



เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน (ประเภทและการวิเคราะห์)

โดย

ชินโรส ทองธรรมชาติ

วิศวกรปฐพี ศุนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก

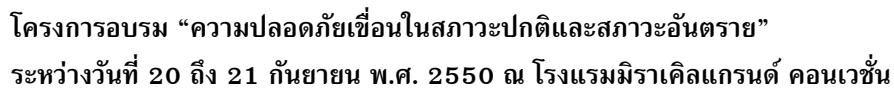
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

ในอดีต USBR ได้เริ่มติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนในปีพ.ศ. 2454 ที่เป็นบ่อวัดระดับน้ำในตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อน ในราวปีพ.ศ. 2473 การติดตามเครื่องมือวัดที่ติดตั้งอย่างเป็นระบบทำให้ทราบพฤติกรรมของเขื่อน (Wiltshire 2002) ในประเทศไทยเขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนตั้งแต่ก่อสร้างเขื่อนไว้หลายชนิด หลังเหตุการณ์ของเขื่อนมูลบนในปี พ.ศ. 2533 วรากร ไม่เรียงและคณะได้สรุปงานเครื่องมือวัดในงานเขื่อนดินให้วิศวกรหรือผู้สนใจได้ใช้อ้างอิงเอกสารด้านวิศวกรรมเครื่องมือวัดเขื่อนหลายฉบับ เช่น Dunicliff (1988) USACE (1987) และ USACE (1995) แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีของเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนได้พัฒนามาโดยตลอด ในปัจจุบันเครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพวัดได้ละเอียด มีความแม่นยำและความไวสูง อีกทั้งมีราคาลดลงหากเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่สูง แต่มีความทั้งการติดตั้ง ดูแลรักษา และวิเคราะห์ผลมีความยุ่งยากซับซ้อนยิ่งขึ้นตามมา ด้วยเหตุนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่วิศวกรก่อสร้าง เจ้าหน้าที่ที่ดูแลรักษาเขื่อนต้องมีความรู้ให้ทันกับเทคโนโลยีที่เปลี่ยนไปและเข้าใจบทบาทของตน

วิศวกรผู้ดูแลรับผิดชอบงานเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนจำเป็นต้องเข้าใจหน้าที่ของตน อันได้แก่

1. การออกแบบระบบเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน ได้แก่ เลือกประเภทของเขื่อนมีวัดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งที่จำเป็น ระบุความถี่ของการอ่าน รวมทั้งระบบอ่านค่าอัตโนมัติ
2. การควบคุมงานในสนาม เช่น การจัดหาเครื่องมือ การสอบเทียบ การติดตั้ง การติดตั้งทดแทน และบำรุงรักษาเครื่องมือ
3. ตรวจวัดประสิทธิภาพของเขื่อน ได้แก่ การใช้งานและบำรุงรักษาฐานข้อมูลเขื่อนวิเคราะห์ข้อมูล รายงานและนำเสนอ
4. วิเคราะห์ผลการอ่านค่า เช่น ความปลอดภัยของเขื่อนจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนและสร้างเกณฑ์การตรวจวัด



```
graph TD; A["Data Reading  
- Manual Field Recording  
- Automatic Recording"] --> B["Data Compilation  
- Computer Database"]; C["Calibration Constants"] --> B; B --> D["Data Processing  
- Computer Worksheet"]; E["Data Adjustment"] --> D; D --> F["Result Presentation  
- Table Forms  
- Graphics"]; F --> G["Reports  
- Emergency Report  
- Progress Report  
- Final Report"]; G --> H["Application of Results  
- Dam Safety  
- Construction Control  
- Research and Development"]; A -.-> I["EMERGENCY CASE"]; B -.-> I; D -.-> I; F -.-> I; I -.-> G;
```

The flowchart illustrates the Dam Safety Monitoring Process, which consists of the following steps and components:

- Data Reading**
 - Manual Field Recording
 - Automatic Recording
- Data Compilation**
 - Computer Database
- Data Processing**
 - Computer Worksheet
- Result Presentation**
 - Table Forms
 - Graphics
- Reports**
 - Emergency Report
 - Progress Report
 - Final Report
- Application of Results**
 - Dam Safety
 - Construction Control
 - Research and Development

Additional components and flow details:

- Calibration Constants** and **Data Adjustment** are inputs to the **Data Compilation** and **Data Processing** steps, respectively.
- Red arrows indicate a feedback loop from the **Data Reading**, **Data Compilation**, **Data Processing**, and **Result Presentation** steps to the **Emergency Report** under the **Reports** step, labeled **EMERGENCY CASE**.

โดย คุณชินโรส ทองธรรมชาติ ศนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและจวนราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ประเภทของเครื่องมือวัด

หน่วยงานที่มีหน้าที่ดูแลและรวบรวมความรู้วิชาการด้านวิศวกรรมเชื่อมได้แบ่งตามวัตถุประสงค์ของการติดตั้งไว้ดังนี้

เครื่องมือวัดความดันน้ำ (Pore Pressure Meter)

ในกลุ่มนี้เป็นเครื่องมือที่ติดตั้งไว้ในตัวเชื่อมหรือฐานรากเชื่อม เพื่อวัดความดันของน้ำที่ไหลซึม เครื่องมือกลุ่มนี้มีหลายชนิด แบ่งตามกลไกการวัดค่าความดันน้ำ เช่น

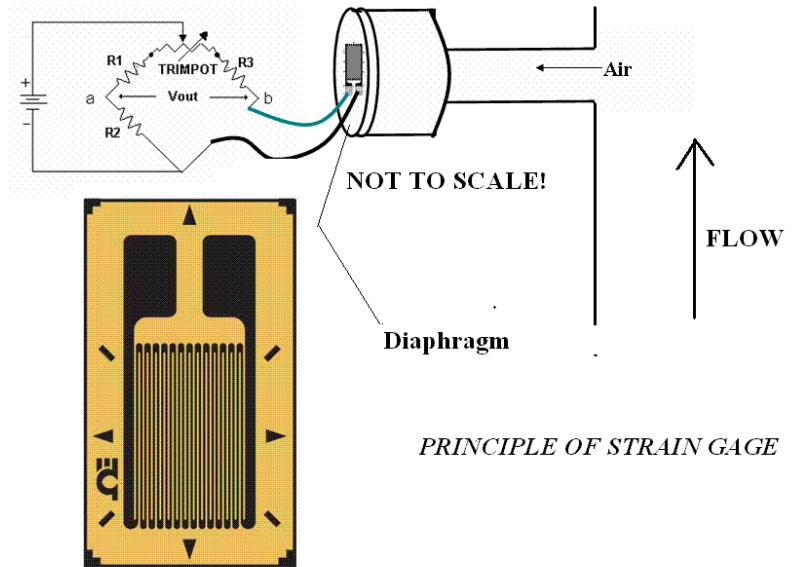
เครื่องมือวัดความดันน้ำอาศัยหลักการเชิงกลศาสตร์ มักมีลักษณะเป็นหลอดและใส่ท่อป้อนผ่านตัวเชื่อม เมื่อเกิดการไหลซึมผ่านแนวท่อจะทำให้ระดับน้ำในท่อสูงขึ้น วัดระดับน้ำในท่อที่เปลี่ยนแปลงตามระดับน้ำในอ่าง ในทำนองเดียวกันเชื่อมที่ต้องการระดับน้ำใต้ดินด้านท้ายเชื่อม เพื่อประมาณความสูงของน้ำที่ต่างกันระหว่างด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำก็สามารถติดตั้งบ่อวัดระดับน้ำใต้ดินได้ ตัวอย่างเช่น Open standpipe Piezometer, Casagrande Piezometer

เครื่องมือวัดความดันน้ำอาศัยหลักการเชิงไฟฟ้า เป็นเครื่องมือในกลุ่มที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันเพราะมีความไวตัว และราคาไม่สูงมาก อีกทั้งสามารถเชื่อมต่อกับระบบตรวจวัดอัตโนมัติได้ ตัวอย่างเครื่องมือประเภทนี้ เช่น Strain gage piezometer หรือ Vibrating wire piezometer ที่สำคัญยังสำหรับการวิเคราะห์ผลจากเครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการเชิงไฟฟ้าจำเป็นต้องสอบเทียบ (Calibration) หัววัดก่อนติดตั้งเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของค่าอ่านกับพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด

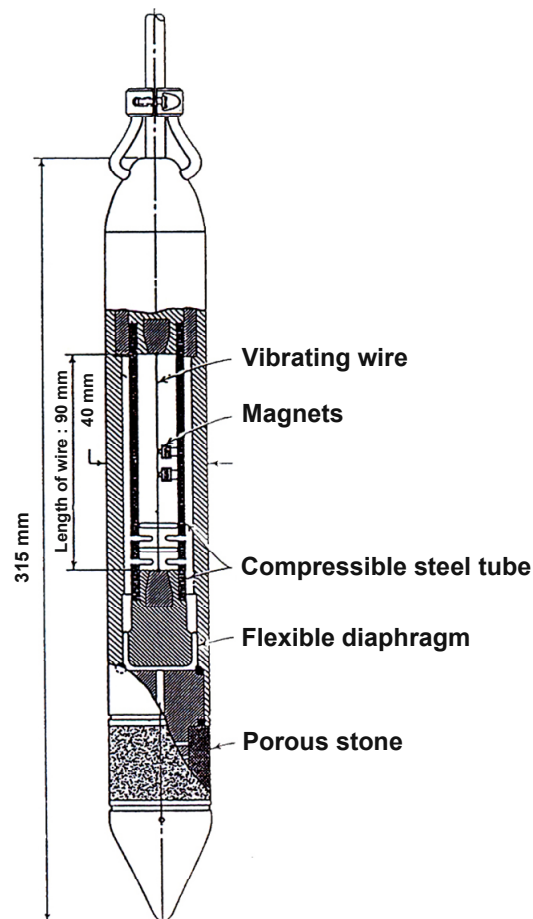
Strain gage อาศัยการขยายหรือหดตัวของขดลวดที่เรียกว่า strain gage ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไป ในรูปที่ 2 Strain gage ที่ติดอยู่บนช่องรับน้ำ (Diaphragm) จะขยายตัวหรือยืดตัวออกเมื่อความดันน้ำเข้าสู่หัววัด ความต้านทานของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเราวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ความไวของ strain gage ระบุด้วย gage factor ข้อควรระวังการเลือกใช้โลหะที่ไวตัวสูงจะต้องมีวงจรปรับแก้อิทธิพลจากอุณหภูมิ โดยทั่วไป strain gage จะมีค่าผิดพลาดประมาณร้อยละ ± 1 ถึง ± 2 ของค่าเต็มสเกล

Vibrating wire เป็นการวัดความดันน้ำจากการวัดความถี่หรือคาบการสั่นของเส้นลวดที่ขึงตึงและสั่นด้วยแม่เหล็ก เมื่อน้ำดันให้ช่องรับน้ำขยับตัวและเส้นลวดหย่อนลงทำให้ความถี่ของการสั่นลดลง เครื่องมือวัดนี้วัดความถี่ ดังนั้นสัญญาณจึงไม่มีผลต่อความยาวสายอย่างในกรณีเครื่องมือวัดที่เป็นระบบวัดความดันที่ต้องมีวงจรขยายสัญญาณ ลักษณะภายในหัววัดแบบนี้แสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 ได้แสดงการเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องมือวัดความดันน้ำแต่ละชนิด เช่น ความไวตัว และความแม่นยำ



รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Strain gage pressure transducer



