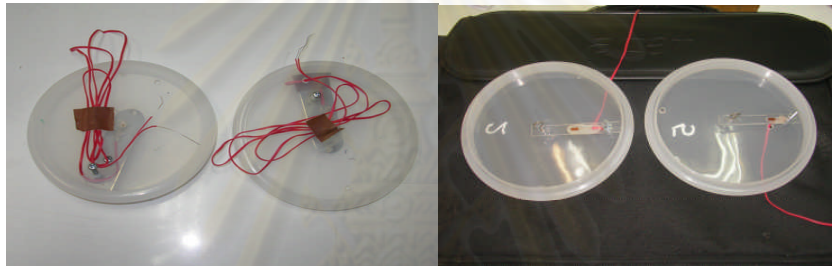
รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะของอุปกรณ์แบบที่ 3

จากรูปแบบดังที่ได้แสดงจึงได้เลือกวัสดุดังนี้

- 1) รูปทรงเครื่องมือใช้กระป๋องพลาสติกขนาด ϕ 15 ซม. สูง 20 ซม.
- 2) อุปกรณ์เซนเซอร์ 3 ส่วน
 - 2.1) ส่วนที่สัมผัสกับน้ำใช้กระป๋องพลาสติก ขนาด ϕ 6 ซม. สูง 7 ซม. หนัก 385 กรัม
 - 2.2) ส่วนที่ Cantilever beam ได้พิจารณาใช้วัสดุ 2 แบบดังนี้
 - 2.2.1) แผ่นเหล็กสแตนเลสขนาด กว้าง 2.5 ซม. ยาว 8 ซม.
 - 2.2.2) แท่งอะครีลิกขนาด กว้าง 1 ซม. ยาว 8 ซม. หนา 0.2 ซม.
 - 2.3) สายเอ็นสำหรับดึงด้วยกับ simple beam ยาว 8 ซม.
- 3) สายยางระดับน้ำเพื่อเชื่อมต่อบน
- 4) สเตรนเกจ



(a)



(b)

(c)

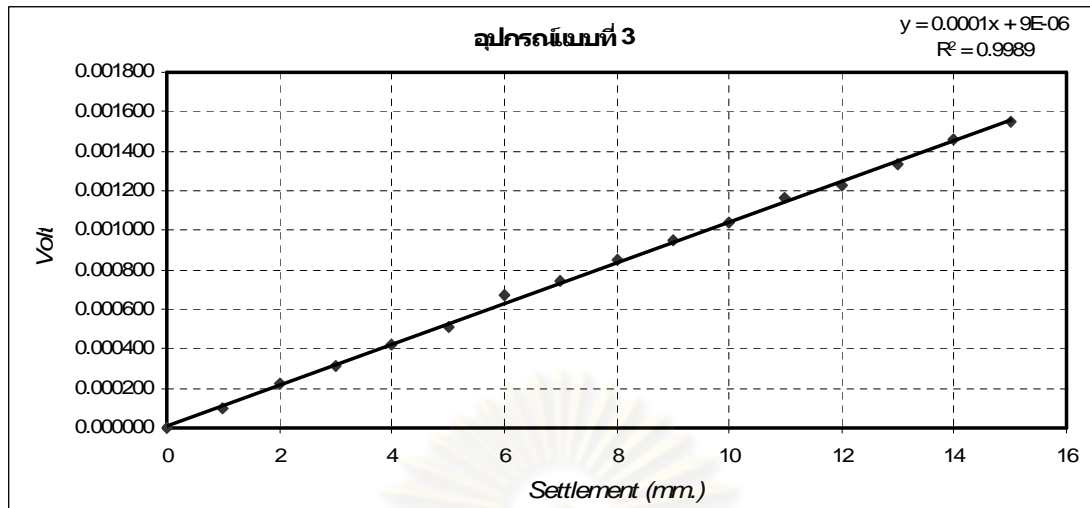
รูปที่ 4.17 แสดงอุปกรณ์แบบที่ 3

(a) รูปแบบอุปกรณ์

(b) ติดสเตรนเกจบนแผ่นเหล็กสเตนเลส

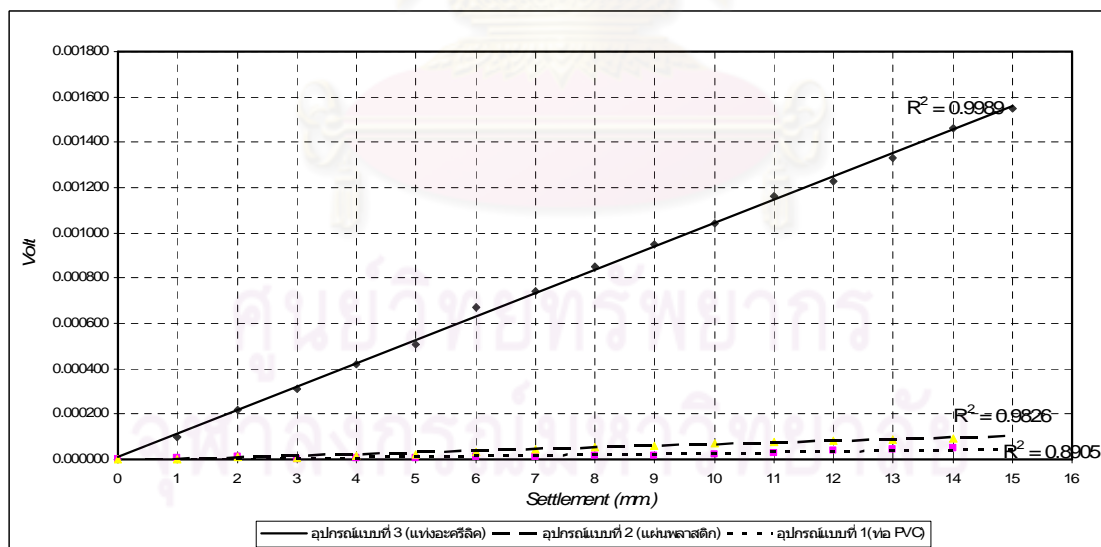
(c) ติดสเตรนเกจบนแท่งอะครีลิค

จากการทดสอบอุปกรณ์แบบที่ 3 ทั้ง 2 ชนิด คือ (1) แบบที่ติดสเตรนเกจบนแผ่นสเตนเลส (2) แบบที่ติดสเตรนเกจบนแท่งอะครีลิค พบว่า แผ่นสเตนเลสนั้นมีความแข็งแรงมากไม่สามารถที่จะตรวจจับค่าการเปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันของน้ำได้ ส่วนแท่งอะครีลิค นั้นให้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจดังกราฟที่แสดง



รูปที่ 4.18 กราฟการตอบสนองของอุปกรณ์แบบที่ 3

จากผลของการทดสอบทั้ง 3 แบบแสดงให้เห็นว่าแท่งอะครีลิกที่ติดตั้งบนแกนแบบคานยื่น มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดและได้ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกแท่งอะครีลิก เป็นชิ้นส่วนตรวจจู้แรง ในการประดิษฐ์เครื่องมือวัดการทรุดตัวในขั้นต่อไป



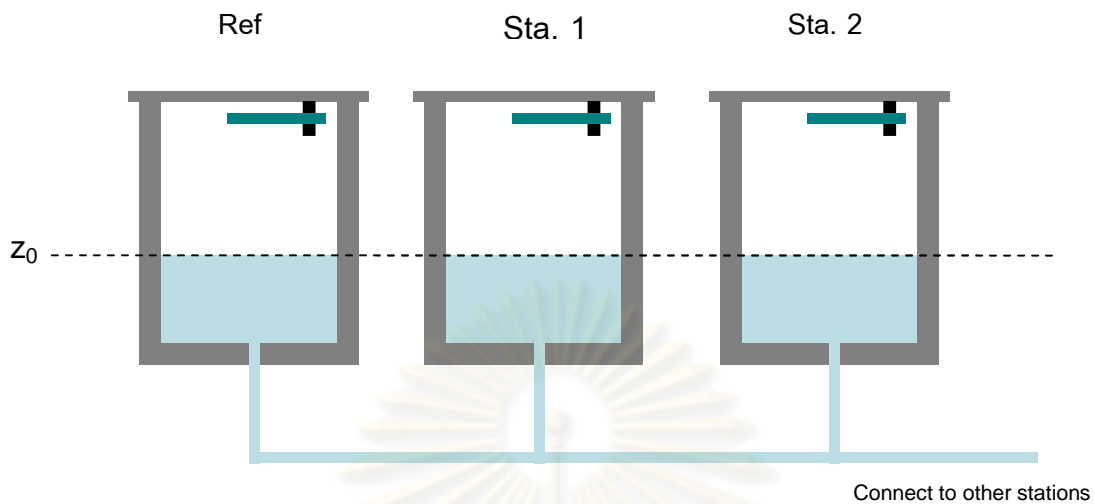
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการตอบสนองของอุปกรณ์ทั้ง 3 แบบ

4.3 สรุปรูปแบบการทำงานของเครื่องมือและการเลือกใช้วัสดุ

จากการทดสอบดังที่นำเสนอมาแล้วข้างต้นสามารถที่จะสรุปการเลือกใช้รูปแบบระบบการทำงาน of เครื่องมือและการเลือกใช้วัสดุได้ดังนี้

4.3.1 ระบบการทำงานของเครื่องมือ

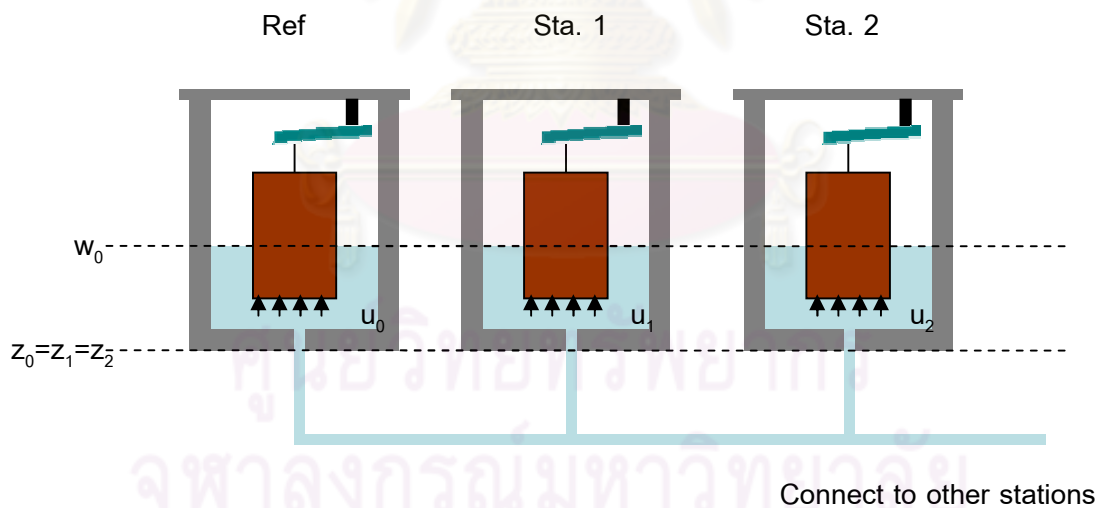
1) ขั้นตอนที่หนึ่ง



รูปที่ 4.20 แสดงการทำงานของระบบขั้นตอนที่ 1

จากรูปที่ 4.20 อันดับแรกสุดจะทำการต่อท่อน้ำเชื่อมกับเครื่องมือตรวจวัด โดยต่อเชื่อมติดกันต่อเนื่องเป็นระยะดังภาพ ในช่วงนี้วัสดุยังไม่มีการรับแรงใดๆ

