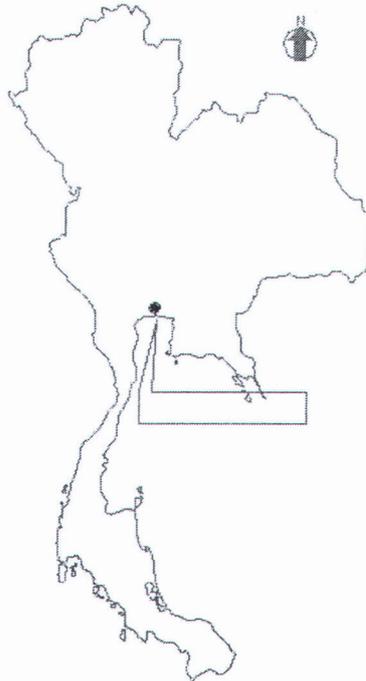


บทที่ 3

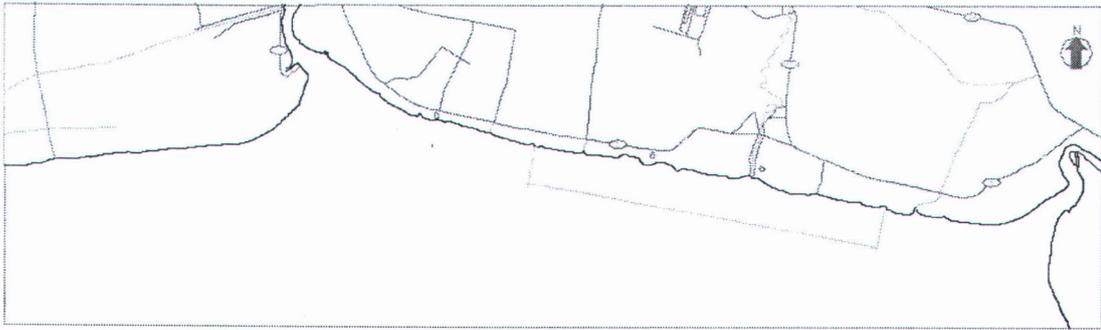
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บริเวณตัวอย่าง

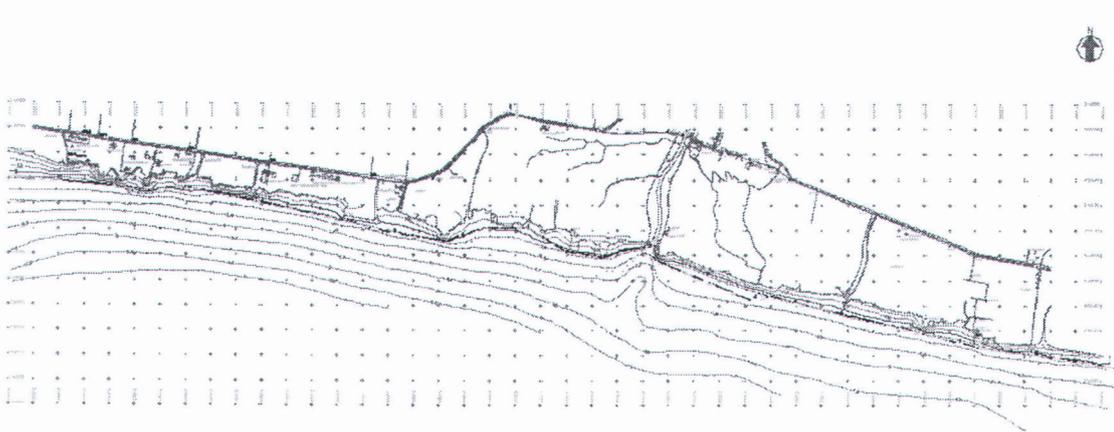
จากการที่ชายฝั่งบริเวณอ่าวไทยตอนบนฝั่งตะวันออกได้มีการเสียหายจากการกัดเซาะชายหาด ด้วยเหตุผลต่างต่างดังในบทที่ 2 แล้ว ทางกรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวี กระทรวงคมนาคม จึงได้มีโครงการ งานก่อสร้างเขื่อนป้องกันการกัดเซาะชายฝั่งฝั่งอ่าวไทยตอนบนฝั่งตะวันออกขึ้นซึ่ง สถานที่ก่อสร้าง ตั้งอยู่ที่ ตำบลคลองสอง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งบริษัท ซีเอสเปกตรัม จำกัด ได้เป็นบริษัทออกแบบ และบริษัท อิตาเลียนไทยเป็นบริษัทรับเหมาก่อสร้าง



