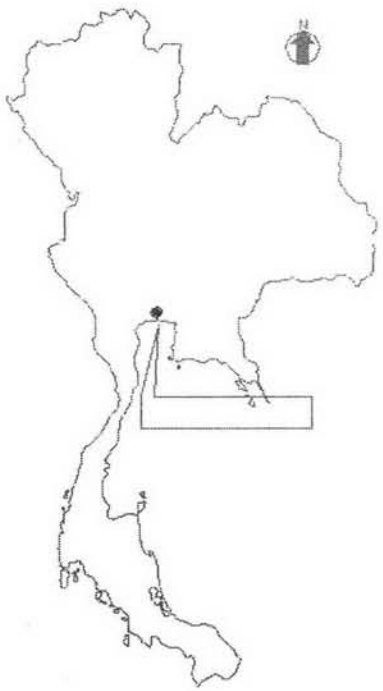
# บทที่ 3

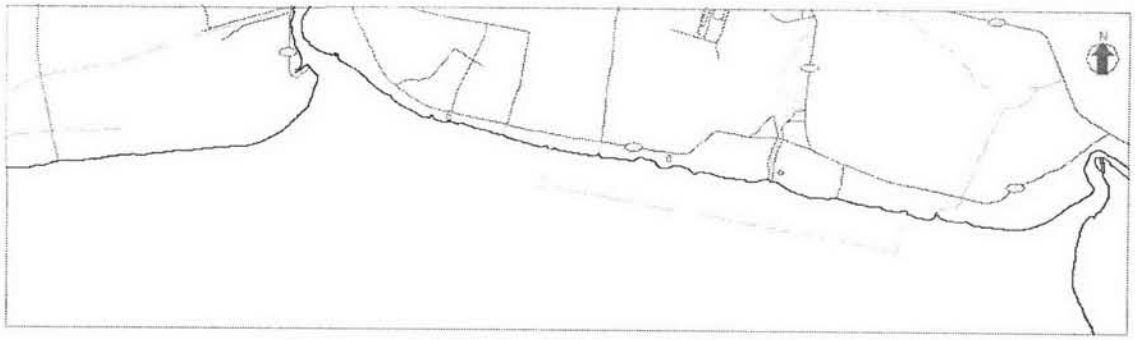
# วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บริเวณตัวอย่าง

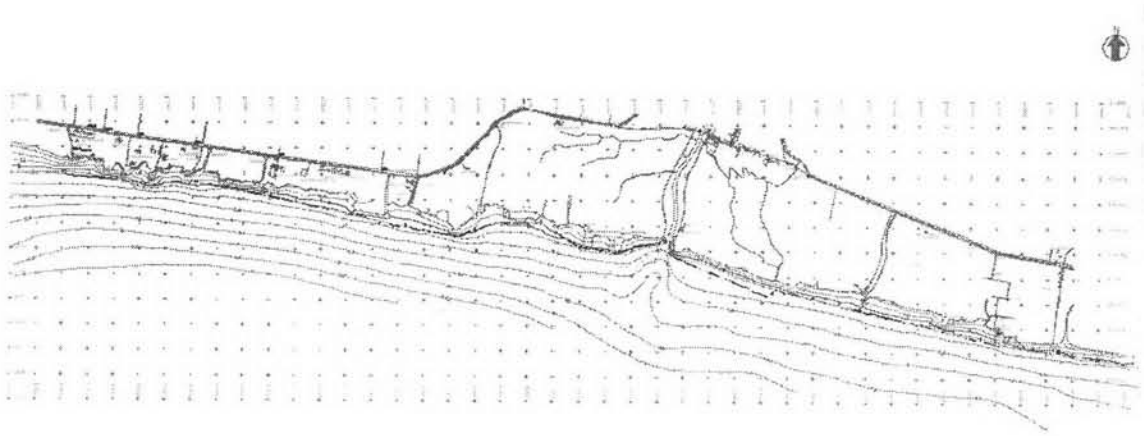
จากการที่ชายฝั่งบริเวณอ่าวไทยตอนบนฝั่งตะวันออกได้มีการเสียหายจากการกัดเซาะชายหาด ด้วยเหตุผลต่างต่างดังในบทที่ 2 แล้ว ทางกรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชย์นาวี กระทรวงคมนาคม จึงได้มีโครงการ งานก่อสร้างเขื่อนป้องกันการกัดเซาะชายฝั่งฝั่งอ่าวไทยตอนบนฝั่งตะวันออกขึ้นซึ่ง สถานที่โครงสร้าง ตั้งอยู่ที่ ตำบลคลองสอง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งบริษัท ซีสเปกตรัม จำกัด ได้เป็นบริษัทออกแบบ และบริษัท อิตาเลี่ยนไทยเป็นบริษัทรับเหมาก่อสร้าง



รูปที่ 3.1 แผนผังบริเวณ ก่อสร้าง



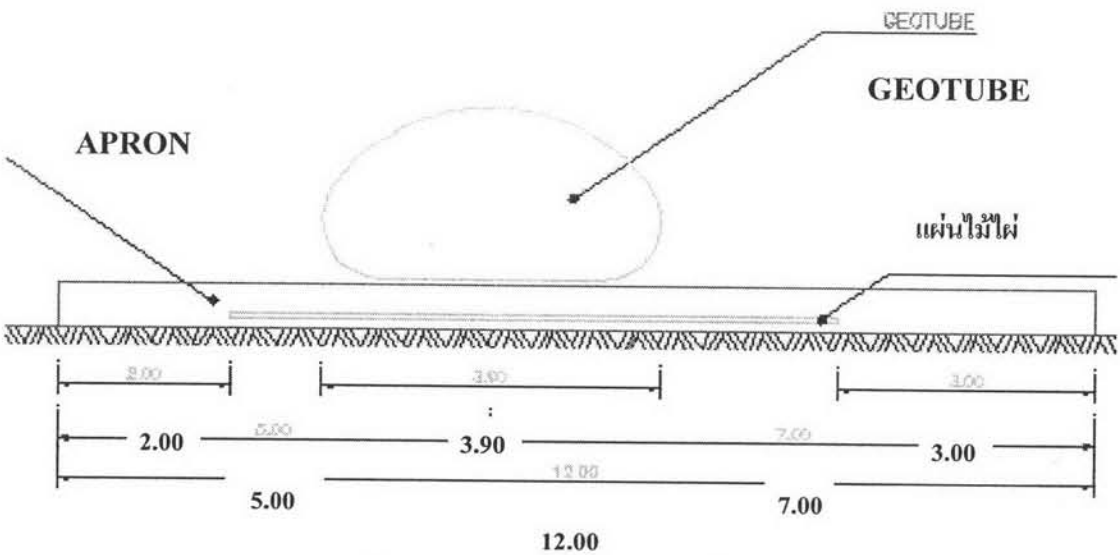
รูปที่ 3.2 แผนผังบริเวณ ก่อสร้างแบบขยาย



รูปที่ 3.3 แผนผังบริเวณ ก่อสร้าง GEOTUBE แต่ละตัว

ตารางที่ 3.1 ลักษณะชั้นดินในการก่อสร้าง

| depth | Soil description | SPT | Wa | LL | PI | sieve#200 | Su | v | E | $Y_{dry}$ | $Y_{wet}$ | k |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 - 6 | dark grey ,moist,very soft ,high plastic ,silt clay | 1 | 90 | 62 | 36 | 91 | 0.5 | 0.35 | 300 | 1.5 | 1.6 | 1E-05 |
| 6 - 12 | dark grey ,moist,soft, high plastic ,silty clay | 1-2 | 85 | 57 | 34 | 92 | 0.75 | 0.35 | 800 | 1.5 | 1.6 | 1E-05 |
| 12 - 24 | Brown-yellow ,moist ,stiff to very stiff ,medium plastic, silly clay | 13 | 35 | 41 | 24 | 93 | 8 | 0.35 | 6500 | 1.6 | 1.7 | 1E-05 |
| 24 up | Brown-yellow ,dence to very dence, non plastic | 50 | 20 | - | - | - | 30 | 0.35 | 6000 | 1.7 | 1.8 | 1E-04 |




รูปที่ 3.4 ลักษณะ GEOTUBE ที่ก่อสร้าง

### 3.2 วิธีการทดสอบการทรุดตัว

การทำระดับหมายถึง การหาความสูงหรือระดับของจุดต่างๆ บนผิวโลกซึ่งเกี่ยวข้องกับการวัดระยะทางดิ่ง ศิลปในการหาความสูงของจุดต่าง ๆ บนผิวโลกซึ่งมีความสัมพันธ์กันนี้เรียกว่า การทำระดับ ซึ่งจะต้องอาศัยกล้องทำระดับ (Level) ไม้วัดระดับ และเครื่องมือประกอบอื่นๆ

การทำระดับมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่องานการทำแผนที่ งานออกแบบทางด้านวิศวกรรมและการก่อสร้าง ผลที่ได้จากการทำระดับจะถูกนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ดังนี้

- งานออกแบบทางหลวง ทางรถไฟ คลอง ฯลฯ ซึ่งจะต้องกำหนดความลาดชั้นให้สอดคล้องกับข้อกำหนด (specification) และสถานที่แท้จริงของภูมิประเทศ
- การให้ค่าระดับ (setting) ในงานก่อสร้างต่าง ๆ ตามที่กำหนดค่าระดับไว้ในแบบ
- คำนวณปริมาตรของงานดิน (earthwork) ทั้งงานดินตัด (cut) ดินถม (fill) และปริมาตรที่ต้องขนย้าย
- หาลักษณะของพื้นที่ระบายน้ำ อ่างเก็บน้ำ
- สร้างแผนที่แสดงลักษณะของภูมิประเทศมาตราส่วนต่าง ๆ
- ใช้ในการรังวัดหาความบิดเบี้ยวในการประกอบเครื่องบิน
- ตรวจสอบระดับในการติดตั้งเครื่องยนต์หรือเครื่องมืออื่น ๆ
- ตรวจสอบการทรุดตัวของพื้นดิน เขื่อม อุโมงค์ และอาคารต่าง ๆ