2) ขั้นตอนที่สอง

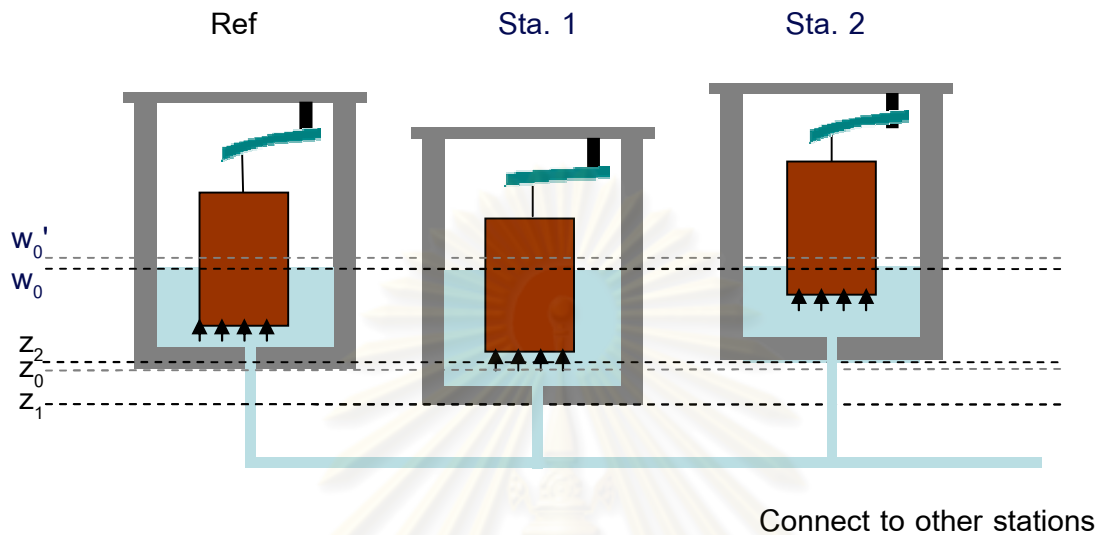


รูปที่ 4.21 แสดงการทำงานของระบบขั้นตอนที่ 2

จากรูปที่ 4.21 เมื่อวัสดุถูกแรงกระทำโดยมวลน้ำหนักถ่วง แรงดังกล่าวจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดกระทำต่อวัสดุค่าหนึ่ง ซึ่งสาเหตุที่จำเป็นต้องใส่ น้ำหนักถ่วงไปเนื่องจากเมื่ออุปกรณ์เกิดการหลุดตัวจะทำให้เชือกที่ผูกติดกับหย่อน หากไม่ได้มีการใส่แรงเริ่มต้นไปก่อน จะทำให้แรงกระทำที่ไปดันวัสดุมีค่าเป็นศูนย์เมื่อติดตั้งน้ำหนักถ่วงลงไปก็จะส่งผลให้เกิดแรงดึงและแรงอัดในส่วน

ด้านบนและด้านล่างของวัสดุตามลำดับ ทำให้ค่า Strain ทั้งส่วนด้านบน และด้านล่างของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลง ในขั้นตอนนี้ถือเป็นการเซ็ทค่าเริ่มต้น (Initial) ของเครื่องมือตรวจวัด

3) ขั้นตอนที่สาม



รูปที่ 4.22 แสดงการทำงานของระบบขั้นตอนที่ 3

จากรูปที่ 4.22 เมื่อเกิดการหลุดตัวเกิดขึ้นที่เครื่องมือตรวจวัดที่จุดใดจุดหนึ่ง ก็จะทำให้ระดับของของเหลวภายในเครื่องมือพยายามที่จะรักษาระดับเดียวกันโดยที่ตำแหน่งที่เกิดการหลุดตัวนั้นจะมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อแรงลอยตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลน้ำหนักถ่วงได้รับแรงลอยตัวเพิ่มทำให้แรงที่ถ่วงวัสดุมีค่าลดลง โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อวัสดุจึงมีค่าลดลงตามลงไป ซึ่ง Strain gauge ที่ติดตั้งไว้ที่ตัววัสดุจะสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้โดยแปลงค่าจากแรงที่เกิดขึ้นส่วนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่งค่าดังกล่าวไปยัง อุปกรณ์รับปรุงสัญญาณต่อไป

4.3.2 ข้อกำหนดของชิ้นส่วนอุปกรณ์

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์ที่หาได้ไม่ยากเย็นโดยที่ราคาไม่สูงและคุณภาพเพียงพอที่จะใช้งานได้ ซึ่งจากการทดสอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ทั้งหมดสรุปได้ดังตารางตารางที่ 4.1 ข้อกำหนดของชิ้นส่วนอุปกรณ์

ตัวแปร	ข้อมูล
ชนิดของแท่ง ROD	อะครีลิก (Young Modulus ~ 20000 ksc)
ขนาด ROD (กว้าง x หนา x ยาว)	10 mm x 2 mm x 60 mm
การติดตั้งแท่ง ROD	CANTILEVER
รูปร่างของแท่ง ROD	RECTANGULAR

ขนาดถ้วย	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 cm สูง 8 cm
ความละเอียดของเครื่อง DATA LOGGERS	1 μE
ชนิดของของเหลว	น้ำ
น้ำหนักถ่วง	385 กรัม

4.4 การสอบเทียบเครื่องมือ

การสอบเทียบเป็นหัวใจสำคัญในการสร้างเครื่องมือโดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด โดยที่การสอบเทียบคือ การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ต้องการนั่นคือค่าเอาต์พุตของเครื่องมือ ซึ่งจะต้องมีความสัมพันธ์กับค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิง ซึ่งการสอบเทียบจะต้องทำเป็นระยะ ๆ อย่างสม่ำเสมอเพื่อทดสอบความถูกต้อง โดยที่ความสามารถทำงานได้ของเครื่องมือนั้นขึ้นอยู่กับ การสอบเทียบเป็นสำคัญ

อันที่จริงแล้วในช่วงการเลือกรูปแบบการทำงานและการเลือกวัสดุในขั้นตอนการทดสอบ การตอบสนองของชิ้นส่วนเครื่องมือนั้นก็ถือเป็นการสอบเทียบในเบื้องต้นแล้วแต่ในขั้นตอนนี้จะทำการสอบเทียบโดยละเอียดเพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปทำการปรับแก้และเขียนลงในโปรแกรม LabVIEW ต่อไป

4.4.1 วิธีการสอบเทียบ

ในงานวิจัยนี้ใช้สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้แรงซึ่งมีหน้าที่ เปลี่ยนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งในการสอบเทียบครั้งนี้จะกระทำโดยการควบคุมการท่อดัดและอ่านค่าเอาต์พุตที่ออกมาหน่วยเป็นโวลต์ กับค่าการท่อดัดที่เกิดจริงจากนั้นนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์และหาค่าคงที่เพื่อเขียนโปรแกรม Lab VIEW ต่อไป

4.4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสอบเทียบ

1.) Dial Gage เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดระยะการเคลื่อนตามแนวแกนที่สนใจ ความละเอียดขึ้นอยู่กับสเกลของตัว gage นั้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้ dial gage ที่มีความละเอียด 1 DIV = 0.001 inch



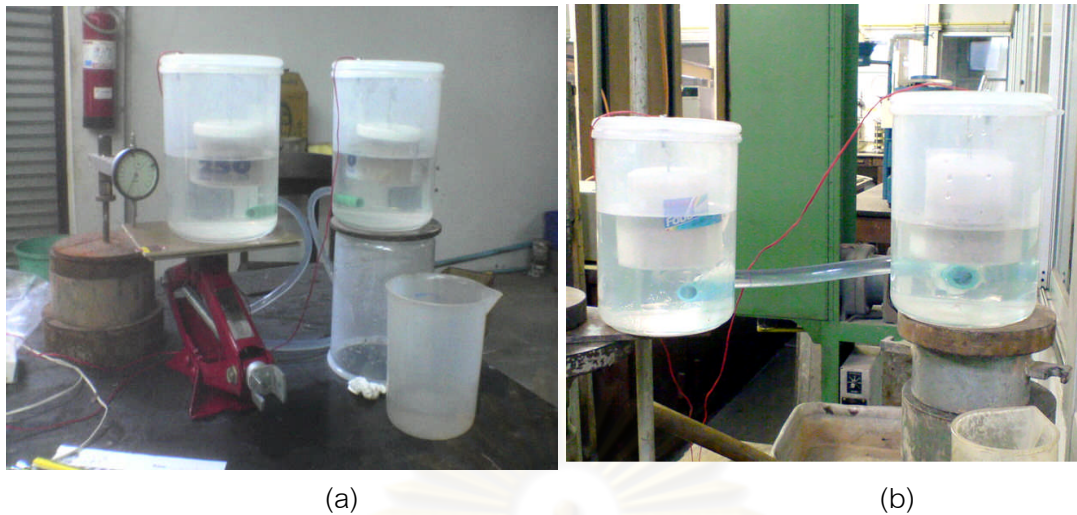
รูปที่ 4.23 Dial Gage

2.) อุปกรณ์สำหรับควบคุมการหลุดตัว เป็นเครื่องมือที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ จุดประสงค์เพื่อทำการสอบเทียบเครื่องมือรวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของเครื่องมือ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ 2 แบบคือ เครื่องทดสอบ CBR และ แม่แรง

4.4.1.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ

- 1.) ทำการต่อท่อเชื่อมอุปกรณ์ระหว่าง Reference กับ Station ที่จะนำมาทดสอบ
- 2.) ใส่น้ำให้ระดับผิวของเหลวอยู่ประมาณระดับกึ่งกลางของน้ำหนักรถ่วง
- 3.) ไล่ฟองอากาศที่อยู่ระหว่างท่อที่ติดตั้ง
- 4.) ปรับระดับความสูงของจุด Reference และจุด Observer เท่ากัน
- 5.) ควบคุมระดับของจุด observer โดย การใช้แม่แรง และ เครื่องทดสอบ CBR

การสอบเทียบได้ทำการสอบเทียบหลายครั้งด้วยกันโดยจะเลือกค่าการสอบเทียบที่ดีที่สุดมาใช้งาน โดยผลที่ได้ดังแสดงในบทที่ 5