รูปที่ 3.1 แผนที่บริเวณ ก่อสร้าง



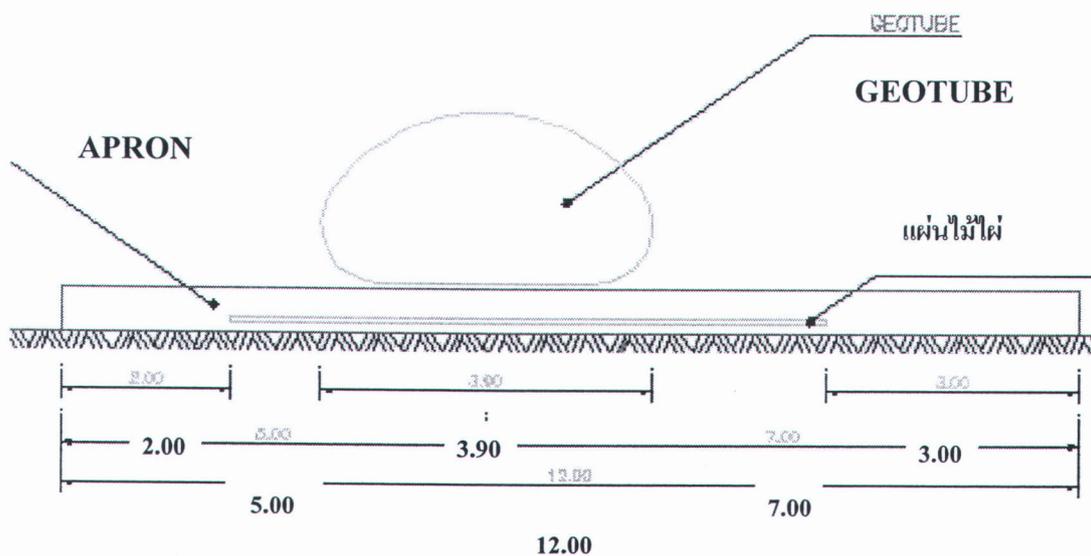
รูปที่ 3.2 แผนผังบริเวณ ก่อสร้างแบบขยาย



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, silty clay	13	35	41	24	93	8	0.35	6500	1.6	1.7	1E-05
24 up	Brown-yellow ,dense to very dense, 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 บนผิวโลกซึ่งเกี่ยวข้องกับการวัดระยะทางตั้ง ศิลปะในการหาความสูงของจุดต่าง ๆ บนผิวโลกซึ่งมีความสัมพันธ์กันนี้เรียกว่า การทำระดับ ซึ่งจะต้องอาศัยกล้องทำระดับ (Level) ไม้วัดระดับ และเครื่องมือประกอบอื่นๆ

การทำระดับมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่องานการทำแผนที่ งานออกแบบทางด้านวิศวกรรม และการก่อสร้าง ผลที่ได้จากการทำระดับจะถูกนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ดังนี้

- งานออกแบบทางหลวง ทางรถไฟ คลอง ฯลฯ ซึ่งจะต้องกำหนดความลาดชันให้สอดคล้องกับข้อกำหนด (specification) และสถานที่แท้จริงของภูมิประเทศ

- การให้ค่าระดับ (setting) ในงานก่อสร้างต่าง ๆ ตามที่กำหนดค่าระดับไว้ในแบบ

- คำนวณปริมาตรของงานดิน (earthwork) ทั้งงานดินตัด (cut) ดินถม (fill) และปริมาตรที่ต้องขนย้าย

- หาลักษณะของพื้นที่ระบายน้ำ อ่างเก็บน้ำ

- สร้างแผนที่แสดงลักษณะของภูมิประเทศมาตราส่วนต่าง ๆ

- ใช้ในการรังวัดหาความบิดเบี้ยวในการประกอบเครื่องบิน

- ตรวจสอบระดับในการติดตั้งเครื่องยนต์หรือเครื่องมืออื่น ๆ

- ตรวจสอบการทรุดตัวของพื้นดิน เขื่อน 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

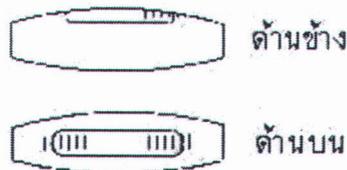
- เลนส์ปรับระยะชัด (Focussing lens) เนื่องจากวัตถุที่สองมีระยะห่างต่าง ๆ กันออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับภาพให้ชัดเจนด้วยความยาวโฟกัสต่างกันออกไปโดยการเพิ่มเลนส์เว้าทั้ง

สองหน้า (negative lens) เพื่อปรับความชัดของภาพ

- กระจาบสายใย (Réticule หรือ diaphragm) เป็นแผ่นแก้วแบนกลมซึ่งได้พิมพ์ระบบของสายใย (cross-hairs) เอาไว้ดังรูป ระบบสายใยประกอบด้วยสายใยในแนวราบและสายใยในแนวตั้ง (horizontal and vertical cross-hairs) นอกจากจะใช้อ่านค่าระดับจากไม้วัดระดับแล้ว สายใยราบคู่ยังสามารถใช้หาระยะทางในการสำรวจจริงวัดแบบ stadia ได้อีก

- เลนส์ช่องตามอง (Eyepiece) คือเลนส์ที่อยู่ตรงข้ามกับเลนส์ปากกล้อง ส่วนมากมักจะใช้ eyepiece แบบ Ramsden คือประกอบด้วยเลนส์นูนแกมกระจาบ (planoconvex lens) 2 อัน ซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ 2 ใน 3 ของระยะโฟกัสของเลนส์ทั้งสองนั้น ผลที่ได้รับคือภาพขยายของวัตถุซึ่งอาจเป็นภาพหัวตั้งหรือหัวกลับแล้วแต่การจัดหรือเพิ่มเลนส์เข้าไป กล้องหัวตรงให้ความชัดเจนน้อยกว่ากล้องหัวกลับ เพราะต้องผ่านระบบเลนส์หลายตัว

2. หลอดระดับลูกน้ำ (spirit level หรือ level หรือ bubble tube) การกำหนดแนวระดับของแกนกล้องสามารถทำได้โดยอาศัยหลอดระดับลูกน้ำ หลอดระดับลูกน้ำนี้ทำด้วยหลอดแก้วบรรจุด้วยของเหลวเกือบเต็มหลอด ผิวด้านในของหลอดแก้วจะมีลักษณะโค้งตามรัศมีที่ต้องการ รัศมีมีความโค้งของหลอดแก้วยิ่งมาก ความไวของลูกน้ำ (sensitivity of the bubble) ก็ยิ่งมากขึ้นด้วย ของเหลวที่ใช้ อาจเป็นอีเธอร์หรือแอลกอฮอล์ ของเหลวดังกล่าวมีจุดเยือกแข็งต่ำ อากาศที่แทรกตัวอยู่ในของเหลวจะพยายามดันตัวเองให้อยู่ในจุดสูงสุดเสมอ ดังนั้นถ้าปรับตัวกล้องให้อยู่ในระดับแล้ว ฟองอากาศจะอยู่ตรงกลางพอดี