ในการนี้เราจะใช้เพื่อตรวจสอบการทรุดตัว ของ GEOTUBE เนื่องจาก GEOTUBE มีความยาวมาก ระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร

**กล้องทำระดับ** (Level) กล้องทำระดับเป็นเครื่องมือที่ใช้กันทั่วไปในการทำระดับแบบทางตรง ซึ่งนิยมใช้กันมากกว่าวิธีอื่นเพราะการใช้กล้องระดับทำระดับให้ความถูกต้องและละเอียดดีกว่าสามารถปรับแนวเล็งให้อยู่ในแนวราบได้ถูกต้อง สายงานระดับสามารถทำต่อเนื่องไปได้เรื่อย ๆ จนถึงจุดที่เราต้องการทราบระดับ

หลักการของกล้องระดับก็คือใช้สำหรับกำหนดแนวเล็งราบ โดยทั่วไปกล้องระดับประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. **ตัวกล้องเล็ง** (telescope) สำหรับใช้กำหนดแนวเล็ง และปรับความชัดของภาพ ตัวกล้องส่องแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

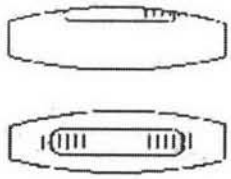
- เลนส์ปากกล้อง (Objective lens) ปกติเป็นเลนส์รวม (compound lens) และจัดเป็นเลนส์แรกที่รับภาพของวัตถุที่หมาย แล้วส่งผ่านไปยังระบบเลนส์ปรับระยะชัด
- เลนส์ปรับระยะชัด (Focuxsing lens) เนื่องจากวัตถุที่สองมีระยะห่างต่าง ๆ กันออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับภาพให้ชัดเจนด้วยความยาวโฟกัสต่างกันออกไปโดยการเพิ่มเลนส์เว้าทั้ง

สองหน้า (negative lens) เพื่อปรับความชัดของภาพ

• ระนาบสายใย (Reticule หรือ diaphragm) เป็นแผ่นแก้วแบนกลมซึ่งได้พิมพ์ระบบของสายใย (cross-hairs) เอาไว้ดังรูป ระบบสายใยประกอบด้วยสายใยในแนวราบและสายใยในแนวดิ่ง (horizontal and vertical cross-hairs) นอกจากจะใช้อ่านค่าระดับจากไม้วัดระดับแล้ว สายใยราบคู่ยังสามารถใช้หาระยะทางในการสำรวจรังวัดแบบ stadia ได้อีก

• เลนส์ช่องตามอง (Eyepiece) คือเลนส์ที่อยู่ตรงข้ามกับเลนส์ปากกล้อง ส่วนมากมักจะใช้ eyepiece แบบ Ramsden คือประกอบด้วยเลนส์นูนแกมระนาบ (pianoconvex lens) 2 อัน ซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ 2 ใน 3 ของระยะโฟกัสของเลนส์ทั้งสองนั้น ผลที่ได้รับคือภาพขยายของวัตถุซึ่งอาจเป็นภาพหัวตั้งหรือหัวกลับแล้วแต่การจัดหรือเพิ่มเลนส์เข้าไป กล้องหัวตรงให้ความชัดเจนน้อยกว่ากล้องหัวกลับ เพราะต้องผ่านระบบเลนส์หลายตัว

2. **หลอดระดับลูกน้ำ** (spirit level หรือ level หรือ bubble tube) การกำหนดแนวระดับของแกนกล้องสามารถทำได้โดยอาศัยหลอดระดับลูกน้ำ หลอดระดับลูกน้ำนี้ทำด้วยหลอดแล้วบรรจุด้วยของเหลวเกือบเต็มหลอด ผิวด้านในของหลอดแก้วจะมีลักษณะโค้งตามรัศมีที่ต้องการ รัศมีความโค้งของหลอดแก้วยิ่งมาก ความไวของลูกน้ำ (sensitivity of the bubble) ก็ยิ่งมากขึ้นด้วย ของเหลวที่ใช้อาจเป็นอีเธอร์หรือแอลกอฮอล์ ของเหลวดังกล่าวมีจุดเยือกแข็งต่ำ อากาศที่แทรกตัวอยู่ในของเหลวจะพยายามดันตัวเองให้อยู่ในจุดสูงสุดเสมอ ดังนั้นถ้าปรับตัวกล้องให้อยู่ในระดับแล้วฟองอากาศจะอยู่ตรงกลางพอดี

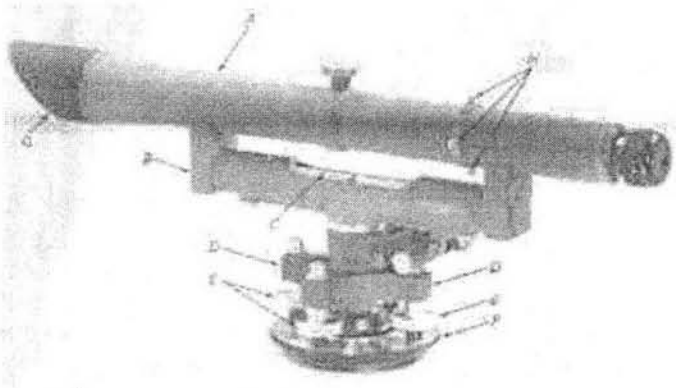



รูปที่ที่ 3.5 หลอดระดับลูกน้ำเมื่อมองจากด้านข้างและด้านบน

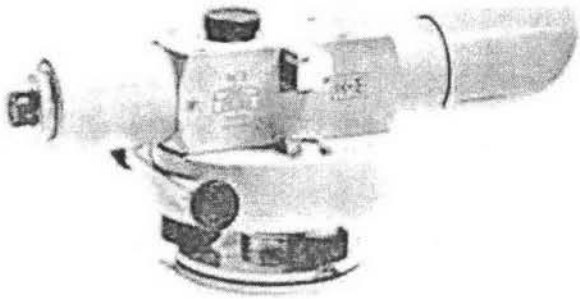
3. **ส่วนที่เป็นฐานของกล้องระดับ** (levelling head) ส่วนที่เป็นฐานของกล้องระดับจะประกอบด้วย plate 2 อัน ซึ่งขนานกัน อันบนเรียกว่า tribrach อันล่างเรียกว่า trivet ซึ่งส่วนนี้จะผูกยึดกับฐานของขากล้อง (tripod) โดยสกรู ส่วนที่เป็นฐานของกล้องระดับนี้จะทำหน้าที่ 3 อย่างคือ รองรับตัวกล้องเล็ง (telescope) ยึดตัวกล้องระดับกับขากล้อง และเป็นที่ปรับแนวเล็งให้อยู่ในแนวราบโดยปรับระดับลูกน้ำให้อยู่ตรงกลางโดยใช้ควงปรับระดับ (foot screws) ซึ่งมีอยู่ 3 ตัวหรือ 4 ตัว แล้วแต่ชนิดของกล้อง กล้องสมัยใหม่มักจะมีควงปรับระดับ 3 ตัว เพราะปรับระดับลูกน้ำได้ง่ายและรวดเร็วกว่า

ขาตั้งกล้องหรือสามขา (tripod) ขาตั้งกล้องเป็นที่รองรับตัวกล้อง ที่ส่วนหัวของขาตั้งกล้องหรือสามขา (tripod head) มีเกลียวหรือสกรูสำหรับยึดฐานของตัวกล้องให้ติดกับขากล้อง

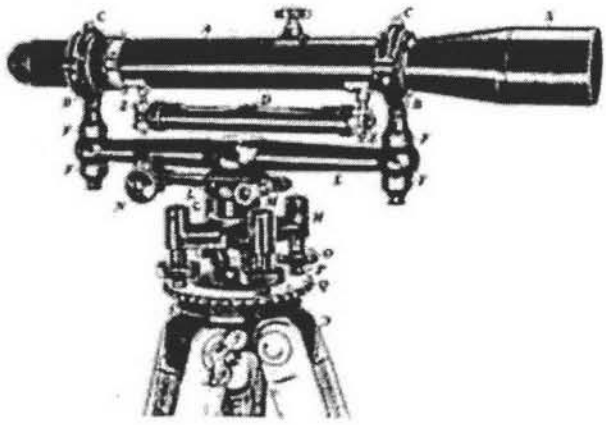
**กล้องระดับ**



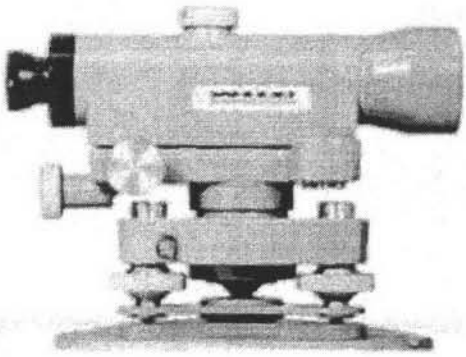
รูปที่ 3.6 กล้องระดับดัมปี (Engineer's dumpy level)



รูปที่ 3.7 กล้อง Zeiss self-leveling level



รูปที่ 3.8 กล้องระดับ Wye



รูปที่ 3.9 กล้องระดับ WILD N10

1) ชนิดที่ตัวกล้องเล็ง (telescope) ไม่สามารถกระดกขึ้นลงได้ กล้องประเภทนี้จะไม่มีควงสัมผัสในทางดิ่ง(tilting screw)ส่วนมากเป็นกล้องแบบเก่า ล้าสมัย

1.1 กล้อง Dumpy ประกอบด้วยกล้องเล็งซึ่งมีกำลังขยายประมาณ 15-40 เท่า ตั้งอยู่บน levelling head ซึ่งประกอบด้วยควงสัมผัสปรับระดับ (foot screws) 3 ตัว หรือ 4 ตัว คำว่า Dumpy มีความหมายว่าสั้นและหนา