รูปที่ 4.24 การสอบเทียบเครื่องมือ

(a) การสอบเทียบโดยใช้แม่แรง

(b) การสอบเทียบโดยใช้เครื่องทดสอบ CBR

4.5 โปรแกรม LabVIEW

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นโปรแกรมประยุกต์ เป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปในการพัฒนา (Graphical – based Programming) โดยในปัจจุบันในหลายอุตสาหกรรมได้นำเอา LabVIEW มาใช้กับงานวัดควบคุม

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเอาโปรแกรม LabVIEW เพื่อการแสดงผลการทดสอบในแต่ละตำแหน่ง โดยการทำงานของโปรแกรมจะต้องทำงานควบคู่กันไปกับตัวเครื่องมือเพราะค่าคงที่ ที่นำมาเขียนลงในโปรแกรม มาจากการสอบเทียบเครื่องมือ ถ้าหากว่ามีการสอบเทียบใหม่ก็จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวด้วยนั่นเอง โดยในงานวิจัยนี้โปรแกรมนี้เป็นเพียงการนำเสนอกราฟและค่าการทดสอบเท่านั้น

4.5.1 การทำงานของโปรแกรม

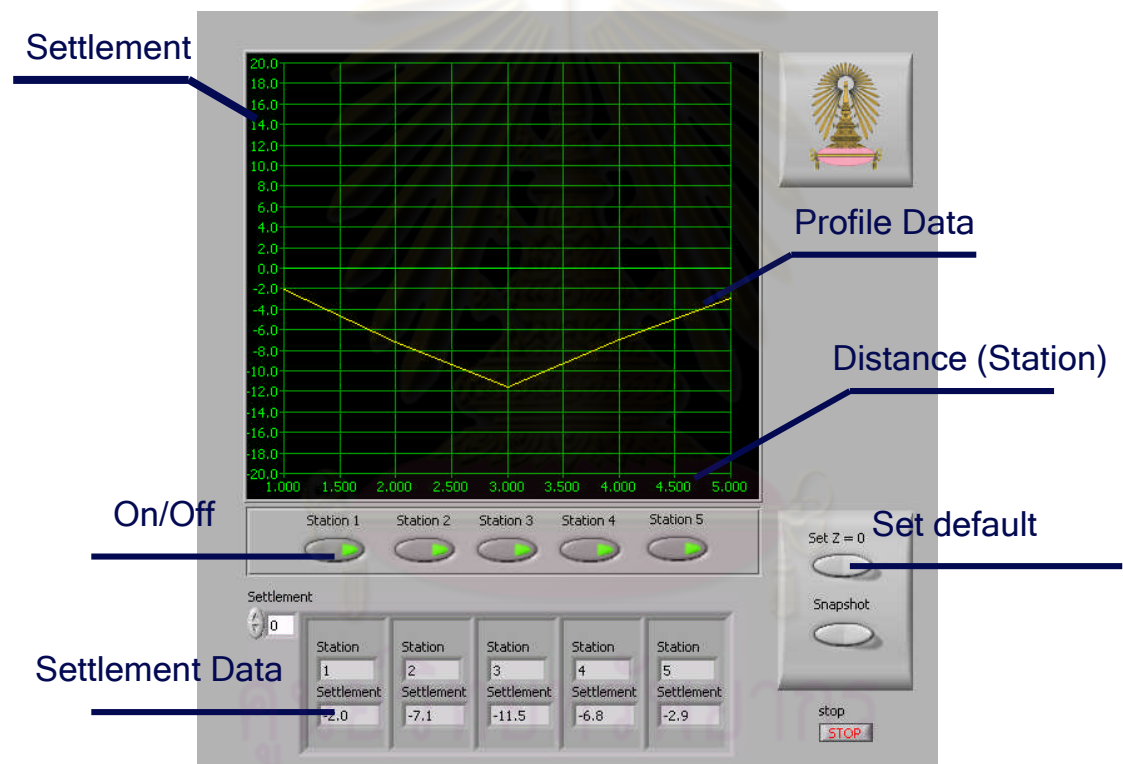
อุปกรณ์ (Tool) ในการใช้งานของโปรแกรมในการอ่านค่าการทดสอบที่เขียนขึ้นโดยใช้ application ของโปรแกรม LabVIEW

ในขั้นตอนแรกจะต้องทำให้โปรแกรมจดจำค่าเริ่มต้นไว้ โดยการใช้งาน ปุ่มตั้งค่าเริ่มต้น (Set default) ซึ่ง โปรแกรมจะเริ่มสามารถแสดงผลค่าการทดสอบในขณะนั้นได้ (Real-time

Status) โดยสามารถทำการเลือกได้ว่าจะให้แสดงผลในจุดตรวจวัดที่ระบุได้ และส่วนของการแสดงผลค่าการทรุดตัวที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ

- 1.) ส่วนของข้อมูลกราฟ เป็นส่วนแสดงผลของโปรแกรม เพื่อบอกถึงรูปร่างลักษณะการทรุดตัวในแต่ละจุดตรวจวัด โดยในแกนนอน เป็นการบอกระยะทางของแต่ละจุดตรวจวัด และในแกนตั้ง เป็นการบอกค่าการทรุดตัวหรือยกตัวที่เกิดขึ้น
- 2.) ส่วนของข้อมูลตัวเลขเป็นค่าเดียวกันที่แสดงในกราฟ แต่จะแสดงออกมาเป็นดิจิทัล

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการนำเสนอผลการทรุดตัวแต่ละจุดเท่านั้นซึ่งไม่สามารถที่จะวิเคราะห์หรือทำงานนอกเหนือจากนี้ได้



รูปที่ 4.25 การใช้โปรแกรม LabVIEW

4.6 การจำลองการทดสอบระบบการทำงานเสมือนจริง

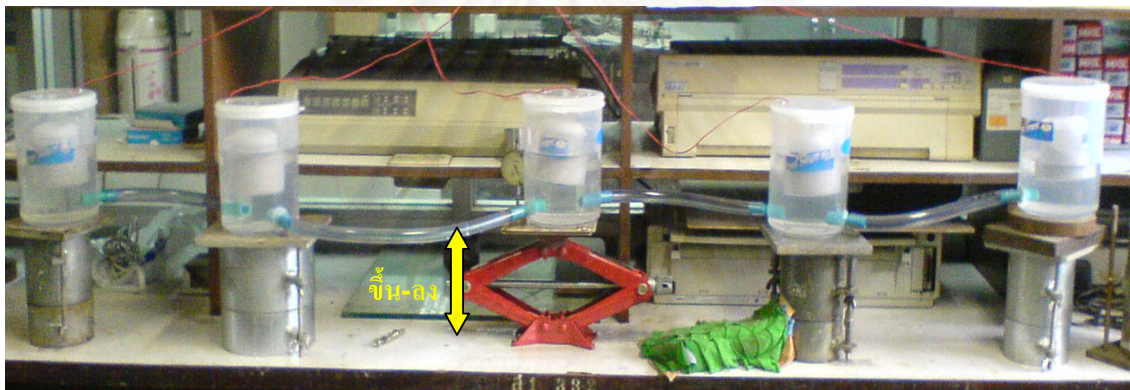
ก่อนที่จะทำเครื่องมือต้นแบบจะต้องทำการทดสอบการทำงานเสมือนจริงคือการสร้างแบบจำลองการทรุดตัวในนี้ใช้แม่แรงเป็นอุปกรณ์ควบคุมการทรุดตัว การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อวัดค่าความแม่นยำของอุปกรณ์ เมื่อได้ทราบค่า Calibration factor จากการทดลองก่อนหน้านี้ก็จะทำการป้อนค่าลงในตัวโปรแกรม LabVIEW

ในการทดสอบจะให้เกิดระยะการหลุดตัวโดยจะอาศัยเครื่องมือที่ใช้ควบคุมกำหนดค่าการหลุดตัว ซึ่งการปรับเครื่องมือ ขึ้น-ลง จะทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างการหลุดตัวที่เกิดขึ้นจริง และค่าหลุดตัวที่อ่านได้จากโปรแกรม LabVIEW เพื่อที่จะนำมาหาค่าความละเอียด และความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1.) ทำการต่อท่อเชื่อมอุปกรณ์ระหว่าง Reference กับ Station ที่จะนำมาทดสอบ
- 2.) ใส่น้ำให้ระดับผิวของเหลวอยู่ประมาณระดับกึ่งกลางของน้ำหนักถ่วง
- 3.) ไล่ฟองอากาศที่อยู่ระหว่างท่อที่ติดตั้ง
- 4.) ปรับระดับความสูงของจุด Reference และจุด Observer เท่ากัน
- 5.) เปลี่ยนแปลงระดับของจุด observer เพื่อวัดค่าการหลุดตัวที่เกิดขึ้นจริง และค่า

หลุดตัวที่อ่านได้จากโปรแกรม LabVIEW

ผลที่ได้จากการทดสอบการทำงานเสมือนจริงแสดงไว้ในบทที่ 5



รูปที่ 4.26 แสดงการทดสอบการทำงานเสมือนจริง

4.7 เครื่องมือต้นแบบ

หลักการประดิษฐ์เครื่องมือต้นแบบได้คำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1.) มีความเชื่อถือได้
- 2.) ง่ายและสะดวกในการใช้งาน
- 3.) มีคุณภาพดีพอต่อการใช้งาน
- 4.) ต้นทุนไม่สูงจนเกินไป

4.7.1 รูปแบบของเครื่องมือต้นแบบ



1. จุดเชื่อมต่อเข้ากับตำแหน่งอื่น
2. จุดสังเกตระดับน้ำภายในเครื่องมือ
3. ตำแหน่งทางออกของสายสเตรอนเกจ

รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะของเครื่องมือต้นแบบ

ในการประดิษฐ์เครื่องมือต้นแบบจะเปลี่ยนเฉพาะรูปลักษณะภายนอกของเครื่องมือเท่านั้น โดยภายในยังคงใช้อุปกรณ์เหมือนเดิมทุกอย่าง เพราะอุปกรณ์ภายในทั้งหมดได้ผ่านการทดสอบและผ่านการคัดเลือกมาแล้วในขั้นตอนการทำเครื่องมือจำลอง

4.8 การทดสอบเครื่องมือต้นแบบ

โปรแกรมการทดสอบเครื่องมือต้นแบบจะทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.8.1 ข้อกำหนดและคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือที่ทำการเปรียบเทียบ

Hydrostatic Settlement Cell เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดการทรุดตัวหรือยกตัวซึ่งสามารถที่จะประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายประเภท เช่น งานเขื่อน งานฐานราก งานอุโมงค์ และรวมไปถึงงานโครงสร้างทุกประเภท ที่ต้องการทราบค่าการทรุดตัว