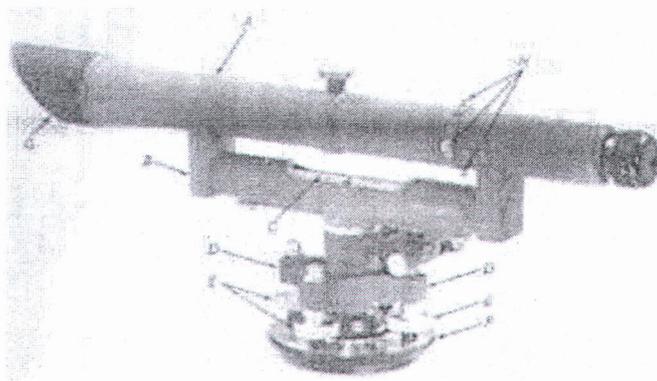


รูปที่ 3.5 หลอดระดับลูกน้ำเมื่อมองจากด้านข้างและด้านบน

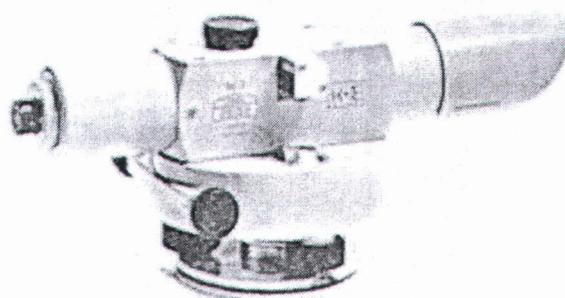
3. ส่วนที่เป็นฐานของกล้องระดับ (levelling head) ส่วนที่เป็นฐานของกล้องระดับจะประกอบด้วย plate 2 อัน ซึ่งขนานกัน อันบนเรียกว่า tribrach อันล่างเรียกว่า trivet ซึ่งส่วนนี้จะผูกยึดกับฐานของขากล้อง (tripod) โดยสกรู ส่วนที่เป็นฐานของกล้องระดับนี้จะทำหน้าที่ 3 อย่างคือ รองรับตัวกล้องเล็ง (telescope) ยึดตัวกล้องระดับกับขากล้อง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

ขาตั้งกล้องหรือสามขา (tripod) ขาตั้งกล้องเป็นที่รองรับตัวกล้อง ที่ส่วนหัวของขาตั้งกล้อง หรือสามขา (tripod head) มีเกลียวหรือสกรูสำหรับยึดฐานของตัวกล้องให้ติดกับขากกล้อง

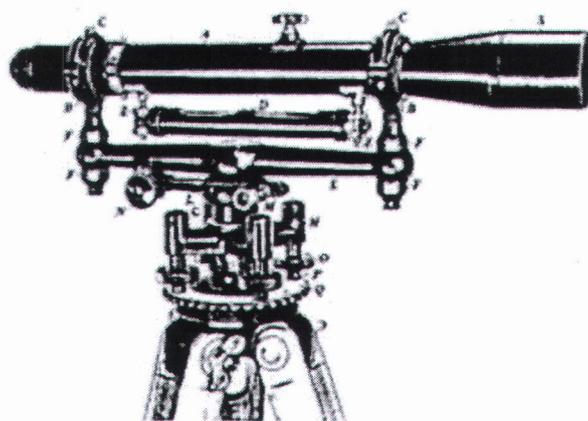
กล้องระดับ



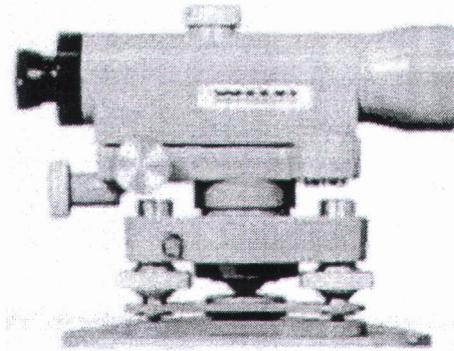
รูปที่ 3.6 กล้องระดับดัมปี (Engineer's dumpy level)



รูปที่ 3.7 กล้อง Zeiss self-leveling level



รูปที่ 3.8 กล้องระดับ Wye



รูปที่ 3.9 กล้องระดับ WILD N10

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

1.1 กล้อง Dumpy ประกอบด้วยกล้องเล็งซึ่งมีกำลังขยายประมาณ 15-40 เท่า ตั้งอยู่บน levelling head ซึ่งประกอบด้วยควงสัณผัสปรับระดับ (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) ตัวกล้องจะมีควงสัณผัสทางดิ่ง เป็นกล้องที่ได้รับการปรับปรุงมาจากชนิดแรก ทำให้สามารถใช้วัดระดับได้เร็วขึ้น การตั้งกล้องตอนแรกตั้งให้ได้ระดับพอประมาณโดยอาศัยลูกน้ำฟองกลม (circular bubble หรือ bull's eye bubble) เมื่อส่องกล้องไปยังไม้วัดระดับแล้ว ก่อนอ่านค่ามุมจะต้องหมุนควงสัณผัสทางดิ่งให้ลูกน้ำของระดับฟองยาว (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 นั่นคือถ้าความคลาดเคลื่อนน้อย ชั้นของงานระดับก็สูง ความคลาดเคลื่อนของงานระดับขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างมากกว่า การสำรวจชนิดอื่น ๆ แม้ว่าเครื่องมือและอุปกรณ์จะเป็นส่วนหนึ่ง แต่ส่วนใหญ่แล้วขึ้นอยู่กับความชำนาญ (skill) ของผู้ทำการรังวัด วิธีการทำระดับและการคำนวณปรับแก้ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพของภูมิประเทศ เช่น พื้นที่สูง ๆ ต่ำ ๆ เป็นเนิน เป็นภูเขา ความคลาดเคลื่อนย่อมจะเกิดได้ง่ายกว่าพื้นที่ราบ ดังนี้เป็นต้น

กรรมการสำรวจชายฝั่งและทำแผนที่สหรัฐอเมริกาและประเทศไทยก็ได้ยึดถือ นำมาใช้ดังนี้

1. การทำระดับอย่างประมาณ (rough leveling) ใช้ในการสำรวจขั้นมูลฐานหรือการสำรวจขั้นต้น ใช้กล้องระดับแบบเล็ก เช่น กล้อง Dumpy อ่านสายใยเดียว จัดเป็นงานชั้นที่ 4 (fourth order leveling) งานระดับที่ต้องการความเร่งด่วนที่มีความละเอียดต่ำโดยการส่องระดับ B.S. และ F.S. ไกลกว่าปกติ จัดอยู่ในงานชั้นนี้ ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ (maximum permissible error) = $\pm 25 \text{ มม./K}$ เมื่อ K เป็น กม. 4