1.2 กล้อง Wye มีลักษณะคล้ายกล้อง Dumpy แต่ตัวกล้องเล็งตั้งอยู่บนฐานรองรับรูปตัว Y ซึ่งถูกยึดให้ติดกันด้วยตัว curved clip ซึ่งกล้อง Wye ตั้งมาจากความจริงที่ว่าตัวกล้องเล็งถูกรองรับไว้ด้วยฐานซึ่งมีลักษณะคล้ายรูปตัว Y ตัวกล้องสามารถยกออกแล้วกลับตัวกล้องส่องได้

1.3 กล้อง Reversible สร้างขึ้นโดยนำเอาข้อดีของกล้อง Dumpy และกล้อง Wye มารวมกัน ตัวกล้องเล็งสามารถหมุนรอบตัวเองในแนวดิ่งได้ ตัวกล้องวางอยู่บนฐานซึ่งมีหลอดระดับฟองยาว (tubular level) ติดอยู่

2) ชนิดที่ตัวกล้องเล็งสามารถกระดกขึ้นลงได้ (tilting level) ตัวกล้องจะมีควงสัมผัสทางดิ่ง เป็นกล้องที่ได้รับการปรับปรุงมาจากชนิดแรก ทำให้สามารถใช้วัดระดับได้เร็วขึ้น การตั้งกล้องตอนแรกตั้งให้ได้ระดับพอประมาณโดยอาศัยลูกน้ำฟองกลม (circular bubble หรือ bull's eye bubble) เมื่อส่องกล้องไปยังไม้วัดระดับแล้ว ก่อนอ่านค่ามุมจะต้องหมุนควงสัมผัสทางดิ่งให้ลูกน้ำของระดับฟองยาว (ระดับลูกน้ำเขาควาย; coincidence bubble) อยู่กึ่งกลางหลอดก่อนเสมอ

ไม้วัดระดับ (Staff, Levelling Rod) ไม้วัดระดับเป็นเครื่องมือประกอบอย่างหนึ่งในการทำระดับคู่กับกล้องระดับ กล้องระดับมีหน้าที่กำหนดแนวเล็งราบ ส่วนไม้วัดระดับมีหน้าที่หาระยะสูงหรือต่ำจากแนวเล็ง

**ความคลาดเคลื่อนในการหาค่าระดับเกิดจากสาเหตุใหญ่ ๆ 3 ประการ**

1) ความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากเครื่องมือ (instrumental error)

- ปรับเครื่องมือไม่ดี เช่น แนวเล็งไม่ขนานกับแกนของหลอดระดับ
- ความคลาดเคลื่อนของระดับน้ำ
- การเคลื่อนของเลนส์เลื่อนสำหรับปรับระยะชัดของภาพ
- ไม้วัดระดับมีความยาวไม่มาตรฐาน

2) ความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากธรรมชาติ (natural error)

- ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความโค้งของผิวโลก
- ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการหักเหของแสง
- ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิของอากาศ
- ความคลาดเคลื่อนอันเกิดมาจากความแปรปรวนของลม
- ความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากคลื่นความร้อนอบอ้าว

3) ความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากบุคคล (personal error)

- ความผิดพลาดในการปฏิบัติงาน (Mistakes or blunders in manipulation) ความผิดพลาดนี้รวมถึงการตั้งกล้อง การปรับภาพไม่ชัดทำให้เกิด parallax ซึ่งมีผลทำให้การอ่านค่าระดับผิดพลาดไปได้
- ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากถือไม้วัดระดับไม่อยู่ใน
- ความคลาดเคลื่อนในการเล็ง

**เกณฑ์ตรวจรับงานระดับของงานต่าง ๆ ซึ่งคณะกรรมการสำรวจและทำแผนที่ของรัฐบาลกลางสหรัฐ**

ชั้นของงานระดับ กำหนดโดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น นั่นคือถ้าความคลาดเคลื่อนน้อยชั้นของงานระดับก็สูง ความคลาดเคลื่อนของงานระดับขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างมากกว่าการสำรวจชนิดอื่น ๆ แม้ว่าเครื่องมือและอุปกรณ์จะเป็นส่วนหนึ่ง แต่ส่วนใหญ่แล้วขึ้นอยู่กับความชำนิชำนาญ (skill) ของผู้ทำการรังวัด วิธีการทำระดับและการคำนวณปรับแก้ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพของภูมิประเทศ เช่น พื้นที่สูง ๆ ต่ำ ๆ เป็นเนิน เป็นภูเขา ความคลาดเคลื่อนย่อมจะเกิดได้ง่ายกว่าพื้นที่ราบ ดังนี้เป็นต้น

กรรมการสำรวจชายฝั่งและทำแผนที่สหรัฐอเมริกาและประเทศไทยก็ได้ยึดถือ นำมาใช้ดังนี้

1. การทำระดับอย่างประมาณ (rough leveling) ใช้ในการสำรวจขั้นมูลฐานหรือการสำรวจขั้นต้น ใช้กล้องระดับแบบเล็ก เช่น กล้อง Dumpy อ่านสายใยเดี่ยว จัดเป็นงานชั้นที่ 4 (fourth order leveling) งานระดับที่ต้องการความเร่งด่วนที่มีความละเอียดต่ำโดยการส่องระดับ B.S. และ F.S. ไกลกว่าปกติ จัดอยู่ในงานชั้นนี้ ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ (maximum permissible error) = ±25 มม./K เมื่อ K เป็น กม. 4

2. งานระดับชั้นธรรมดา (ordinary leveling) ใช้สำหรับงานวิศวกรรมและการก่อสร้างทั่ว ๆ ไป เช่น การก่อสร้างเขื่อน ทางหลวง อาคาร ฯลฯ ใช้กล้องที่มีความละเอียดปานกลาง ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ตอนบรรจบต้องไม่เกิน±12มม.

3. งานระดับชั้นดีเยี่ยม (excellent leveling) สำคัญและจำเป็นสำหรับการสร้าง B.M. ในเมืองหรือเป็นหมุดหลักฐานอ้างอิงของการทำ จัดเป็นงานชั้นที่ 2 (second-order leveling) ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้±8.4มม.

4. การทำระดับอย่างละเอียด (precise leveling) ใช้ในงานสร้าง B.M. ที่ต้องการความละเอียดสูง เพื่อเป็นหมุดหลักฐานของงานระดับที่จะทำกระจายไปทั่วทั้งบริเวณอันกว้างใหญ่ เครื่องมือที่ใช้ในการทำระดับประเภทนี้ ต้องมีความละเอียดสูง ได้รับการตรวจและปรับแก้อย่างดีใช้กล้องระดับที่มีความละเอียดสูง ไม่ทำระดับขณะที่ร้อนจัดและลมแรง จัดเป็นงานระดับชั้นที่ 1 (first-order leveling) ปกติจะใช้เป็น B.M. ฐานของ B.M. ในชั้นอื่น ๆ โดยการวางสายการระดับปกคลุมไปทั่วประเทศโดยไม่ให้ระยะของ B.M. ที่วางไว้สำหรับชั้นนี้ห่างกันเกิน 80 กม. ทุก ๆ สายการระดับให้แบ่งเป็นตอน มีระยะ 1-2 กม. และทุก ๆ ตอนต้องทำระดับทั้งไปและกลับ โดยให้มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ ±4 มม. วิธีการทำระดับจะต้องกระทำให้ถูกวิธีทุกขั้นตอน การปรับแก้จะต้องปรับแก้เพื่อขจัดค่าความคลาดเคลื่อนอันอาจจะเกิดขึ้นได้ทุกอย่าง

5. การทำงานระดับชั้นพิเศษ (special-order leveling) นอกจากเกณฑ์ของงานระดับทั้ง 4 ชั้นที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเกณฑ์ของงานระดับชั้นพิเศษที่ใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวของอาคาร พื้นดิน การติดตั้งเครื่องจักร เครื่องยนต์ ที่ต้องการความละเอียดสูงยิ่ง ใช้เครื่องมือและวิธีการทำระดับแบบการทำงานระดับชั้นที่ 1 แต่แตกต่างกันในเรื่องความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ โดยงานระดับพิเศษจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด ที่ยอมให้ไม่เกิน ±1-2 มม.

**การเขียน**Profile

เมื่อได้ค่าระดับของจุดต่าง ๆ บนแนวที่กำหนดแล้ว ก็นำข้อมูลค่าระดับและระยะทางมาพล็อตลงบนกระดาษกราฟโดยใช้มาตราส่วนที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะใช้มาตราส่วน 1:500 สำหรับ

ระยะทาง และมาตราส่วน 1:100 สำหรับค่าระดับความสูง profile นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับนักออกแบบวิศวกรรม (designer) ในการวาง grade lines สำหรับทางหลวง ถนน ฯลฯ สำหรับรูป plan ของการทำ profile นั้น บางครั้งก็นำมาแสดงอยู่ใต้หรือบน profile ด้วย

งานทำระดับจะต้องมีการตรวจสอบผลงานเพื่อให้ทราบว่างานระดับที่เราทำนั้นมีความถูกต้องเพียงใด ค่าที่ได้พอที่จะนำไปใช้ในงานต่าง ๆ ได้หรือไม่ หรืออยู่ในเกณฑ์กำหนดของความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ (Permissible error) ตามชั้นของงานระดับที่ต้องการหรือไม่ ผู้ทำระดับจะต้องสามารถให้คำประกันได้ว่าการทำระดับครั้งหนึ่ง ๆ มีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด การทำระดับที่ไม่ได้รับการยอมรับอันเนื่องมาจากมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าเกณฑ์กำหนด จำเป็นจะต้องแก้ไขงานในสนามใหม่ เป็นการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น วิธีการตรวจสอบการถ่ายค่าระดับมีดังต่อไปนี้