ตารางที่ 4.2 ข้อกำหนดทั่วไปของเครื่องมือที่ทำการเปรียบเทียบ

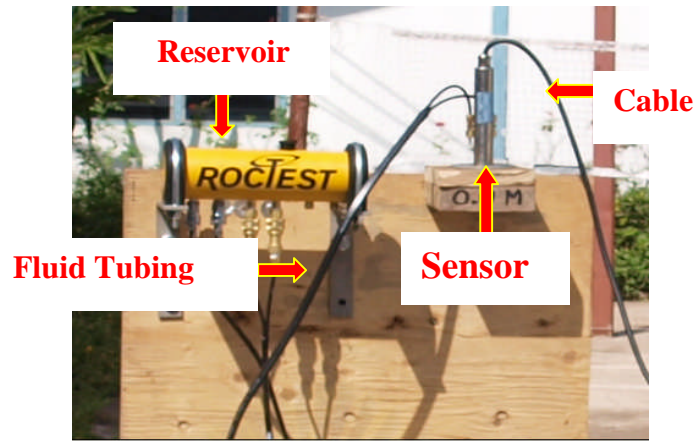
1.ชนิดของเครื่องมือ	Hydrostatic Settlement Cell
2.ชื่อเครื่องมือ / รุ่น	Soil Settlement Gauge / SSG
3.บริษัทผู้ผลิต / ประเทศ	Roctest / Canada
4.คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือ	
4.1 Transducer Type	Vibrating Wire
4.2 Fluid Type	Water
4.3 Accuracy	$\pm 0.1\% FS$
4.4 Resolution	$\pm 0.025\% FS$
4.5 Range	1 m.(1000 mm)

4.8.2 ส่วนประกอบของระบบ

ลักษณะการทำงานของเครื่องมือเป็นลักษณะการทำงานแบบ Single Point นั่นคือในแต่ละตำแหน่งของเครื่องมือจะต้องมี Reservoir เป็นของตัวเองโดยตัวระบบการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

1.) ส่วนที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดซึ่งจะติดตั้งที่ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าการทรุดตัว

2.) ส่วนที่เป็น Reservoir ส่วนนี้จะต้องติดตั้งในตำแหน่งที่ไม่ถูกรบกวน นั่นคือต้องติดตั้งในตำแหน่งที่คาดว่าจะไม่เกิดการทรุดตัวซึ่งส่วนนี้ยังเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการคำนวณค่าการทรุดตัวต่อไป



รูปที่ 4.28 แสดงเครื่องมือที่นำมาทำการเปรียบเทียบ

4.8.3 การคำนวณค่าการหดตัวของเครื่องมือ

เครื่องมือชนิดนี้ใช้เซ็นเซอร์ ระบบ Vibrating Wire ในการอ่านค่านั้นจะอ่านออกมาเป็น Linear Unit (LU) โดยใช้เครื่อง Read Out Unit ในการอ่าน ซึ่งได้ทำการ สอบเทียบ มาจากโรงงาน แล้ว ส่วนการคำนวณค่าการหดตัวหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$P.\text{Converted} = AL^2 + BL + C', \quad C' = -AL_0^2 - BL_0,$$

$$P.\text{Corrected} = P.\text{Converted} - CT (T - T_0), \quad LU = \text{Linear Unit}, \quad 1\text{kPa} = 0.10198 \text{ mH}_2\text{O}$$

เมื่อ A, B, C' = ค่าคงที่ของเครื่องมือแต่ละตัว

Linear Unit (LU) = ค่าที่อ่านจาก Read Out Unit



รูปที่ 4.29 Read Out

4.8.4 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือ

เครื่องมือชนิดนี้ได้นำมาติดตั้งในโครงการก่อสร้างเขื่อนไฟฟ้าพลังน้ำ น้ำงึม 2 ประเทศลาว ซึ่งเป็นเขื่อนหินถมฉาบผิวหน้าด้วยคอนกรีต โดยจะทำการติดตั้งภายในตัวเขื่อนของชั้นหินถมตามตำแหน่งต่าง ๆ รวม 22 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.30 แสดงการติดตั้งเครื่องมือ

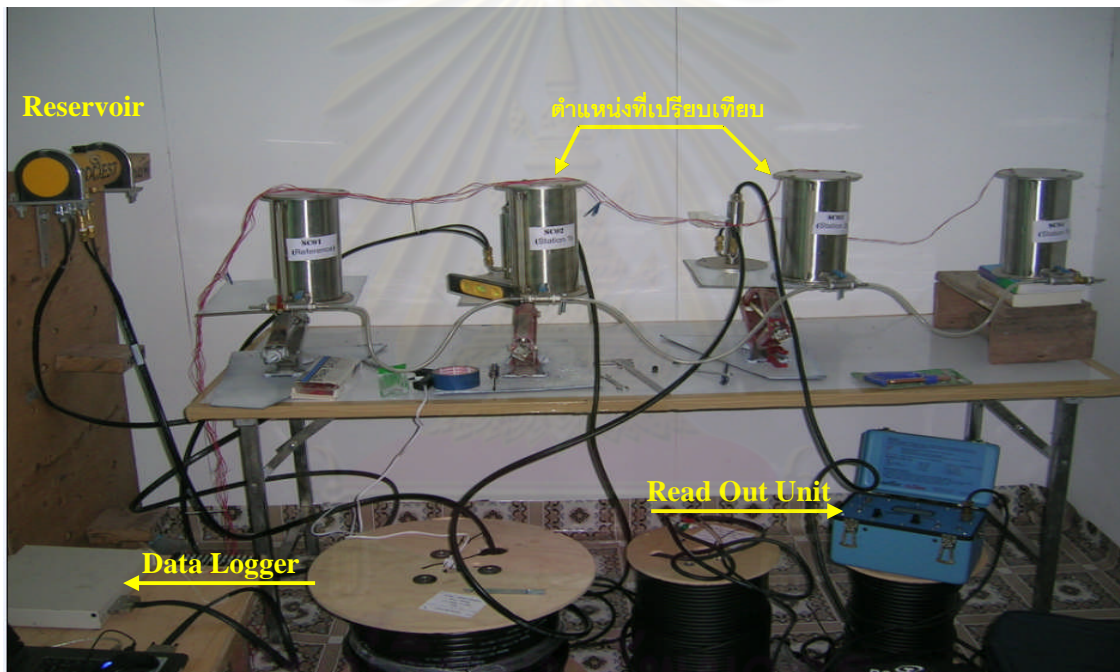
4.8.5 การเปรียบเทียบเครื่องมือ

การเปรียบเทียบเครื่องมือ คือ การเปรียบเทียบเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมา กับเครื่องมือจากต่างประเทศ (SSG) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1.) ทำการติดตั้งเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาบนแบบจำลองการหลุดตัวโดยในขั้นตอนนี้จะใช้แม่แรงเป็นอุปกรณ์ควบคุมการหลุดตัว
- 2.) นำเครื่องมือวัดการหลุดตัว SSG มาติดตั้งที่ตำแหน่งเดียวกันกับเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นมา อนึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้นำเอาเครื่องมือวัดการหลุดตัว SSG มาเปรียบเทียบ 2 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.31 แสดงการติดตั้งเครื่องมือที่ตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบเครื่องมือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

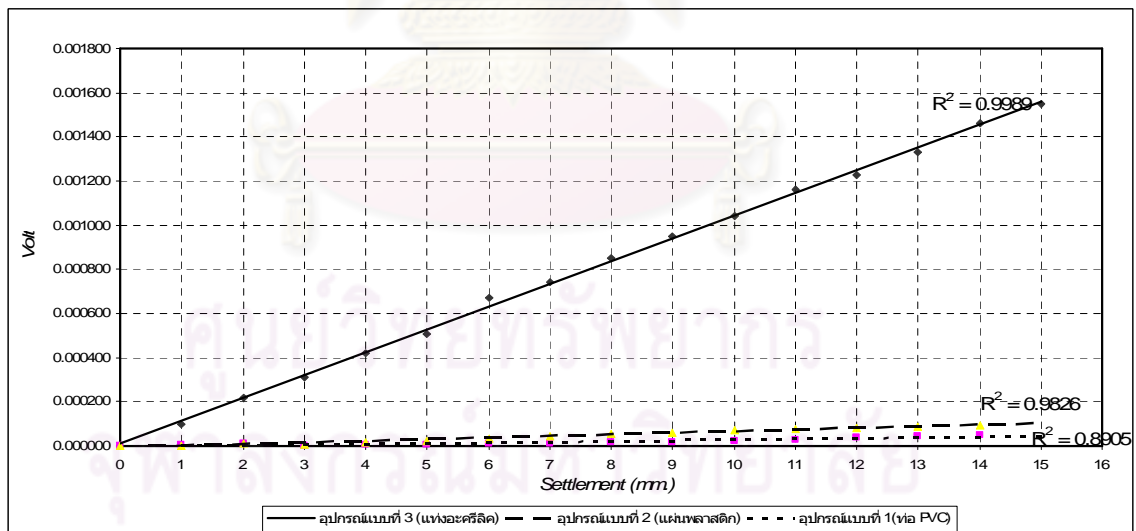
ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงแนวคิด กระบวนการ และขั้นตอนต่างๆ ของการพัฒนาเครื่องมือรวมถึงส่วนประกอบของเครื่องมืออย่างละเอียด ในบทนี้จะเป็นผลจากการทดสอบของบทที่ผ่านมาโดยจะนำเสนอผลทั้งหมดที่ได้ทดสอบโดยแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

- 1.) ผลการเลือกวัสดุเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้แรง
- 2.) ผลการสอบเทียบ
- 3.) ผลการทดสอบการทำงานเสมือนจริง
- 4.) ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือต้นแบบกับเครื่องมือจากต่างประเทศ

โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2 ผลการเลือกวัสดุเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

จากการทดสอบอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน 3 ประเภท ได้ผลการทดสอบดังแสดง



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการตอบสนองของอุปกรณ์ทั้ง 3 แบบ

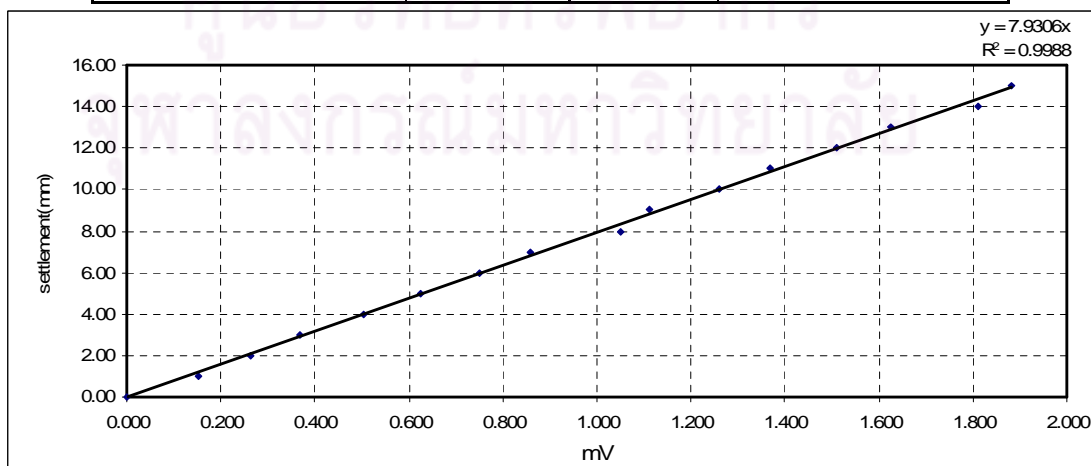
จากผลการทดสอบที่แสดง ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกแฉงอะครีลิกเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