2. งานระดับชั้นธรรมดา (ordinary leveling) ใช้สำหรับงานวิศวกรรมและการก่อสร้างทั่ว ๆ ไป เช่น การก่อสร้างเขื่อน ทางหลวง อาคาร ฯลฯ ใช้กล้องที่มีความละเอียดปานกลาง ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ตอนบรรจบต้องไม่เกิน $\pm 12 \text{ มม.}$

3. งานระดับชั้นดีเยี่ยม (excellent leveling) สำคัญและจำเป็นสำหรับการสร้าง B.M. ในเมืองหรือเป็นหมุดหลักฐานอ้างอิงของการทำ จัดเป็นงานชั้นที่ 2 (second-order leveling) ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ $\pm 8.4 \text{ มม.}$

4. การทำระดับอย่างละเอียด (precise leveling) ใช้ในงานสร้าง B.M. ที่ต้องการความละเอียดสูง เพื่อเป็นหมุดหลักฐานของงานระดับที่จะทำกระจายไปทั่วทั้งบริเวณอันกว้างใหญ่ เครื่องมือที่ใช้ในการทำระดับประเภทนี้ ต้องมีความละเอียดสูง ได้รับการตรวจและปรับแก้อย่างดีใช้กล้องระดับที่มีความละเอียดสูง ไม่ทำระดับขณะที่ยังร้อนจัดและลมแรง 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 $\pm 4 \text{ มม.}$ วิธีการทำระดับจะต้องกระทำให้ถูกวิธีทุกขั้นตอน การปรับแก้จะต้องปรับแก้เพื่อจำกัดค่าความคลาดเคลื่อนอันอาจเกิดขึ้นได้ทุกอย่าง

5. การทำงานระดับชั้นพิเศษ (special-order leveling) นอกจากเกณฑ์ของงานระดับทั้ง 4 ชั้นที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเกณฑ์ของงานระดับชั้นพิเศษที่ใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวของอาคารพื้นดิน การติดตั้งเครื่องจักร เครื่องยนต์ ที่ต้องการความละเอียดสูงยิ่ง ใช้เครื่องมือและวิธีการทำระดับแบบการทำงานระดับชั้นที่ 1 แต่แตกต่างกันในเรื่องความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ โดยงานระดับพิเศษจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ไม่เกิน $\pm 1-2 \text{ มม.}$

การเขียนProfile

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

งานทำระดับจะต้องมีการตรวจสอบผลงานเพื่อให้ทราบว่าการระดับที่เราทำนั้นมีความถูกต้องเพียงใด 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. ซึ่งอยู่ในระดับชั้นเดียวกันหรือสูงกว่าที่อยู่ห่างไกลออกไป ดังนั้นเราจึงสามารถหาความคลาดเคลื่อนของการบรรจบได้จากความแตกต่างของระดับเดิมกับระดับใหม่ที่ได้จากการรังวัดเมื่อเข้าบรรจบ ณ หมุดบรรจบ

3) การถ่ายค่าระดับโดยวิธีทำไปและทำกลับ (forward run and backward run) เป็นการทำไปและทำกลับในแต่ละตอน (section) ซึ่งตอนหนึ่ง ๆ ยาวระหว่าง 1-2 กม. วิธีนี้ใช้ในกรณีที่ยังหน้าไม่มีหมุด B.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 ใดไปยังจุดเดียวกัน ค่าระดับยอมจะเท่ากันหรือใกล้เคียงกันที่สุด

วิธีนี้ใช้เมื่อเรามีคนและเครื่องมือพอ การตั้งกล้องควรจะต้องตั้งใกล้ ๆ กัน สามารถตรวจสอบค่าแตกต่างของระดับ ณ จุดเดียวกันได้ ปกติไม่ให้ต่างกันเกิน 2 มม. ถ้าต่างกันเกินกว่านี้ให้อ่านค่าจากไม้วัดระดับใหม่ทั้ง 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 การจุดสมุดสนามอาจจะทำได้โดยการแบ่งเป็น ตั้งกล้องครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ในหน้าเดียวกันหรือแยกกันคนละหน้า พยายามอย่าให้สับสนค่ากัน

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

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

- พื้นระดับฐานสัมบูรณ์ (Absolute datum) คือ พื้นระดับฐานที่นับเนื่องจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ใช้สำหรับงานวิศวกรรม งานก่อสร้างทั่วไป และงานสร้างแผนที่
- พื้นระดับฐานสมมุติ (Assumed datum) บางครั้งถ้าต้องการสำรวจเฉพาะบริเวณหนึ่งบริเวณใด และไม่นำแผนที่นั้นไปต่อกับบริเวณใกล้เคียง อาจสมมุติจุดใดจุดหนึ่งขึ้นมาโดยให้มีค่าระดับ (elevation) เป็นค่าจำนวนเต็ม เช่น 100.000 เมตร

ระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean sea level) เป็นค่าเฉลี่ยของระดับน้ำทะเลที่ขึ้นสูงสุดและลงต่ำสุด การใช้ระดับน้ำทะเลปานกลางนี้ถือเป็นสากล แต่ไม่ได้หมายความว่าระดับน้ำทะเลปานกลางทั่วโลกจะเท่ากันหมดโดยตลอด ระดับน้ำทะเลปานกลางในอเมริการะหว่างทางด้านมหาสมุทรแอตแลนติก และแปซิฟิกต่างกันประมาณ 1 เมตร

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

ค่าระดับ (Elevation) หมายถึงระยะในแนวตั้งจากพื้นระดับหลักฐาน (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.) สร้างไว้อย่างถาวรในภูมิประเทศโดยหล่อคอนกรีตไว้ในที่ ๆ ถูกคนหรือสัตว์รบกวนได้น้อยที่สุด
- หมุดระดับฐานชั่วคราว (Temporary B.M. หรือ B.M.T.) สร้างขึ้นเพื่อใช้ชั่วคราว จึงมักจะทำเป็นหมุดไม้ตอกลงไปในดินให้เสมอมิวดิน หรืออาจใช้ตะปูหัวกลมตอกไว้ตามที่ ๆ จะทำเป็นหมุดหลักฐานชั่วคราว เช่น บนต้นไม้ หลักกิโลเมตร เสาโทรเลข ฯลฯ

หมุดทั้งสองแบบนี้ต้องมีเลขกำกับเอาไว้ด้วย และจะต้องแสดงรายละเอียดของจุดอ้างอิง (reference point) ไว้ด้วย จุดอ้างอิงนี้ควรเป็นสิ่งถาวร