รูปที่ 3 องค์ประกอบภายในเครื่องมือวัดความดันน้ำแบบ Vibrating wire

ที่มา Sherard et al, 1967



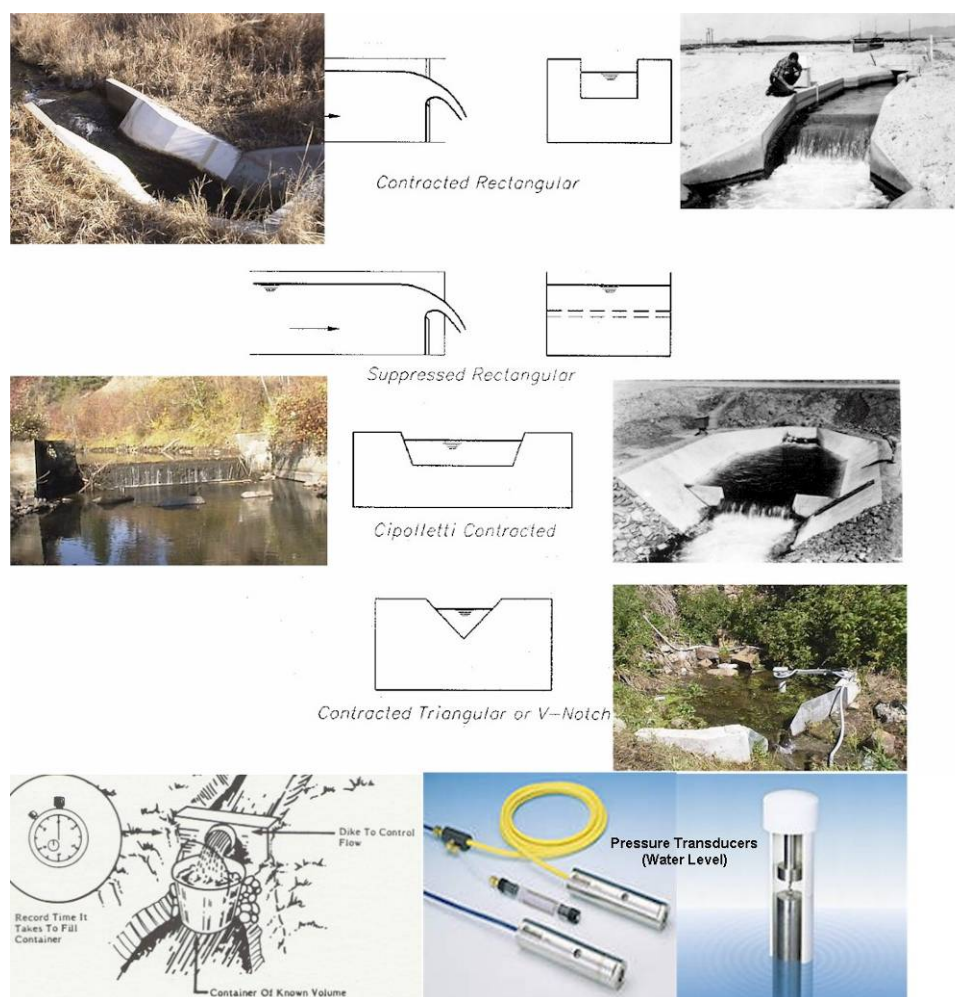
ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อด้อยของเครื่องมือวัดความดันน้ำชนิดต่าง ๆ (Dunnicliff, 1988)

ชนิดของเครื่องมือวัด	ข้อดี	ข้อด้อย
Observation Well	ติดตั้งโดยไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ, ราคาถูก	ช่วงลำนาก, ค่าไม่น่าเชื่อถือเมื่อมีชั้นน้ำหลายชั้น
Open Standpipe Piezometer	ค่าน่าเชื่อถือ, ความคงทนสูง, ราคาถูก, ไม่เกิดปัญหาเรื่องฟองอากาศถ้าขนาดภายในท่อมากกว่า 8 มิลลิเมตร	ช่วงลำนาก, กีดขวางการก่อสร้าง, เกิดความเสียหายต่อท่อได้ง่าย, เกิดการอุดตันของหัววัดได้ง่าย
Twin-tube Hydraulic Piezometer	ค่าน่าเชื่อถือ, ความคงทนสูง, ล้างทำความสะอาดหัววัดได้, วัดอัตราการไหลซึมได้	ความซับซ้อนในการติดตั้งแผงอ่านค่า, ระดับท่อต้องอยู่ต่ำกว่าค่าแรงดันรวม, ต้องล้างทำความสะอาดหัววัดเป็นประจำ
Pneumatic Piezometer	ช่วงลำนากน้อย, ไม่กีดขวางการก่อสร้าง, ไม่เกิดปัญหาจากน้ำแข็งตัว	ระบบมีความซับซ้อนมาก, ต้องระวังความชื้นภายในท่อ
Vibrating Wire Piezometer	อ่านค่าง่ายและช่วงลำนากน้อย, ไม่กีดขวางการก่อสร้าง, อ่านค่าความดันน้ำเป็นลบได้, ไม่ต้องปรับแก้ค่าความยาวสาย, ไม่เกิดปัญหาจากน้ำแข็งตัว, อ่านค่าความดันเป็นลบได้	ต้องมีระบบป้องกันฟ้าผ่า, เกิดค่าเลื่อนศูนย์ (zero drift), ราคาแพง
Electrical Resistance Piezometer	อ่านค่าง่ายและช่วงลำนากน้อย, ไม่กีดขวางการก่อสร้าง, เหมาะกับการวัดค่าแบบไดนามิกส์, อ่านค่าแรงดันน้ำเป็นลบได้, ไม่เกิดปัญหาจากน้ำแข็งตัว, อ่านค่าความดันเป็นลบได้	ต้องปรับแก้ค่าความยาวสาย, มีปัญหาเรื่องความชื้นและอุณหภูมิ, ความคงทนน้อย, ต้องมีระบบป้องกันฟ้าผ่า, ราคาแพง

เครื่องมือวัดปริมาณการไหลซึม

การประเมินปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านตัวเชื่อมหรือที่ไหลซึมผ่านฐานรากเชื่อมมาในตัวเชื่อม มักนิยมใช้เครื่องมือที่เป็นรางเปิด (Open Channel) ที่ติดตั้งบริเวณด้านท้ายเชื่อม ดังรูปที่ 4 และมีฝายน้ำที่ปลายทางออกของราง น้ำที่ล้นผ่านฝายน้ำล้นจะแสดงถึงปริมาณน้ำที่ไหลซึมซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงของระดับน้ำหน้าฝาย รูปร่างของฝายมีหลายแบบ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมคางหมู หรือสามเหลี่ยม ในกรณีนี้

จำเป็นต้องการวัดปริมาณที่ละเอียดอาจติดตั้งเครื่องมือความดันน้ำหรือความสูงของน้ำ เช่น Pressure Transducer ได้เช่นกัน



รูปที่ 4 ฝ่ายวัดปริมาณการไหลซึม

ที่มา USBR (2001)

ความถูกต้องของการวัดปริมาณการไหลด้วยรางเปิดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการอ่านค่าความสูงน้ำ ความหนาของฝาย (0.02 ถึง 0.08 นิ้ว) หรือแม้กระทั่งความคมของขอบฝายซึ่งควรลบมุมให้เป็น 45 องศา USBR (2001) ได้แนะนำวิธีการตรวจวัดปริมาณการไหลไว้ใน “Water Measurement Manual” ว่า สำหรับการวัดปริมาณการไหลซึมซึ่งมีช่วงอัตราการไหลน้อยระหว่าง 1.4 ถึง 120 ลิตรต่อวินาที (0.05 ถึง 4.25 ลบ.ฟุตต่อวินาที) ฝายรูปสามเหลี่ยม (V-Notch weir) จะเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด ตำแหน่งที่วัดความสูงน้ำควรห่างจากฝายอย่างน้อย 2 เท่าของความสูงน้ำสูงสุด การวัดความสูงของน้ำจากสันฝายสามารถนำเทคนิคการวัดความดันน้ำด้วยเครื่องวัดความดันน้ำหรือการวัดความสูงของน้ำด้วยคลื่นเสียงก็ได้ นอกเหนือจากการวัดด้วยไม้บรรทัด USBR (2001) ได้ทดสอบการไหลผ่านฝายเพื่อหาสมการหาอัตราการไหลของ V-Notch weir มุม 90 องศา และแนะนำให้ใช้



$$Q = 2.49 H^{2.48}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลผ่านฝาย หน่วยเป็นลบ.ฟุต/วินาที

H = ความสูงของระดับน้ำจาก Notch หน่วยเป็นฟุต

เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

สำหรับเชื่อมคอนกรีตความร้อนหรืออุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดหน่วยแรงค้ำในตัวยึด ดังนั้นการวัดความร้อนหรืออุณหภูมิจึงต้องการสำหรับเชื่อมคอนกรีตอย่างยิ่งในระหว่างการก่อสร้าง เครื่องมือที่นิยมใช้วัดอุณหภูมิได้แก่ Thermocouple และ Thermistor เครื่องมือเหล่านี้อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ (Thermoelectric effect) นอกจากนี้ในประเทศยุโรปใช้ Fiber optic cable สำหรับเชื่อมดินถมใช้เครื่องมือเหลือนี้วัดอุณหภูมิเพื่อบ่งบอกถึงจุดที่มีการรั่วซึมผ่านตัวยึดได้

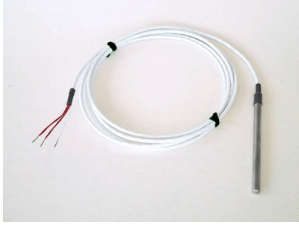
Thermocouple สายหัววัดทำจากโลหะสองชนิด ซึ่งในงานอุตสาหกรรมนิยมใช้วัดและควบคุมความร้อนในขบวนการผลิต Thermocouple แบบมาตรฐานแบ่งได้เป็น 7 ประเภทตามชนิดของคู่โลหะ อันได้แก่ ประเภท E (Chromel/Constantan), J (Iron/Constantan), K (Chromel/Alumel), T (Copper/Constantan), R (Platinum-13% Rhodium/Platinum), S (Platinum-10% Rhodium/Platinum), B (Platinum-30% Rhodium/Platinum-6% Rhodium) แต่ละประเภทจะมีช่วงการอ่านอุณหภูมิ ความละเอียด และความไวตัวแตกต่างกัน อุปกรณ์ประเภทนี้มีราคาไม่สูง ติดตั้งง่าย และสามารถเชื่อมต่อกับระบบอ่านค่าแบบอัตโนมัติได้ดี สำหรับงานเชื่อมจะใช้ประเภท T เพราะมีช่วงการอ่านค่าที่เหมาะสมคืออยู่ระหว่าง -200 ถึง 350°C มีค่าผิดพลาดร้อยละ ± 1 หรือ $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$

Resistance Thermometer หรือ Resistance Temperature Device (RTD) คือเทอร์โมมิเตอร์ชนิดความต้านทาน อาศัยสมบัติความต้านทานของตัวนำที่เป็นโลหะบริสุทธิ์ เช่น แพลตินัม เงิน ทองแดง ซึ่งจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิ อุปกรณ์ประเภทนี้จะให้ค่าความแม่นยำสูง มีเสถียรภาพ (Stability) และความคงทนสูง ช่วงการวัดของแพลตินัมอยู่ระหว่าง -258 ถึง 900°C นิเกิลอยู่ระหว่าง -150 ถึง 300°C และทองแดงระหว่าง -200 ถึง 120°C