5.3 การสอบเทียบ

5.3.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือ

ตารางที่ 5.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 1

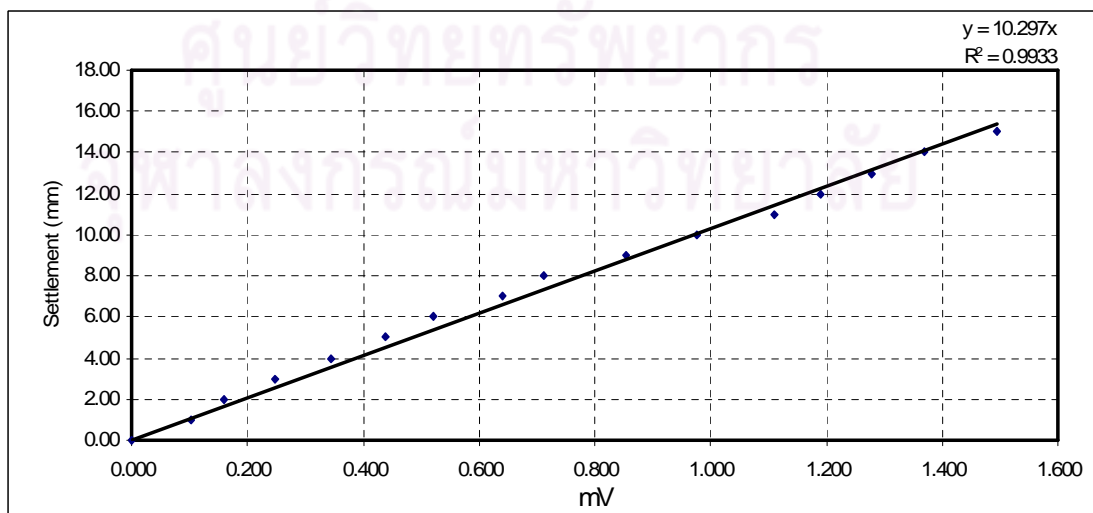
ผลการสอบเทียบเครื่องมือ No.SC01		แท่งอะครีลิก ขนาด หน้าตัด	
เอาต์พุต = mV		10 x 2 mm ² ความยาว 85 mm	
ชนิดการติดตั้ง		CANTILEVER	
Initial Volt (Observer Point)		3.22	
Initial Volt (Reference Point)		-2.41	
Settlement (mm.)	mV 1	mV 2	Δ mV
0	3.220	-2.410	0.000
1	3.271	-2.511	0.152
2	3.328	-2.566	0.264
3	3.380	-2.618	0.368
4	3.449	-2.685	0.504
5	3.510	-2.745	0.624
6	3.573	-2.807	0.750
7	3.627	-2.860	0.856
8	3.725	-2.956	1.051
9	3.756	-2.987	1.113
10	3.830	-3.059	1.259
11	3.885	-3.114	1.369
12	3.957	-3.184	1.511
13	4.015	-3.240	1.625
14	4.108	-3.332	1.810
15	4.144	-3.367	1.881



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 1

ตารางที่ 5.2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 2

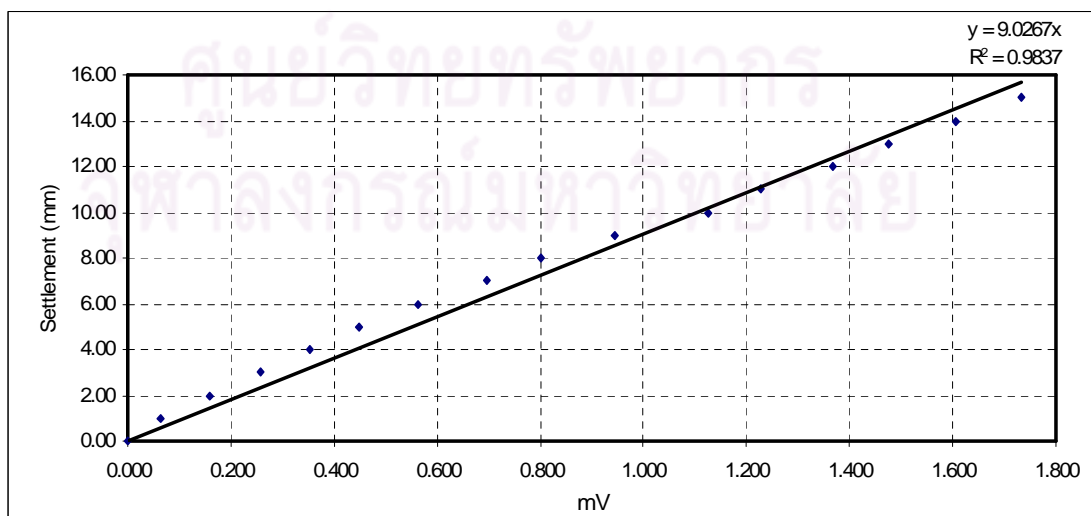
ผลการสอบเทียบเครื่องมือ No.SC02		แท่งอะครีลิก ขนาด หน้าตัด	
เอาต์พุต = mV		10 x 2 mm ² ความยาว 85 mm	
ชนิดการติดตั้ง		CANTILEVER	
Initial Volt (Observer Point)		3.14	
Initial Volt (Reference Point)		-2.24	
Settlement (mm.)	mV 1	mV 2	Δ mV
0	3.140	-2.240	0.000
1	3.247	-2.487	0.103
2	3.275	-2.515	0.160
3	3.320	-2.558	0.248
4	3.368	-2.606	0.344
5	3.416	-2.653	0.439
6	3.573	-2.807	0.522
7	3.517	-2.752	0.639
8	3.553	-2.787	0.711
9	3.626	-2.859	0.855
10	3.688	-2.919	0.977
11	3.755	-2.986	1.111
12	3.796	-3.025	1.191
13	3.840	-3.069	1.279
14	3.886	-3.114	1.369
15	3.948	-3.175	1.494



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 2

ตารางที่ 5.3 ผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 3

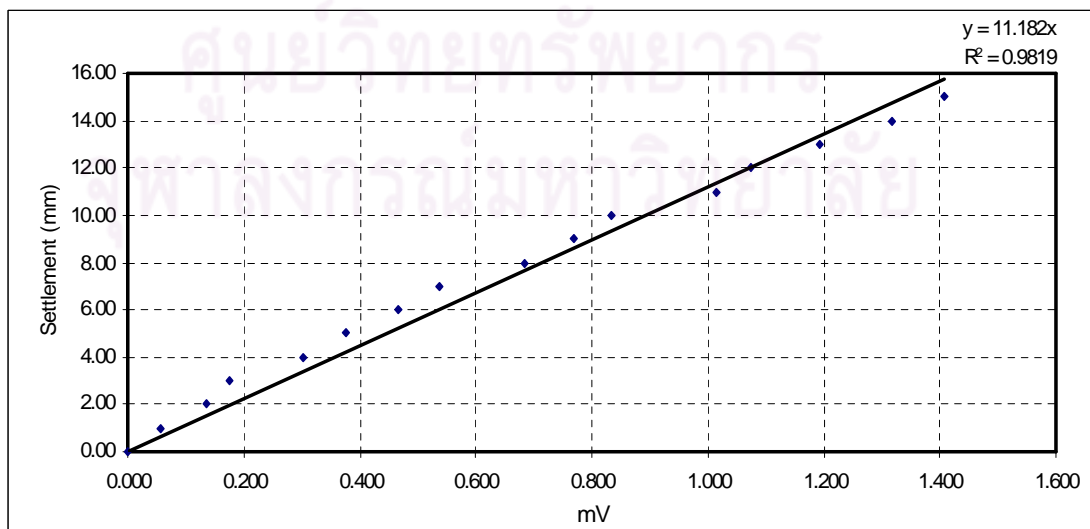
ผลการสอบเทียบเครื่องมือ No.SC03		แท่งอะครีลิก ขนาด หน้าตัด	
เอาต์พุต = mV		10 x 2 mm ² ความยาว 85 mm	
ชนิดการติดตั้ง		CANTILEVER	
Initial Volt (Observer Point)		3.42	
Initial Volt (Reference Point)		-2.19	
Settlement (mm.)	mV 1	mV 2	Δ mV
0	3.420	-2.190	0.000
1	3.227	-2.467	0.064
2	3.275	-2.515	0.160
3	3.324	-2.562	0.256
4	3.372	-2.610	0.353
5	3.421	-2.658	0.449
6	3.478	-2.714	0.562
7	3.547	-2.781	0.697
8	3.599	-2.833	0.802
9	3.672	-2.904	0.946
10	3.762	-2.992	1.124
11	3.814	-3.043	1.227
12	3.884	-3.112	1.366
13	3.939	-3.166	1.475
14	4.005	-3.231	1.605
15	4.069	-3.293	1.732



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 3

ตารางที่ 5.4 ผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 4

ผลการสอบเทียบเครื่องมือ No.SC04		แท่งอะครีลิก ขนาด หน้าตัด	
เอาต์พุต = mV		10 x 2 mm ² ความยาว 85 mm	
ชนิดการติดตั้ง		CANTILEVER	
Initial Volt (Observer Point)		3.39	
Initial Volt (Reference Point)		-2.23	
Settlement (mm.)	mV 1	mV2	Δ mV
0	3.390	-2.230	0.000
1	3.223	-2.463	0.056
2	3.263	-2.503	0.136
3	3.283	-2.523	0.176
4	3.348	-2.586	0.304
5	3.384	-2.622	0.376
6	3.430	-2.667	0.467
7	3.465	-2.701	0.536
8	3.539	-2.774	0.683
9	3.582	-2.816	0.768
10	3.615	-2.848	0.833
11	3.707	-2.939	1.016
12	3.736	-2.967	1.074
13	3.796	-3.026	1.192
14	3.860	-3.089	1.319
15	3.905	-3.133	1.408



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือตำแหน่งที่ 4

จากผลการสอบเทียบจะได้สมการเพื่อแปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้า(Volt) เป็นค่าการทรุดตัวดังนี้

ค่าการทรุดตัว (Settlement) = $A(\Delta mV)$ หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

เมื่อ $\Delta mV = (\text{ค่าที่อ่าน} - \text{ค่าเริ่มต้น})_{\text{จุดอ้างอิง}} - (\text{ค่าที่อ่าน} - \text{ค่าเริ่มต้น})_{\text{ตำแหน่งที่ต้องการ}}$

$A =$ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับแต่ละตำแหน่งของเครื่องมือจากการสอบเทียบ