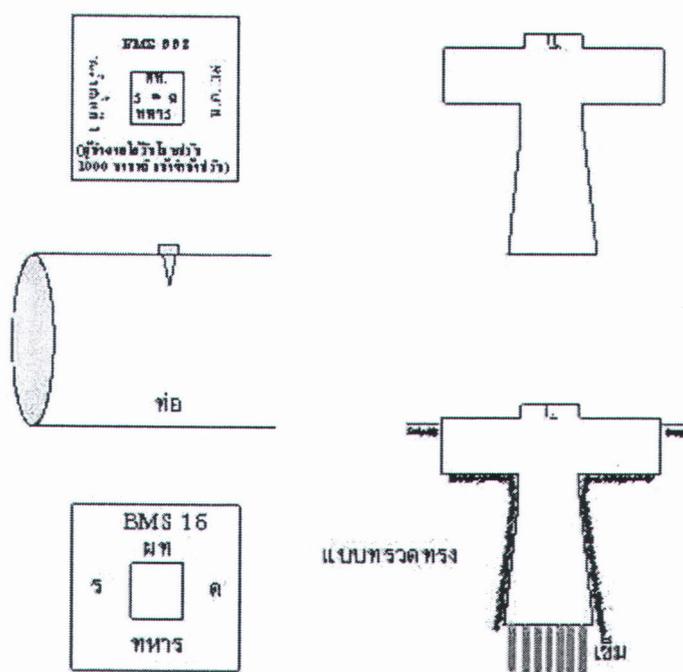
ชั้นของหมุดระดับฐาน (Classes of bench mark)

- หมุดชั้นที่ 1 คือ หมุด B.M.P. (principal bench mark) ตามมาตรฐานของกรมแผนที่ทหารเป็นหมุดถาวรต้องหล่อด้วยคอนกรีตลึกลงไปใต้ดิน หมุดนี้ควรตอกเข็มกันทรุดด้วย มีหมุดหัวทองเหลืองซึ่งได้ทำแบบขึ้นไว้โดยเฉพาะหน้าตัดขนาด 4 ซม. และมีเดือยาว 15-20 ซม. เดือนี้ควรมีลักษณะเป็น 2 ง่ามฝังลงในคอนกรีตหรือมีปลายงอเป็นรูปตัวยู

- หมุดชั้นที่ 2 คือหมุด B.M.S. (secondary bench mark) หมุดนี้มีความสำคัญรองลงมาจากหมุดชั้นที่ 1 การหล่อหมุดชนิดนี้มิได้ทำเหมือนหมุดชั้นที่ 1 เราใช้วิธีสกัดให้เป็นรูลงไปใ้ในคอนกรีต

เช่น คอนกรีตที่เชิงสะพาน ท่อระบายน้ำ ฐานคอนกรีตของอนุสาวรีย์ หรืออาคารถาวรอื่น ๆ แล้วใช้ตะปูเหล็กหรือแท่งทองเหลืองหัวสี่เหลี่ยมซึ่งเตรียมไว้มีขนาดยาวประมาณ 15 ซม. ฝังลงไปในรู

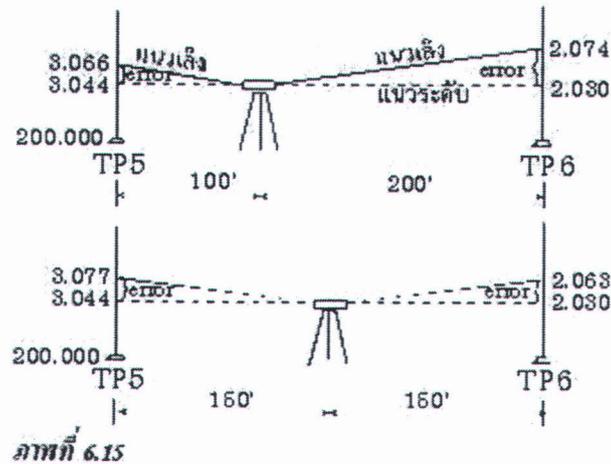
• หมุดชั้นที่ 3 คือหมุด B.M.T. (temporary bench mark) ในการปฏิบัติงานบางที่เราอาจต้องเลิกงานโดยฉับพลัน เพราะมีเหตุการณ์บางอย่างบังคับเรา เช่น ฝนตกหนัก มีดเคี้ยว ลงในระหว่างทำงานซึ่งยังไม่ถึงหมุด B.M.P. หรือ B.M.S. ที่สร้างไว้ ในกรณีเช่นนี้เราสร้างหมุด B.M.T. ขึ้นเพื่อพักงานไว้ทำในโอกาสต่อไป หรือกรณีที่เรทำการสำรวจมาเป็นระยะทางไกลมากแล้ว เห็นว่าถ้าทำต่อไปเกรงจะมีความคลาดเคลื่อนสะสมมากขึ้น จึงหาทางบรรจุหมุด B.M.T. เสียก่อน โดยปกติเราสร้างไว้ที่หลักกิโลเมตร เสาโทรเลข คอสะพาน บากไว้บนต้นไม้หรือที่ที่เห็นว่าจะไม่ได้รับการรบกวนจากคนและสัตว์



ภาพที่ 3.10 หมุดระดับหลักฐานถาวร

ในการระดับชั้นธรรมดา (ordinary levelling) ถ้ากล้องอยู่ในสภาพดีมักจะไม่ค่อยมีการกำหนดระยะส่องหลังและส่องหน้าให้เท่ากัน อิทธิพลของความโค้งของโลกและการหักเหของแสงโดยบรรยากาศจะน้อย ยกเว้นแต่จุดส่องหน้าและจุดส่องหลังจะมีระดับแตกต่างกันมากอย่างผิดปกติ อย่างไรก็ตามผลของการที่เครื่องมือไม่อยู่ในสภาพที่ดีมีผลอย่างมากต่อความถูกต้องในการระดับ ถ้าไม่กำหนดระยะส่องหลังให้เท่ากับระยะส่องหน้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่แนวเล็งของกล้องไม่ได้ขนานกับแนวแกนระดับของลูกน้ำของตัวกล้องค่าความผิดพลาดนี้จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับระยะทางจากจุดตั้งกล้องไปยังจุดตั้งวัดระดับ ดังนั้นความผิดพลาดอันเนื่องมาจากความบกพร่อง