Thermister เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่อาศัยการเปลี่ยนความต้านทานของวัสดุคล้าย RTD แต่ผลิตจากคาร์บอนหรือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ออกไซด์ของแมงกานีสกับทองแดง ที่มีสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสูงหรือความไวตัว (Sensitive) ต่อความร้อนสูง และแตกต่างกับ RTD ที่ความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ช่วงการวัดตั้งแต่ -30 ถึง 300°C

ตารางที่ 2 ได้สรุปคุณสมบัติของเครื่องมือวัดอุณหภูมิแต่ละชนิด เพื่อการเลือกใช้ติดตั้งในเชื่อม

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

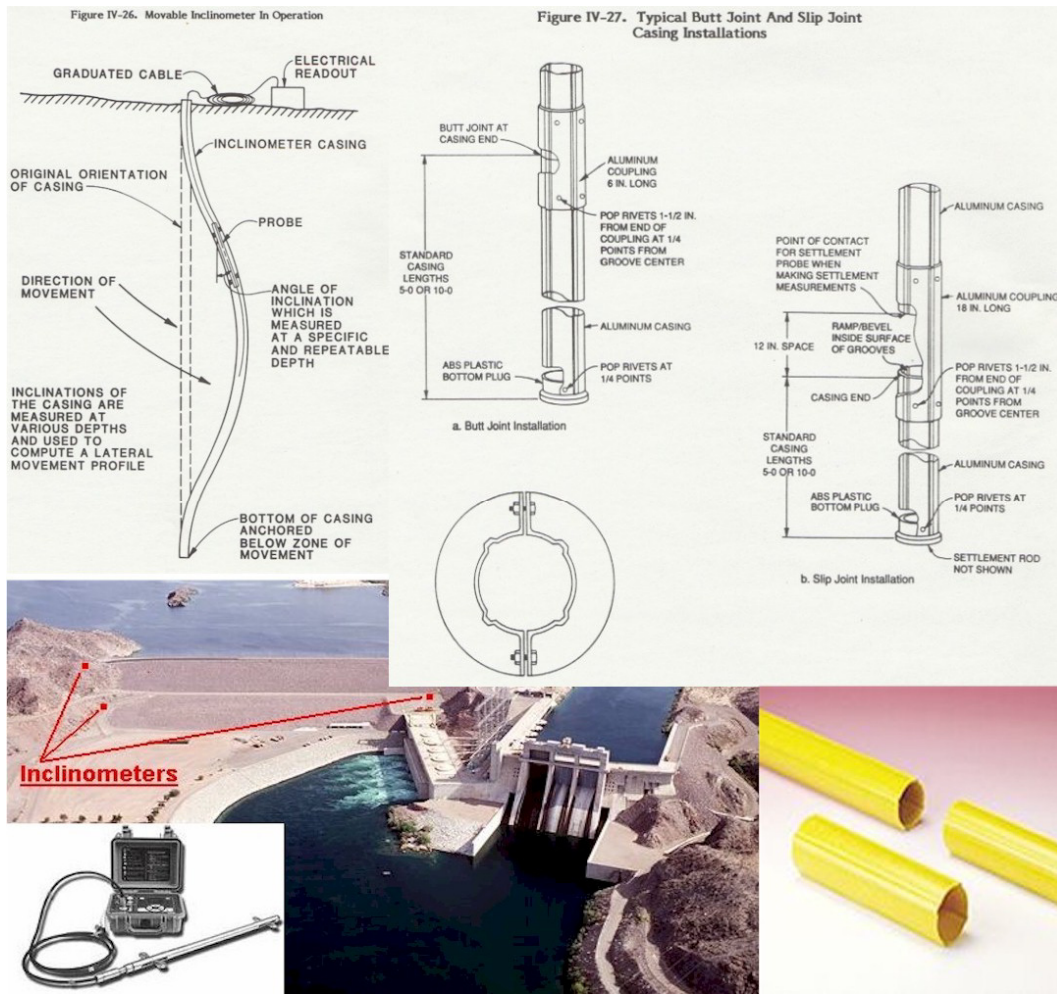
คุณสมบัติ	Thermocouple	RTD	Thermister
ลักษณะภายนอก			
Repeatability	1 ถึง 8 °C	0.03 ถึง 0.06 °C	0.1 ถึง 1 °C
เสถียรภาพการใช้งาน ที่เปลี่ยนแปลงได้	0.5 ถึง 1 °C ต่อปี	น้อยกว่าร้อยละ 0.10 ภายใน 5 ปี	0.1 ถึง 3 °C ภายใน 1 ปี
ความไวตัว	10 ถึง 50 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	0.2 ถึง 10 $\Omega/^{\circ}\text{C}$	100 ถึง 1000 $\Omega/^{\circ}\text{C}$
Linearity	ดี	ดี	ไม่ดี

เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว

เครื่องมือในกลุ่มนี้จัดเป็นกลุ่มพื้นฐานของการตรวจวัด มีหลายชนิดด้วยกัน ตั้งแต่เครื่องมือแบบง่าย เช่น หมุดวัดสำรวจ ดิ่งวัดการเคลื่อนตัว ไปจนถึงเครื่องมือที่ซับซ้อนที่มีความแม่นยำสูง เช่น Extensometer GPS LVDT การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมที่ต้องการทราบ ลักษณะการเคลื่อนตัวที่วัดอาจเป็นการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง การเคลื่อนตัวด้านข้าง การเคลื่อนตัวในแนวแกน การเคลื่อนตัวที่แตกต่างกัน การเอียงตัวของเขื่อนสำหรับเขื่อนคอนกรีต

Inclinometer (Slope Indicator)

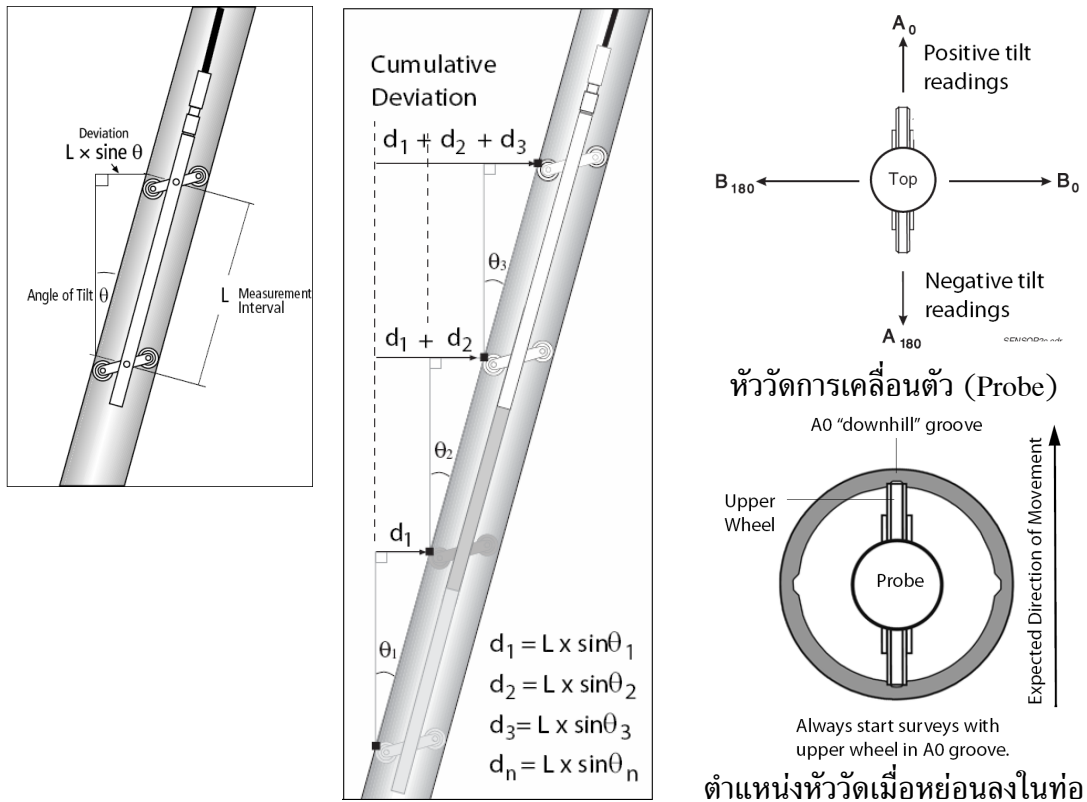
Inclinometer เป็นเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนตัวของมวลดินในแนวราบ ซึ่งส่งผลต่อความมั่นคงของเขื่อนดินหรือลาดดิน ประเมินการเคลื่อนพังของลาดดิน ประกอบด้วยท่อที่ฝังในตัวเขื่อนในแนวตั้ง การวัดจะใช้หัววัดเคลื่อนตัวไปตามเส้นท่อ หากตัวเขื่อนหรือลาดดินเคลื่อนตัวไปจะทำให้ท่อดังกล่าวโค้งหรือบิดตัวไปตาม ดังรูปที่ 5 ความลึกของท่อและตำแหน่งการติดตั้งควรกำหนดจากกวางการพิบัติที่คาดการณ์ไว้ การอ่านจะปล่อยหัววัดจากตำแหน่งที่ทราบระดับ เช่น ปลายท่อด้านบน สำหรับเขื่อนหินทิ้งลาดหน้าคอนกรีต จะติดตั้ง Inclinometer เพื่อวัดการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีตลาดหน้าได้



รูปที่ 5 Inclinator ในงานเขื่อน

ที่มา USBR

การอ่านค่าโดยทั่วไปจะใช้ Probe หย่อนลงไปในท่อ ผลการอ่านเป็นค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบ ดังรูปที่ 6 ค่าการเคลื่อนตัวเป็นสัดส่วนกับความยาวของ Probe และการเอียงตัวของท่อ ซึ่งปกติ Probe มีความยาว 0.50 เมตร การเคลื่อนตัวจะวัดทั้ง 2 แกน ได้แก่ แกนในทิศทางเหนือ-ใต้ และ แกนในทิศทางตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งค่าอ่านในแนวที่ตรงข้ามกันจะมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน การเคลื่อนตัวของเส้นท่อหรือแนวเส้นท่อที่เคลื่อนที่ไปในแนวราบ คำนวณได้จากผลรวมสะสมค่าการเคลื่อนตัวของท่อ (Cumulative Deviation) ในรูปที่ 6 ซึ่งเท่ากับ $d_1 + d_2 + d_3$ ที่ระดับปากท่อ



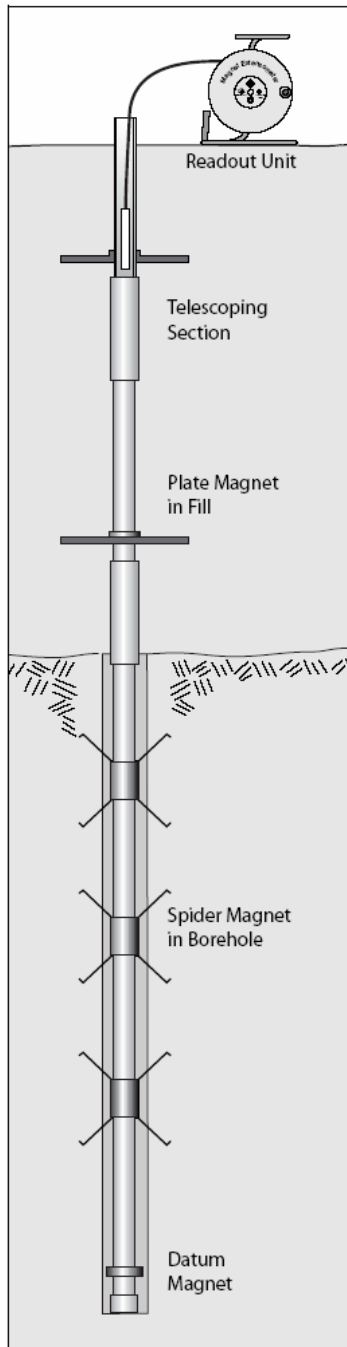
รูปที่ 6 การอ่านค่าและวิเคราะห์ผลจาก Inclinator (Slope Indicator, 2006)