5.3.2 สรุปสูตรสำหรับคำนวณหาค่าการทรุดตัวของเครื่องมือแต่ละตำแหน่ง
ตารางที่ 5.5 สรุปสูตรคำนวณหาค่าการทรุดตัว

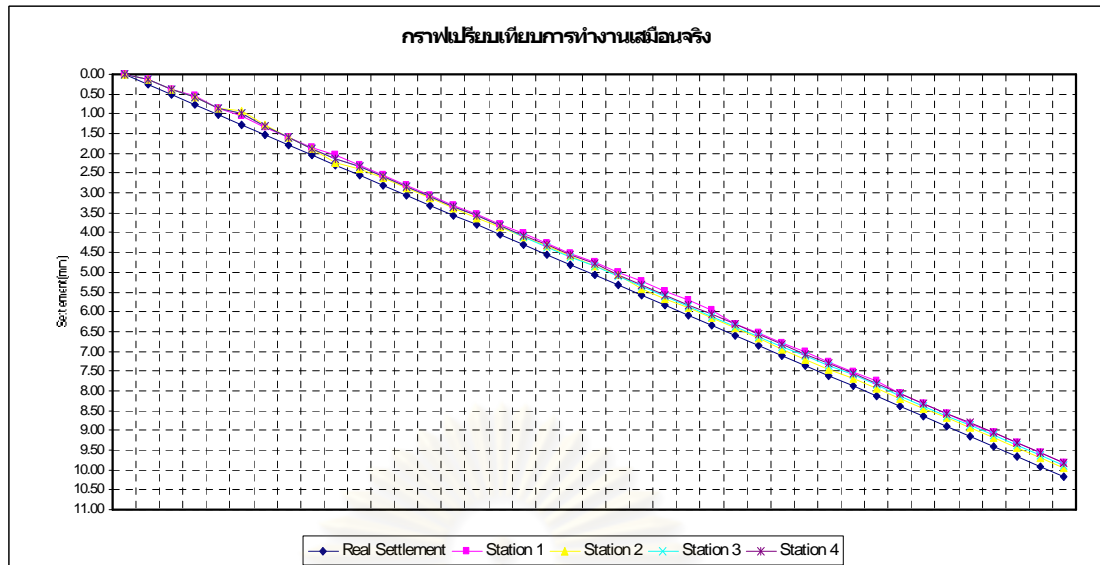
Station No.	สูตรคำนวณค่าการทรุดตัว(mm)
Station 1	7.9306 (ΔmV)
Station 2	10.297 (ΔmV)
Station 3	9.0267 (ΔmV)
Station 4	11.182 (ΔmV)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 ผลการทดสอบระบบการทำงานเสมือนจริง

ตารางที่ 5.6 ค่าการทรุดตัวจากการทดสอบการทำงานเสมือนจริง

Dial gauge (DIV)	Dial gauge (mm)	Station1	Station2	Station3	Station4
		Settlement (mm)	Settlement (mm)	Settlement (mm)	Settlement (mm)
0	0.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10	0.254	0.13454	0.11654	0.12554	0.12554
20	0.508	0.36868	0.37852	0.37360	0.37360
30	0.762	0.55370	0.57845	0.56608	0.56608
40	1.016	0.86481	0.85483	0.85982	0.85982
50	1.270	1.05212	0.92474	0.98843	0.98843
60	1.524	1.32485	1.28475	1.30480	1.30480
70	1.778	1.58954	1.60425	1.59690	1.59690
80	2.032	1.85635	1.88463	1.87049	1.87049
90	2.286	2.04548	2.24545	2.14547	2.14547
100	2.540	2.28676	2.38526	2.33601	2.33601
110	2.794	2.53820	2.62932	2.58376	2.58376
120	3.048	2.82133	2.88333	2.85233	2.85233
130	3.302	3.06290	3.13735	3.10012	3.10012
140	3.556	3.30447	3.39137	3.34792	3.34792
150	3.810	3.54603	3.62268	3.58436	3.58436
160	4.064	3.78760	3.86562	3.82661	3.82661
170	4.318	4.02916	4.10855	4.10341	4.06886
180	4.572	4.27073	4.35148	4.35565	4.31110
190	4.826	4.51230	4.59441	4.60788	4.55335
200	5.080	4.75386	4.83734	4.86012	4.79560
210	5.334	4.99543	5.08027	5.11235	5.07317
220	5.588	5.23700	5.42350	5.36459	5.32244
230	5.842	5.47856	5.67918	5.61682	5.57171
240	6.096	5.72013	5.89552	5.86906	5.82098
250	6.350	5.96169	6.15101	6.12129	6.07025
260	6.604	6.30326	6.40649	6.37353	6.31952
270	6.858	6.54483	6.66197	6.62577	6.56879
280	7.112	6.78639	6.94796	6.87800	6.81806
290	7.366	7.02796	7.20172	7.11484	7.06733
300	7.620	7.26953	7.46126	7.36539	7.31659
310	7.874	7.51109	7.67487	7.59298	7.56586
320	8.128	7.75266	7.92776	7.84021	7.81513
330	8.382	8.06829	8.18065	8.12447	8.06440
340	8.636	8.31889	8.43354	8.37621	8.31367
350	8.890	8.56948	8.68643	8.62796	8.56294
360	9.144	8.82008	8.93932	8.87970	8.81221
370	9.398	9.07068	9.19221	9.13144	9.06148
380	9.652	9.32128	9.44510	9.38319	9.31075
390	9.906	9.57187	9.69799	9.63493	9.56002
400	10.160	9.82247	9.95088	9.88667	9.80929



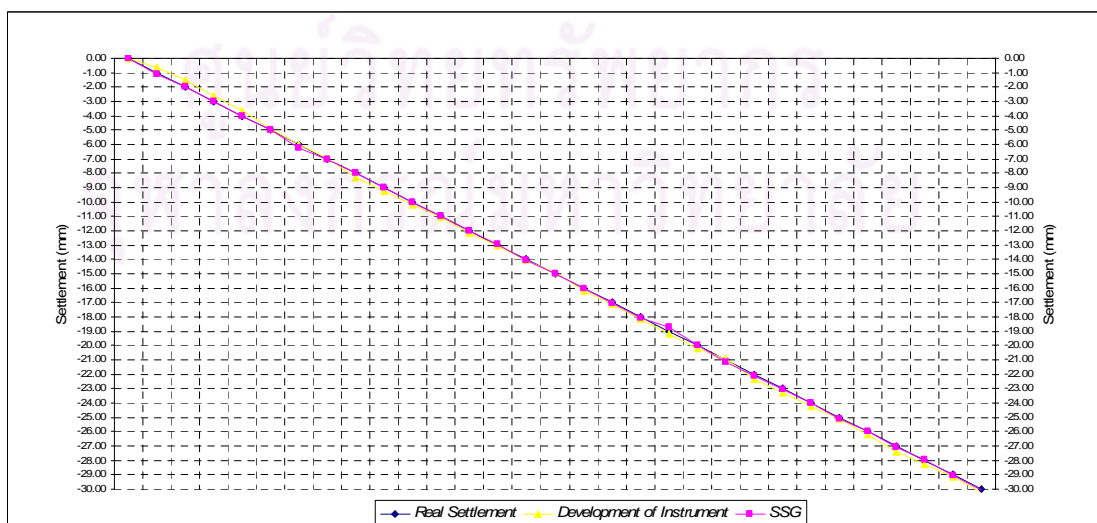
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลการทำงานเสมือนจริง

5.5 ผลการทดสอบเครื่องมือต้นแบบ

การทดสอบเครื่องมือต้นแบบทดสอบโดย วางเครื่องมือทั้ง 2 ชนิด คือเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาและเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศโดยต่อไปนี้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาจะใช้ชื่อเรียกว่า SC แล้วต่อท้ายด้วยหมายเลข ส่วนเครื่องมือจากต่างประเทศจะเรียกว่า SSG โดยวางในตำแหน่งเดียวกันจากนั้นก็ควบคุมให้เกิดการทรุดตัวแล้วอ่านค่าที่ได้ของเครื่องมือทั้ง 2 ชนิดแล้วนำค่ามาเปรียบเทียบกัน โดย สูตรในการคำนวณค่าการทรุดตัวดังแสดงตามตาราง

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC01 กับ SSG

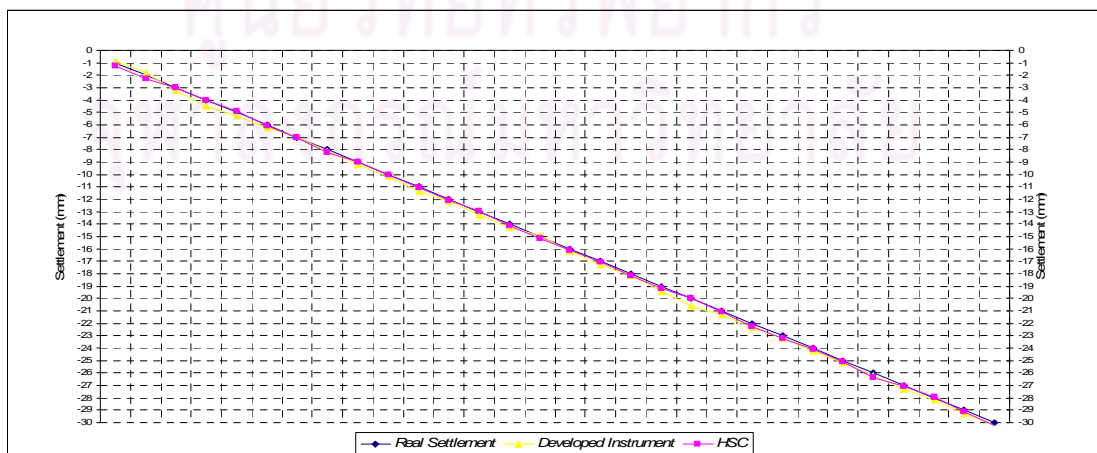
Real Settlement	SC 01		SSG	
	ΔmV	Settlement (mm)	Reading (Lu)	Settlement (mm)
0.00	0.000	0.00	3235.31	0.00
1.00	0.076	0.60	3235.40	1.10
2.00	0.189	1.50	3235.46	1.95
3.00	0.328	2.60	3235.54	2.98
4.00	0.461	3.65	3235.62	4.05
5.00	0.621	4.92	3235.69	5.01
6.00	0.760	6.02	3235.78	6.23
7.00	0.879	6.97	3235.85	7.05
8.00	1.041	8.26	3235.92	8.00
9.00	1.166	9.25	3235.99	8.98
10.00	1.279	10.15	3236.07	10.04
11.00	1.392	11.04	3236.15	11.01
12.00	1.532	12.15	3236.22	12.00
13.00	1.638	12.99	3236.30	12.97
14.00	1.769	14.03	3236.38	14.05
15.00	1.879	14.90	3236.45	15.01
16.00	2.038	16.16	3236.53	15.99
17.00	2.159	17.12	3236.60	17.03
18.00	2.288	18.14	3236.68	18.08
19.00	2.423	19.21	3236.73	18.70
20.00	2.548	20.20	3236.83	19.97
21.00	2.640	20.93	3236.91	21.12
22.00	2.814	22.32	3236.99	22.08
23.00	2.934	23.27	3237.06	23.09
24.00	3.054	24.22	3237.13	23.99
25.00	3.170	25.14	3237.22	25.14
26.00	3.307	26.23	3237.28	25.99
27.00	3.450	27.36	3237.36	27.04
28.00	3.561	28.24	3237.44	27.98
29.00	3.677	29.16	3237.51	29.03
30.00	3.814	30.25	3237.60	30.10