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



ภาพที่ 3.11 การถ่ายระดับ

ในการทำระดับในที่ที่เป็นภูเขา ระยะส่องหลังและส่องหน้า จะถูกจำกัดโดยความลาดชันของสภาพภูมิประเทศ เพื่อให้จะได้ระยะระหว่างจุดส่องหลังและจุดส่องหน้ามากที่สุด คนตั้งกล้องจะต้องเลือกจุดตั้งกล้องที่สามารถอ่านค่าระดับตรงส่วนบนสุดของวัดระดับที่จุดส่องหลังได้ถ้าทำขึ้นเขา หรืออ่านค่าระดับตรงส่วนต่ำสุดของสตีฟที่จุดส่องหลังได้ถ้าทำลงเขา การกำหนดระยะส่องหลังและส่องหน้าให้เท่ากันสามารถทำได้โดยเลือกจุดตั้งกล้องให้เป็นรูปซิกแซก

รูป การตรวจสอบในสนาม



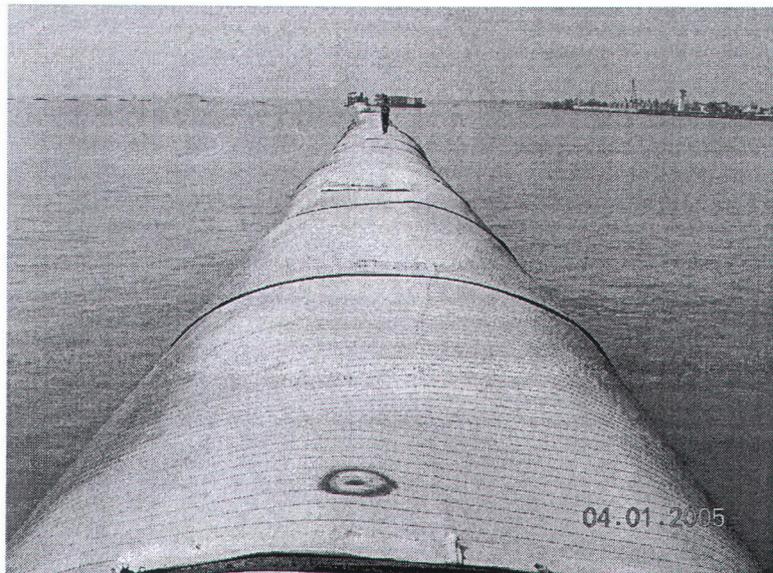
รูปที่ 3.12 ช่างสำรวจใช้กล้องวัดระดับในการวัดระดับการทรุดตัวของ GEOTUBE



รูปที่ 3.13 การทำสัญลักษณ์ใช้กล้องวัดระดับในการวัดระดับการทรุดตัวของ GEOTUBE



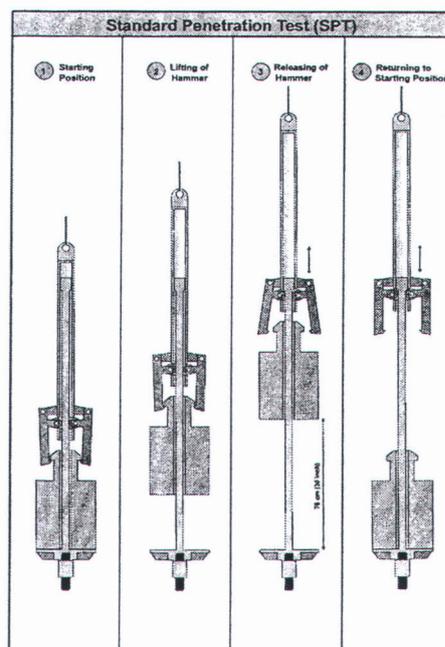
รูปที่ 3.14 ช่างสำรวจใช้ไม้วัดระดับในการวัดระดับ



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 มีหน่วยเป็น ครั้ง/ ฟุต ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปหาคุณสมบัติของดินโดยใช้ความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่ทดสอบ



รูปที่ 3.16 วิธีการทดสอบการตอกมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

คุณสมบัติของดินสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) 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

$$N = C_N N_{field} \quad \dots(3.3)$$

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,

$\bar{\sigma}_v$

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

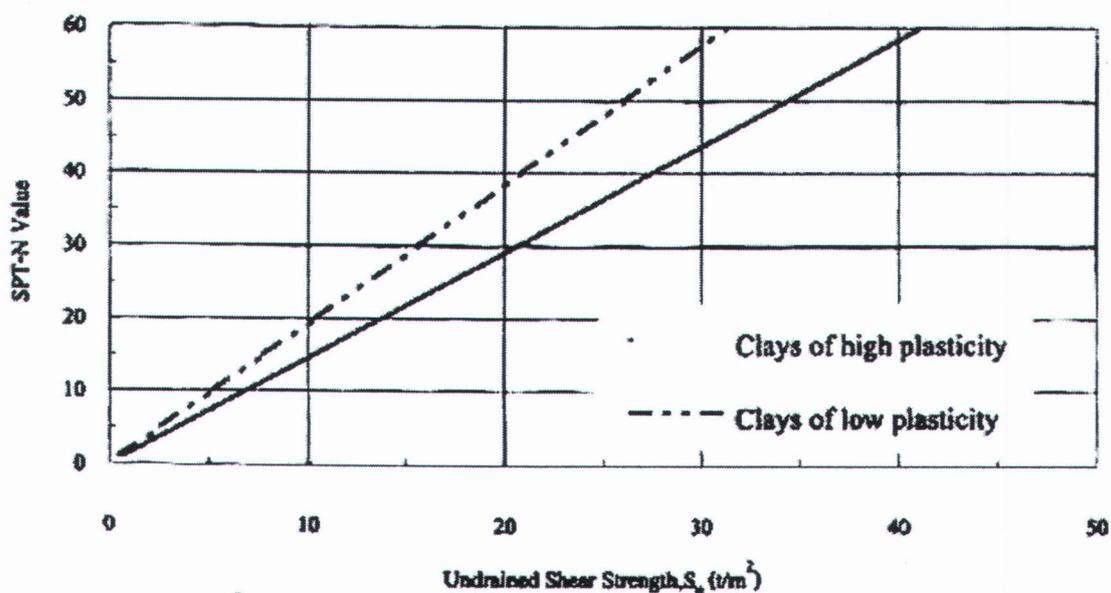
2.3.1 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำ (Undrained shear strength, s_u) เป็นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเฉพาะของดินเหนียวอิ่มตัวในสภาพการกระทำอย่างรวดเร็วโดยไม่ยอมให้น้ำระบายออกมา ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบในสนามโดยใช้ใบมีดมาตรฐาน (Field vane test) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการแบบไม่มีแรงอัดรอบข้าง (Unconfined compression test) และการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่คายน้ำ (Unconsolidated undrained test, UU test หรือ Consolidated undrained test, CU test) หรือการใช้ความสัมพันธ์แบบเอ็มพีริคัล (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