1) การถ่ายค่าระดับโดยวิธีสายการระดับปิดหรือบรรจบตัวเอง (closed-or loop level circuit) วิธีนี้ทำได้โดยเริ่มถ่ายค่าระดับจากจุด B.M.P. หรือ B.M.S. หรือจากหมุด B.M.T.ที่สมมุติค่าระดับขึ้นหมุดใดหมุดหนึ่ง เดินสายการระดับโอบอ้อมไปตามภูมิประเทศ แล้วกลับเข้ามาบรรจบ ณ B.M. เดิม ความคลาดเคลื่อนของการบรรจบ (error of closure) จะหาได้จากผลต่างระหว่างค่าเดิมที่มีอยู่แล้วกับค่าที่ได้จากการรังวัดใหม่

2) การถ่ายค่าระดับโดยวิธีสายการระดับบรรจบกับหมุดระดับหลักฐานอื่น (connecting-or linear-or series level circuit) วิธีนี้เริ่มโดยการถ่ายค่าระดับจากหมุด B.M.P. หรือ B.M.S. ที่เลือกขึ้น แล้วเดินเป็นเส้นไปบรรจบกับหมุด B.M.P. หรือ B.M.S. ซึ่งอยู่ในระดับขั้นเดียวกันหรือสูงกว่าที่อยู่ห่างไกลออกไป ดังนั้นเราจึงสามารถหาความคลาดเคลื่อนของการบรรจบได้จากความแตกต่างของระดับเดิมกับระดับใหม่ที่ได้จากการรังวัดเมื่อเข้าบรรจบ ณ หมุดบรรจบ

3) การถ่ายค่าระดับโดยวิธีทำไปและทำกลับ (forward run and backward run) เป็นการทำไปและทำกลับในแต่ละตอน (section) ซึ่งตอนหนึ่ง ๆ ยาวระหว่าง 1-2 กม. วิธีนี้ใช้ในกรณีที่ข้างหน้าไม่มีหมุดB.M.สำหรับตรวจสอบในระหว่างการทำระดับกลับ จะต้องตั้งไม้วัดระดับบนหมุดที่จะสร้างเป็น B.M. หรือ T.P. ที่ต้องการจะตรวจสอบค่าทุกหมุด หมุดใดที่ไม่ต้องการตรวจสอบค่า ไม่จำเป็นต้องตั้งไม้วัดระดับ หรือถ้าต้องการตรวจสอบอย่างรวดเร็ว เราอาจจะตั้งไม้วัดระดับบนหมุดที่สำคัญ ๆ บางหมุดเท่านั้นก็พอ จึงไม่จำเป็นต้องเดินสายงานระดับกลับในทางเดิม

4) การถ่ายค่าระดับโดยวิธีใช้กล้อง 2 กล้อง (double instrument method)
วิธีนี้ เป็นการตรวจสอบค่าระดับของจุด ตามหลักการระดับซึ่งไม่ว่าเราจะส่องจากกล้อง ๆ ไหนไปยังจุดเดียวกัน ค่าระดับย่อมจะเท่ากันหรือใกล้เคียงกันที่สุด

วิธีนี้ใช้เมื่อเรามีคนและเครื่องมือพอ การตั้งกล้องควรจะตั้งใกล้ ๆ กัน สามารถตรวจสอบค่าแตกต่างของระดับ ณ จุดเดียวกันได้ ปกติไม่ให้ต่างกันเกิน 2 มม. ถ้าต่างกันเกินกว่านี้ ให้อ่านค่าจากไม้วัดระดับใหม่ทั้ง 2 กล้อง

5) การถ่ายค่าระดับโดยวิธีเปลี่ยนค่า H.I. ของกล้อง วิธีนี้คล้ายกับวิธีที่ 4 แต่ใช้ในกรณีที่มีคนและเครื่องมือจำกัด ทำได้โดยการเมื่ออ่านค่าระดับทั้ง B.S. และ F.S. ชุดหนึ่งแล้ว ขยับขากล้องเพื่อเปลี่ยนค่า H.I. ของกล้องใหม่ ตั้งระดับแล้วอ่านค่าทั้ง B.S. และ F.S. อีกชุดหนึ่ง ค่าแตกต่างของระดับ ณ จุดเดียวกันไม่ให้ต่างกันเกินกว่า 2 มม. ถ้าต่างกันเกินกว่านี้ให้อ่านค่าระดับซ้ำใหม่อีก พยายามหลีกเลี่ยงอุปทานที่เกิดขึ้นขณะทำการอ่านค่าว่าค่าจะต้องเท่ากันเสมอ อ่านค่าที่ปรากฏจริง ๆ การจดสมุดสนามอาจจะทำได้โดยการแบ่งเป็น ตั้งกล้องครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ในหน้าเดียวกันหรือแยกกันคนละหน้า พยายามอย่าให้สับสนค่ากัน

6) การถ่ายค่าระดับโดยวิธีใช้กล้อง 1 กล้อง และ T.P.2 ชุด (double-rodding) วิธีนี้เป็นการตรวจสอบ H.I. ของกล้องเพราะความผิดอันหนึ่งในงานระดับที่มักพบเสมอคือ การคำนวณค่า H.I. ผิด เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดดังกล่าวที่อาจจะเกิดขึ้น ทำได้โดยการสร้าง T.P. ขึ้น 2 ตัวอยู่ใกล้ ๆ กัน ในขณะที่ถ่ายค่าระดับ เราจึงมีค่า H.I.2 ตัวตรวจสอบค่า โดยตลอดสายการระดับค่า H.I. ทั้งสองจะต้องมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2 มม. และถ้าหากแตกต่างกันเกินกว่า 2 มม. ให้อ่านค่าซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ในการจดสมุดสนามให้จดในหน้าเดียวกัน แต่แยกเป็นทางซ้าย (L) และขวา (R) โดยถือเอาทิศทางเดินของสายระดับเป็นหลัก

พื้นระดับฐาน (Datum) เป็นพื้นระดับที่ใช้เป็นฐานในการคำนวณงานระดับ ฐานระดับศูนย์คือระดับน้ำทะเลปานกลาง (ร.ท.ก.; mean sea level ; M.S.L.) หากไม่สามารถโยงกับระดับน้ำทะเลปานกลางได้ อาจจะสมมุติพื้นระดับฐานชั่วคราว (Arbitrary datum) ขึ้นเพื่อดำเนินงานเบื้องต้น ระดับฐานเป็นระนาบโค้ง คำว่า datum plane อาจจะใช้แทนคำว่า datum เฉย ๆ ก็แล้วแต่ความนิยม พื้นระดับฐานแบ่งเป็น 2 ชนิด

- พื้นระดับฐานสัมบูรณ์ (Absolute datum) คือ พื้นระดับฐานที่นับเนื่องจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ใช้สำหรับงานวิศวกรรม งานก่อสร้างทั่ว ๆ ไป และงานสร้างแผนที่
- พื้นระดับฐานสมมุติ (Assumed datum) บางครั้งถ้าต้องการสำรวจเฉพาะบริเวณหนึ่งบริเวณใด และไม่นำแผนที่นั้นไปต่อกับบริเวณใกล้เคียง อาจสมมติจุดใดจุดหนึ่งขึ้นมาโดยให้มีค่าระดับ (elevation) เป็นค่าจำนวนเต็ม เช่น 100.000 เมตร

ระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean sea level) เป็นค่าเฉลี่ยของระดับน้ำทะเลที่ขึ้นสูงสุดและลงต่ำสุด การใช้ระดับน้ำทะเลปานกลางนี้ถือเป็นสากล แต่มิได้หมายความว่าระดับน้ำทะเลปานกลางทั่วโลกจะเท่ากันหมดโดยตลอด ระดับน้ำทะเลปานกลางในอเมริการะหว่างทางด้านมหาสมุทร แอตแลนติค และแปซิฟิคต่างกันประมาณ 1 เมตร

สำหรับประเทศไทย คือ เกาะหลักในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นหมุดหลักฐานอันแรกของประเทศไทย เรียกว่าหมุด B.M.A. กำหนดความสูงเท่ากับ +1.4477 เมตร ค่าใดมีค่าสูงกว่านี้มีเครื่องหมาย + ค่าใดที่ต่ำกว่ามีเครื่องหมายเป็น -

ค่าระดับ (Elevation) หมายถึงระยะในแนวดิ่งจากพื้นระดับหลักฐาน (ซึ่งปกติใช้ ร.ท.ก.) ไปยังจุดต่าง ๆ

หมุดระดับฐาน (Bench mark; B.M.) คือหมุดที่ทราบระดับแน่นอนและได้ทำการปรับแก้ระดับเรียบร้อยแล้ว ใช้สำหรับเป็นหมุดฐานที่จะถ่ายค่าระดับไปยังจุดอื่น ๆ ที่ต้องการทราบระดับความสูงต่อไป หมุด B.M. แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

• หมุดระดับฐานถาวร (Permanent B.M. ย่อว่า B.M.P.) สร้างไว้อย่างถาวรในภูมิประเทศ โดยหล่อคอนกรีตไว้ในที่ ๆ ถูกคนหรือสัตว์รบกวนได้น้อยที่สุด

• หมุดระดับฐานชั่วคราว (Temporary B.M. หรือ B.M.T.) สร้างขึ้นเพื่อใช้ชั่วคราว จึงมักจะทำเป็นหมุดไม้ตอกลงไปในดินให้เสมอผิวดิน หรืออาจใช้ตะปูหัวกลมตอกไว้ตามที่ ๆ จะทำเป็นหมุดหลักฐานชั่วคราว เช่น บนต้นไม้ หลักกิโลเมตร เสาโทรเลข ฯลฯ

หมุดทั้งสองแบบนี้ต้องมีเลขกำกับเอาไว้ด้วย และจะต้องแสดงรายละเอียดของจุดอ้างอิง (reference point) ไว้ด้วย จุดอ้างอิงนี้ควรเป็นสิ่งถาวร

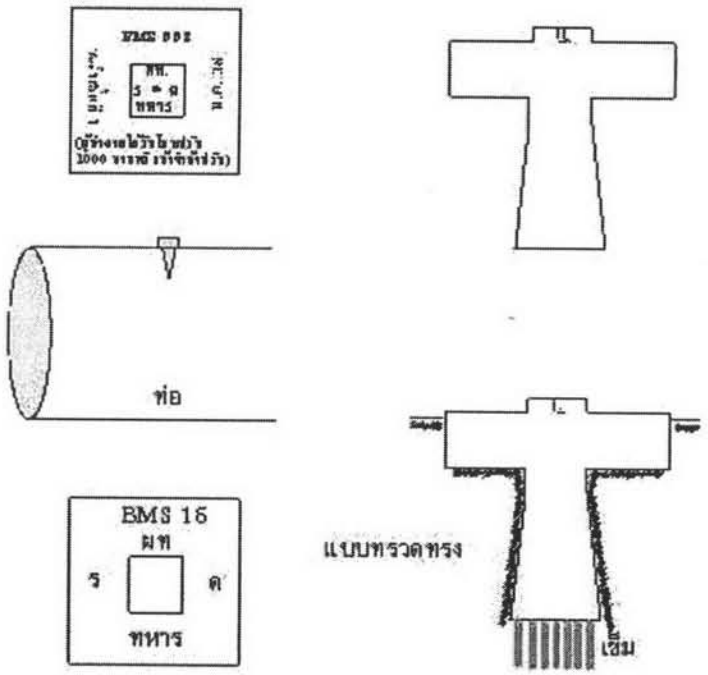
ชั้นของหมุดระดับฐาน (Classes of bench mark)

• หมุดชั้นที่ 1 คือ หมุด B.M.P. (principal bench mark) ตามมาตรฐานของกรมแผนที่ทหาร เป็นหมุดถาวรต้องหล่อด้วยคอนกรีตลึกลงไปในดิน หมุดนี้ควรตอกเข็มกันทรุดด้วย มีหมุดหัวทองเหลืองซึ่งได้ทำแบบขึ้นไว้โดยเฉพาะหน้าตัดขนาด 4 ซม. และมีเดือยยาว 15-20 ซม. เดือยนี้ควรมีลักษณะเป็น2ง่ามฝังลงในคอนกรีตหรือมีปลายงอเป็นรูปตัวยู

• หมุดชั้นที่ 2 คือหมุด B.M.S. (secondary bench mark) หมุดนี้มีความสำคัญรองลงมาจากหมุดชั้นที่ 1 การหล่อหมุดชนิดนี้มิได้ทำเหมือนหมุดชั้นที่ 1 เราใช้วิธีสกัดให้เป็นรูลงไปในคอนกรีต

เช่น คอนกรีตที่เชิงสะพาน ท่อระบายน้ำ ฐานคอนกรีตของอนุสาวรีย์ หรืออาคารถาวรอื่น ๆ แล้วใช้ตะปูเหล็กหรือแท่งทองเหลืองหัวสี่เหลี่ยมซึ่งเตรียมไว้มีขนาดยาวประมาณ 15 ซม. ฝังลงไปในรู

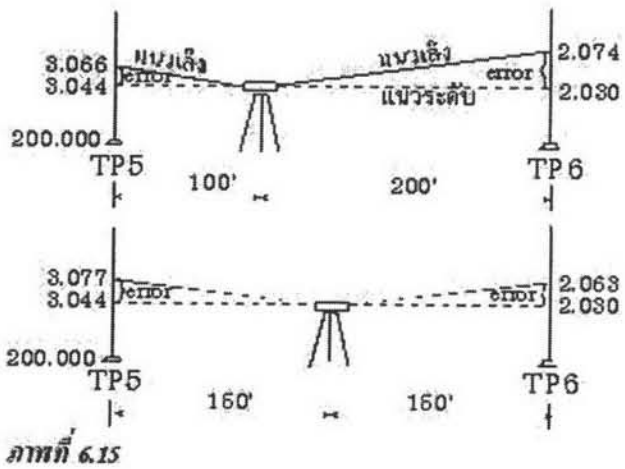
• หมุดชั้นที่ 3 คือหมุด B.M.T. (temporary bench mark) ในการปฏิบัติงานบางทีเราอาจต้องเลิกงานโดยฉับพลัน เพราะมีเหตุการณ์บางอย่างบังคับเรา เช่น ฝนตกหนัก มืดค่ำ ลงในระหว่างทำงานซึ่งยังไปไม่ถึงหมุด B.M.P. หรือ B.M.S. ที่สร้างไว้ ในกรณีเช่นนี้เราสร้างหมุด B.M.T. ขึ้นเพื่อพักงานไว้ทำในโอกาสต่อไป หรือกรณีที่เราทำการสำรวจมาเป็นระยะทางไกลมากแล้ว เห็นว่าถ้าทำต่อไปเกรงจะมีความคลาดเคลื่อนสะสมมากขึ้น จึงหาทางบรรจบหมุด B.M.T. เสียก่อน โดยปกติเราสร้างไว้ที่หลักกิโลเมตร เสาโทรเลข คอสะพาน บากไว้บนต้นไม้หรือที่ที่เห็นว่าจะไม่ได้รับการรบกวนจากคนและสัตว์




ภาพที่ 3.10 หมุดระดับหลักฐานถาวร

ในการระดับขั้นธรรมดา (ordinary levelling) ถ้ากล้องอยู่ในสภาพดีมักจะไม่ค่อยมีการกำหนดระยะส่องหลังและส่องหน้าให้เท่ากัน อิทธิพลของความโค้งของผิวโลกและการหักเหของแสงโดยบรรยากาศจะน้อย ยกเว้นแต่ว่าจุดส่องหน้าและจุดส่องหลังจะมีระดับแตกต่างกันมากอย่างผิดปกติ อย่างไรก็ตามผลของการที่เครื่องมือไม่อยู่ในสภาพที่ดีมีผลอย่างมากต่อความถูกต้องในการระดับ ถ้าไม่กำหนดระยะส่องหลังให้เท่ากับระยะส่องหน้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่แนวเล็งของกล้องไม่ได้ขนานกับแนวแกนระดับของลูกน้ำของตัวกล้องค่าความผิดพลาดนี้จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับระยะทางจากจุดตั้งกล้องไปยังจุดตั้งวัดระดับ ดังนั้นความผิดพลาดอันเนื่องมาจากความบกพร่อง

ของกล้องดังกล่าวข้างต้นจะถูกกำจัดให้หมดไป ถ้าระยะทางส่องหลังกับส่องหน้าเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าส่องหลังจะไปบวกเข้ากับค่าระดับเดิมเป็น H.I. และค่าส่องหน้าจะไปลบออกจาก H.I. เป็นค่าระดับของ T.P. ดังนั้นค่า Error ซึ่งมีค่าเท่ากันถ้าหากระยะทางของส่องหลังและส่องหน้าเท่ากันจะไปหักล้างกันเอง



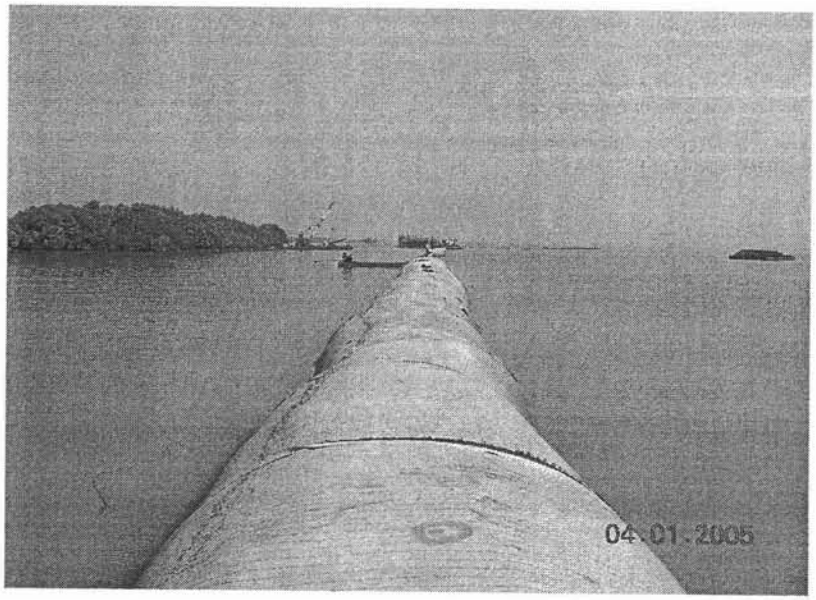

ภาพที่ 6.15

ภาพที่ 3.11 การถ่ายระดับ

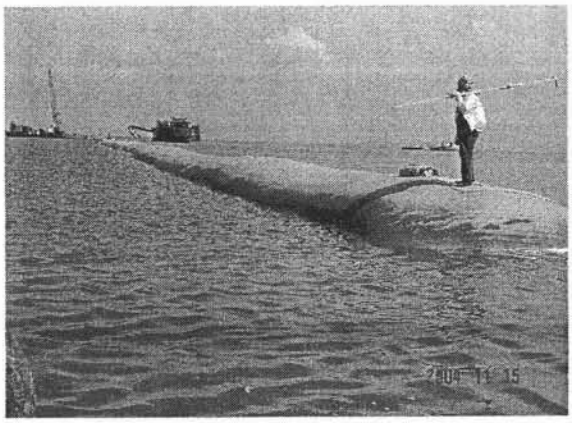
ในการทำระดับในที่เป็นภูเขาระยะส่องหลังและส่องหน้า จะถูกจำกัดโดยความลาดชันของสภาพภูมิประเทศ เพื่อที่จะให้ได้ระยะระหว่างจุดส่องหลังและจุดส่องหน้ามากที่สุด คนตั้งกล้องจะต้องเลือกจุดตั้งกล้องที่จะสามารถอ่านค่าระดับตรงส่วนบนสุดของวัดระดับที่จุดส่องหลังได้ถ้าทำขึ้นเขา หรืออ่านค่าระดับตรงส่วนต่ำสุดของสต๊าฟที่จุดส่องหลังได้ถ้าทำลงเขา การกำหนดระยะส่องหลังและส่องหน้าให้เท่ากันสามารถทำได้โดยเลือกจุดตั้งกล้องให้เป็นรูปซิกแซก

**รูป การตรวจสอบในสนาม**

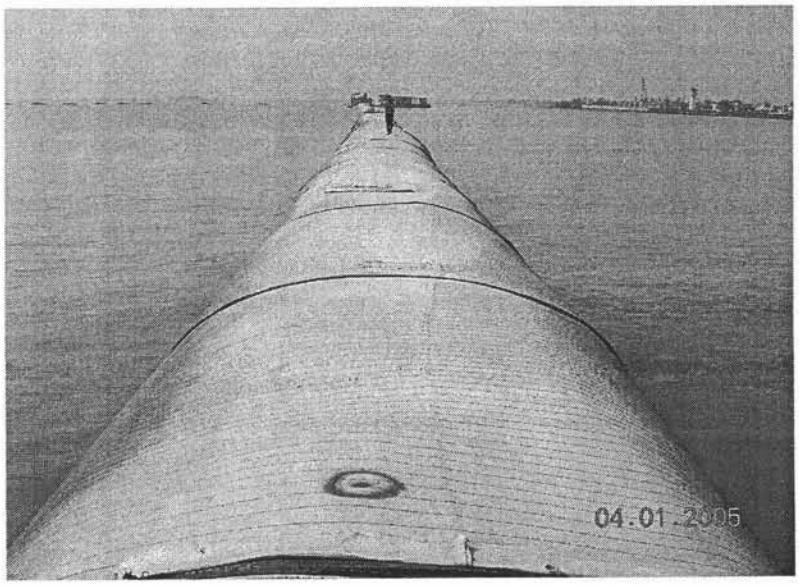
รูปที่ 3.12 ช่างสำรวจใช้กล้องวัดระดับในการวัดระดับการทรุดตัวของ GEOTUBE




รูปที่ 3.13 การทำสัญลักษณ์ใช้กล้องวัดระดับในการวัดระดับการทรุดตัวของ GEOTUBE



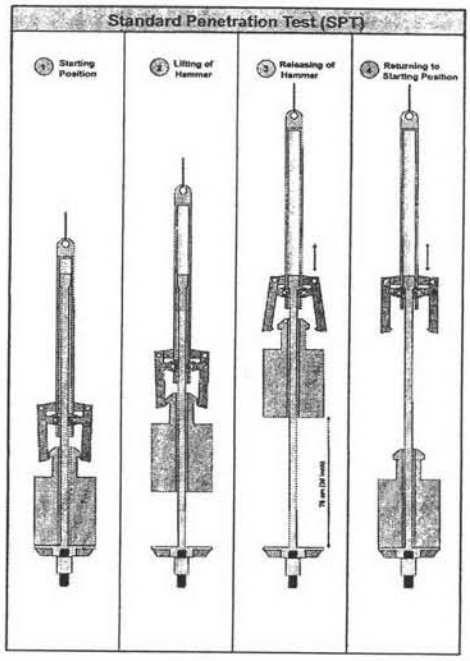
รูปที่ 3.14 ช่างสำรวจใช้ไม้วัดระดับในการวัดระดับ




รูปที่ 3.15 ช่างสำรวจได้ทำสัญลักษณ์เป็นเครื่องหมายการตรวจวัดจุดอ้างอิงต่าง ๆ

**การทดสอบการตอกมาตรฐาน** (Standard Penetration Test ,SPT )

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความแน่นสัมพัทธ์ในที่ของชั้นทรายหรือกรวด หรือหาค่าความแข็ง – อ่อนของชั้นดินเหนียวแข็ง การทดสอบจะใช้ตุ้มน้ำหนักส่งถ่ายแรงไปยังกระบอกผ่าโดยส่งผ่านก้านเจาะ เพื่อส่งกระบอกผ่าลงในชั้นดินและพร้อมกับการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกผ่าซึ่งจะกระทำพร้อมๆกันกับการทดสอบ SPT เครื่องมือ-อุปกรณ์ที่สำคัญในการทดสอบมี ตุ้มน้ำหนัก 140 ปอนด์ (63.5 กิโลกรัม) และกระบอกผ่า วิธีการทดสอบจะยกตุ้มน้ำหนัก 140 ปอนด์ โดยให้มีระยะตก 30 นิ้ว ตุ้มน้ำหนักจะถูกปล่อยตกอย่างอิสระ ตกกระทบกับแป้นรองรับที่อยู่ส่วนปลายบนสุดของก้านเจาะ ส่วนที่ปลายล่างสุดของก้านเจาะจะเป็นหัวทดสอบซึ่งเป็นกระบอกผ่าซีกมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ผลการทดสอบจะเป็นค่าจำนวนครั้งที่ใช้ในการปล่อยให้ตุ้มตกกระทบให้กระบอกผ่าจมลงในชั้นดินเป็นระยะ 1 ฟุต โดยที่การนับจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงๆ ละ 6 นิ้ว จำนวนครั้งที่ได้จะนำเฉพาะจำนวนครั้งใน 2 ช่วง หลังมารวมกัน ส่วนในช่วง 6 นิ้วแรกไม่นำมารวมทั้งนี้เพราะถือว่าในช่วงแรกเป็นการตอกเพื่อให้กระบอกผ่าจมเข้าที่ก่อนรวมถึงดินในช่วงแรกจะถูกรบกวนจากการเจาะนำหรือจากการล้างหลุมเจาะ ค่าที่ได้จะได้เป็นค่า N มีหน่วยเป็นครั้ง/ ฟุต ซึ่งค่าดังกล่าวสามรถนำไปหาคุณสมบัติของดินโดยใช้ความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่ทดสอบ




รูปที่ 3.16 วิธีการทดสอบการตอกมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

คุณสมบัติของดินสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายใน ($\phi$) หรือกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบแบบ Unconfined Compressive Strength (UC) กับผลการทดสอบ SPT ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 โดยที่ทำการปรับแก้ค่า N (SPT) โดยใช้กราฟที่ปรับแก้ในรูปของความสัมพันธ์กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ซึ่งเสนอโดย Peck, Hansen and Thornburn (1974) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 หรือดังแสดงในตารางที่ 3.1

$$N = C_N N_{field} \qquad .....(3.3)$$

เมื่อ $C_N$ คือ ค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ (รูปที่ 3.5)

$N_{field}$ คือ ค่า N (SPT) จากการทดสอบในสนาม

ตารางที่ 3.2 วิธีการปรับแก้ค่า N (SPT) เนื่องจากผลของ Effective Overburden Pressure, $\overline{\sigma}_v$

| Reference | Correlation, $C_N$ | Unit of $\overline{\sigma}_v$ |
|---|---|---|
| Teng (1962) | $C_N = \frac{50}{10 + \overline{\sigma}_v}$ | psi. |
| Bazaraa (1967) | $C_N = \frac{4}{1 + 2\overline{\sigma}_v}$, $\overline{\sigma}_v \leq 1.5$ ksc.<br>$C_N = \frac{4}{3.25 + 0.5\overline{\sigma}_v}$, $\overline{\sigma}_v > 1.5$ ksc. | ksf. |
| Peck, Hansen and Thornburn (1974) | $C_N = 0.77 \log \frac{20}{\overline{\sigma}_v}$ | tsf. |
| Tokimatsu and Yoshimi (1983) | $C_N = \frac{1.7}{0.7 + \overline{\sigma}_v}$ | ksc. |
| Seed (1976) | $C_N = 1 - 1.25 \log \sigma_V'$ | tsf. |

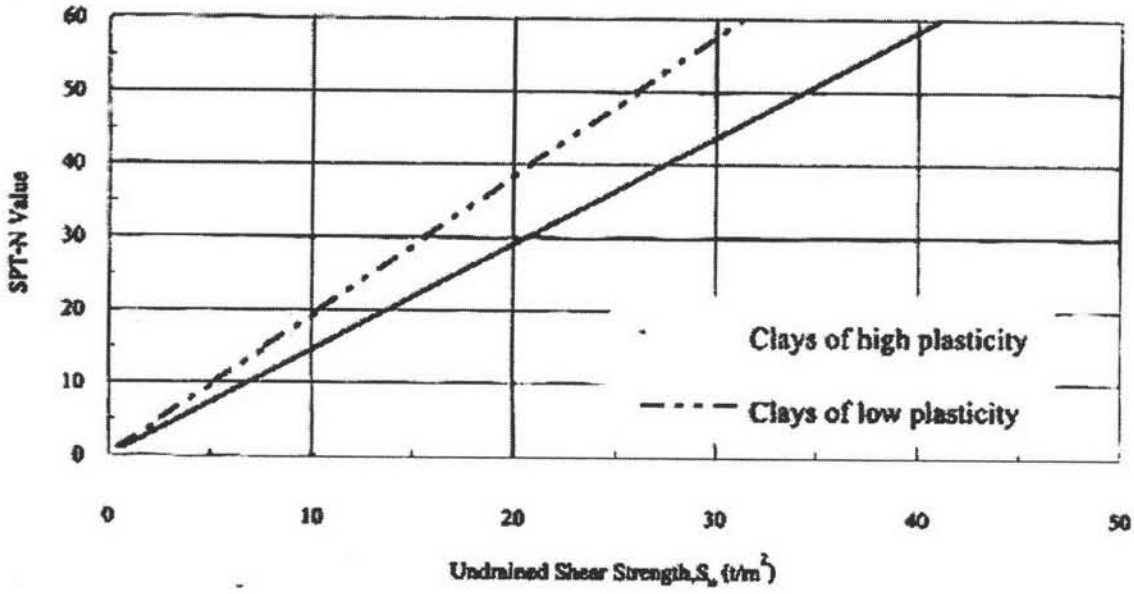
2.3.1 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำ (Undrained shear strength, $s_u$) เป็นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเฉพาะของดินเหนียวอิ่มตัวในสภาพการกระทำอย่างรวดเร็วโดยไม่ยอมให้น้ำระบายออกมา ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบในสนามโดยใช้ใบมีดมาตรฐาน (Field vane test) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการแบบไม่มีแรงอัดรอบข้าง (Unconfined compression test) และการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่คายน้ำ (Unconsolidated undrained test, UU test หรือ Consolidated undrained test, CU test) หรือการใช้ความสัมพันธ์แบบเอ็มพีริแค็ล (Empirical) ระหว่างค่า N จากการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) กับ

$s_u$ ที่เสนอโดยวีระนันท์ (2526) สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ชั้นแรก ได้ให้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยข้อมูลส่วนใหญ่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Blow count (N) จากการทดสอบ SPT กับ $s_u$ ดังนี้

$s_u$ = 0.685N (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียวประเภท CH

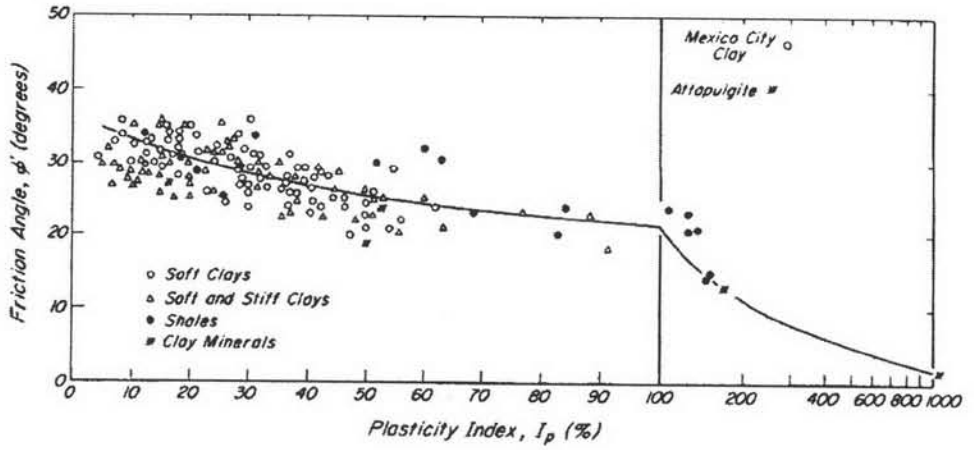
$s_u$ = 0.520N (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียวประเภท CL

N วัดในค่าจำนวนครั้งต่อฟุต โดยการจำแนกดินเหนียวใช้ระบบ Unified Soil Classification (USCS) และค่า N ที่ใช้เป็นค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้

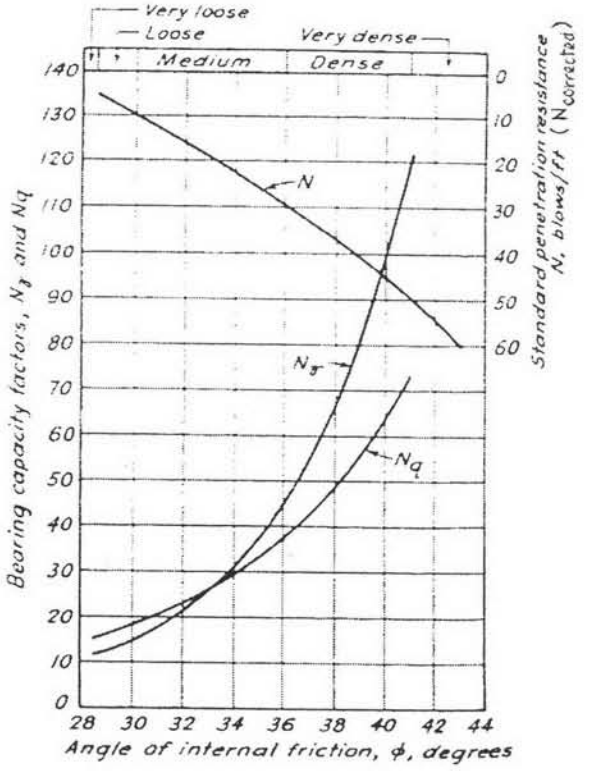



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ $s_u$ (วีระนันท์, 2526)

2.3.2 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบประสิทธิผล (Effective shear strength, $\tau$ ) โดยค่ากำลังแบบนี้จะนิยามโดยใช้ค่าคงที่สองตัวคือ มุมของแรงเสียดทานภายใน (Angle of internal friction, $\phi'$ ) และ ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion intercept, c') ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้กล่องเฉือนโดยตรง (Direct shear test) และการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบคายน้ำ (Consolidated drained test, CD test) ทั้งนี้ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในยังสามารถประมาณได้จากการทดสอบการทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT) หรืออาจจะประมาณค่ามุมต้านทานแรงเฉือนภายในที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับดินเหนียวได้โดยใช้ความสัมพันธ์กับค่าดรรชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนค่า Angle of internal friction สำหรับดินทรายนั้น ประมาณได้โดยใช้ความสัมพันธ์กับค่า Blow count จาก Standard penetration test (SPT-N) ดังแสดงในรูปที่ 2.7




รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Angle of internal friction กับค่า Plasticity index สำหรับดินเหนียวโดย Terzaghi et al. (1996)




รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างAngle of internal friction กับค่า SPT-N สำหรับดินทรายโดย Peck et al. (1974)

2.3.3 โมดูลัสของดิน (Soil modulus) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวของดิน และค่าโมดูลัสของดินมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากระดับของหน่วยแรงที่

เปลี่ยนแปลงไป และการหาค่าโมดูลัสของดินได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเค้นในแนวดิ่งกับค่าเปลี่ยนแปลงความเครียดทางดิ่งในสภาพที่ดินไม่มีการระบายน้ำแบบ 3 มิติ โดยมีสมมุติฐานให้ดินเป็นวัสดุแบบ Ideal Elastic (Davis และ Poulos, 1963) ดังนี้

$$E_u = \frac{3E'}{2(1+\nu')} \quad \text{..... (2.4)}$$

$$E' = \frac{(1+\nu')(1-2\nu')}{m_v(1-\nu')} \quad \text{..... (2.5)}$$

โดยที่ $E'$ และ $\nu_s'$ คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของดินในสภาพระบายน้ำ และอัตราปัวซองในสภาพระบายน้ำของดินตามลำดับ

**การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐาน**

เป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของดิน เพื่อเป็นการจำแนกชนิดและลักษณะของดิน รวมถึงสามารถบ่งชี้ถึงปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่จะเกิดขึ้นได้ สมบัติขั้นพื้นฐานของดินเรียกได้อีกอย่างว่า ดัชนีของสมบัติ (Index Property) การทดสอบเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของดินจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการที่จะทำการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม การทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. การทดสอบหาปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (Natural Water Content)
2. การทดสอบหาความหนาแน่นรวม (Total Density)
3. การทดสอบหาค่าพิกัด Atterberge (Atterberge Limit)

## 3.3 การใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลีเมนต์ในการวิเคราะห์

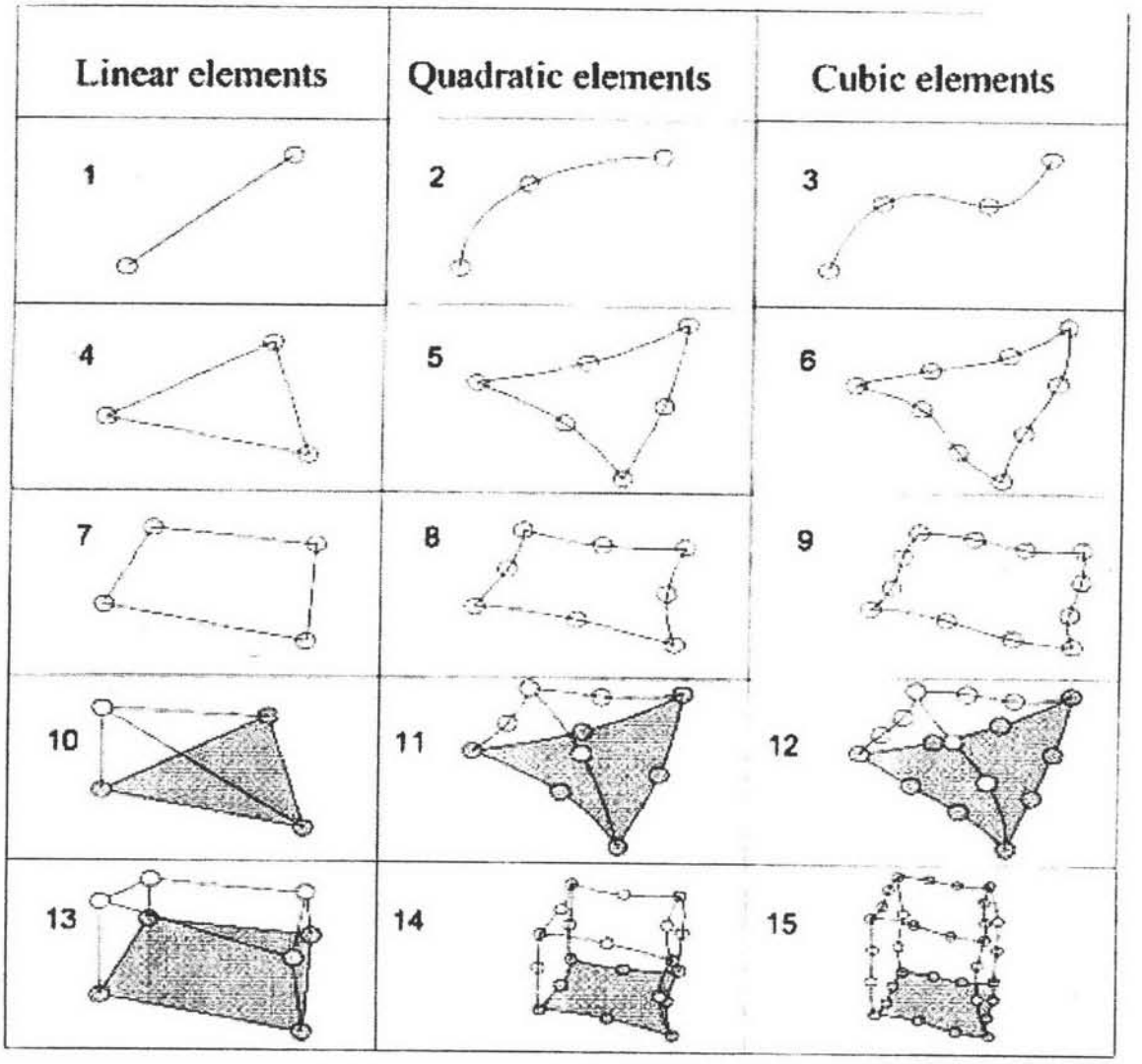
### ความรู้พื้นฐานและการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนอิลิเม้นต์ (Finite element method [FEM])

FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งเพื่อใช้หาผลเฉลยของสมการทางคณิตศาสตร์ (Differential equation) ซึ่งการประมาณโดยการแบ่งบริเวณของปัญหาออกเป็นขอบเขตย่อยๆ (Discretization) เป็นแนวความคิดหลักของวิธีการนี้

ฐิรวัตร (2546) ได้อธิบายลำดับขั้นตอน FEM ว่าจะประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อยๆ ตามลำดับการคำนวณดังนี้

- พิจารณาระบบทั้งหมดเข้าไปในอิลิเม้นต์ที่จำกัด (Discretize the whole system into finite elements)
- สร้างเมตริกซ์ความแข็งแรง (Build element stiffness matrix)
- รวมเมตริกซ์ความแข็งแรงแต่ละตัวเข้าไปในความแข็งแรงทั้งหมด (Assembly individual stiffness matrix into the global stiffness)
- ใช้สภาพจำกัดทางขอบเขต (Apply boundary conditions)
- แก้ปัญหาสำหรับปัญหาแรก (Solve for primary solution)
- แยกปัญหาที่สองจากปัญหาแรก (Derive for secondary solution from the primary solution)

Discretization: เป็นการแบ่งชั้นดินออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ชิ้นส่วนเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นโดยลักษณะทางเรขาคณิตง่ายๆ เป็นรูปหลายเหลี่ยม (Polygons) และใช้จุดมุมต่างๆ (Nodes) เป็นส่วนสำคัญในการคำนวณพฤติกรรมของชิ้นส่วนนั้นๆ ในรูปที่ 2.13 ได้แสดงอิลิเม้นต์ต่างๆ ที่นิยมนำมาใช้ในสภาพปัญหา สำหรับอิลิเม้นต์ชนิดต่างๆ นั้นจะมีการเก็บค่าการเคลื่อนที่ของจุดมุมหรือ Node เท่านั้น และค่าการเคลื่อนที่ที่จุดมุมนี้จะใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนที่ภายในอิลิเมนต์แล้วในไปสู่ค่าของความเครียดได้




รูปที่ 3.20 ตัวอย่างของอิลิเม้นต์ชนิดต่างๆที่ใช้ในการคำนวณโดย FEM (ฐิรวัตร, 2546)

สร้างอิลิเม้นต์เมตริกซ์ความแข็งแรง (Build element stiffness matrix) : สมการในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุนั้นๆ (Constitutive law or constitutive equations) เช่นเป็นวัสดุที่ประพฤติตามกฎของฮุค หรือเป็นวัสดุแบบอิลาสติก-พลาสติกและมีกำลังตามเกณฑ์ของมอร์-คูลอมบ์ เป็นต้น ซึ่งจะได้สมการสมดุลของแรงมาชุดหนึ่งแล้วจึงจะพิจารณาสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วน จากสมการสมดุลของแรงที่ได้จะใช้เทคนิคต่างๆเช่นวิธี Virtual work, Weigh residual หรือ Variational principle เพื่อพัฒนาไปสู่สมการสำหรับสำหรับหาค่าเมตริกซ์ความแข็งระดับอิลิเม้นต์ (Element stiffness matrix, $k$) ค่าเมตริกซ์ จะได้

จากสมการ 2.13 ซึ่งการหาค่าอินทิเกรตนั้นจะใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธีของเกาส์ (Gauss integration scheme)

$$[k]^e = \int_v [B]^T [C][B]\,dv; \text{ เมื่อ } [\varepsilon]=[B][u] \quad \text{.....(2.13)}$$

โดยที่ $[B]$ คือเมตริกซ์ที่ใช้แปลงการเคลื่อนที่ให้เป็นความเครียด

$[C]$ คือเมตริกซ์ที่ใช้แปลงจากความเครียดเป็นความเค้น (Constitutive matrix)

Assembly of global stiffness: การเกิดระบบของสมการ (Set of simultaneous equations) จะเกิดขึ้นเมื่อนำเอาสมการสมดุลของแรงจากแต่ละชิ้นส่วนมาเขียนรวมกัน จะสามารถเขียนได้ในรูปของเมตริกซ์ดังสมการ 2.14

$$[K][U]=[F] \quad \text{.....(2.14)}$$

โดยที่ $[K]$ คือ เมตริกซ์ความแข็งแรงของระบบ

$[U]$ คือ เมตริกซ์ของการเคลื่อนที่ของจุดมุมต่างๆ

$[F]$ คือ เมตริกซ์ของแรงกระทำภายนอกที่มีต่อระบบปัญหา

Boundary condition: สภาพข้อจำกัดทางขอบเขตเป็นการทำให้สามารถหาค่าผกผันของเมตริกซ์ $[K]$ ได้

Primary solution: เป็นการแก้ระบบสมการเมื่อกำหนดสภาพจำกัดทางขอบเขตแล้ว ใน FEM นั้นค่าการเคลื่อนตัวของจุดมุมหาได้จากสมการ 2.15

$$[u] = [K]^{-1}[F] \quad \text{.....(2.15)}$$

Secondary solution: ค่าการเคลื่อนที่ที่ได้จากการแก้ระบบสมการในขั้นตอนก่อนนั้น สามารถหาค่าความเค้นและความเครียดได้ในสมการที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

$$[\varepsilon] = [B][u] \quad \text{.....(2.16)}$$

$$[\sigma] = [C][\varepsilon] = [C][B][u] \quad \text{.....(2.17)}$$

### 2.5.1 สมมุติฐานและข้อมูลที่ใช้

- **ข้อมูลทางเรขาคณิต** (Geometries)

ข้อมูลส่วนนี้มีความสำคัญมากในการทำแบบจำลองในการวิเคราะห์ เพราะว่าในการแบ่งชิ้นส่วน (Discretisation) จะต้องกำหนดขอบเขตและชั้นของปัญหา เช่น ขนาดของโครงสร้าง (Dimension), ความหนา (Thickness), ความลึก (Depth), ระยะห่างระหว่างโครงสร้าง (Spacing) รวมไปถึงความหนาของชั้นดิน (Soil layering) เป็นต้น

ข้อมูลชั้นดิน (Soil Conditions)

ข้อมูลชั้นดินนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลชั้นดินทั่วกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยทำการแบ่งกลุ่มชั้นดินที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน และได้จัดทำชั้นดินเพื่อเป็นภาพรวมของตัวแทนของแต่ละกลุ่มเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

ข้อมูลทางวิศวกรรม (Engineering Conditions)

ข้อมูลในส่วนนี้จะอ้างอิงจากวิธีการก่อสร้าง และชนิดของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้อยู่ในกรุงเทพฯ และปริมณฑล ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิดคือ Pipe jacking, Horizontal Directional Drilling (HDD), Duct bank และManhole

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Constitutive Models)

โดยเลือกแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Constitutive models) ของดินเป็นวัสดุอิลาสโตพลาสติก (Elastoplastic material) ในที่นี้จะใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb โดยการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพีสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองวิธีคือ การวิเคราะห์ในช่วงเวลาสั้น (Short term) หรือ Undrianed condition คือโดยตามทฤษฎีจะถือว่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) ยังไม่ทันระบายออกไปจากมวลดิน โดยเป็นการวิเคราะห์จะใช้หน่วยแรงรวม (Total stress analysis) และการวิเคราะห์ในช่วงเวลานาน (Long term) หรือ Drained condition โดยสมมุติว่าแรงดันน้ำส่วนเกินได้ระบายออกไปหมดแล้ว การวิเคราะห์จะใช้หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress analysis)

ค่าคงที่ของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์ทั้งสองกรณีนั้นจะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่ของดิน (Soil parameters) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อิลิเม้นต์

| ค่าคงที่ของวัสดุ (Material parameters) | Total stress analysis (Undrained condition) | Effective stress analysis (Drained condition) |
|---|---|---|
| Angel of internal friction | 0 | $\phi'$ |
| Cohesion intercept | Undrained shear strength, $s_u$ | c' |
| Modulus of Elasticity | Undrained modulus, $E_u$ | Drained modulus, E' |
| Poisson's ratio | $\nu_u = 0.5$ | $\nu'_u \approx 0.2 - 0.3$ |