Magnetic Settlement Gauge

Magnetic Settlement Gauge เป็นเครื่องมือวัดการทรุดตัวในตัวเขื่อน จะประกอบด้วย ท่อที่มักเป็นท่อของ Inclinator และวงแหวนแม่เหล็กที่มีระยะห่างประมาณ 3 เมตร คล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 7 การติดตั้งในหลุมเจาะจะใช้วงแหวนแม่เหล็กที่ติดกับขาแมงมุม เรียกว่า Spider Magnet หรือเลือกใช้เป็นแบบ Plate Magnet หากติดตั้งในระหว่างการบดอัดตัวเขื่อนก็ได้ การอ่านค่าจะใช้ Probe ที่ส่งกระแสแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อผ่านวงแหวนแม่เหล็กจะมีเสียงสัญญาณดังขึ้น

Hydraulic Settlement Gauge

Hydraulic settlement gauge ใช้วัดเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งหรือการทรุดตัวชนิดอื่นที่อาศัยระดับน้ำในเส้นท่อ ประกอบด้วย Cell ที่ฝังไว้ในตัวเขื่อน ภายใน Cell มีท่อน้ำล้น ท่ออากาศ และท่อระบายน้ำที่ล้นจากท่อน้ำ และท่อน้ำจะลากออกมานอกตัวเขื่อนที่ปลายด้านนอกนี้จะใช้ระดับน้ำหรือความสูงน้ำที่เปลี่ยนไปตามระดับของ Cell เมื่อตัวเขื่อนทรุดตัวลง ดังรูปหลักการทำงานในรูปที่ 8



รูปที่ 7 Magnetic Settlement Gauge (Slope Indicator, 2002)

มาตรวัดการเคลื่อนตัวของรอยแยก (Jointmeter)

บริเวณรอยต่อของคอนกรีตเพื่อการหดตัว (Contraction Joint) ตามแนวขวางในตัวเขื่อน หรือรอยต่อของคอนกรีตตามหน้าเขื่อน เพื่อติดตามการเคลื่อนตัวของตัวเขื่อนอันเกิดจากอิทธิพลของความดันน้ำหรือน้ำหนักบรรทุกหรือการทรุดตัวของตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อน จึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือวัดชนิดนี้ ตัวอย่างเช่น เขื่อนขุนด่านปราการชลได้เลือกใช้มาตรวัดการเคลื่อนตัวของรอยแยกแบบ Mechanical โดยวัดการเคลื่อนตัวในทั้งสามทิศทาง (Triaxial Jointmeter) ดังรูปที่ 9 เขื่อนแควน้อยอัน

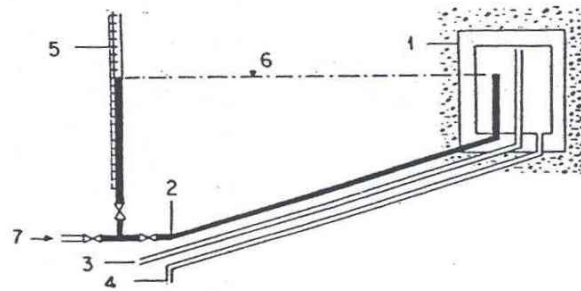


Fig. 5.16 (a) Principle of an Over-flow Settlement Gauge
1. Measuring Cell; 2. Water over-flow tube; 3. Vent Tube; 4. Drain Tube 5. Graduated Tube; 6. Liquid level to be maintained; 7. Supply of de-aerated water to cause flow

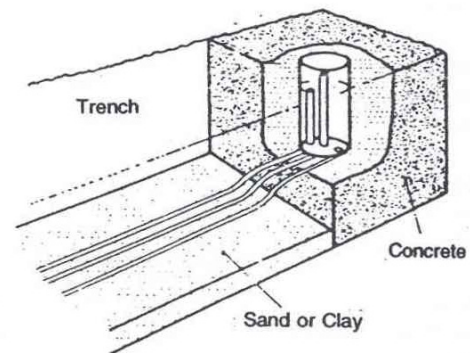
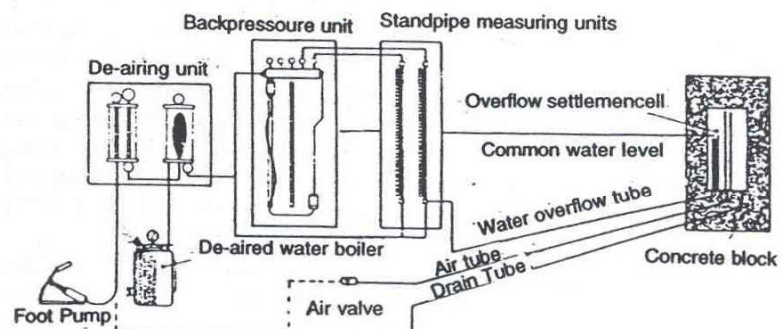
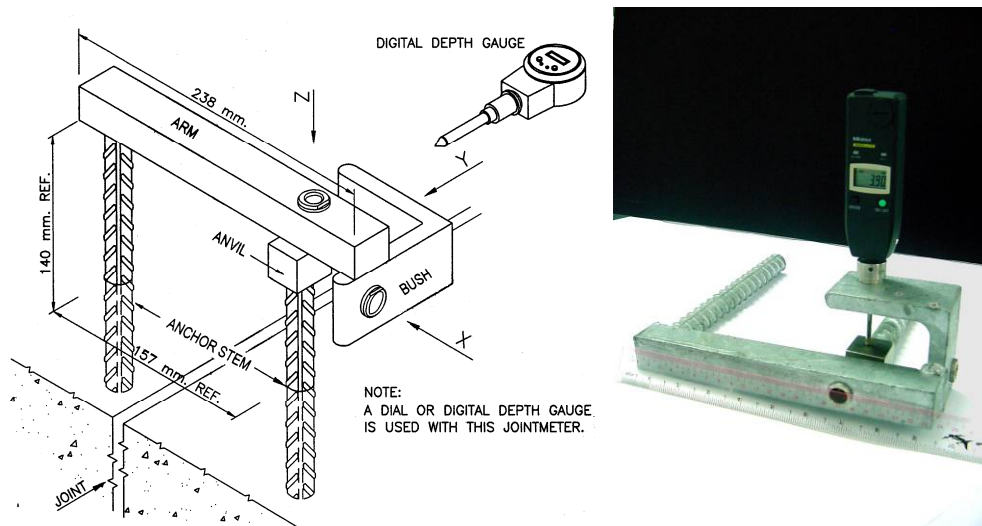


Fig. 5.16(b). Hydraulic Over-flow Settlement Gauge (Soil Inst. Ltd.)

รูปที่ 8 หลักการวัดการทรุดตัวด้วย Hydraulic Settlement Gauge

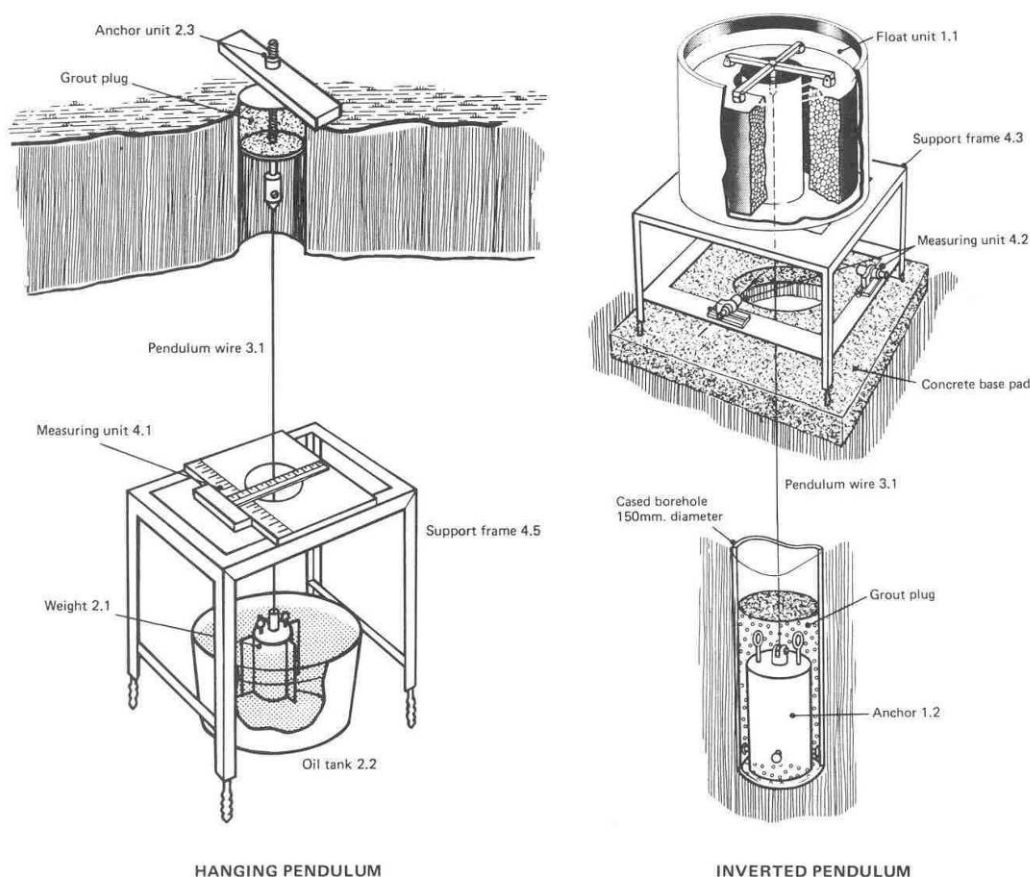
เนื่องจากพระราชดำริ ได้ติดตั้งไว้ที่ผิวคอนกรีตตาดหน้า ลักษณะของมาตรวัดการเคลื่อนตัวของรอยแยกที่ใช้ จะประกอบด้วย แขนวัดการเคลื่อนตัว (Arm) และแท่นรับ (Anvil) ซึ่งยึดอยู่กับแกนเหล็ก (Anchor Stem) ทั้งสามทิศทางของแขนวัดมีรูเสียบ (Bush) สำหรับวัดการเคลื่อนตัวด้วย Dial Depth Gauge หรือ Digital Depth Gauge มาตรวัดการเคลื่อนตัวของรอยแยกจะมีช่วงการอ่านค่า 15 มิลลิเมตร การอ่านค่าจะใช้เครื่องวัดความลึก Dial Depth Gauge เสียบในรูบนแขนวัด หรือใช้ LVDT