$$s_u = 0.685N \text{ (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียวประเภท CH}$$

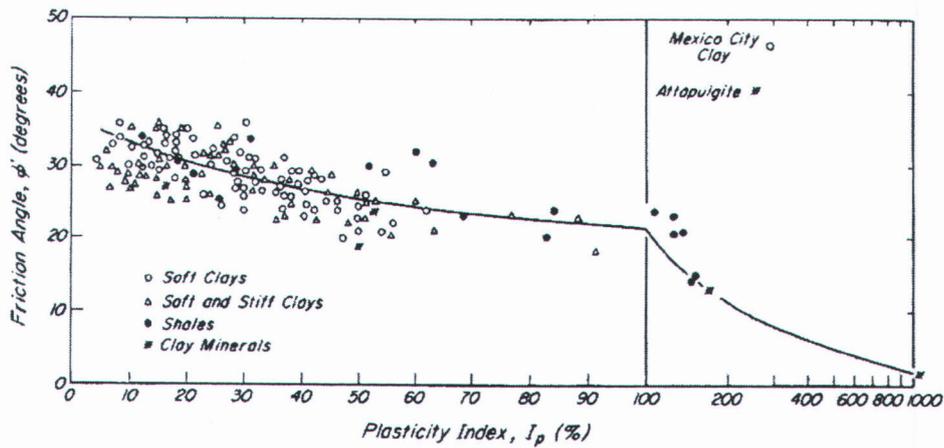
$$s_u = 0.520N \text{ (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียวประเภท CL}$$

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

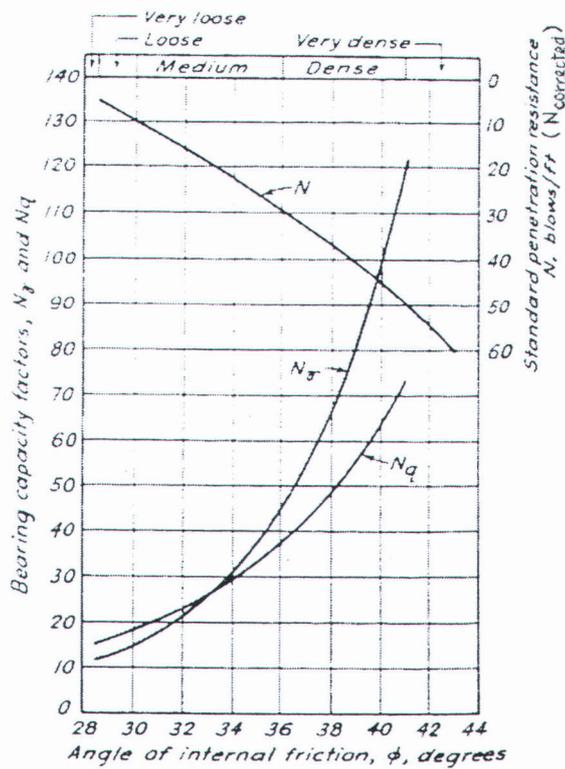


รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ s_u (วีระนันท์, 2526)

2.3.2 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบประสิทธิผล (Effective shear strength, τ) โดยค่ากำลังแบบนี้จะนิยามโดยใช้ค่าคงที่สองตัวคือ มุมของแรงเสียดทานภายใน (Angle of internal friction, ϕ') และ ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion intercept, c') ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้กล่องเฉือนโดยตรง (Direct shear test) และการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบคายน้ำ (Consolidated drained test, CD test) ทั้งนี้ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในยังสามารถประมาณได้จากการทดสอบการทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT) หรืออาจจะประมาณค่ามุมต้านทานแรงเฉือนภายในที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับดินเหนียวได้โดยใช้ความสัมพันธ์กับค่าดัชนีพลาสติก (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 ความสัมพันธ์ระหว่าง Angle of internal friction กับค่า SPT-N สำหรับดินทรายโดย Peck et al. (1974)

2.3.3 โมดูลัสของดิน (Soil modulus) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวของดิน และค่าโมดูลัสของดินมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากระดับของหน่วยแรงที่

เปลี่ยนแปลงไป และการหาค่าโมดูลัสของดินได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรง
 เค้นในแนวตั้งกับค่าเปลี่ยนแปลงความเครียดทางตั้งในสภาพที่ดินไม่มีการระบายน้ำแบบ 3 มิติ โดย
 มีสมมติฐานให้ดินเป็นวัสดุแบบ Ideal Elastic (Davis และ Poulos, 1963) ดังนี้

$$E_u = \frac{3E'}{2(1+v')} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$E' = \frac{(1+v')(1-2v')}{m_v(1-v')} \dots\dots\dots (2.5)$$

โดยที่ E' และ v' คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของดินในสภาพระบายน้ำ และอัตราปัวซองในสภาพ
 ระบายน้ำของดินตามลำดับ

การทดสอบคุณสมบัติชั้นพื้นฐาน

เป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของดิน เพื่อเป็นการจำแนกชนิดและ
 ลักษณะของดิน รวมถึงสามารถบ่งชี้ถึงปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่จะเกิดขึ้นได้ สมบัติพื้นฐาน
 ของดินเรียกได้อีกอย่างว่า ดัชนีของสมบัติ (Index Property) การทดสอบเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของ
 ดินจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการที่จะทำการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม การทดสอบมี
 ดังต่อไปนี้

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

3.3 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์

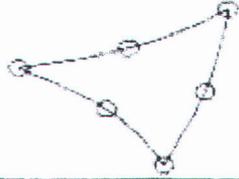
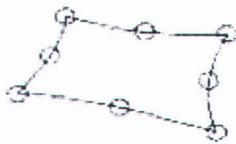
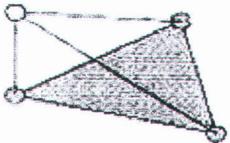
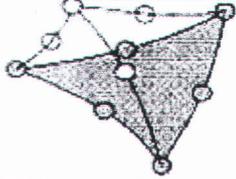
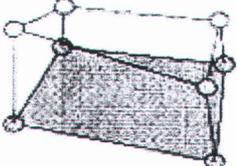
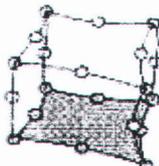
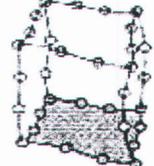
ความรู้พื้นฐานและการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method [FEM])

FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งเพื่อใช้หาค่าเฉลยของสมการทางคณิตศาสตร์ (Differential equation) ซึ่งการประมาณโดยการแบ่งบริเวณของปัญหาออกเป็นขอบเขตย่อยๆ (Discretization) เป็นแนวความคิดหลักของวิธีการนี้

ฐิรวัตร (2546) ได้อธิบายลำดับขั้นตอน FEM ว่าจะประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อยๆ ตามลำดับการคำนวณดังนี้

- พิจารณาระบบทั้งหมดเข้าไปในอีลิเมนต์ที่จำกัด (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: เป็นการแบ่งชิ้นดินออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ชิ้นส่วนเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นโดยลักษณะทางเรขาคณิตต่างๆ เป็นรูปหลายเหลี่ยม (Polygons) และใช้จุดมุมต่างๆ (Nodes) เป็นส่วนสำคัญในการคำนวณพฤติกรรมของชิ้นส่วนนั้นๆ ในรูปที่ 2.13 ได้แสดงอีลิเมนต์ต่างๆ ที่นิยมนำมาใช้ในสภาพปัญหา สำหรับอีลิเมนต์ชนิดต่างๆ นั้นจะมีการเก็บค่าการเคลื่อนที่ของจุดมุม หรือ Node เท่านั้น และค่าการเคลื่อนที่ที่จุดมุมนี้จะใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนที่ภายในอีลิเมนต์แล้วนำไปสู่ค่าของความเครียดได้

Linear elements	Quadratic elements	Cubic elements
1 	2 	3 
4 	5 	6 
7 	8 	9 
10 	11 	12 
13 	14 	15 

รูปที่ 3.20 ตัวอย่างของอีลิเมนต์ชนิดต่างๆที่ใช้ในการคำนวณโดย FEM (จิรวัตร, 2546)

สร้างอีลิเมนต์เมตริกซ์ความแข็งแรง (Build element stiffness matrix) : สมการในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุนั้นๆ (Constitutive law or constitutive equations) เช่นเป็นวัสดุที่ประพฤติตามกฎของฮุก หรือเป็นวัสดุแบบอีลาสติก-พลาสติกและมีกำลังตามเกณฑ์ของมอร์-คูลอมบ์ เป็นต้น ซึ่งจะได้สมการสมดุลของแรงมาชุดหนึ่งแล้วจึงจะพิจารณาสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วน จากสมการสมดุลของแรงที่ได้จะใช้เทคนิคต่างๆเช่นวิธี Virtual work, Weigh residual หรือ Variational principle เพื่อพัฒนาไปสู่สมการสำหรับหาค่าเมตริกซ์ความแข็งแรงระดับอีลิเมนต์ (Element stiffness matrix, k) ค่าเมตริกซ์ จะได้

จากสมการ 2.13 ซึ่งการหาค่าอินทิเกรตนั้นจะใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธีของเกาส์ (Gauss integration scheme)

$$[k]^e = \int [B]^T [C][B] dv; \text{ เมื่อ } [\varepsilon] = [B][u] \dots \dots \dots (2.13)$$

โดยที่ $[B]$ คือเมตริกซ์ที่ใช้แปลงการเคลื่อนที่ให้เป็นความเครียด

$[C]$ คือเมตริกซ์ที่ใช้แปลงจากความเครียดเป็นความเค้น
(Constitutive matrix)

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

$$[K][U] = [F] \dots \dots \dots (2.14)$$

โดยที่ $[K]$ คือ เมตริกซ์ความแข็งแรงของระบบ

$[U]$ คือ เมตริกซ์ของการเคลื่อนที่ของจุดมุมต่างๆ

$[F]$ คือ เมตริกซ์ของแรงกระทำภายนอกที่มีต่อระบบปัญหา

Boundary condition: สภาพข้อจำกัดทางขอบเขตเป็นการทำให้สามารถหาค่าผกผันของเมตริกซ์ $[K]$ ได้

Primary solution: เป็นการแก้ระบบสมการเมื่อกำหนดสภาพข้อจำกัดทางขอบเขตแล้ว ใน FEM นั้นค่าการเคลื่อนตัวของจุดมุมหาได้จากสมการ 2.15

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

Secondary solution: ค่าการเคลื่อนที่ที่ได้จากการแก้ระบบสมการในขั้นตอนก่อนนั้นสามารถหาค่าความเค้นและความเครียดได้ในสมการที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

$$[\varepsilon] = [B][u] \dots \dots \dots (2.16)$$

$$[\sigma] = [C][\varepsilon] = [C][B][u] \dots \dots \dots (2.17)$$

2.5.1 สมมุติฐานและข้อมูลที่ใช้

- ข้อมูลทางเรขาคณิต (Geometries)

ข้อมูลส่วนนี้มีความสำคัญมากในการทำแบบจำลองในการวิเคราะห์ เพราะในการแบ่งชิ้นส่วน (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 และ Manhole

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Constitutive Models)

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

ค่าคงที่ของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์ทั้งสองกรณีนั้นจะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่ของดิน (Soil parameters) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

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