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC01 กับ SSG

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC02 กับ SSG

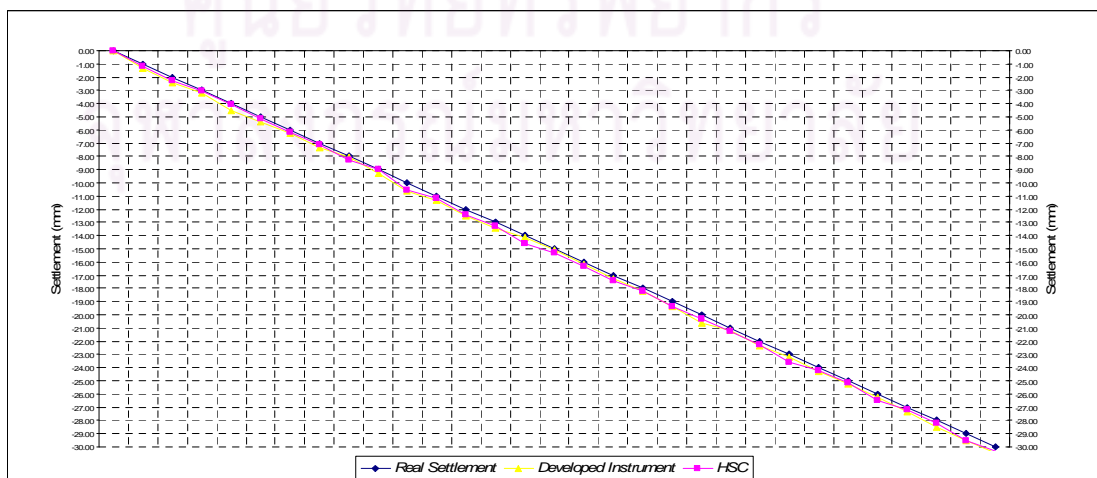
Real Settlement	SC 02		SSG	
	ΔmV	Settlement (mm)	Reading (Lu)	Settlement (mm)
0.00	0.000	0.00	3235.30	0.00
1.00	0.086	0.89	3235.40	1.27
2.00	0.175	1.80	3235.47	2.29
3.00	0.311	3.20	3235.53	2.99
4.00	0.437	4.50	3235.61	4.03
5.00	0.515	5.30	3235.67	4.89
6.00	0.604	6.22	3235.76	6.11
7.00	0.677	6.97	3235.83	7.01
8.00	0.787	8.11	3235.92	8.21
9.00	0.895	9.22	3235.98	8.98
10.00	0.991	10.21	3236.06	10.04
11.00	1.102	11.35	3236.14	11.08
12.00	1.178	12.13	3236.22	12.09
13.00	1.293	13.31	3236.28	12.97
14.00	1.392	14.33	3236.37	14.11
15.00	1.447	14.90	3236.45	15.14
16.00	1.575	16.22	3236.52	16.12
17.00	1.677	17.27	3236.59	17.03
18.00	1.762	18.14	3236.68	18.12
19.00	1.885	19.41	3236.76	19.21
20.00	2.004	20.63	3236.82	19.98
21.00	2.071	21.32	3236.90	21.08
22.00	2.172	22.37	3236.99	22.26
23.00	2.256	23.23	3237.06	23.24
24.00	2.352	24.22	3237.13	24.07
25.00	2.450	25.23	3237.21	25.14
26.00	2.547	26.23	3237.30	26.40
27.00	2.657	27.36	3237.36	27.10
28.00	2.743	28.24	3237.42	27.98
29.00	2.849	29.34	3237.51	29.10
30.00	2.936	30.23	3237.60	30.26



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC02 กับ SSG

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC03 กับ SSG

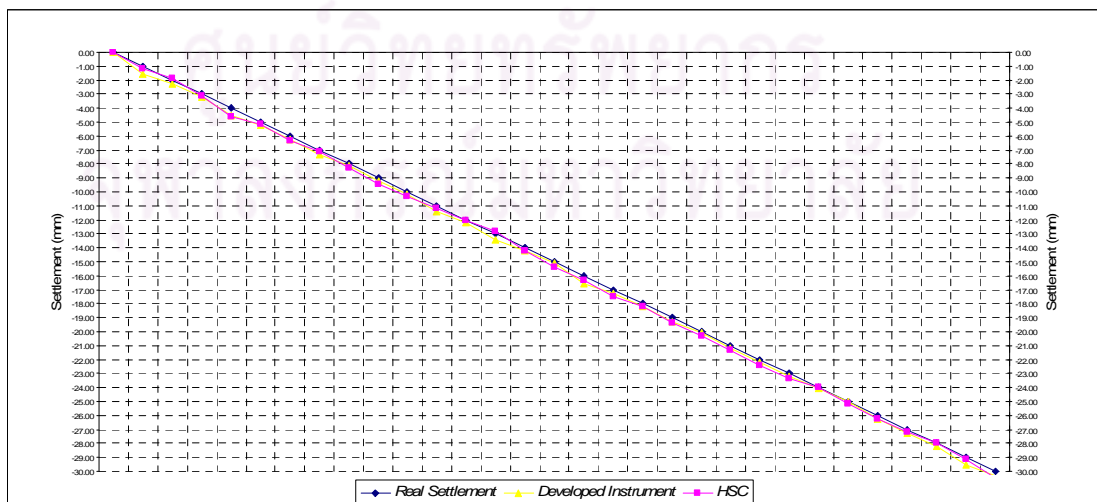
Real Settlement	SC 03		SSG	
	ΔmV	Settlement (mm)	Reading (Lu)	Settlement (mm)
0.00	0.000	0.00	3235.35	0.00
1.00	0.144	1.30	3235.44	1.19
2.00	0.266	2.40	3235.52	2.24
3.00	0.355	3.20	3235.58	3.03
4.00	0.499	4.50	3235.66	4.09
5.00	0.599	5.40	3235.74	5.14
6.00	0.690	6.22	3235.82	6.20
7.00	0.811	7.33	3235.89	7.12
8.00	0.889	8.03	3235.98	8.31
9.00	1.033	9.33	3236.03	8.96
10.00	1.176	10.62	3236.15	10.55
11.00	1.258	11.36	3236.20	11.20
12.00	1.388	12.53	3236.29	12.39
13.00	1.486	13.41	3236.36	13.31
14.00	1.566	14.14	3236.46	14.63
15.00	1.675	15.12	3236.51	15.29
16.00	1.797	16.22	3236.59	16.35
17.00	1.913	17.27	3236.67	17.40
18.00	2.021	18.24	3236.73	18.19
19.00	2.151	19.41	3236.82	19.38
20.00	2.286	20.63	3236.89	20.30
21.00	2.351	21.22	3236.96	21.22
22.00	2.479	22.38	3237.04	22.28
23.00	2.576	23.26	3237.14	23.59
24.00	2.696	24.34	3237.19	24.25
25.00	2.796	25.24	3237.26	25.18
26.00	2.910	26.27	3237.36	26.49
27.00	3.031	27.36	3237.41	27.15
28.00	3.157	28.50	3237.49	28.21
29.00	3.271	29.53	3237.59	29.53
30.00	3.379	30.50	3237.65	30.32



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC03 กับ SSG

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC04 กับ SSG

Real Settlement	SC 03		SSG	
	ΔmV	Settlement (mm)	Reading (Lu)	Settlement (mm)
0.00	0.000	0.00	3235.35	0.00
1.00	0.144	1.30	3235.44	1.19
2.00	0.266	2.40	3235.52	2.24
3.00	0.355	3.20	3235.58	3.03
4.00	0.499	4.50	3235.66	4.09
5.00	0.599	5.40	3235.74	5.14
6.00	0.690	6.22	3235.82	6.20
7.00	0.811	7.33	3235.89	7.12
8.00	0.889	8.03	3235.98	8.31
9.00	1.033	9.33	3236.03	8.96
10.00	1.176	10.62	3236.15	10.55
11.00	1.258	11.36	3236.20	11.20
12.00	1.388	12.53	3236.29	12.39
13.00	1.486	13.41	3236.36	13.31
14.00	1.566	14.14	3236.46	14.63
15.00	1.675	15.12	3236.51	15.29
16.00	1.797	16.22	3236.59	16.35
17.00	1.913	17.27	3236.67	17.40
18.00	2.021	18.24	3236.73	18.19
19.00	2.151	19.41	3236.82	19.38
20.00	2.286	20.63	3236.89	20.30
21.00	2.351	21.22	3236.96	21.22
22.00	2.479	22.38	3237.04	22.28
23.00	2.576	23.26	3237.14	23.59
24.00	2.696	24.34	3237.19	24.25
25.00	2.796	25.24	3237.26	25.18
26.00	2.910	26.27	3237.36	26.49
27.00	3.031	27.36	3237.41	27.15
28.00	3.157	28.50	3237.49	28.21
29.00	3.271	29.53	3237.59	29.53
30.00	3.379	30.50	3237.65	30.32



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของ SC04 กับ SSG

5.5.1 ความละเอียด (Resolution) และความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องมือ

ความละเอียด หาได้โดยการนำเอาคุณสมบัติของอุปกรณ์คือ การ์ด DAQ มาหาค่าความละเอียดได้ดังนี้ ค่าอินพุต ± 50 mV, 16 บิต, ซึ่งจะได้ $\Delta \text{mV} = 100 \text{ mV} / 2^{16} = 1.5258 \mu\text{V}$

จากค่าที่ได้ข้างต้นนำมาแทนในสูตรที่ได้จากการสอบเทียบจะได้ค่าความละเอียดของเครื่องมือดังตารางแสดง

ตารางที่ 5.11 ความละเอียดของเครื่องมือแต่ละตำแหน่ง

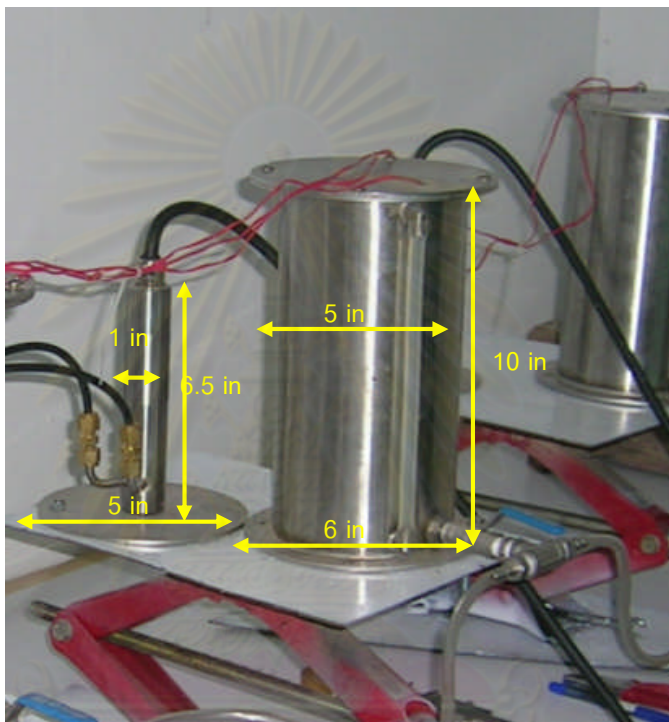
Station No.	ค่าความละเอียด (mm)	ค่าความละเอียดเฉลี่ย (mm)
Station 1	0.013	0.015 (0.05 % F.S)
Station 2	0.015	
Station 3	0.014	
Station 4	0.017	

ค่าความถูกต้อง หาได้โดยการนำข้อมูลจากการเปรียบเทียบเครื่องมือโดยอ้างอิงข้อมูลจาก Dial Gauge กับ ข้อมูลการทดสอบตัวจาก เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมา เพื่อหาค่า error ที่เกิดขึ้นทั้งระบบ ค่าความถูกต้องที่ได้ = 0.10 มม. (± 0.33 % FS.)