รูปที่ 9 มาตรวัดการเคลื่อนตัวของรอยแยก ในเขื่อนขุนด่านปราการชล

Pendulum

ดั่งวัดการเคลื่อนตัว (Pendulum) ใช้วัดการเอียงตัวของเขื่อนหรือการเคลื่อนตัวของเขื่อนคอนกรีต มีลักษณะเป็นตุ้มน้ำหนักที่ซึ่งตั้งด้วยเส้นลวดด้านบนยึดกับสมอ เรียกว่า Direct Pendulum หรืออาจมีลักษณะ Inverted Pendulum ที่เส้นลวดซึ่งอยู่กับสมอที่ฝังในชั้นหินฐานราก และด้านบนยึดอยู่กับลูกลอย ใช้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของตัวเขื่อน การตรวจสอบจะวัดการเคลื่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดที่ติดตั้งโตะในตัวเขื่อน องค์ประกอบของเครื่องมือเพนดูลัมทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 องค์ประกอบของดิ่งวัดการเอียงตัว (Dunnicliff, 1988)

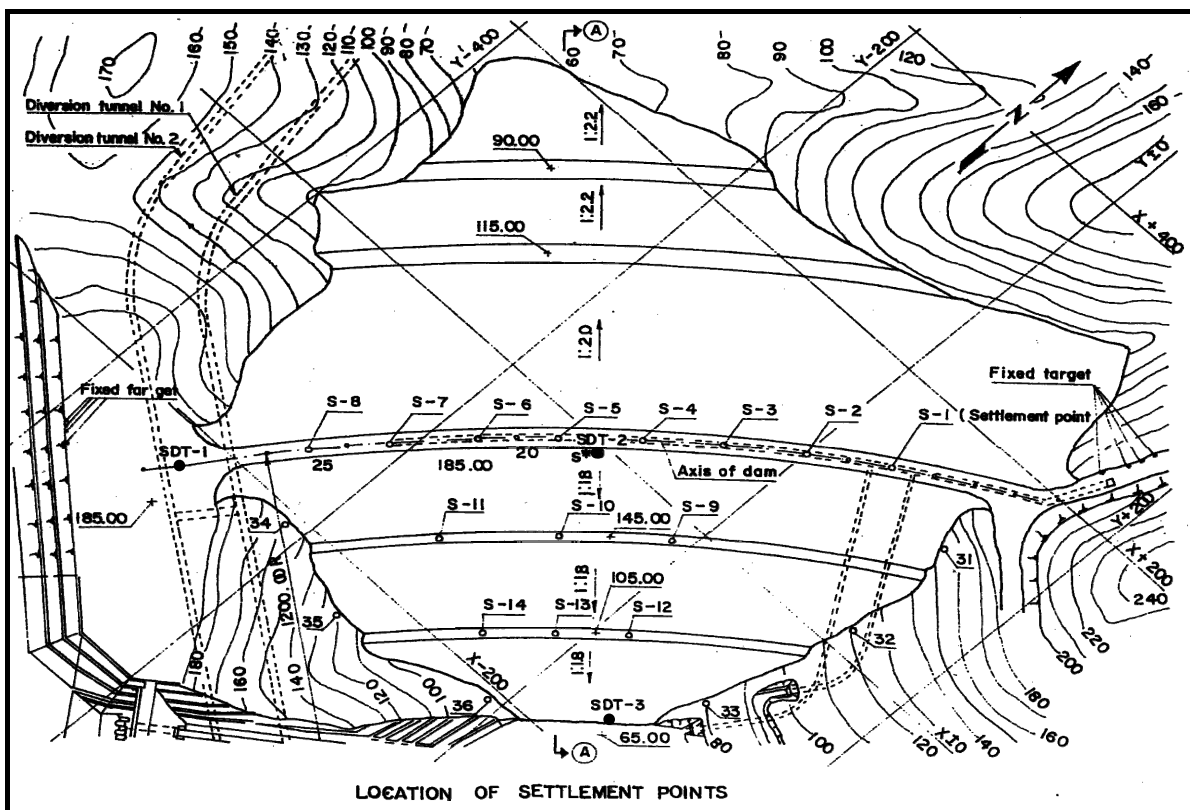
เครื่องมือวัดหน่วยแรง

การตรวจวัดหน่วยแรงและความเครียด (Measurement of Stress/Strain) เป็นการตรวจวัดพฤติกรรมด้านหน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นในตัวเชื่อมเพื่อใช้ในการตรวจสอบสมมติฐานการออกแบบ โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่ผู้ออกแบบคาดว่าจะเกิดหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดสูงสุดคือบริเวณใกล้ฐานเชื่อมและบริเวณที่เปลี่ยนความลาด รวมทั้งติดตั้งบริเวณกลางเชื่อมเพื่อหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

ระบบการวัดค่าแบ่งเป็น 2 ระบบตามตัวกลางคือ ระบบ Hydraulic ซึ่งใช้น้ำหรือน้ำมันเป็นตัวกลาง มักไม่นิยมใช้ในงานเชื่อมเพราะมีความละเอียดน้อย และระบบ Pneumatic ซึ่งใช้แรงดันลมอัดเข้าของเหลว (น้ำ, น้ำมัน, โปรท) ใน Pressure cell ไปดันไดอะแฟรม (Diaphragm) ให้เกิดการแอ่นตัวแล้ววัดการแอ่นตัวด้วย Strain gage หรือ Vibrating wire หรือ LVDT (Linear Variable Displacement Transformer)

เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน

แรงสั่นสะเทือนที่กระทำกับตัวเขื่อนมีที่มาจากแผ่นดินไหว หรือจากการเก็บกักน้ำในอ่างเอง (Reservoir Induced) ผลการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมเขื่อนเมื่อมีแรงสั่นสะเทือนมากระทำกับตัวเขื่อน อัตราเร่งที่ขยายในตัวเขื่อน เพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยเขื่อนและประโยชน์ในการออกแบบเขื่อนต่อไป แรงสั่นสะเทือนสามารถตรวจวัดได้จากเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน 2 ประเภทคือ Seismograph และ Accelerograph โดย Seismograph เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเคลื่อนตัวของตัวเขื่อน สำหรับ Accelerograph ใช้วัดความเร่งของการสั่นสะเทือน เครื่องมือวัดในกลุ่มนี้มักติดตั้งในบริเวณฐานเขื่อน สันเขื่อนหรือยันเขา และขอบอ่างเก็บน้ำดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือน เขื่อนศรีนครินทร์

การวิเคราะห์ผลอ่านค่าจากเครื่องมือวัด

การวิเคราะห์ผลอ่านค่าจากเครื่องมือวัดเป็นพื้นฐานของการประเมินความปลอดภัยเขื่อน เพื่อบอกสถานะความมั่นคงของเขื่อน แม้ว่าการออกแบบเขื่อนมักได้เผื่อหรือเลือกใช้คุณสมบัติที่เหมาะสมจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติ หรือกำหนดอัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อนในกรณีต่างๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลอ่านค่าจึงจำเป็นต้องการวิเคราะห์คาดการณ์พฤติกรรมเขื่อนเพื่อเปรียบเทียบว่าการออกแบบมีสมมติฐานที่เหมาะสมแล้วหรือไม่ เขื่อนมีความปลอดภัยเพียงใด การวิเคราะห์ที่จำเป็นสำหรับเขื่อน



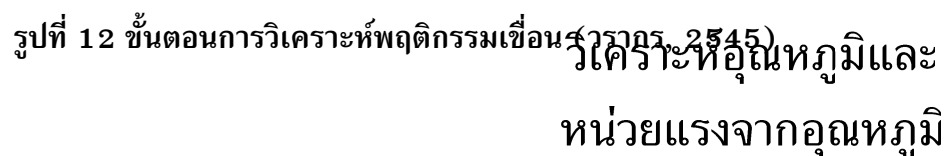
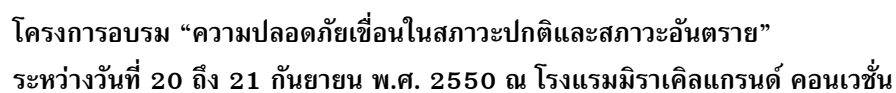
ดินและหินถม ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเชื่อม การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเชื่อม และฐานราก การวิเคราะห์แรงและการทรุดตัว และสำหรับเชื่อมคอนกรีต ได้แก่ การวิเคราะห์หน่วยแรงและอุณหภูมิ การวิเคราะห์เสถียรภาพของเชื่อม ในเบื้องต้นสามารถอาจยัดเอารายงานการออกแบบ (Design Report) และก่อนการเก็บน้ำควรนำผลการดำเนินการก่อสร้างเชื่อมเพื่อทำการวิเคราะห์โดยละเอียด สำหรับสร้างเกณฑ์การเตือนภัย ดังแสดงในรูปที่ 12 เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมเชื่อมโดยทั่วไป

พารามิเตอร์ที่แสดงพฤติกรรมของเชื่อมที่ได้จากการวิเคราะห์เครื่องมือวัดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องมือวัดสรุปได้ดังในตารางที่ 3 โดยมีวัตถุประสงค์ในทางวิศวกรรม เช่น การควบคุมงานในระหว่างการก่อสร้างเพื่อให้ตัวเชื่อมมั่นคง การบดอัดที่ไม่เร็วจนทำให้ความดันน้ำสะสมหรือบดอัดคอนกรีตเร่งจนอุณหภูมิสะสมในตัวเชื่อม หรือการทำนายพฤติกรรมในระยะยาว เช่น การทรุดตัว วิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อตรวจสอบสมมติฐานของการออกแบบ คุณสมบัติของวัสดุถมเชื่อมและหินฐานราก

การวิเคราะห์พฤติกรรมจากเครื่องมือวัดจำเป็นต้องมีความเข้าใจหลักการของการอ่านค่าของเครื่องมือวัดแต่ละชนิด โดยอาจศึกษาจาก Specification ของเครื่องมือชิ้น ๆ และทฤษฎีพื้นฐาน การไหลซึมผ่านวัสดุพูน การพัฒนาความดันน้ำ การกระจายของหน่วยแรงในดิน การยุบอัดตัวคายน้ำ เป็นต้น อีกทั้งวิธีการออกแบบเชื่อมประเภทต่าง ๆ เพื่อเข้าใจระดับความปลอดภัยของเชื่อมที่ผู้ออกแบบเชื่อมพิจารณา

ผลการวิเคราะห์มักนำเสนอเป็นกราฟในทั่วไปมักแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่ตรวจวัด (ความดันน้ำ หน่วยแรง ปริมาณการไหลซึม ฯลฯ) กับเวลา หรือแสดงเป็นอัตรา การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์นั้นกับเวลา ในบางครั้งการนำเสนอที่เปรียบเทียบกับเวลานี้อาจไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์หรือพฤติกรรมของเชื่อมให้ชัดเจนได้ การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มากกระทำกับผลลัพธ์ (load-response relationship) สามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมเชื่อมได้และหาคุณสมบัติของวัสดุได้อีกด้วย เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของดินถมกับการทรุดตัวหรือการเคลื่อนตัว ระดับน้ำหน้าอ่างกับความดันน้ำด้านท้ายเชื่อมหรือปริมาณการไหลซึม

ในภาพรวมอาจแสดงผลการอ่านค่ากับตำแหน่งเพื่อการพิจารณาความผิดปกติของทั้งตัวเชื่อม เช่น การเคลื่อนตัวของสันเชื่อมในแนวแกนเชื่อม ความดันน้ำใต้ฐานเชื่อมในแนวหน้าตัดเชื่อมเพื่อหาแรงดันลอยตัวใต้ฐานเชื่อม สำหรับเชื่อมคอนกรีต หรือการพลอต Contour ของค่าวัดที่ได้จากเครื่องมือที่ติดตั้งกระจายทั่วทั้งหน้าตัวเชื่อม เช่น ความดันน้ำในตัวเชื่อม อุณหภูมิในตัวเชื่อม ซึ่งควรระบุอยู่ในรายงานการออกแบบหรือเงื่อนไขของการออกแบบเชื่อม





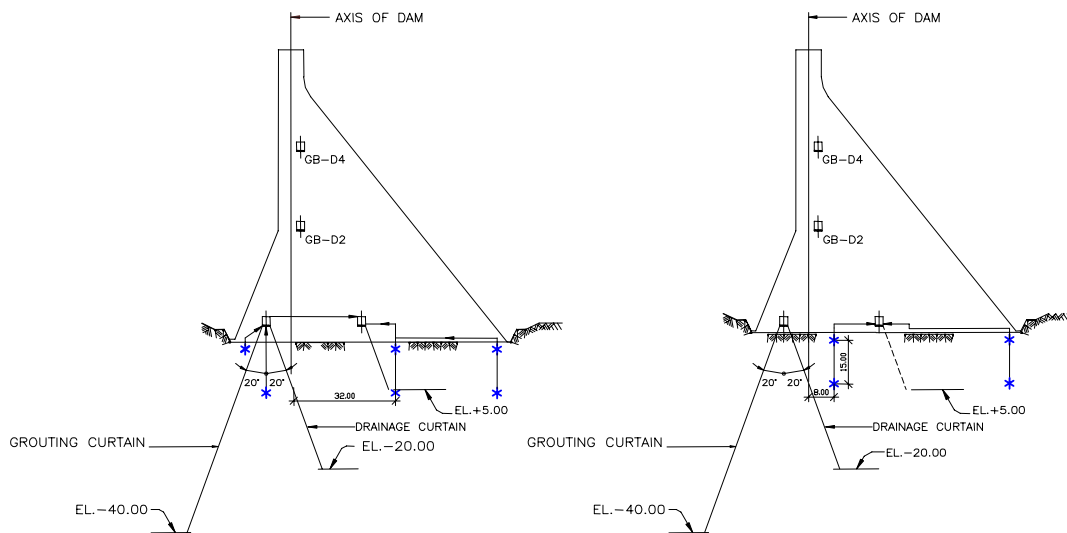
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดในงานเขื่อน

พฤติกรรม	ชนิดเครื่องมือวัด	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	
		ระหว่างการก่อสร้าง	ระหว่างการใช้งาน
ความดันน้ำ (Pore Water Pressure)	1. Piezometer 2. Observation Well 3. Seepage Flow Meter	- ค่า Pore pressure ratio - Pore pressure dissipation - Steady flow	- Pore pressure dissipation - Consolidation rate - Seepage loss - Steady flow
หน่วยแรงในมวลดิน (Earth pressure)	1. Total pressure cell 2. Piezometer	- การเปลี่ยนแปลงของ Stress ในขณะก่อสร้าง	- ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ในทิศทางต่างๆ - ค่า FS เฉพาะจุด - พฤติกรรมแรงดันดินโดยรอบท่อ Outlet
การเคลื่อนตัว (Deformation)	1. Surface B.M. 2. Cross-arm 3. Settlement Plate 4. Inclinator 5. Foundation Compression Transducer 6. Hydraulic Settlement gauge	- การทรุดตัวระหว่างการก่อสร้างและใช้งาน	- ความสัมพันธ์ของ Stress-Strain - การเคลื่อนตัวด้านข้าง - การเคลื่อนตัวโดยรอบท่อ Outlet - ความยืดหยุ่นของวัสดุก่อสร้างและฐานรากเขื่อน
อุณหภูมิ	1. Thermocouple	- อัตราสะสมความร้อน	- สัมประสิทธิ์ทางความร้อน
การสั่นสะเทือน (Seismic Vibration)	1. Accelerometer 2. Seismometer	- Seismic coefficient - ความถี่ในการเกิดแผ่นดินไหวและความรุนแรงในบริเวณเขื่อน - ปฏิกริยาของเขื่อนภายหลังแผ่นดินไหวหรือการระเบิดในบริเวณใกล้เคียง	

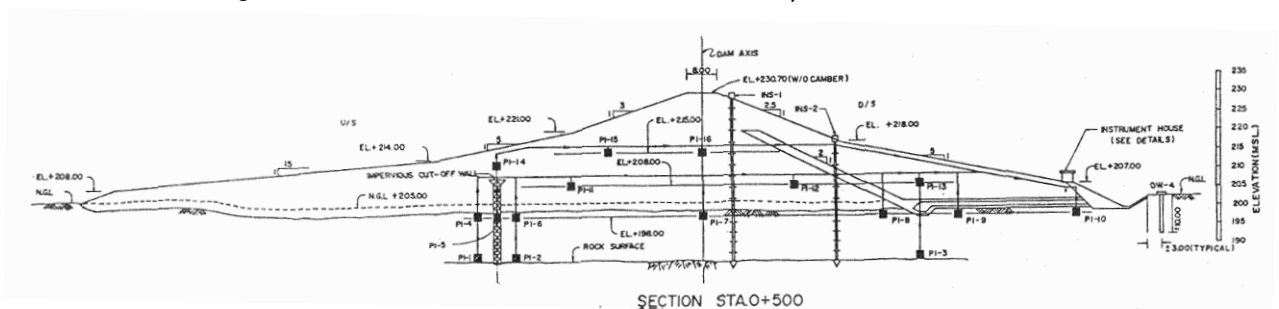
ความดันน้ำในตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อน

การตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมการไหลซึม เช่น ม่านอัดฉีดน้ำปูน (Grouting Curtain) และม่านระบายน้ำ (Drainage Curtain) เราจำเป็นต้องทราบค่าความดันน้ำ สำหรับเขื่อนคอนกรีตใช้ตรวจวัดความดันน้ำ (Pressure Head) ในหินฐานรากที่รองรับตัวเขื่อน และใช้ประเมินแรงลอยตัว (Uplift Force) ที่เกิดขึ้นใต้ฐานเขื่อน ดังนั้นจึงมักนิยมติดตั้งพิโซมิเตอร์ (Piezometer) ไว้ใต้ฐานรากเขื่อน ตำแหน่งต่างๆ ตลอดแนวเขื่อน ดังรูปที่ 13 สำหรับเขื่อนดินหลังจากที่เขื่อนได้เก็บน้ำความดันน้ำในตัวเขื่อนโดยเฉพาะบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำสูงขึ้น การไหลซึมผ่านแกนดินเหนียวที่ผิดปกติและการระบายน้ำผ่านชั้นกรองที่ผิดปกติ เหตุการณ์เหล่านี้สามารถตรวจสอบได้จากความดันน้ำในบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้การบดอัดเขื่อนทำให้เกิดความดันสะสม ซึ่งบางครั้งเป็นเหตุการณ์ผิดปกติในระหว่างการก่อสร้าง เช่น

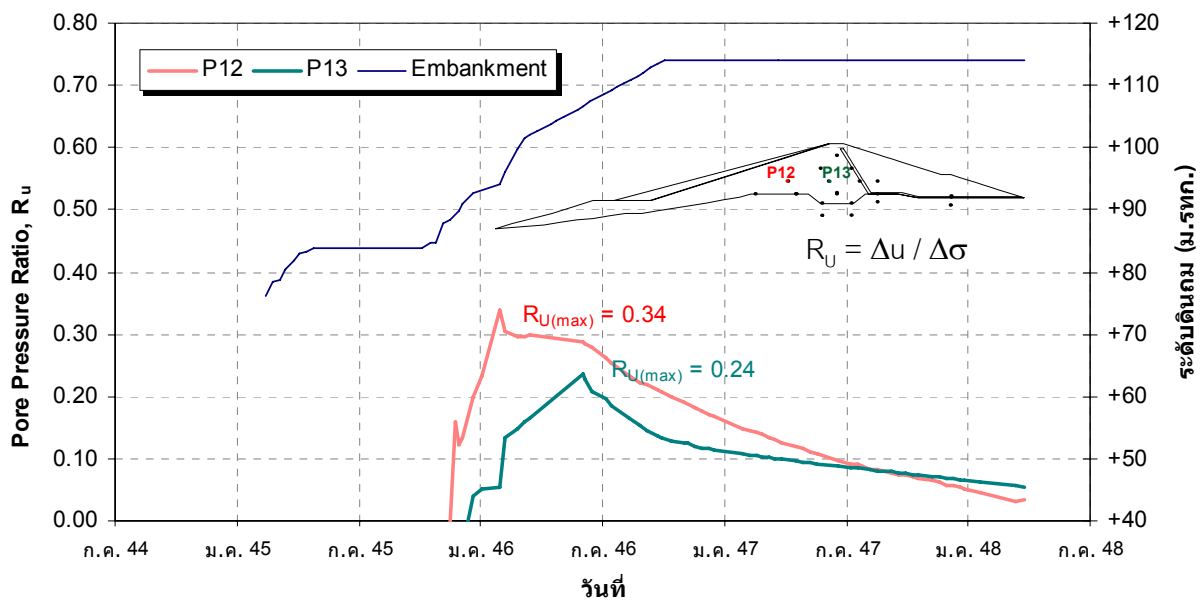
เขื่อน Calaveras ในระหว่างก่อสร้างเขื่อนดินต้องการหาความดันน้ำที่สะสมในตัวเขื่อนในการควบคุมการบดอัดระหว่างก่อสร้าง มักใช้ค่าอัตราส่วนความดันน้ำ (Pore Pressure Ratio, R_u) ในระหว่างเก็บกักน้ำเขื่อน ระดับน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำเป็นสิ่งที่ต้องการเพื่อประมาณเส้นระดับน้ำสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ และหากความผิดปกติของวัสดุรองเกิดการอุดตัน ความดันน้ำในบริเวณท้ายน้ำที่สูงขึ้นย่อมตรวจวัดได้จากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งไว้ในบริเวณดังกล่าว ระดับน้ำใต้ดินด้านท้ายเขื่อนนำไปใช้หาความต่างศักย์ของน้ำสำหรับหาประสิทธิภาพของระบบปิดกั้นน้ำในตัวเขื่อน เช่น ม่านอัดฉีดน้ำปูน หากพิจารณาจากความดันน้ำที่ลดลงเมื่อผ่านม่านอัดฉีดน้ำปูน นอกจากนี้ในระหว่างการก่อสร้าง การวัดความดันน้ำใต้ฐานรากต้องแยกความดันน้ำในธรรมชาติออกจากความดันน้ำที่เพิ่มขึ้นจากการบดอัดถมเขื่อน ความดันน้ำที่วัดได้จากพิโซมิเตอร์จะเป็นผลมาจากทั้งความดันน้ำจากการไหลซึมและระดับน้ำใต้ดินซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ดังนั้นหากต้องการหาความดันที่แท้จริงจากระดับในอ่างเก็บน้ำจำเป็นต้องทราบค่าระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 13 ตำแหน่งพิโซมิเตอร์ในฐานรากเขื่อนขุนด่านปราการชล



รูปที่ 14 ตำแหน่งพิโซมิเตอร์ในตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนมูลบน



รูปที่ 15 ค่า R_u จากการประมาณด้วยพิโซมิเตอร์

ปริมาณการไหลซึม (Seepage Discharge)

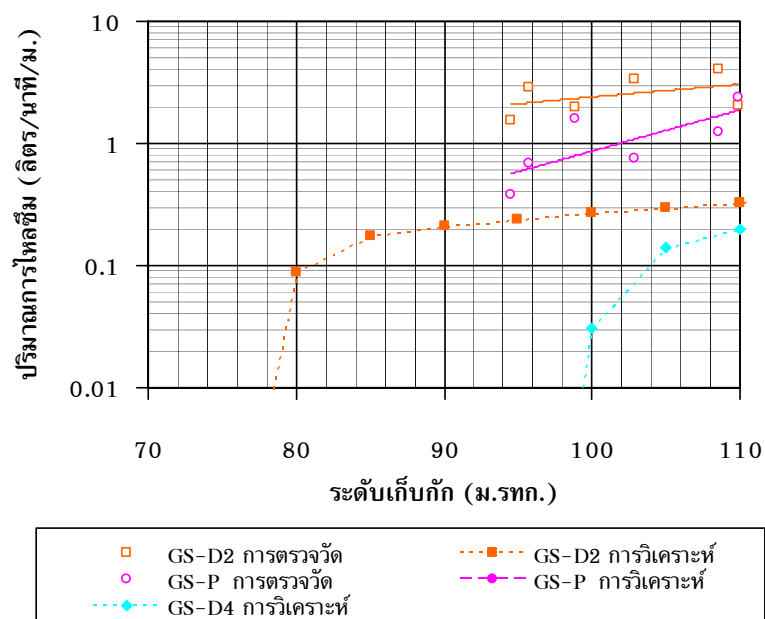
ปริมาณน้ำที่ตรวจวัดได้จะบ่งบอกถึงพฤติกรรมการรั่วซึมของตัวเขื่อนและชั้นหินฐานราก ซึ่งหากพบว่าปริมาณน้ำที่ซึมผ่านมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างผิดปกติ น้ำมีความขุ่นหรือสีที่ผิดปกติ หรือความเป็นกรดต่างจากน้ำที่ไหลซึมผ่านตัวเขื่อน สิ่งบ่งชี้เหล่านี้สามารถช่วยให้เจ้าของเขื่อนสามารถดำเนินการแก้ไขได้ตั้งแต่เริ่มต้น ตัวอย่างการวิเคราะห์อัตราการไหลซึมที่ไหลผ่านตัวเขื่อนที่แสดงเป็นแผนภูมิฟองน้ำในรูปที่ 16 ซึ่งจะเห็นว่าการไหลซึมมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำที่อยู่เหนือจุดตรวจวัด ดังนั้นหากมีจุดใดมีอัตราการไหลซึมสูงกว่าจุดตรวจวัดที่อยู่ล่างย่อมแสดงถึงความผิดปกติได้ ดังในบริเวณกม. 1+800 ถึง กม. 2+000

การเคลื่อนตัว

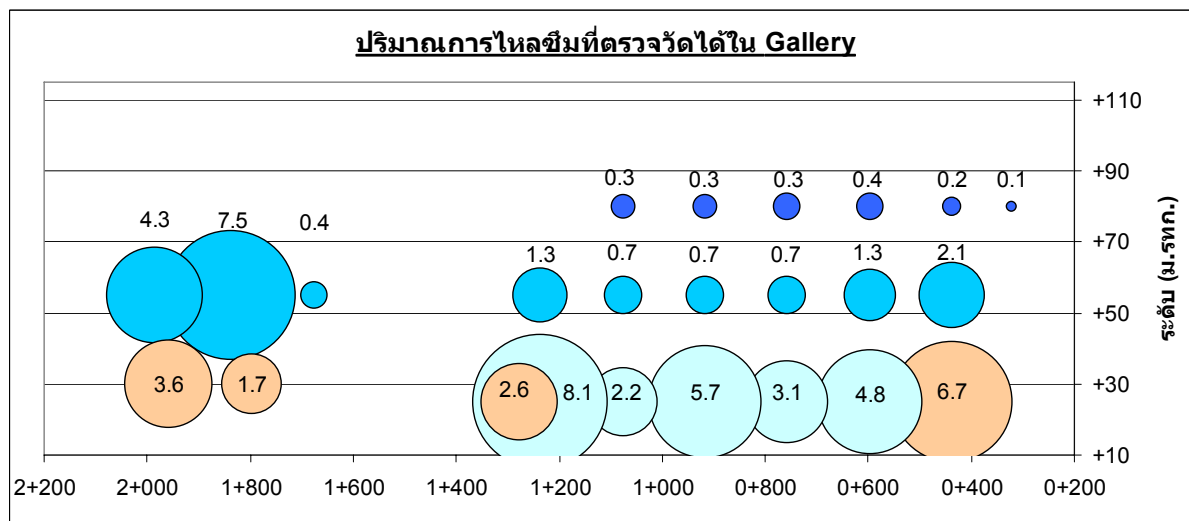
การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวจะเป็นการคำนวณหาระยะการเคลื่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเริ่มต้น (Relative Displacement) โดยค่าเริ่มต้นที่นำมาเปรียบเทียบมักหมายถึงเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดน้ำเสร็จ หรือในทางปฏิบัติจะใช้หลังก่อสร้างเสร็จใหม่ก็ได้ หากต้องการเปรียบเทียบพฤติกรรมก่อนและหลังการเก็บกักน้ำ การเคลื่อนที่ในแนวราบสำหรับเขื่อนดินสามารถตรวจวัดได้จากหมุดสำรวจที่ติดตั้งบนลาดเขื่อน หรือจากท่อ Inclinator ที่ติดตั้งในตัวเขื่อน ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 17 สำหรับเขื่อนคอนกรีตจะวัดได้จากการเคลื่อนตัวของเส้นลวดเพนดูลัม (Pendulum Wire) ในเขื่อนเขื่อนคอนกรีตโค้ง (Arch dam) การเคลื่อนตัวจะเกิดขึ้นในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางความโค้งของเขื่อน ในเขื่อนคอนกรีตน้ำหนักถ่วง (Gravity dam) จะแสดงการเคลื่อนตัวในแนวเหนือน้ำท้ายน้ำเป็นหลัก



โครงการอบรม “ความปลอดภัยเชื่อมโยงในสภาวะปกติและสภาวะอันตราย”
ระหว่างวันที่ 20 ถึง 21 กันยายน พ.ศ. 2550 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น



(ก) ระดับเก็บกักน้ำกับปริมาณการไหลซึม



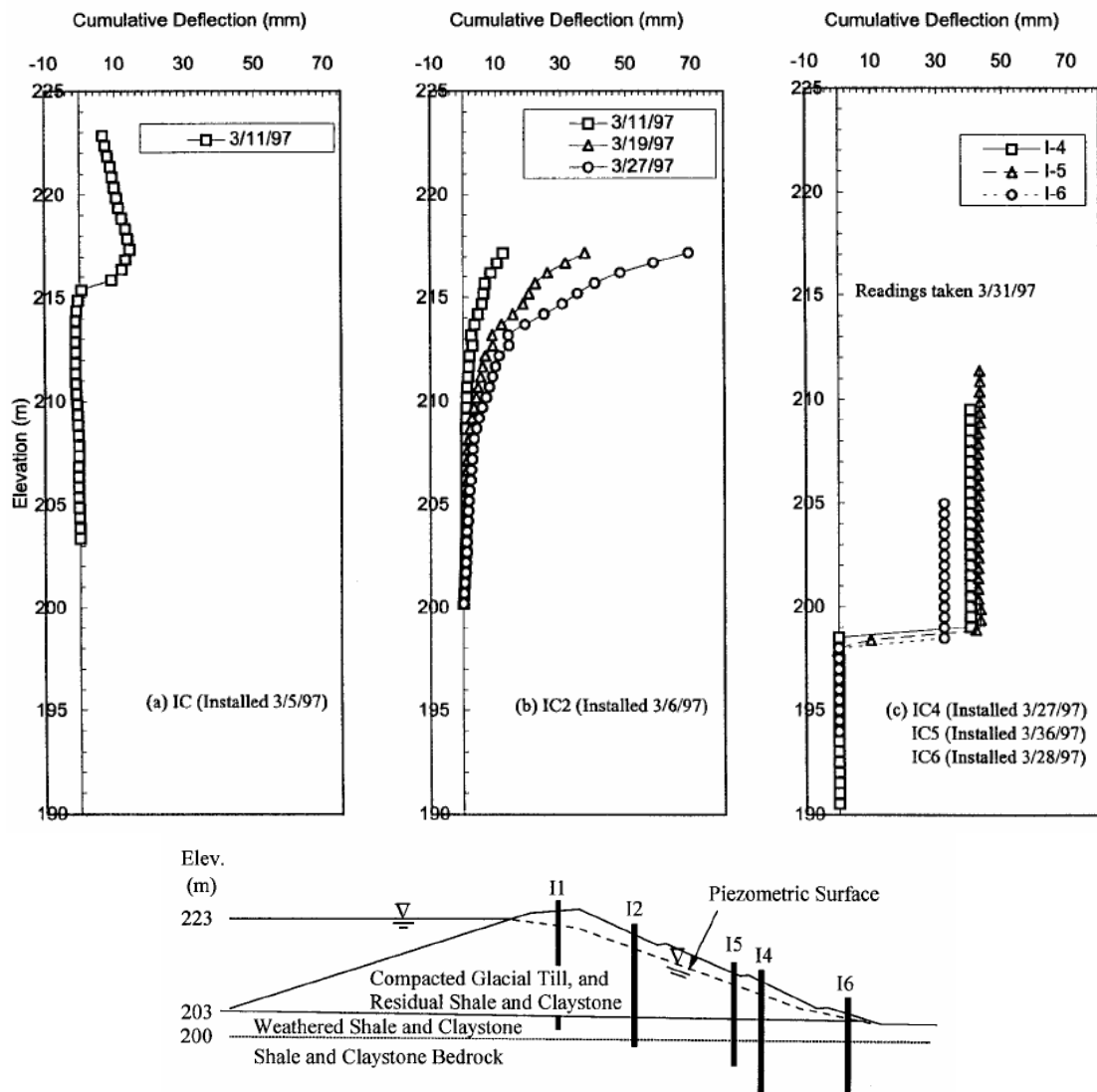
(ข) ปริมาณการไหลซึมผ่านตัวเชื่อมในแต่ละตำแหน่ง

รูปที่ 16 การวิเคราะห์ปริมาณการไหลซึมผ่านตัวเชื่อม



โครงการอบรม “ความปลอดภัยเขื่อนในสภาวะปกติและสภาวะอันตราย”

ระหว่างวันที่ 20 ถึง 21 กันยายน พ.ศ. 2550 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น

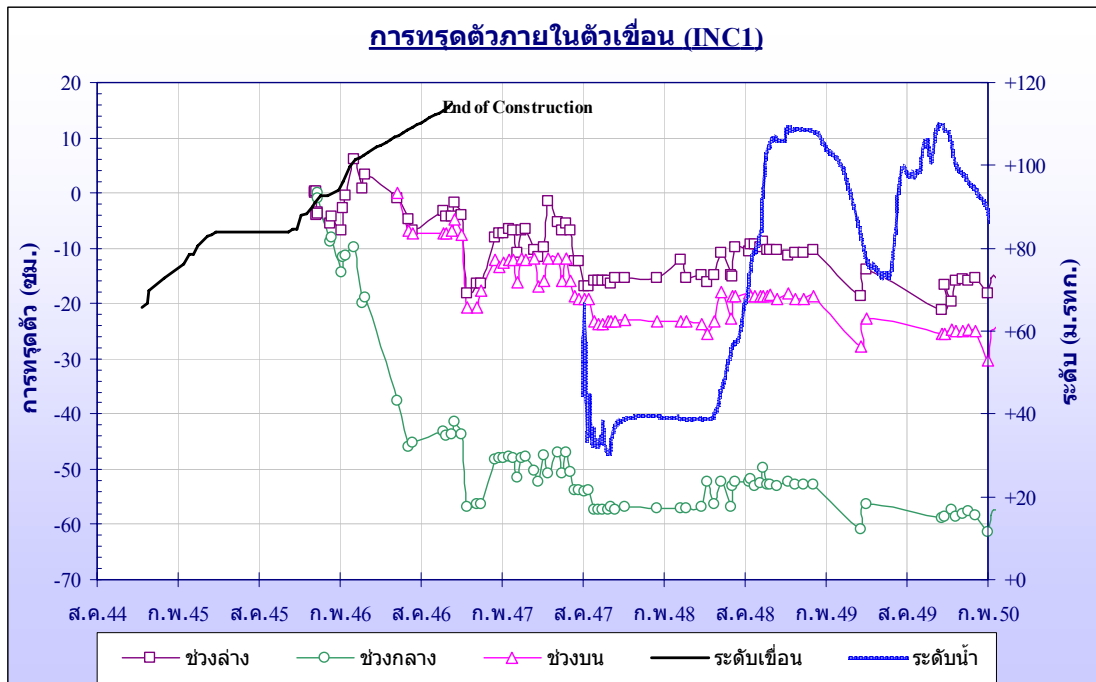


รูปที่ 17 การเคลื่อนตัวในแนวราบจาก Inclinator

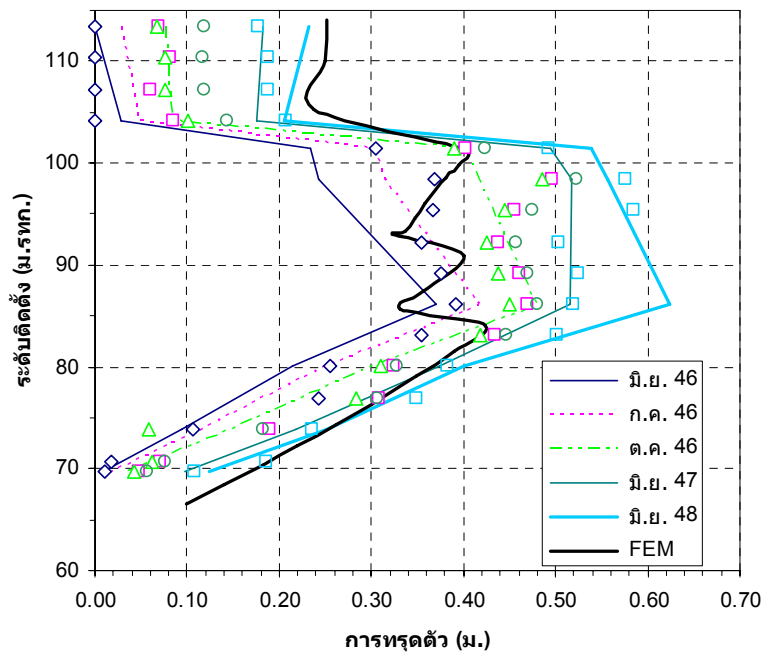
ในทำนองเดียวกันการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งหรือการทรุดตัวจะเป็นการวิเคราะห์การทรุดตัวจากระดับเริ่มต้น การวิเคราะห์การทรุดตัวดำเนินการเพื่อการทำนายขนาดการทรุดตัวและระยะเวลาเมื่อสิ้นสุด โดยอาจอ้างอิงทฤษฎีการยุบตัวของดิน หรือแบบจำลองคณิตศาสตร์ เช่น First Order Rate Equation (FORE) Rectangular Hyperbolic Method (RHM) Asaoka's Plot การทรุดตัวจะเกิดขึ้นตั้งแต่ก่อสร้างเขื่อนติดตามได้โดยการพล็อตเทียบตลอดความลึกของ



โครงการอบรม “ความปลอดภัยเชื่อมในสภาวะปกติและสภาวะอันตราย”
ระหว่างวันที่ 20 ถึง 21 กันยายน พ.ศ. 2550 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา



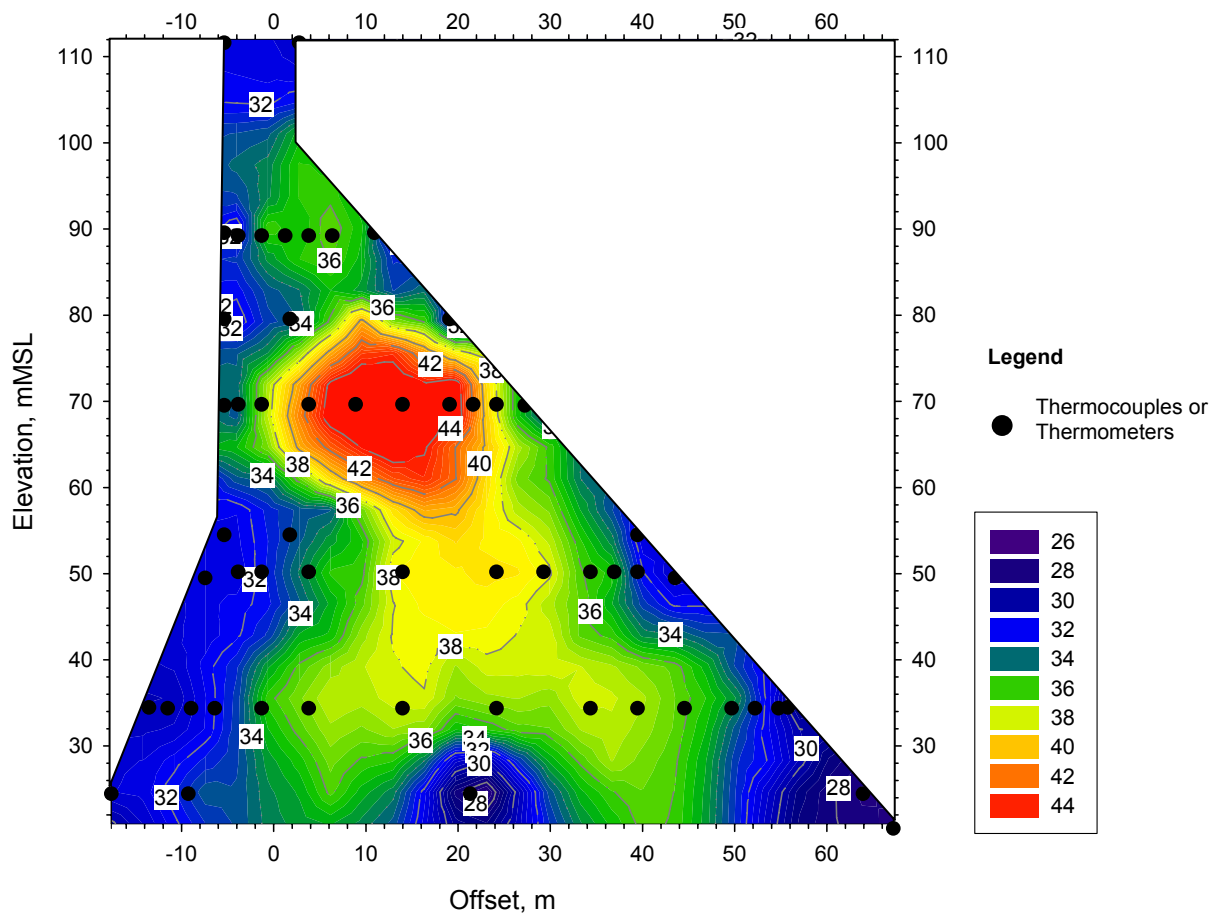
(ข) ผลการวัดการทรุดตัวภายในตัวเชื่อม ณ ช่วงเวลาต่างๆ

รูปที่ 18 การวัดการทรุดตัวภายในตัวเชื่อมด้วย Multi stage settlement gage

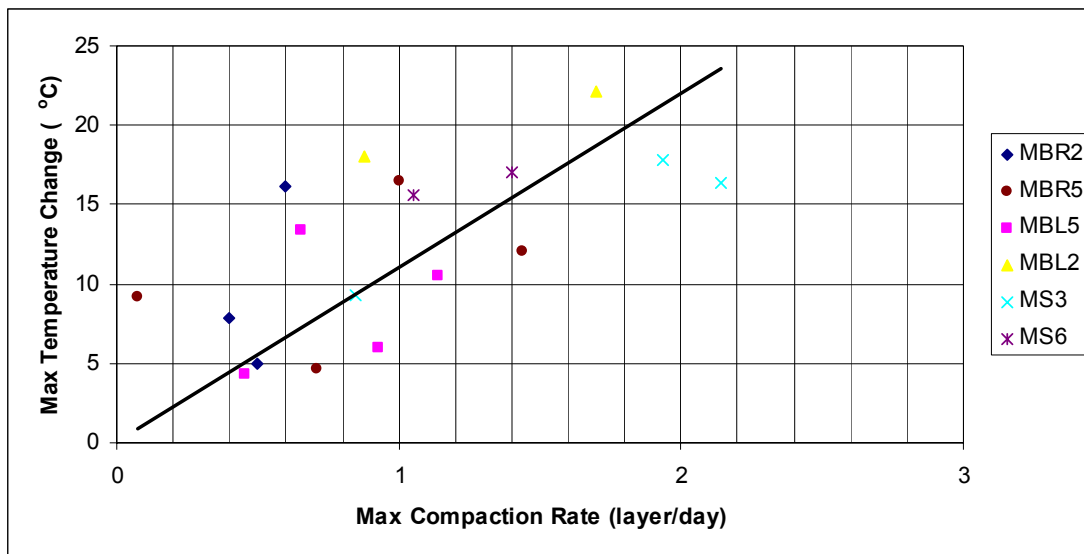


อุณหภูมิ

อุณหภูมิในตัวเชื่อมคอนกรีตในระหว่างการก่อสร้างถึงการเก็บกักน้ำใช้งาน ใช้ประเมินหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การกระจายของอุณหภูมิในตัวเชื่อมวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่แสดงเป็น Contour ดังตัวอย่างในรูปที่ 19 และเมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิที่สะสมจากการบดอัดเชื่อมคอนกรีตใช้เป็นเกณฑ์การควบคุมงานก่อสร้าง ในรูปที่ 20 หากบดอัดด้วยอัตราเร็วกว่า 1 ชั้นต่อวัน จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นกว่า 15 องศาเซลเซียส



รูปที่ 19 เส้นชั้นการกระจายระดับอุณหภูมิที่หน้าตัดเชื่อม



รูปที่ 20 ผลของอัตราการบดอัดเขื่อนที่มีต่ออุณหภูมิในเขื่อนคอนกรีตบดอัด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณกรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

วรกร ไม้เรียง การตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อน.

Dunnicliff, J. 1988. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.

ICOLD 1969. Bulletin No.21 General Considerations Applicable to Instrumentation to Earth and Rockfill Dam.

ICOLD 1982. Bulletin No.41 Automated Observation for the Safety Control of Dams.

ICOLD 1988. Bulletin No.60 Dam Monitoring General Considerations.

ICOLD 2000. Bulletin No.118 Automated dam monitoring systems – Guidelines and case histories.

Slope Indicator 2006. Digitilt Inclinator Probe Manual.

Slope Indicator 2002. Magnet Extensometer.

USACE 1987. EM 1110-2-4300: Instrumentation for Concrete Structures.

USACE 1995. EM 1110-2-1908: Engineering and Design – Instrumentation of Embankment Dams and Levees.