5.6 ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมา กับเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะสรุปผลจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องมือทั้ง 2 ชนิด ตามรายการในหัวข้อต่อไป

5.6.1 ขนาดของเครื่องมือ



รูปที่ 5.8 แสดงขนาดของเครื่องมือ

ตารางที่ 5.12 ขนาดของ SC กับ SSG

ขนาด	เครื่องมือที่พัฒนา (SC)	เครื่องมือจากต่างประเทศ (SSG)
ความสูง	10 in	6.5 in
ความกว้างของตัวเครื่องมือ	5 in	1 in
ความกว้างของฐาน	6 in	5 in

5.6.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือ
ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือ

รายการ	เครื่องมือที่พัฒนา (SC)	* เครื่องมือจากต่างประเทศ (SSG)
1.ประเภทเครื่องมือ	เครื่องมือวัดระบบไฮดรอลิก (Settlement Gauge แบบ Multi Point)	เครื่องมือวัดระบบไฮดรอลิก (Settlement Gauge แบบ Single Point)
2.ลักษณะการใช้งาน	วัดการทรุดตัวและการยกตัว	วัดการทรุดตัวและการยกตัว
3.ประเภทการใช้งาน	ประยุกต์ใช้ได้ทุกประเภทของงาน ที่ต้องการทราบค่าทรุดตัว	ประยุกต์ใช้ได้ทุกประเภทของงาน ที่ต้องการทราบค่าทรุดตัว
4.Transducer Type	Strain Gauge	Vibrating Wire
5.ชนิดของของเหลว	น้ำบริสุทธิ์	น้ำบริสุทธิ์
6.Resolution	0.05 % FS. (0.015 มม.)	0.025 % FS. (0.25 มม.)
7.System Accuracy	±0.33 % FS. (0.10 มม.)	± 0.1% FS. (1 มม.)
8.Range	30 มม.	1 ม. (1000มม.)
9.ราคา / หน่วย	4000 บาท (ราคาค่าต้นทุน)	61900 บาท (ราคาขาย)

*หมายเหตุ เครื่องมือจากต่างประเทศที่นำมาเปรียบเทียบค่า Full-Scale (FS) =1000 มม.

บทที่ 6

สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องมือสำหรับตรวจวัดการทรุดตัวในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทรุดตัวในงานอุโมงค์โดยการออกแบบได้คำนึงถึงราคาต้นทุน และคุณภาพ จะต้องเพียงพอต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ สำหรับตรวจวัดค่าการทรุดตัวในงานอื่นๆภายในขอบเขตการทำงานที่จำกัดของเครื่องมือ

6.1 สรุปผลจากการวิจัย

เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นเครื่องมือวัดระบบไฮดรอลิก ประเภท Liquid Level Gauge แบบ Multipoint Gauge โดยออกแบบมาเพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งเท่านั้น และการวัดค่าการทรุดตัวของเครื่องมือจะให้ได้เฉพาะค่าระดับสัมพัทธ์ (Relative Elevation) ระหว่างจุด 2 จุด เท่านั้น (จุดอ้างอิง กับ จุดที่ต้องการทราบค่าการทรุดตัว) ซึ่งไม่สามารถที่จะหาค่าระดับสัมบูรณ์ได้ (Absolute Elevation) ดังนั้น ข้อมูลที่วัดจะต้องอ้างอิงกับหมุดหลักฐาน แล้วใช้การสำรวจระดับ เพื่อตรวจสอบระดับของหมุดหลักฐานกับตำแหน่งระดับอ้างอิงให้ถูกต้องอยู่ตลอดเวลา

สิ่งที่เป็นหัวใจสำคัญของระบบการทำงานคือ การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจู้แรง (ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แท่งอะคริลิก) ซึ่งการเลือกชิ้นส่วนที่เหมาะสมนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อความละเอียด และความถูกต้องของเครื่องมือ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Lab VIEW ในการนำเสนอผล จะเสนอในรูปแบบของกราฟ และ ตัวเลข ซึ่งผู้ใช้งานสามารถที่จะพิจารณาเฉพาะตำแหน่งตรวจวัดที่สนใจได้

6.2 สรุปผลการทดสอบการเปรียบเทียบเครื่องมือ

จากผลการทดสอบ สามารถที่จะสรุปผลในส่วนที่สำคัญดังตารางต่อไปนี้
ตารางที่ 6.1 สรุปผลคุณสมบัติของเครื่องมือ

รายการ	เครื่องมือที่พัฒนา (SC)	เครื่องมือจากต่างประเทศ (SSG)
Resolution	0.05% FS. (0.015 มม.)	0.025 % FS. (0.25 มม.)
System Accuracy	± 0.33% FS. (0.10 มม.)	± 0.1% FS. (1 มม.)
Range	30 มม.	1ม. (1000 มม.)
ราคา / หน่วย	4000 บาท(ราคาต้นทุน)	61900 บาท (ราคาขาย)

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดได้ในช่วงที่แคบกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนั้น วัดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำช่วงของการวัดจึงจำกัดอยู่เท่ากับความสูงของอุปกรณ์ แต่เครื่องมือจากต่างประเทศวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ ดังนั้นจึงวัดได้ในช่วงที่กว้างกว่าขนาดของอุปกรณ์เอง สำหรับความละเอียดนั้น เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีความละเอียดมากกว่าเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ เนื่องจากทำงานที่แคบกว่า และหากพิจารณาทางด้านราคาพบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีราคาถูกกว่าประมาณ 15 เท่า โดยการทดสอบเปรียบเทียบในครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติในเบื้องต้นเท่านั้น ยังมีส่วนที่ยังไม่ได้พิจารณานั้นคือ ความสามารถของเครื่องมือในการทำงานระยะยาว

ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช้เครื่องมือขึ้นอยู่กับ ชนิดของงาน และใช้ภายในขอบเขตที่จำกัดของเครื่องมือจะสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องมือได้อย่างมาก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยมีความเชื่อว่าในอนาคตหากมีการพัฒนาและวิจัยกันอย่างต่อเนื่องแล้วเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นโดยวิศวกรไทยสามารถที่จะสู้กับเครื่องมือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศได้อย่างแน่นอน

6.3 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

1. ในการวิจัยครั้งนี้มีข้อจำกัดอยู่หลายประการด้วยกันโดยในการเลือกอุปกรณ์ชิ้นส่วนตรวจรู้แรงนั้นควรจะมีการทดสอบตามหลักการทางวิศวกรรม และควรขอความร่วมมือจากภาควิชาวัสดุหรือหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้องเพราะถ้าเลือกชิ้นส่วนตรวจรู้แรงถูกต้องและเหมาะสม จะทำให้ค่าความละเอียดและค่าความถูกต้องสูงขึ้นนั่นเอง
2. ควรทดลองใช้สเตรนเกจที่มีความไวหรือแฟคเตอร์มากกว่าเดิมซึ่งจะทำให้สามารถตรวจวัดความเครียดที่มีขนาดเล็กและทำให้สามารถใช้อัตราการขยายสัญญาณ ของวงจรสเตรนเกจลดลงเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ได้ดีขึ้น
3. ควรมีการปรับแก้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยการติด Dummy Gauge
4. เพื่อความสะดวกในการติดตั้งควรปรับปรุงเครื่องมือให้มีขนาดเล็กลงโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของเครื่องมือ
5. หากพัฒนาเครื่องมือจนมีความมั่นใจแล้วควรนำไปติดตั้ง ณ สถานที่ก่อสร้างจริง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กิจพล ไพโรไพศาลกิจ. ผลกระทบของการเจาะอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินต่ออุโมงค์ส่งน้ำในดิน กรุงเทพมหานคร.วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- เจริญ เพชรมณี. เรียนลัด Lab VIEW. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2547.
- ชินวุฒิ ชาญฉายา. การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของชั้นดินกรุงเทพฯเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน โดยวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- พจนานฎ สุวรรณมณี. เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546.
- วิรัช พิทักษ์ทรายทอง. ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ต่อการเคลื่อนตัวของดินบริเวณสิ่งก่อสร้างใกล้เคียง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- สุนันท์ ศรัณยนิത്യ. กลศาสตร์ของไหล. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545.
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. วิศวกรรมปฐพี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2540.

ภาษาอังกฤษ

- Dunnicliff, J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. (n.p.): John Wiley and Sons, 1988.
- Hunna , T.W.Foundation Instrumentation.(n.p.):Trans Tech Publication , 1973.
- Roctest Company.Instruction Manual of Soil Settlement Gauge.(n.p.): Roctest Limited , 2005.
- Sivaram M.S.L Cheekiralla. Development of a wireless sensor unit for tunnel monitoring Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 2004.

STS Engineering Consultants Company. Technical Proposal for Instrumentation Work of NN2HPP,Lao PDR. Bangkok ,Thailand, 2007.

Suwansawat, S. Earth pressure balance(EPB)shield tunneling in Bangkok:Ground response and prediction of surface settlements using artificial neural network. D.SC. Dissertation, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 2002.

Teparaksa,W.Principal and application of instrumentation for the first MRTA subway project in Bangkok.Proc.of 5th International Conference on Field Measurement in Geomechanics:411-416.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุวิทย์ ทิพย์ยาน เกิดวันที่ 30 กันยายน พ.ศ.2523 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปี การศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาด้าน ปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย