

บทที่ 5

การดำเนินงานศึกษาวิจัย

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ การประยุกต์ใช้สมอยึดพื้นเพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดของเหมืองแม่เมาะ ที่สำคัญประกอบด้วย เครื่องเจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้น สมอยึดพื้น เครื่องมือดึงสมอยึดพื้น เครื่องมือวัดแรงดึงของสมอยึดพื้น เครื่องมือวัดแรงดันน้ำใต้ดิน เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของเชิงลาด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 เครื่องเจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้น

เครื่องเจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้นเป็นระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนหัวเจาะผ่านระบบเกียร์ การเจาะหลุมเป็นการเจาะแบบปั่น (Rotary Drilling) โดยใช้หัวเจาะแบบ Drag Bit ซึ่งเหมาะสำหรับการเจาะชั้นดินหรือหินที่ไม่แข็งมาก เพื่อให้ได้หลุมเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นิ้ว หรือประมาณ 150 มิลลิเมตร ความเอียงของหลุมเจาะ 15 องศาจากแนวราบ และการเจาะดังกล่าวใช้แรงลมเป่าได้เศษดินจากการเจาะที่ก้นหลุม เพื่อไม่ให้น้ำมีผลกระทบต่อกำลังยึดหน่วง (Bond Strength) ของผนังหลุมเจาะ รายละเอียดของเครื่องเจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้นตามรูป 5.1



รูป 5.1 เครื่องเจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้น

5.1.2 สมอยึดพื้น

สมอยึดพื้นเพื่อเสริมเสถียรภาพผนังบ่อเหมืองแม่เมาะมีความยาว 27.65 เมตร โดยแยกเป็นส่วนความยาวพันธะ (Bond Length) 10.00 เมตร ส่วนความยาวอิสระ (Free Length) 16.25 เมตร และส่วนหัวของสมอยึดพื้น (Anchor Head) 1.40 เมตร สมอยึดพื้นแต่ละชุดประกอบด้วยลวดเหล็กตีเกลียว (Steel Strand) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตรหรือ 0.60 นิ้วจำนวน 4 เส้น รายละเอียดตามรูป 5.2 โดยลวดเหล็กตีเกลียวแต่ละเส้นเป็น Grade 270 มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามมาตรฐาน ASTM A416 รายละเอียดตามตาราง 5.1



รูป 5.2 ส่วนประกอบของสมอยึดพื้น

ตาราง 5.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของลวดเหล็กตีเกลียว Grade 270

Code / Specification	ASTM A416
Yield Strength (N/mm ²)	1,670
Ultimate Strength (N/mm ²)	1,860
Nominal Diameter (mm)	15.24
Cross-Sectional Area (mm ²)	140.00
Weight (kg/m)	1.102
Ultimate Load (kN)	260.70
Modulus of Elasticity (N/mm ²)	195,000

5.1.3 เครื่องมือดึงสมอยึดพื้น

เครื่องมือดึงสมอยึดพื้นเป็นแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) สามารถดึงสมอยึดพื้นด้วยแรงสูงสุด 1,100 kN โดยมีพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (Piston Surface Area) 196 cm^2 ด้วยแรงดันสูงสุด 560 bar ระยะดึงสมอยึดพื้นสูงสุด 200 มิลลิเมตร มีรูทะลุตัวแม่แรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร รายละเอียดตามรูป 5.3



รูป 5.3 แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 1,100 kN

5.1.4 เครื่องมือวัดแรงดึงของสมอยึดพื้น

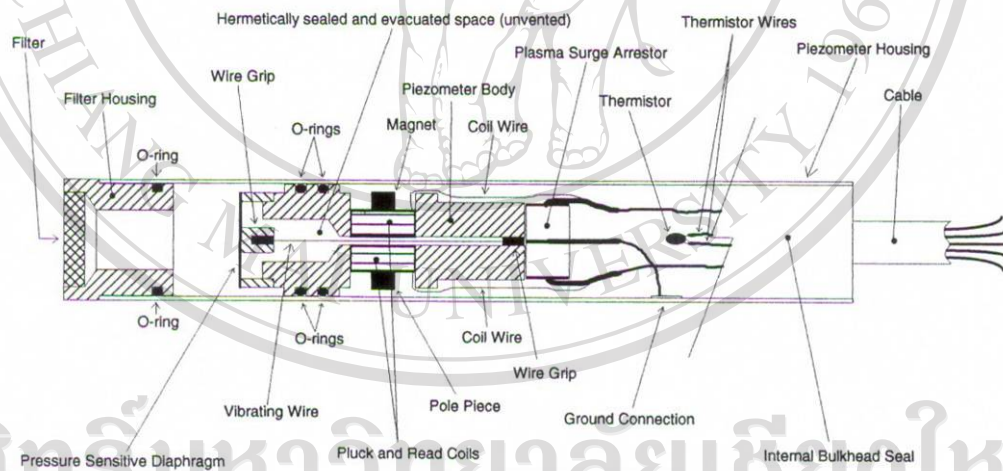
เครื่องมือวัดแรงดึงของสมอยึดพื้นเป็น Center-Hole Load Cell แบบ Strain Gauge รับแรงได้สูงสุด 100 tones ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ Bearing Plate, Load Cell และ Load Distribution Plate โดยมีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 105 มิลลิเมตร รายละเอียดตามรูป 5.4

5.1.5 เครื่องมือวัดแรงดันน้ำใต้ดิน

เครื่องมือวัดแรงดันน้ำใต้ดินเป็นแบบ Vibrating Wire Piezometer ซึ่งประกอบด้วย แผ่นกั้นไวต่อความดัน (Pressure Sensitive Diaphragm) ต่ออยู่กับเส้นลวดสั่น (Vibrating Wire Element) เมื่อแรงดันน้ำใต้ดินเปลี่ยนแปลงจะวัดค่าเป็นความเปลี่ยนแปลงแรงดึง (Tension) ของแผ่นกั้นไวต่อความดัน และความถี่ของการสั่นของเส้นลวดสั่น (Vibration Frequency) โดยค่าความถี่ของการสั่นของเส้นลวดสั่นยกกำลังสอง มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันน้ำใต้ดินบนแผ่นกั้นไวต่อความดัน รายละเอียดตามรูป 5.5



รูป 5.4 Center-Hole Load Cell แบบ Strain Gauge ขนาด 100 tones



รูป 5.5 เครื่องมือวัดแรงดันน้ำใต้ดินแบบ Vibrating Wire Piezometer (GEOKON, Inc., 2005)

5.1.6 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของลาดดิน

เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของลาดดินมี 2 แบบคือ แบบแรกเป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวผิวดินโดยใช้กล้องสำรวจ พร้อมหมุดวัดจำนวน 9 จุด และแบบที่สองเป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวใต้ดิน โดยใช้ Inclinator จำนวน 1 หลุม รายละเอียดตามรูปที่ 5.6 และ Shear Monitor จำนวน 2 หลุม รายละเอียดตามรูป 5.7



รูป 5.6 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวใต้ดิน โดยใช้ Inclinator



รูป 5.7 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวใต้ดินโดยใช้ Shear Monitor

5.2 การดำเนินงานศึกษาวิจัย

วิธีการดำเนินงานศึกษาวิจัยตามแผนงานดังกล่าวประกอบ 4 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนการศึกษาและออกแบบสมอยึดพื้น ขั้นตอนการดำเนินการติดตั้งสมอยึดพื้น ขั้นตอนการตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้น และขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการใช้งานสมอยึดพื้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

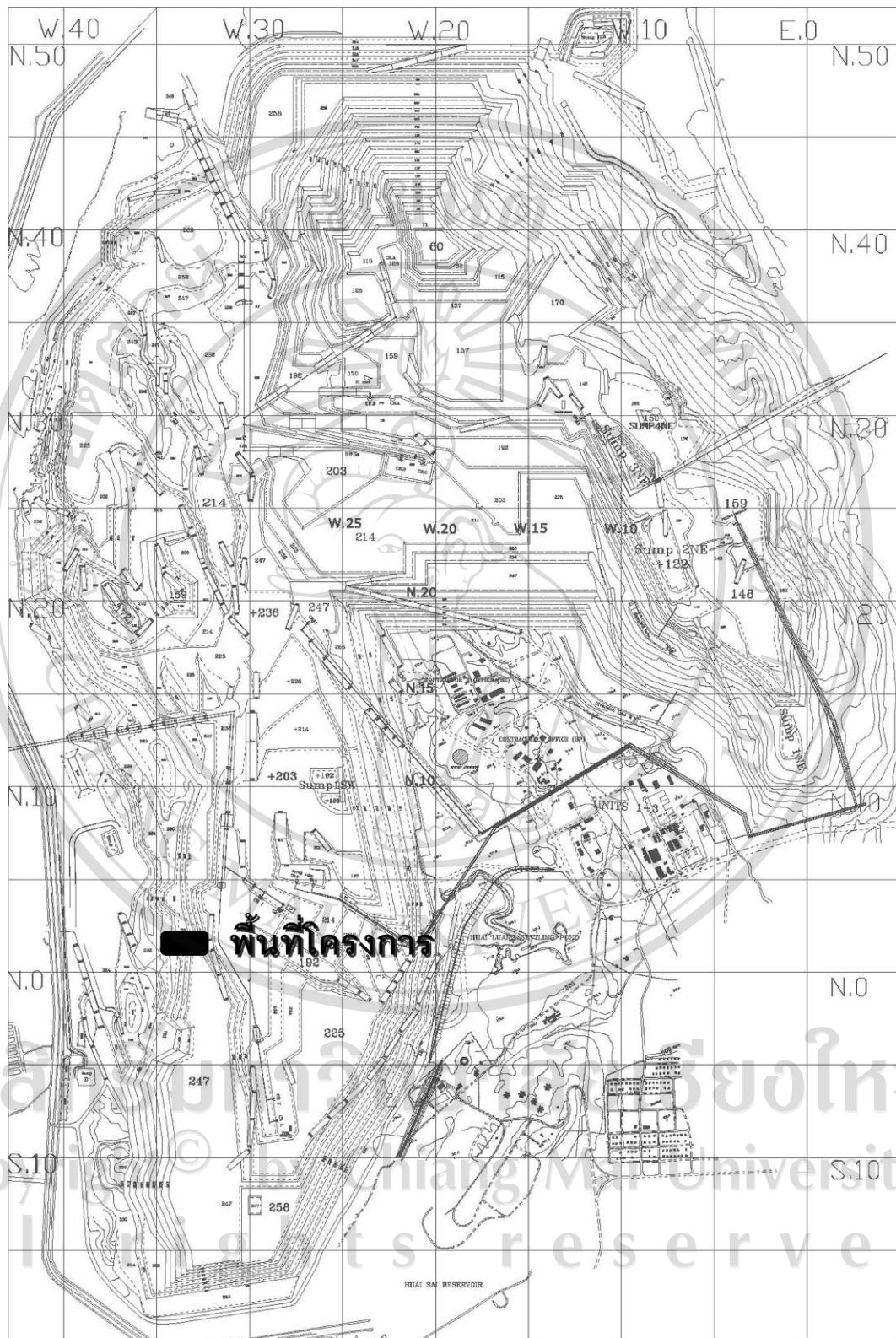
5.2.1 ขั้นตอนการศึกษาและออกแบบสมอยึดพื้น

5.2.1.1 การทบทวนกรอบแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

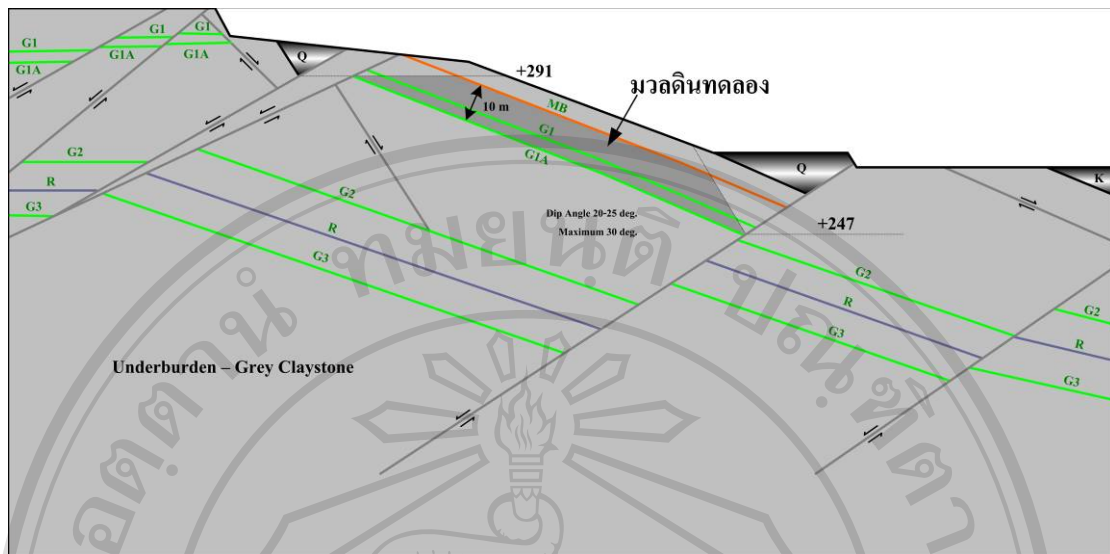
เป็นการทบทวนกรอบแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องคือ แรง (Force) หน่วยแรง (Stress) ความเครียด (Strain) ความเสียดทาน (Friction) การเฉือนในดิน (Shearing in soil) กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) การเลื่อนไถลของมวลดินภายใต้แรงโน้มถ่วง (Sliding due to gravitational loading) การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดด้วยวิธีขีดจำกัดภาวะสมดุล (Slope Stability Analysis by Limit Equilibrium Method) การสำรวจภาคสนาม (Site investigation) ลักษณะทางธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีของเหมืองแม่เมาะ และองค์ความรู้เกี่ยวกับสมอยึดพื้น ดังรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 บทที่ 3 และบทที่ 4

5.2.1.2 การรวบรวมข้อมูลเพื่อการออกแบบสมอยึดพื้น

พื้นที่โครงการตั้งอยู่บริเวณผนังบ่อเหมืองด้านตะวันตกของบ่อ SW รายละเอียดตามรูป 5.9 ลักษณะของชั้นดินเป็นชั้นดินใต้ถ้ำที่เรียกว่า Underburden ที่เป็นหินโคลนสีเทา (Grey Claystone) มีชั้นดินอ่อนที่เป็นชั้นดินเหนียวสีเขียว (Green Clay) แทรกอยู่จำนวน 2 ชั้นคือชั้น G1 และ G1A ซึ่งถือเป็นระนาบที่มีโอกาสพังทลาย (Potential Slip Plane) ที่ความลึกประมาณ 7 เมตร และ 10 เมตร ตามลำดับจากชั้นดินสีส้มที่เรียกว่าชั้น Marker Bed ซึ่งอยู่ประมาณผิวดินหลังการปรับพื้นที่เบื้องต้นจากการตรวจวัดข้อมูลธรณีโครงสร้างในสนามและแปลความหมายเป็นภาพตัดขวาง พบว่าชั้นดินเอียงเทเข้าหากลางบ่อเหมืองไปทางทิศตะวันออกประมาณ 20-25 องศา โดยค่าความเอียงสูงสุดที่ตรวจวัดได้ประมาณ 30 องศา รายละเอียดภาพตัดขวางตามรูป 5.10 โดยในเบื้องต้นวางแผนเสริมเสถียรภาพมวลดินจากระดับ +291 ถึงระดับ +247



รูป 5.9 พื้นที่โครงการบริเวณผนังบ่อเหมืองแม่เมาะด้านตะวันตกของบ่อ SW



รูป 5.10 ภาพตัดขวางบริเวณพื้นที่โครงการ

การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้น Grey Claystone จาก Geotechnical Report Volume 3 (EGAT, 1985) พบว่าค่าเฉลี่ยของ Total Density เท่ากับ 1.95 t/m^3 , Liquid Limit เท่ากับ 50.60%, Plasticity Index เท่ากับ 23.10% และ Unconfined Compression Strength เท่ากับ 4.27 MPa ที่ Strain at Failure เท่ากับ 2.20% และรายงานคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้น Green Clay ว่าค่าเฉลี่ยของ Total Density เท่ากับ 2.06 t/m^3 , Liquid Limit เท่ากับ 59.60%, Plasticity Index เท่ากับ 27.60% และ Unconfined Compression Strength เท่ากับ 2.17 MPa ที่ Strain at Failure เท่ากับ 1.78%

การศึกษาคุณสมบัติกำลังเฉือนของชั้นดินอ่อน Green Clay จาก Interim Review of Geotechnical Strength Data (EGAT, 1990) พบว่าค่าเฉลี่ยต่ำสุดของ Cohesion เท่ากับ 0.0 kN/m^2 และ Friction Angle เท่ากับ 12.00 องศา และคุณสมบัติกำลังเฉือนของรอยเลื่อน (Fault) มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดของ Cohesion เท่ากับ 0.0 kN/m^2 และ Friction Angle เท่ากับ 17.00 องศา โดยความเห็นชอบของผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมธรณีคือ Barry McMahon, T.D. Sullivan และ C.O. Brawner

จากการเจาะหลุมสำรวจเพิ่มเติมบริเวณพื้นที่โครงการจำนวน 4 หลุม ความลึกหลุมละประมาณ 20 เมตร รายละเอียดของหลุมเจาะดังรายละเอียดที่แสดงในภาคผนวก ก โดยทำการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) ที่ความลึก 0.50-1.00 เมตร พบว่ามีค่า Blow Count (N) อยู่ในช่วง 52-199 หากคำนวณ Allowable Bearing Capacity (q_a) ตามวิธีของ Meyerhof ซึ่ง $q_a = 12Nk_d$ โดย $k_d = 1 + 1.33(D/B)$ จะได้ค่า q_a ต่ำสุดประมาณ 600 kN/m^2 และในการออกแบบจะใช้ $q_a = 500 \text{ kN/m}^2$ ในเบื้องต้นหากใช้แผ่นคอนกรีตขนาด 1x1 เมตร เพื่อรับแรงดึงของสมอยึดพื้นที่ผิวดิน ดังนั้นสมอยึดพื้นแต่ละหลุมจะสามารถรับแรงได้สูงสุดหลุมละ 500 kN

Little John and Bruce (1977) เสนอแนะวิธีประเมิน Working Bond Stress (τ_a) จากค่า Unconfined Compressive Strength (σ_u) โดยแนะนำ $\tau_a = \sigma_u/30$ ดังนั้นหาก $\sigma_u = 4,270 \text{ kN/m}^2$ จะสามารถคำนวณ τ_a ได้เท่ากับ 142.33 kN/m^2 และในการออกแบบจะใช้ $\tau_a = 140 \text{ kN/m}^2$ จะสามารถคำนวณส่วนความยาวพันธะของสมอยึดพื้น (l_b) ได้ดังนี้

$$l_b = Q / (\pi \cdot D \cdot \tau_a)$$

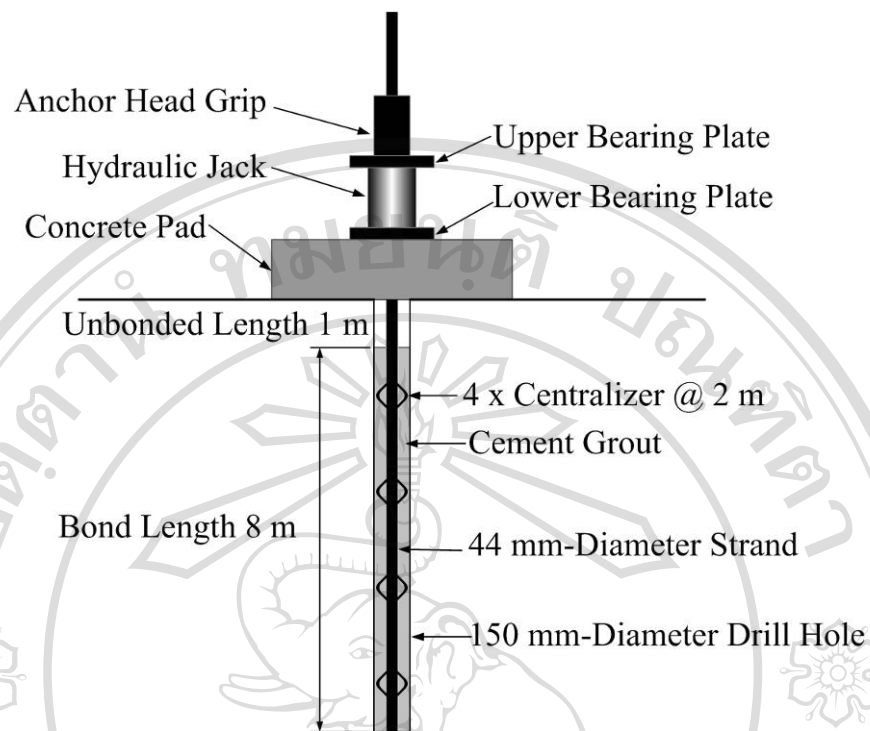
โดย l_b = ส่วนความยาวพันธะ (m)

Q = แรงดึงที่ส่วนหัวของสมอยึดพื้นมีค่าเท่ากับ 500 kN

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นมีค่าเท่ากับ 0.15 m

τ_a = Working Bond Strength ของปูนเกร้าท์กับผนังหลุมเจาะ มีค่าเท่ากับ 140 kN/m^2

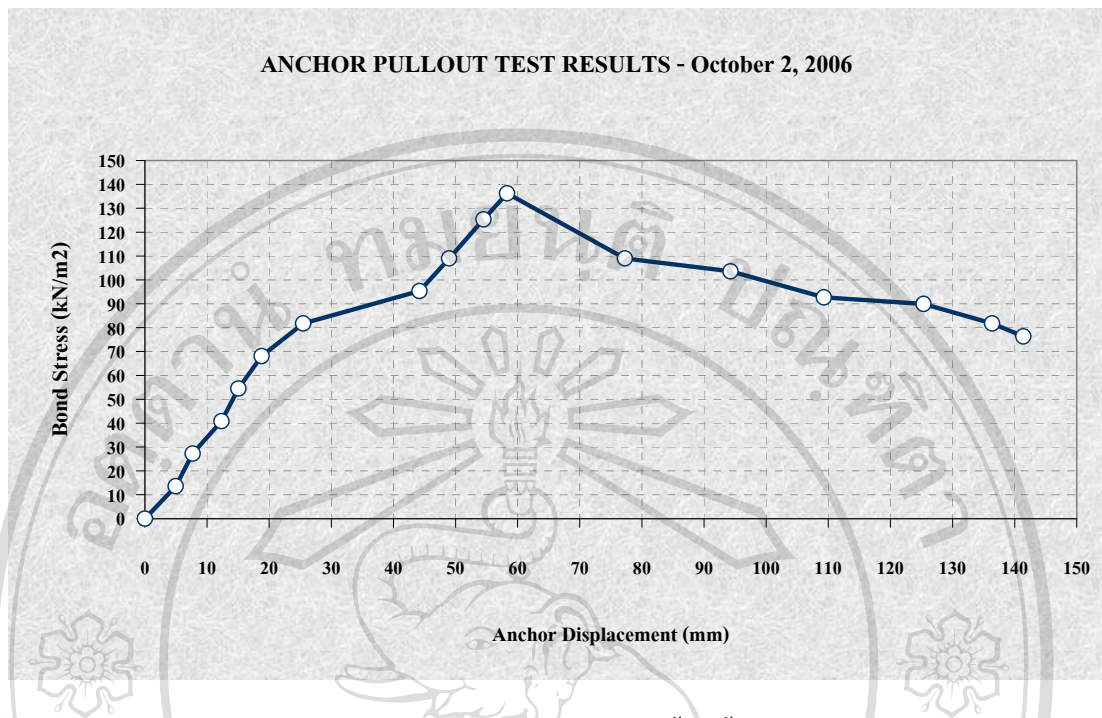
ดังนั้นส่วนความยาวพันธะของสมอยึดพื้นจะมีค่าเท่ากับ 7.58 เมตร หรือ 8.00 เมตร ในการออกแบบเพื่อยืนยันค่า Working Bond Strength สำหรับการออกแบบส่วนความยาวพันธะของสมอยึดพื้น จึงดำเนินการทดสอบดึงสมอยึดพื้น (Anchor Pullout Test) โดยเจาะหลุมแนวดิ่งด้วย Auger ในบริเวณพื้นที่โครงการ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ความลึก 9 เมตร เพื่อเป็นส่วนความยาวพันธะ 8 เมตร และเป็นส่วนความยาวอิสระ 1 เมตร จากนั้นใส่ลวดเหล็กตีเกลียวขนาด 44 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 12 เมตร รับแรงดึงได้สูงสุด 1,000 kN ลงไปในหลุมเจาะ โดยมี Centralizer 4 ช่วง ช่วงละ 2 เมตร ตลอดส่วนความยาวพันธะ จากนั้นอัดฉีดปูนเกร้าท์ ซึ่งเป็น Portland Cement Type I และผสมกับน้ำโดยใช้ W:C Ratio = 0.45 จากนั้นก่อสร้างแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 1 x 1 เมตรหนา 0.40 เมตร เพื่อรับแรงดึงของสมอยึดพื้นที่ผิวดิน หลังจากบ่มคอนกรีตไวนานประมาณ 12 วัน จึงเริ่มทำการทดสอบดึงสมอยึดพื้นโดยติดตั้ง Center-Hole Hydraulic Jack ซึ่งสามารถดันด้วยแรงมากที่สุด 1,100 kN พร้อมติดตั้ง Anchor Head Grip ที่ส่วนบนสุดเพื่อยึดสมอยึดพื้น รายละเอียดการติดตั้งหลุมทดสอบดึงสมอยึดพื้นตามรูป 5.11 และรูป 5.12 ในการทดสอบทำการบันทึกข้อมูล แรงดึงในสมอยึดพื้น การยืดตัวของสมอยึดพื้น และการทรุดตัวของแผ่นคอนกรีตรับแรง จากนั้นจะสามารถคำนวณหน่วยแรงยึดหน่วงระหว่างปูนเกร้าท์กับผนังหลุมเจาะแล้วนำไปเขียนกราฟร่วมกับข้อมูลการยืดตัวของสมอยึดพื้น รายละเอียดตามรูป 5.13



รูป 5.11 รายละเอียดการติดตั้งหลุมทดสอบดึงสมอชิดพื้น

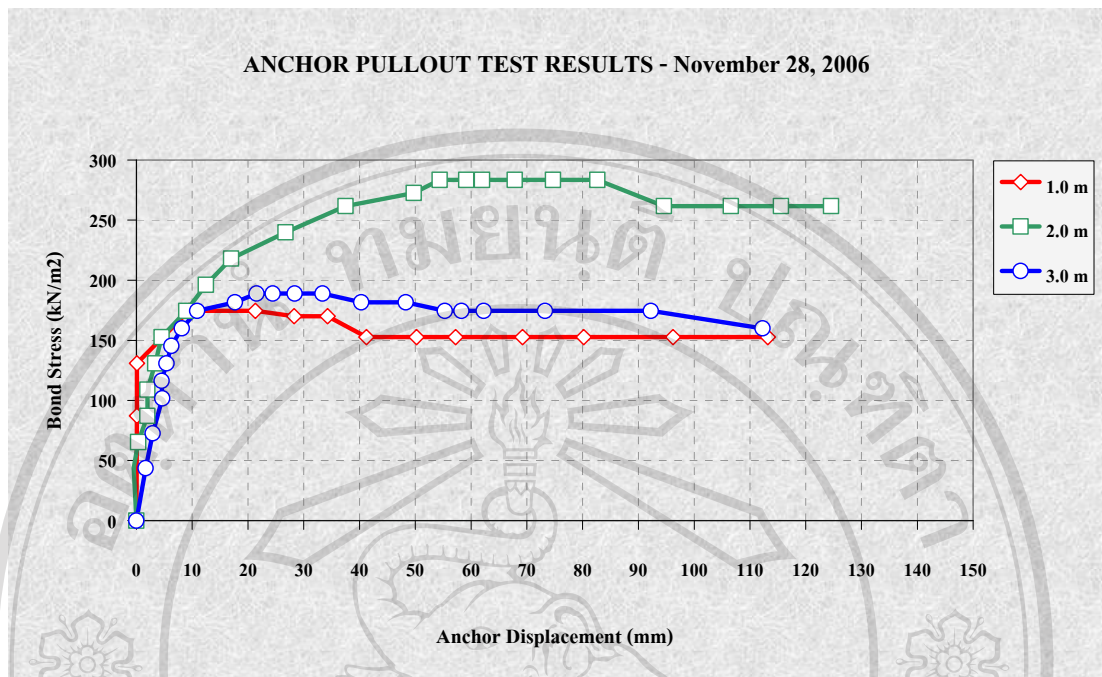


รูป 5.12 การดำเนินงานทดสอบดึงสมอชิดพื้น



รูป 5.13 ผลทดสอบดึงสมอยึดพื้นครั้งแรก

จากผลการทดสอบดึงสมอยึดพื้นพบว่าค่าหน่วยแรงยึดหน่วยสูงสุดเท่ากับ 136 kN/m^2 การยึดตัวของสมอยึดพื้นเท่ากับ 58 มิลลิเมตร หากใช้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3.00 ตามคำแนะนำของ Little John and Bruce (1977) จะสามารถคำนวณ Working Bond Stress (τ_u) ได้เท่ากับ 45 kN/m^2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ต้องการ จึงทำการค้นหาสาเหตุโดยการขุดหลุมทดสอบดึงสมอยึดพื้นเพื่อตรวจสอบสภาพหลุมเจาะ พบว่ามีแผ่นดินเหนียวเคลือบอยู่ที่ผนังของหลุมเจาะ ซึ่งเกิดเนื่องจากขณะทำการเจาะหลุมด้วย Auger แล้วหยอดน้ำลงไปในหลุมเจาะเพื่อดึงเศษดินขึ้นมาจากหลุมเจาะ จึงทำการทดสอบดึงสมอยึดพื้นใหม่จำนวน 3 หลุม โดยใช้เหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วจำนวน 3 เส้น และความลึกของหลุมเจาะ 1, 2 และ 3 เมตร และในขณะที่เจาะหลุมไม่ใช้น้ำในการดึงเศษดินขึ้นมาจากหลุมเจาะ ผลทดสอบดึงสมอพื้นพบว่าค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงยึดหน่วยสูงสุดเท่ากับ 215 kN/m^2 สามารถคำนวณ Working Bond Stress (τ_u) ได้เท่ากับ 71 kN/m^2 รายละเอียดตามรูป 5.14 ซึ่งมีความมากขึ้น แต่ยังมีค่าน้อยกว่าค่าที่ต้องการคือ 140 kN/m^2 อย่างไรก็ตามได้มีการค้นหาสาเหตุโดยทดสอบการหดตัวของปูนเกรท พบว่าปูนซีเมนต์ผสมน้ำด้วย W:C Ratio เท่ากับ 0.45 มีการหดตัวในแนวรัศมีประมาณ 0.5% ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุหลักทำให้ได้ค่า Working Bond Stress (τ_u) ที่ต่ำกว่าความเป็นจริง



รูป 5.14 ผลทดสอบดึงสมอยึดพื้นครั้งที่สอง

ข้อสรุปจากการทดสอบดึงสมอยึดพื้นพบว่าวิธีการเจาะแบบปั๊มด้วย Auger ไม่เหมาะสม เนื่องจากในธรรมชาติเนื้อดินมีความชื้นอยู่บางส่วนอยู่แล้ว อาจทำให้เกิดแผ่นดินเหนียวบาง เคลือบผนังหลุมเจาะ ทำให้ Bond Strength ของปูนเกรตที่กับผนังหลุมเจาะลดลง และในการทำ ความสะอาดหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นไม่ควรใช้น้ำในการล้างเศษดินจากหลุมเจาะ ดังนั้นในการ ดำเนินการเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นจึงกำหนดให้เจาะหลุมโดยเครื่องเจาะแบบปั๊ม โดยใช้หัวเจาะ แบบ Drag Bit และทำความสะอาดหลุมเจาะด้วยแรงลม อีกประเด็นที่สำคัญคือปูนเกรตที่ต้องใส่ สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัวของปูนเกรต อย่างไรก็ตามไม่สามารถดำเนินการทดสอบดึงสมอยึดพื้นได้ เนื่องจากต้องเร่งดำเนินการตามแผน และจะยืนยันค่า Bond Strength ของปูนเกรตที่กับผนังหลุมเจาะ จากการทดสอบสมอยึดพื้นอีกครั้งหนึ่ง

5.2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดมวลดินทดลอง

วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดมวลดินทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SLOPE/W ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดด้วยวิธีจำกัดภาวะสมดุล (Limit Equilibrium) โดยใช้หลักการของ Morgenstern-Price โดยกำหนดให้ความเอียงของชั้นดิน 30 องศา ระบายการพังทลาย ซึ่งเป็นชั้น G1A อยู่ลึกประมาณ 10 เมตร ในแนวตั้งฉากกับผิวดินที่ปรับสภาพเรียบร้อยแล้ว ความสูงของเชิงลาดประมาณ 40 เมตร จากระดับ +291 และสมมุติระดับน้ำสูงประมาณ 2.50 เมตร จากระนาบการพังทลาย รายละเอียดตามรูป 5.10 และกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินดังต่อไปนี้

Grey Claystone :

Unit Weight	=	19.50	kN/m ³
Cohesion	=	100.00	kN/m ²
Friction Angle	=	20.00	degrees

Green Clay – G1A :

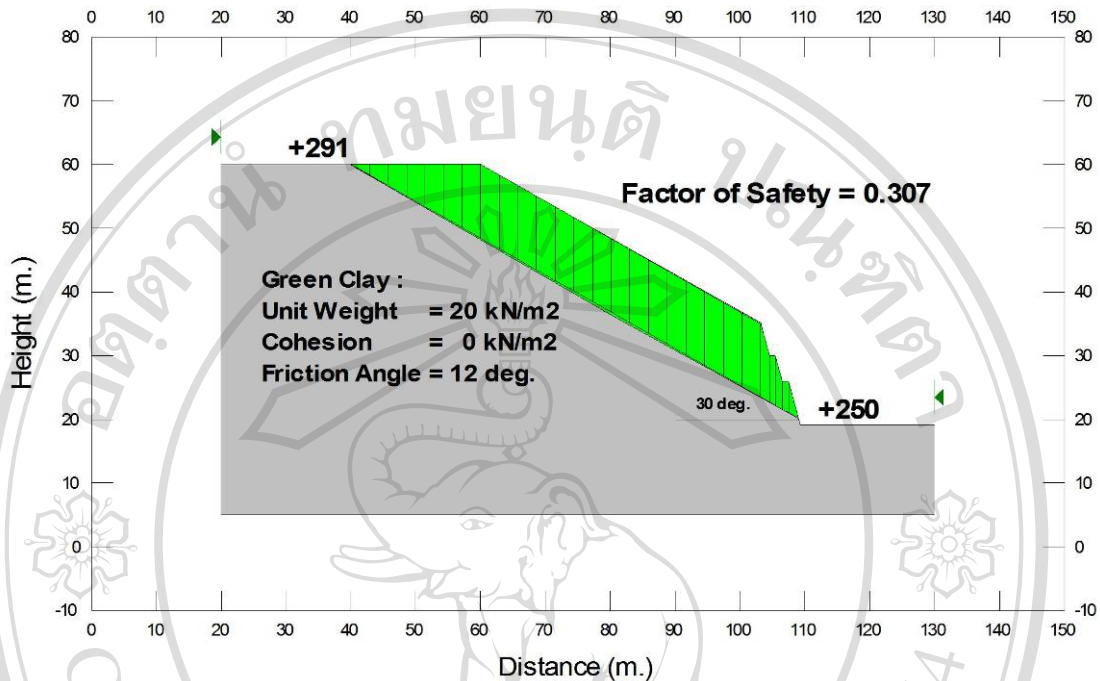
Unit Weight	=	20.00	kN/m ³
Cohesion	=	0.00	kN/m ²
Friction Angle	=	12.00	degrees

Faults :

Unit Weight	=	20.00	kN/m ³
Cohesion	=	0.00	kN/m ²
Friction Angle	=	17.00	degrees

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดมวลดินทดลองมีส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 0.31 กล่าวคือหากไม่เสริมเสถียรภาพด้วยวิธีการใด จะเกิดการพังทลายของมวลดินทดลองอย่างแน่นอน รายละเอียดตามรูป 5.15

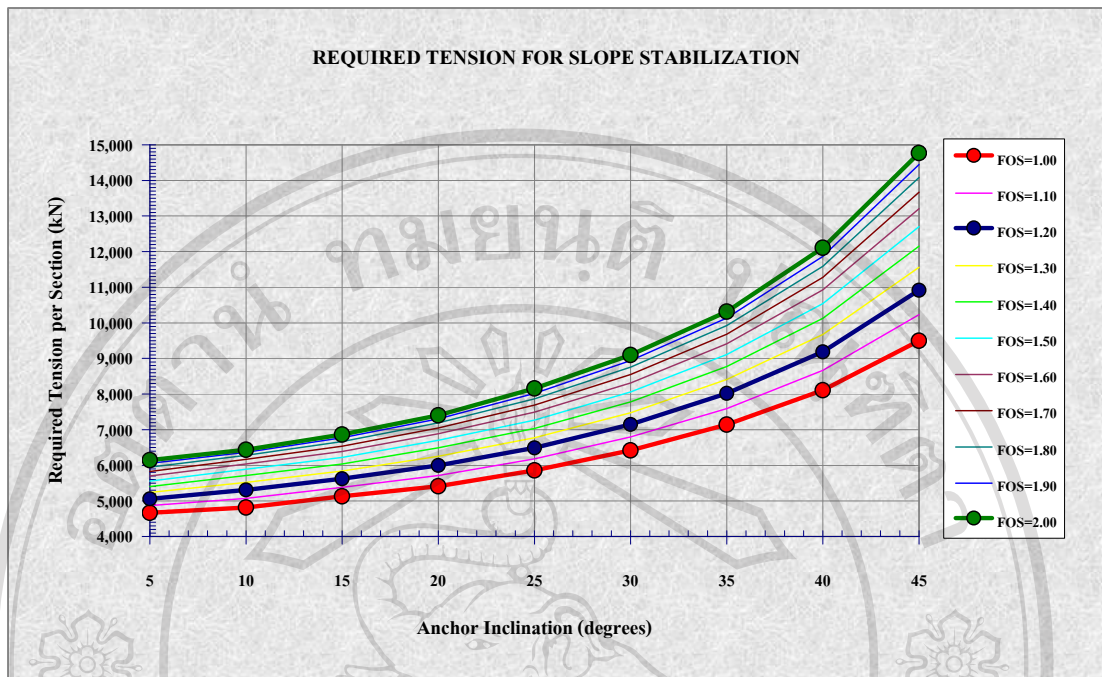
West Wall - SW Pit, N2 : Without Ground Anchor
Morgenstern-Price, Half-Sine Function, $R_u = 0.125$



รูป 5.15 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดโดยไม่เสริมเสถียรภาพ

5.2.1.4 การประเมินแรงดึงของสมอยึดพื้นที่ต้องการเพื่อเสริมเสถียรภาพความลาด

ในการสร้างแบบจำลองการติดตั้งสมอยึดพื้นที่ต้องการเพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดมวลดินทดลอง โดยใช้ภาพตัดขวางตามรูป 5.15 มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาแรงดึงของสมอยึดพื้นที่ต้องการ ทำให้มวลดินทดลองมีสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.20 โดยแปรผันค่าความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่ช่วง 5-45 องศา เพื่อหามุมเอียงของสมอยึดพื้นที่เหมาะสมและมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด รายละเอียดการประเมินแรงดึงของสมอยึดพื้นที่ต้องการตามรูป 5.16 กล่าวคือเมื่อต้องการให้มวลดินทดลองมีสัดส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องเพิ่มแรงดึงในสมอยึดพื้นที่มากขึ้น และเมื่อความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่เพิ่มขึ้น ต้องการแรงดึงของสมอยึดพื้นที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการให้มวลดินทดลองมีสัดส่วนความปลอดภัย 1.20 ต้องใช้แรงดึงของสมอยึดพื้นที่ประมาณ 5,620 kN โดยหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่เอียง 15 องศา



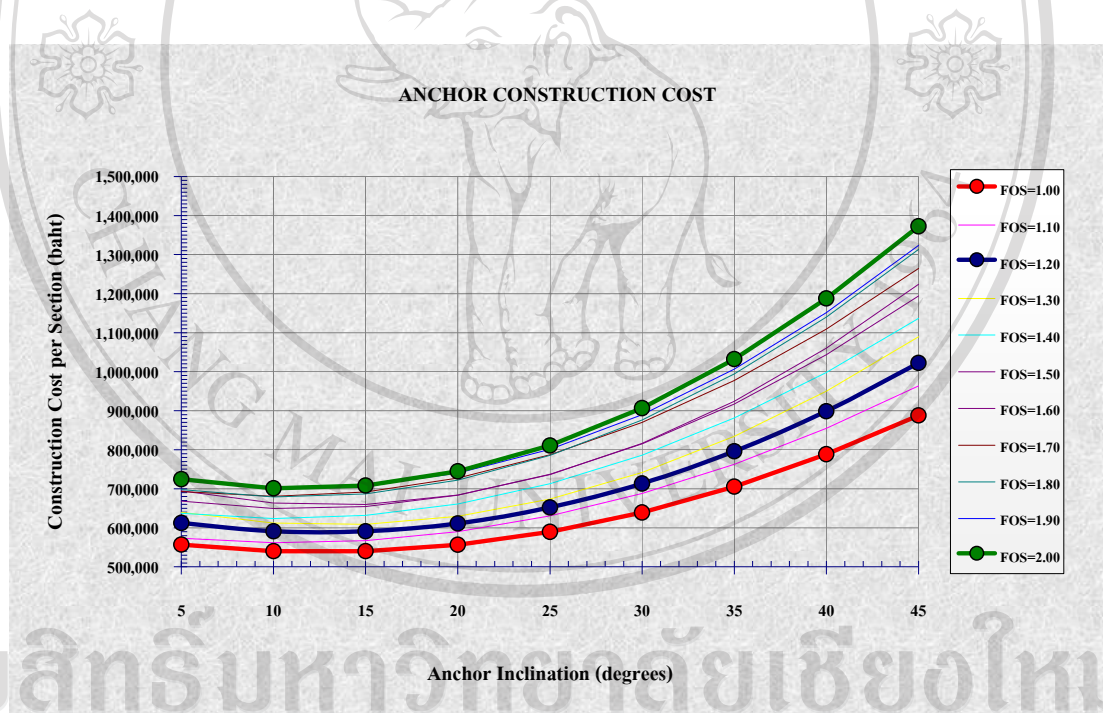
รูป 5.16 แรงดึงของสมอยึดพื้นที่ต้องการเพื่อเสริมเสถียรภาพมวลดินทดลอง

5.2.1.5 การประเมินความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่เหมาะสม

ความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่เหมาะสม ประเมินจากราคาค่าก่อสร้างต่ำสุด ที่ความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่ต่างกัน กล่าวคือหากหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่เอียงน้อย จากแนวราบจะสามารถรับแรงดึงได้มาก ทำให้ใช้จำนวนหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่จำนวนน้อย แต่ความลึกของหลุมเจาะและความยาวของสมอยึดพื้นมาก ในทางตรงกันข้ามหากหลุมเจาะเอียงมาก จากแนวราบมากจะสามารถรับแรงดึงได้น้อย ทำให้ใช้จำนวนหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่จำนวนมาก แต่ความลึกของหลุมเจาะและความยาวของสมอยึดพื้นน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประเมินความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่เหมาะสมโดยมีราคาค่าก่อสร้างต่ำที่สุด โดยการประเมินราคาค่าก่อสร้างดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานที่สมอยึดพื้นที่แต่ละหลุมสามารถรับแรงได้ 500 kN โดยราคาค่าก่อสร้างหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่ประกอบด้วยค่าเจาะหลุมและอุปกรณ์สมอยึดพื้น รายละเอียดราคาค่าก่อสร้างต่อหน่วยเบื้องต้นตามตาราง 5.2 และราคาค่าก่อสร้างหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่ความเอียงของหลุมเจาะและสัดส่วนความปลอดภัยที่ต่างกัน รายละเอียดตามรูป 5.17

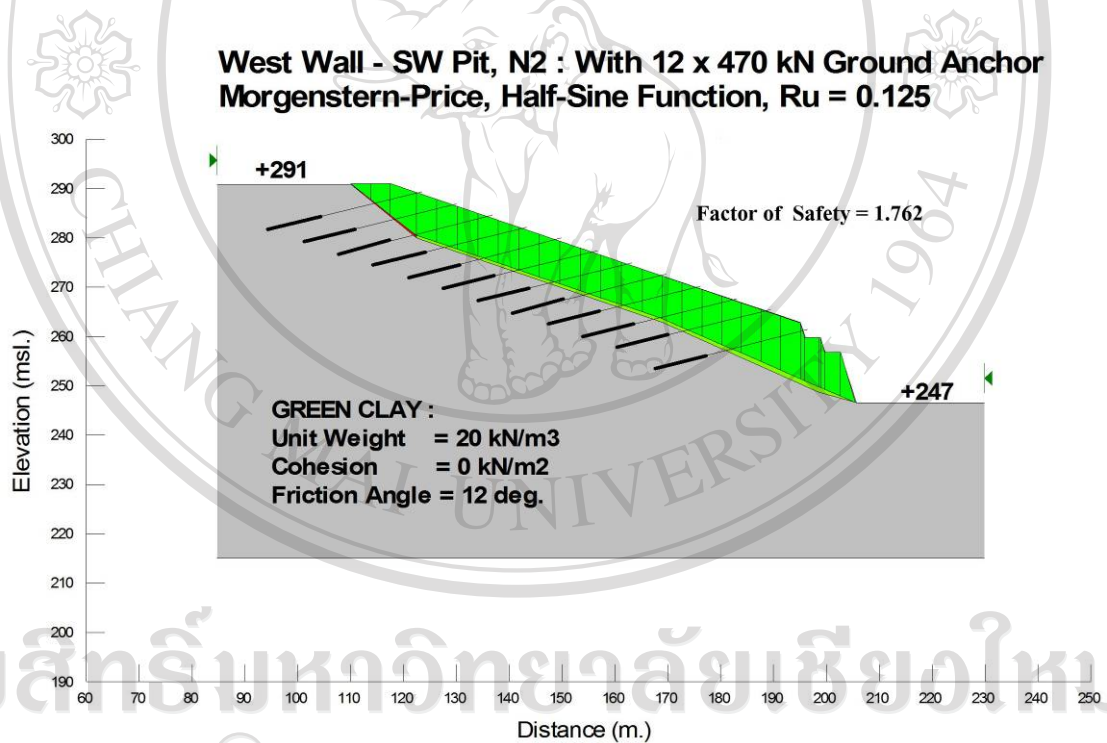
ตาราง 5.2 ประมาณราคาก่อสร้างต่อหน่วยของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้น

ลำดับที่	รายการ	ราคาต่อหน่วย
1	4x15-mm Prestressing Steel Strand	400 บาทต่อเมตร
2	150 mm in Diameter Rotary Drilling	700 บาทต่อเมตร
3	Anchor Assembly	10,000 บาทต่อหลุม
4	Cement Grout	1,500 บาทต่อหลุม
5	Reinforce Concrete Pad 1.00 x 1.00 x 0.40 m	500 บาทต่อหลุม
6	Labour Cost	2,000 บาทต่อหลุม
7	Operating Cost	15%
8	Slope Protection with Concrete	5,000 บาทต่อหลุม



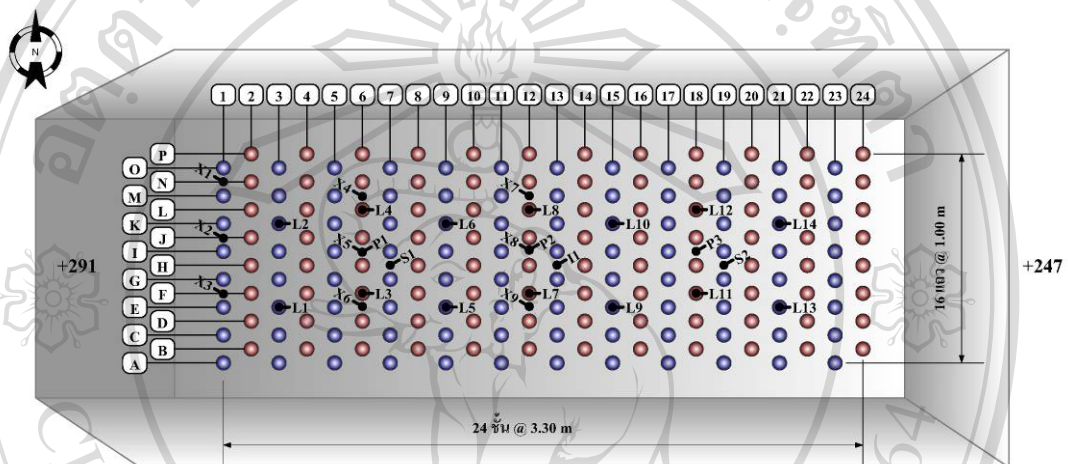
รูป 5.17 ราคาก่อสร้างหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้น

จากการประเมินราคาก่อสร้างหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นพบว่าที่สัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.20 และราคาก่อสร้างต่ำสุด ความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งคือ 15 องศา จากแนวราบ ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ FHWA (1999) ซึ่งแนะนำว่าความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่สามารถทำได้คือ 10-45 องศา จากแนวราบ แต่ความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นโดยทั่วไป 15-30 องศาจากแนวราบ ดังนั้นความเอียงของหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่เหมาะสมสำหรับโครงการนี้คือ 15 องศา จากแนวราบ โดยแต่ละภาพตัดขวางต้องการแรงดึง 5,620 kN หากกำหนดให้สมอยึดพื้นแต่ละหลุมรับแรงได้ 500 kN ต้องใช้สมอยึดพื้นจำนวน 12 หลุมต่อภาพตัดขวาง และสามารถลดแรงของสมอยึดพื้นแต่ละหลุมเหลือ 470 kN โดยแรงดึงรวมยังคงมากกว่า 5,620 kN และใช้สมอยึดพื้นจำนวน 12 หลุมต่อภาพตัดขวางเท่าเดิม และสามารถคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยได้เท่ากับ 1.76 รายละเอียดตามรูป 5.18



รูป 5.18 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาด โดยเสริมเสถียรภาพด้วยสมอยึดพื้น

การออกแบบสมอยึดพื้นเพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดของมวลดินทดลองดังกล่าวเป็นการออกแบบ 2 มิติในแนวภาพตัดขวางซึ่งหนา 1 เมตร ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมมวลดินทดลองประมาณ $20,000 \text{ m}^3$ จึงออกแบบให้ใช้สมอยึดพื้นจำนวน 16 แถว แถวละ 12 หลุม โดยระยะห่างระหว่างแถวเท่ากับ 1.00 เมตร ซึ่งในแนวที่ตัดกันจะเจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้นสลับฟันปลา ดังนั้นจำเป็นต้องใช้สมอยึดพื้นจำนวนทั้งหมด 192 หลุม รายละเอียดตามรูป 5.19



รูป 5.19 รูปแบบหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นเพื่อเสริมเสถียรภาพความลาด

5.2.1.6 การเลือกใช้วัสดุทำสมอยึดพื้นที่เหมาะสม

วัสดุที่ใช้ทำสมอยึดพื้นมี 2 ประเภทคือเป็นเหล็กเส้น และสวดเหล็กตีเกลียว โดยเหล็กเส้นสามารถใช้เป็นวัสดุทำสมอยึดพื้นได้ยาวประมาณ 18 เมตร โดยที่ไม่ต้องมีข้อต่อ แต่กรณีนี้ต้องการสมอยึดพื้นที่ยาวกว่านั้น ดังนั้นเหล็กเส้นจึงไม่เหมาะสำหรับทำสมอยึดพื้นเพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดของมวลดินทดลองของโครงการนี้ ประกอบกับการใส่เหล็กเส้นเข้าไปในหลุมเจาะค่อนข้างยากเนื่องจากมีน้ำหนักรวมและเป็นเส้นตรง ดังนั้นวัสดุที่จะใช้ทำสมอยึดพื้นสำหรับโครงการนี้จึงตัดสินใจใช้สวดเหล็กกลุ่มตีเกลียวเพื่อรับแรงดึงออกแบบหลุมละ 500 kN

Duncan C. Wyllie (1992) เสนอแนะวิธีเลือกวัสดุที่ใช้ทำสมอยึดพื้นในแง่ของการรับแรงดึง ดังนี้ กำหนดให้ Allowable Working Load ควรมีค่าประมาณ 50-62.5% ของความสามารถรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ในกรณีนี้ตัดสินใจใช้ Allowable Working Load มีค่าเท่ากับ 50% ของ Ultimate Tensile Strength

Working Load ของแต่ละหลุมของโครงการนี้มีค่าเท่ากับ 500 kN ดังนั้น Ultimate Tensile Strength ของสมอยึดพื้นต้องมีค่ามากกว่า 1,000 kN จึงเลือกใช้ 7-Wires Steel Strand (Grade 270) จำนวน 4 เส้น สามารถรับแรงดึงสูงสุด 1,043 kN ตามมาตรฐาน ASTM A416 ดังรายละเอียดที่แสดงในภาคผนวก ข

5.2.1.7 การออกแบบรายละเอียดส่วนความยาวพันธะและส่วนความยาวอิสระ

จากการเจาะสำรวจเพิ่มเติมได้มีการเก็บตัวอย่างจากหลุมเจาะเพื่อทดสอบ Unconfined Compressive Strength จำนวน 3 ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ยเท่ากับ $3,187 \text{ kN/m}^2$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่ใช้ในการออกแบบเดิม จึงตัดสินใจเปลี่ยนแปลงการออกแบบโดยใช้ค่า $\sigma_u = 3,000 \text{ kN/m}^2$ ดังนั้น Working Bond Stress (τ_u) ที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับ 100 kN/m^2 พร้อมคำนวณส่วนความยาวพันธะของสมอยึดพื้นใหม่จะมีค่าเท่ากับ 9.97 เมตร หรือ 10.00 เมตร บนพื้นฐานของแรงดึงของสมอยึดพื้นแต่ละหลุมเท่ากับ 470 kN

ส่วนความยาวพันธะ (Bond Length) ที่ประเมินได้มีความยาว 10 เมตร เป็นส่วนที่เป็นลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวเปลือยจำนวน 4 เส้น สัมผัสกับปูนเกรทโดยตรง และจำเป็นต้องมี Centralizer เพื่อให้ลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวแยกกันและอยู่ตรงกลางหลุมเจาะ โดยกำหนด Centralizer จำนวน 5 จุด แต่ละจุดอยู่ห่างกันประมาณ 2.20 m

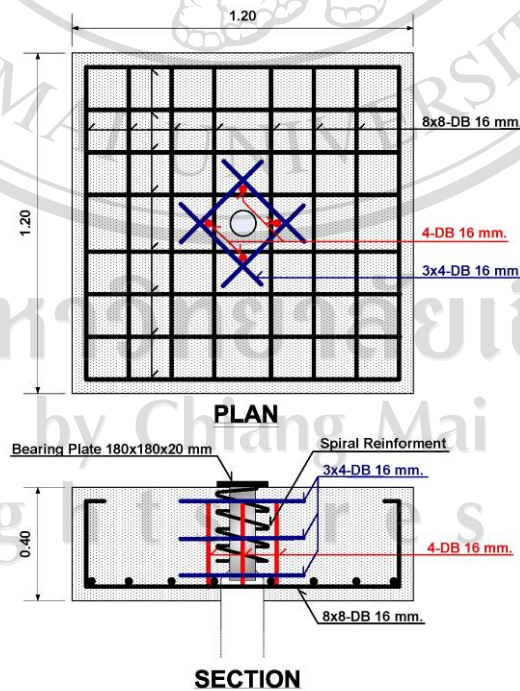
ส่วนความยาวอิสระ (Free Length) เป็นส่วนที่ต่อจากส่วนความยาวพันธะ โดยสามารถยึดได้อย่างอิสระเมื่อรับแรงดึง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีปลอกหุ้มลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวตลอดส่วนความยาวอิสระ จากการประเมินส่วนความยาวอิสระจากรูปร่างของมวลดินทดลอง โดยต้องขยาดะลูชั้นดินอ่อน G1A มากกว่า 1.50 เมตร พบว่าส่วนความยาวอิสระต้องมีความยาวเท่ากับ 16.25 เมตร วัดต่อจากส่วนความยาวพันธะถึงผิวดิน และเผื่อความยาวไว้สำหรับการดึงประมาณ 1.40 เมตร

ดังนั้นความยาวรวมของสมอยึดพื้นเท่ากับ 27.65 เมตร ซึ่งเป็นส่วนความยาวพันธะ ส่วนความยาวอิสระ และส่วนความยาวเผื่อ

5.2.1.8 การออกแบบส่วนหัวของสมอยึดพื้น

ส่วนหัวของสมอยึดพื้นประกอบด้วย แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก, Bearing Plate และ Wedge Plate โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Wedge Plate เป็นแท่งเหล็กทรงกระบอก มีจำนวน 4 รู เพื่อให้ลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวสอดผ่านได้ พร้อมมีลิ้มเพื่อล็อกลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวแต่ละเส้นเมื่อแรงดึงได้ตามที่ต้องการ
- Bearing Plate เป็นแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีเหล็กเสริมเป็นรูปเกลียวด้านล่าง ทำหน้าที่รับแรงจาก Wedge Plate แล้วถ่ายแรงไปยังแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก
- แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก ออกแบบให้มีขนาด 1.20x1.20x0.40 เมตร ทำหน้าที่รับแรงทั้งระบบของสมอยึดพื้นแล้วถ่ายแรงไปยังพื้นดิน ซึ่งมี Allowable Bearing Capacity ประมาณ 500 kN/m^2 โดยแรงดึงของสมอยึดพื้นแต่ละหลุมประมาณ 470 kN ดังนั้นหน่วยแรงที่ถ่ายไปยังพื้นดินจะมีค่าเท่ากับ 326 kN/m^2 ดังนั้นจึงเชื่อว่าผิวดินจะสามารถรับหน่วยแรงดังกล่าวได้ นอกจากนี้ได้มีการออกแบบการเสริมเหล็กเพื่อให้แผ่นคอนกรีตรับแรงแข็งแกร่งพอที่จะสามารถรับแรงดังกล่าวได้ ซึ่งรูปแบบแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าวได้ทดลองใช้งานจริงในการทดสอบดึงสมอยึดพื้นแล้ว พบว่าสามารถรับแรงขนาด 500 kN ได้ รายละเอียดของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามรูป 5.20



รูป 5.20 รายละเอียดแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรง

5.2.1.9 เครื่องมือตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้น

การตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้นต้องการศึกษาเกี่ยวกับ การรับแรงของสมอยึดพื้น แรงดันน้ำใต้ดิน และการเคลื่อนตัวของมวลดิน ตำแหน่งเครื่องมือตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้นตามรูป 5.19 โดยรายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือดังต่อไปนี้

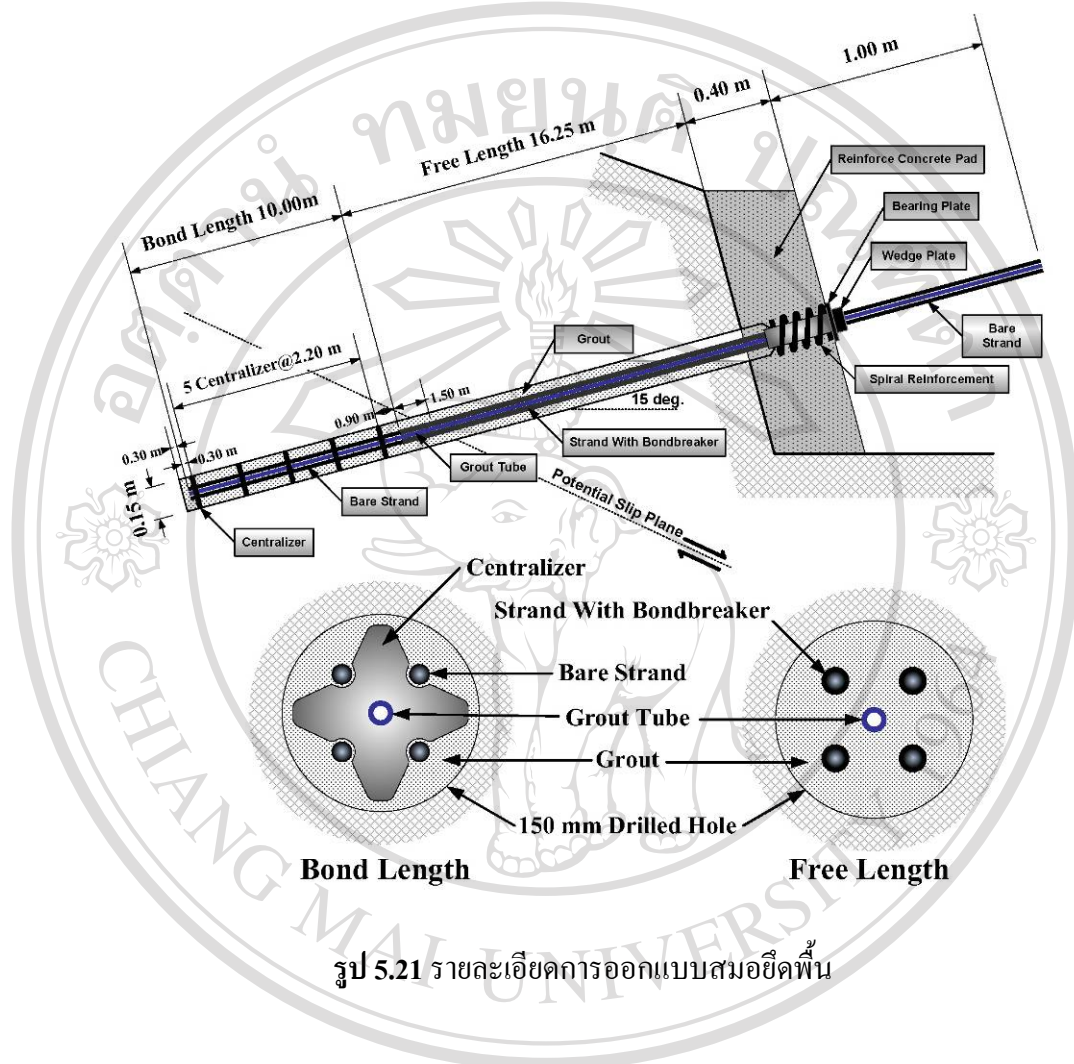
- 100 tons Capacity Center-Hole Load Cell (ใช้สัญลักษณ์ L) แบบ Strain Gauge จำนวน 14 ชุด เพื่อตรวจติดตามพฤติกรรมการรับแรงของสมอยึดพื้น โดยวางแผนติดตั้งที่ส่วนหัวของสมอยึดพื้นที่หลุม E3, K3, F6, L6, E9, K9, F12, L12, E15, K15, F18, L18, E21 และ K21 ความถี่ในการตรวจวัดข้อมูลประมาณ 8 ครั้งต่อเดือน
- Vibrating Wire Piezometer (ใช้สัญลักษณ์ P) จำนวน 3 หลุม เพื่อตรวจติดตามแรงดันน้ำใต้ดินในชั้นดินอ่อนที่มีโอกาสพังทลาย โดยวางแผนติดตั้งในชั้น G1A ซึ่งอยู่ลึกประมาณ 7.50 เมตร จากผิวดิน ตำแหน่งตรงกลางของมวลดินทดลองในชั้นที่ 6, 12 และ 18 ความถี่ในการตรวจวัดข้อมูลประมาณ 8 ครั้งต่อเดือน
- Inclinator (ใช้สัญลักษณ์ I) จำนวน 1 หลุม และ Shear Monitor (ใช้สัญลักษณ์ S) จำนวน 2 หลุม เพื่อตรวจติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของมวลดินทดลอง โดย Inclinator วางแผนติดตั้งในหลุมเจาะลึกประมาณ 20 เมตร ในชั้นที่ 13 ความถี่ในการตรวจวัดข้อมูลประมาณ 4 ครั้งต่อเดือน และ Shear Monitor วางแผนติดตั้งในหลุมเจาะลึกประมาณ 15 เมตร ในชั้นที่ 7 และ 19 ความถี่ในการตรวจวัดข้อมูลประมาณ 8 ครั้งต่อเดือน โดยเชื่อว่าตำแหน่งกันหลุมเจาะติดตั้งเครื่องมือดังกล่าวไม่มีการเคลื่อนตัว
- หมุดวัดการเคลื่อนตัวตรวจวัดโดยกล้องสำรวจ (ใช้สัญลักษณ์ X) จำนวน 9 จุด เพื่อตรวจติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของมวลดินทดลอง โดยวางแผนติดตั้งหมุดวัดในชั้นที่ 1, 6 และ 12 ชั้นละจำนวน 3 จุด ความถี่ในการตรวจวัดข้อมูลประมาณ 1 ครั้งต่อเดือน

5.2.1.10 สรุปการออกแบบสมอยึดพื้นเพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดของมวลดินทดลอง

การออกแบบสมอยึดพื้นเพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดของมวลดินประมาณ $20,000 \text{ m}^3$ ให้มีสัดส่วนความปลอดภัยมากกว่า 1.20 และมีอายุการใช้งานสมอยึดพื้นมากกว่า 1 ปี โดยมวลดินดังกล่าวเอียงเพดานประมาณ 30 องศา ซึ่งระนาบที่มีโอกาสพังทลายเป็นชั้นดินเหนียวสีเขียวที่เรียกว่า ชั้น G1A ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงเฉือนค่อนข้างต่ำ อยู่ลึกประมาณ 10 เมตร จากผิวดินที่ปรับสภาพเรียบร้อยแล้ว จากการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดโดยไม่เสริมเสถียรภาพด้วยสมอยึดพื้นด้วยวิธี Limit Equilibrium ตามหลักการของ Morgenstern-Price พร้อมกำหนดระดับน้ำเหนือระนาบที่มีโอกาสพังทลายประมาณ 2.50 เมตร ด้วยการใช้ r_u เท่ากับ 0.125 พบว่าสัดส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 0.31 บ่งบอกให้ทราบว่าหากไม่เสริมเสถียรภาพด้วยวิธีการใด มวลดินดังกล่าวจะเกิดการพังทลายอย่างแน่นอน ดังนั้นโครงการนี้จึงออกแบบสมอยึดพื้นเพื่อเสริมเสถียรภาพมวลดินดังกล่าวพร้อมติดตั้งเครื่องมือตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้นและมวลดินทดลอง สามารถสรุปการออกแบบได้ดังต่อไปนี้

- แรงดึงของสมอยึดพื้นเท่ากับ 470-500 kN ต่อหลุม
- จำนวนหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นจำนวน 192 หลุม
- รูปแบบการติดตั้งหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นจำนวน 16 แถว แถวละ 12 หลุม ระยะห่างระหว่างแถวเท่ากับ 1 เมตร แต่ละแถวติดตั้งแบบสลับฟันปลา
- เจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้นด้วยเครื่องเจาะแบบปั่นใช้หัวเจาะแบบ Drag Bit ทำความสะอาดหลุมเจาะด้วยแรงลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ 150 มิลลิเมตร ความลึก 26.55 เมตร ความเอียงของหลุมเจาะ 15 องศาจากแนวราบ
- เลือกใช้ลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวตามมาตรฐาน ASTM A416 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้นต่อหลุม รับแรงดึงสูงสุดได้ 1,043 kN
- ความยาวรวมของสมอยึดพื้นเท่ากับ 27.65 เมตร เป็นส่วนความยาวพันธะเท่ากับ 10.00 เมตร ส่วนความยาวอิสระเท่ากับ 16.25 เมตร และความยาวเผื่อสำหรับการดึงเท่ากับ 1.40 เมตร
- ปูนเกราที่เป็น Portland Cement Type I ผสมน้ำสะอาด ด้วยสัดส่วน W:C Ratio เท่ากับ 0.45 ใส่สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัวสำหรับงานเกราท์ ในอัตราส่วน 500 กรัม ต่อปูนซีเมนต์ 50 กิโลกรัม
- แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงที่ผิวดินขนาด $1.20 \times 1.20 \times 0.40$ เมตร

สรุปการออกแบบสมอยึดพื้นตามรูป 5.21



รูป 5.21 รายละเอียดการออกแบบสมอยึดพื้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5.2.2 ขั้นตอนการดำเนินการติดตั้งสมอยึดพื้น

5.2.2.1 การเตรียมพื้นที่ก่อนการติดตั้งสมอยึดพื้น

ลักษณะของชั้นดินบริเวณพื้นที่โครงการเป็นชั้นดินได้ถ่านที่เรียกว่า Grey Claystone ฝั่งเทพาทิศตะวันออกหรือกลางบ่อเหมือง โดยส่วนบนของมวลดินทดลองที่ระดับ +291 ลงไป มีความเอียงของชั้นดินประมาณ 20 องศา และส่วนล่างของมวลดินทดลองที่ระดับ +247 ขึ้นไป มีความเอียงของชั้นดินประมาณ 25 องศา ที่ได้ชั้นถ่านประมาณ 5.00 เมตร เป็นชั้นดินสีส้มซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะเพื่อการขีปน และใต้ชั้นดินสีส้มประมาณ 10.00 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวสีเขียวที่เรียกว่า Green Clay ซึ่งเป็นระนาบที่มีโอกาสพังทลาย

การเตรียมพื้นที่ก่อนการติดตั้งสมอยึดพื้น ดำเนินการ โดยใช้เครื่องจักรปรับเชิงลาดตามชั้นดินสีส้ม หลังจากนั้นจึงทำการปรับพื้นที่เป็นขั้นบันได โดยสูงขั้นละประมาณ 1.20 เมตร ปรับให้เอียงรับสมอยึดพื้นประมาณ 75 องศาจากแนวราบ โดยขุดให้มีระยะราบของแต่ละขั้นประมาณ 3.00 เมตร รายละเอียดตามรูป 5.22



รูป 5.22 รายละเอียดการเตรียมพื้นที่ก่อนการติดตั้งสมอยึดพื้น

5.2.2.2 การเจาะหลุมสำหรับติดตั้งสมอยึดพื้น

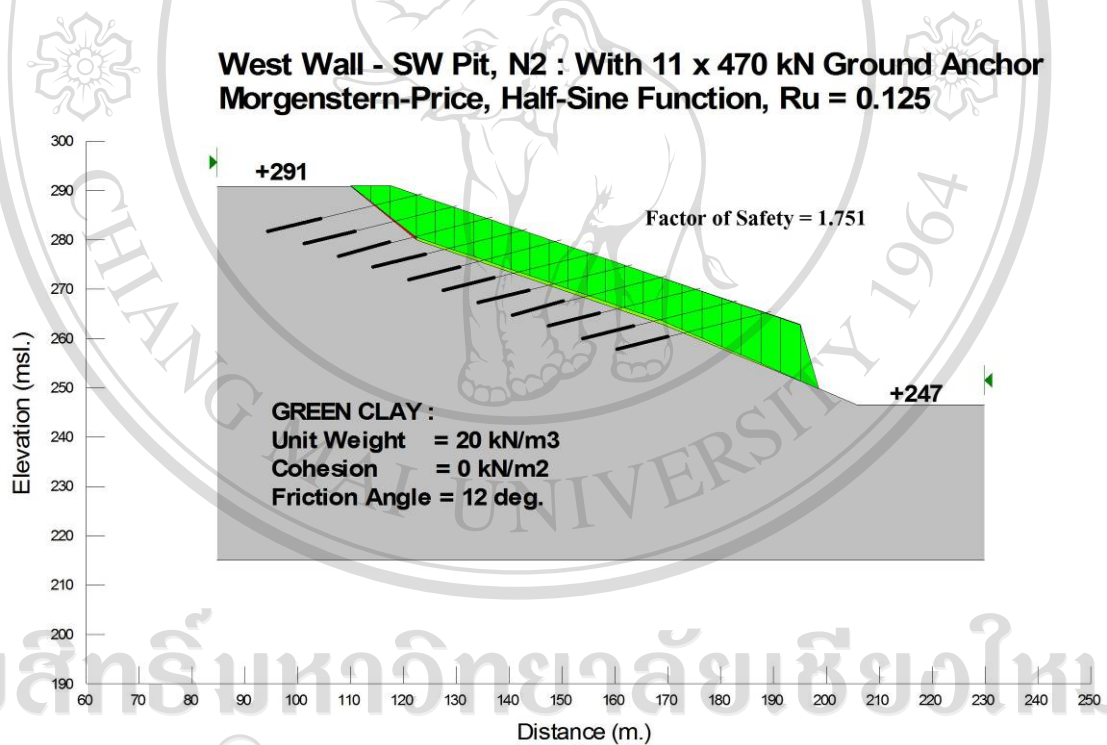
เครื่องเจาะเป็นแบบปั่น โดยใช้หัวเจาะแบบ Drag Bit ทำความสะอาดหลุมเจาะด้วยแรงลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะประมาณ 150 มิลลิเมตร ความเอียงของหลุมเจาะประมาณ 15 องศา จากแนวราบ ความลึกของหลุมเจาะประมาณ 26.55 เมตร โดยวางแผนเป็นหลุมทดสอบสมอยึดพื้น จำนวน 8 หลุม และหลุมติดตั้งสมอยึดพื้นจำนวน 192 หลุม โดยดำเนินการเจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้น ควบคู่ไปกับการเตรียมพื้นที่ กล่าวคือเมื่อเตรียมพื้นที่จากด้านบนระดับ +291 ไปจนถึงประมาณ ระดับ +270 หรือเตรียมพื้นที่ได้ประมาณ 16 ชั้น จะเริ่มดำเนินการเจาะหลุมทันที

การเจาะหลุมทดสอบสมอยึดพื้นมีวัตถุประสงค์หลักคือยืนยันค่า Maximum Working Tension ด้วยการทดสอบที่เรียกว่า Predesign Load Test พร้อมกันนี้ได้ดำเนินการทดสอบสมรรถนะ (Performance Test) ของสมอยึดพื้น ผลพลอยได้คือทำความเข้าใจกับเทคนิคการเจาะและติดตั้งสมอยึดพื้น หากมีปัญหาอุปสรรคในระหว่างการดำเนินการจะสามารถแก้ไขได้ทันในการเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นจริง จากการสังเกตสภาพการณ์ในสนามพบว่าสภาพของผนังหลุมเจาะแห้ง และไม่มีแผ่น ดินเหนียวบางเคลือบที่ผนังหลุมเจาะ ดังนั้นจึงเชื่อว่าวิธีการเจาะดังกล่าวน่าจะเหมาะสมกับโครงการนี้ และหากใส่สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัวของปูนเกรตท์ จึงน่าจะทำให้ Bond Strength ระหว่างปูนเกรตท์ กับผนังหลุมเจาะสูงกว่าค่าที่เคยทดสอบมา สภาพภายในหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นตามรูป 5.23



รูป 5.23 สภาพภายในหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้น

เมื่อดำเนินการเตรียมพื้นที่ไปจนถึงประมาณชั้นที่ 22 ซึ่งเป็นฤดูฝน พบว่าเหลือปริมาณงานขุดขนดินอีกจำนวนมาก คาดว่าเครื่องจักรชุดที่เตรียมพื้นที่ปัจจุบันไม่สามารถดำเนินการได้ทันตามกำหนด ดังนั้นจึงตัดสินใจลดจำนวนหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นเหลือ 176 หลุม จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลดินทดลองใหม่ โดยลดจำนวนชั้นของสมอยึดพื้นจาก 24 ชั้น เหลือเพียง 22 ชั้น และสถานะของการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเหมือนเดิมทุกอย่าง พบว่ามวลดินมีสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.75 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเดิม ทั้งนี้เนื่องจากมวลดินที่ลดลงประมาณ $1,800 \text{ m}^3$ ทำให้แรงในส่วนที่จะทำให้เชิงลาดพังทลายมีค่าลดลง ดังนั้นแรงดึงของสมอยึดพื้นที่จำเป็นต้องใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพจึงลดลง ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับของเดิม ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลดินที่เสริมเสถียรภาพด้วยสมอยึดพื้นที่มีจำนวน 22 ชั้นตามรูป 5.24



รูป 5.24 ผลวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดมวลดินที่มี 22 ชั้น

5.2.2.3 การติดตั้งสมอยึดพื้นในหลุมเจาะ

สมอยึดพื้นที่จะติดตั้งผลิตสำเร็จมาจากโรงงานตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ข้างต้น กล่าวคือ เป็นส่วนความยาวพันธะ (Bond Length) 10.00 เมตร ส่วนความยาวอิสระ (Free Length) 16.25 เมตร และส่วนความยาวเพื่อสำหรับการดึง 1.40 m. ตลอดความยาวของสมอยึดพื้นมีท่อเกรทที่ยาวตลอด อยู่ตรงกลางเพื่ออัดฉีดปูนเกรทจากกันหลุมขึ้นมาที่ปากหลุม โดยท่อเกรทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 16 มิลลิเมตร รับแรงดันของปูนเกรทที่ได้สูงสุดประมาณ 1 MPa

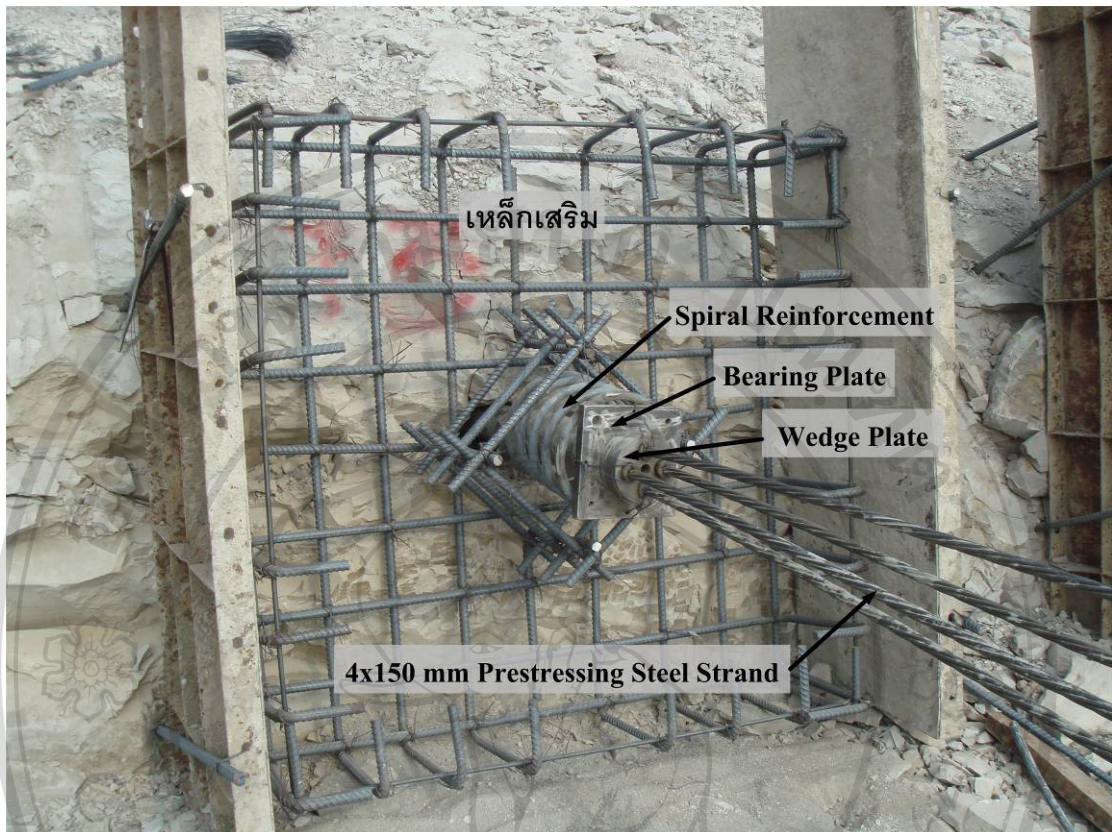
ส่วนความยาวพันธะเป็นลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวเปลือยสัมผัสกับปูนเกรท โดยแรงดึง ในลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวจะถ่ายไปยังปูนเกรทโดยมีแรงยึดหน่วงระหว่างลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียว กับปูนเกรทที่ด้านอยู่ และแรงดึงดังกล่าวจะถูกถ่ายไปยังผนังหลุมเจาะโดยมีแรงต้านจากแรงยึดหน่วง ระหว่างปูนเกรทกับผนังหลุมด้านอยู่ ส่วนความยาวพันธะมี Centralizer จำนวน 5 จุด ห่างกัน จุดละประมาณ 2.20 เมตร เพื่อให้สมอยึดพื้นติดตั้งอยู่ประมาณกลางหลุมเจาะพอดี

ส่วนความยาวอิสระเป็นลวดเหล็กกลุ่มดีเกลียวหุ้มด้วยปลอกพลาสติก เพื่อให้ลวดเหล็ก กลุ่มดีเกลียวสามารถยืดตัวขณะรับแรงดึงได้อย่างอิสระ และตลอดส่วนความยาวอิสระจะถูกหุ้มด้วย ปูนเกรทจนเกือบเต็มหลุมเจาะ

ส่วนหัวของสมอยึดพื้นเป็นส่วนที่ต่อจากส่วนความยาวอิสระ โดยจะมีปลอกเหล็กทะลุ แผ่นคอนกรีตรับแรงเพื่อให้สมอยึดพื้นลอดผ่านได้ และเหล็กเสริมรูปเกลียวเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ให้แผ่นคอนกรีตรับแรง และส่วนบนสุดเป็นแผ่นเหล็กรับแรง (Bearing Plate) ขนาด 180x180x20 มิลลิเมตร เพื่อรับแรงจาก Wedge Plate โดยตรง แล้วถ่ายแรงไปยังแผ่นคอนกรีตรับแรงต่อไป

ปูนเกรทที่เป็น Portland Cement Type I ผสมกับน้ำสะอาด โดยใช้ W:C Ratio เท่ากับ 0.45 ใส่สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัวสำหรับงานเกรทในสัดส่วน 500 กรัม ต่อปูนซีเมนต์ 50 กิโลกรัม พร้อมใช้เครื่องกวนตลอดเวลาที่ดำเนินการเพื่อให้ปูนเกรทเป็นเนื้อเดียวกัน และต้องเตรียม ส่วนผสมของปูนเกรทให้เพียงพอสำหรับการอัดฉีดปูนเกรทให้เต็มหลุมในครั้งเดียว

เมื่อตรวจสอบสภาพของสมอยึดพื้นเรียบร้อยแล้ว จึงนำสมอยึดพื้นใส่เข้าไปในหลุมเจาะ โดยใช้แรงงานถึงประมาณ 12 คน เนื่องจากสมอยึดพื้นมีความยาว 27.65 เมตร มีน้ำหนักประมาณ 120 กิโลกรัม จากนั้นอัดฉีดปูนเกรทผ่านท่อเกรทไปยังกันหลุม ให้ปูนเกรทอัดขึ้นมาจากกันหลุม มายังปากหลุมจนกระทั่งเกือบเต็มปากหลุม แล้วจึงก่อสร้างแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแบบ ที่ออกแบบไว้ โดยแผ่นคอนกรีตรับแรงมีขนาดประมาณ 1.20x1.20x0.40 เมตร และผิวของ แผ่นคอนกรีตรับแรงต้องเสมอกับ Bearing Plate พอดี รายละเอียดของการติดตั้งสมอยึดพื้นตามรูป 5.25 ขึ้นตอนสุดท้ายเทแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหนาประมาณ 5 เซนติเมตร ปิดทับหน้าผิวดินทั้งหมด เพื่อป้องกันน้ำฝนซึมเข้ามวลดิน พร้อมขุดร่องระบายน้ำด้านบนเพื่อป้องกันน้ำจากด้านบน

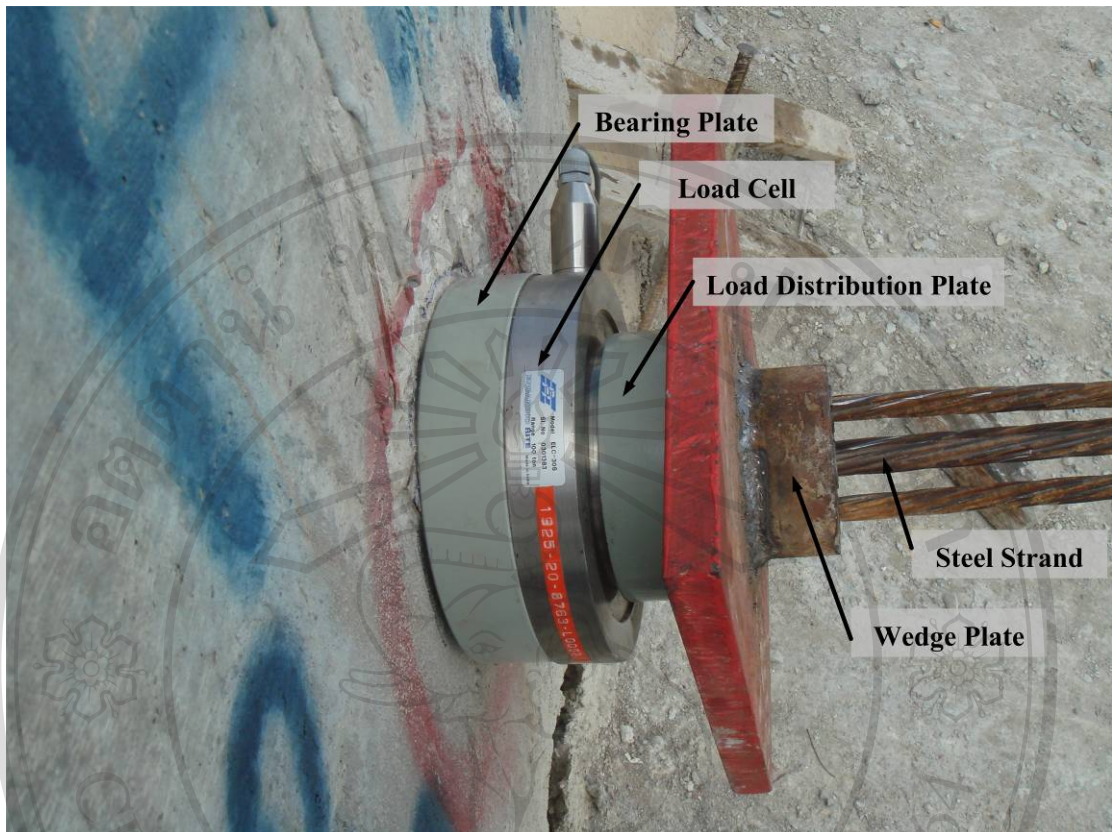


รูป 5.25 การติดตั้งสมอยึดพื้นที่ปากหลุมเจาะ

5.2.2.4 การติดตั้งเครื่องมือตรวจติดตามสมอยึดพื้น

เครื่องมือตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้นประกอบด้วย Center-Hole Load Cell, Vibrating Wire Piezometer, Inclinator, Shear monitor และหมุดวัดการเคลื่อนตัว

Center-Hole Load Cell ใช้สำหรับวัดแรงดึงของสมอยึดพื้น โดยสามารถติดตั้งได้จำนวน 12 จุด ที่หลุม E3, K3, F6, L6, E9, K9, F12, L12, E15, K15, F18 และ E19 โดย Load Cell ที่ใช้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ Bearing Plate, Load Cell และ Load Distribution Plate ดำเนินการติดตั้งโดยวาง Bearing Plate ของ Load Cell แนบกับ Bearing Plate ของสมอยึดพื้น จากนั้นวางตัว Load Cell แล้ววางทับด้วย Load Distribution Plate โดยมีแผ่นเหล็กทับอีกชั้นหนึ่ง จากนั้นเป็น Wedge Plate ของสมอยึดพื้นอยู่ชั้นนอกสุด โดยสอดลวดเหล็กกลุ่มตีเกลียวทะลุผ่านส่วนประกอบทั้งหมด และส่วนประกอบทั้งหมดต้องอยู่ประมาณตรงกลางหลุมพอดี รายละเอียดการติดตั้ง Load Cell ที่ส่วนหัวของสมอยึดพื้นตามรูป 5.26 การตรวจวัดข้อมูลแรงดึงของสมอยึดพื้นใช้ Readout Unit ต่อเชื่อมกับสายสัญญาณที่ต่อออกมาจาก Load Cell



รูป 5.26 การติดตั้ง Load Cell เพื่อตรวจติดตามพฤติกรรมรับแรงของสมอยึดพื้น

Vibrating Wire Piezometer ใช้สำหรับวัดแรงดันน้ำในระนาบที่มีโอกาสพังทลาย โดยติดตั้งจำนวน 3 หลุม ในชั้นที่ 6, 12 และ 20 โดยติดตั้งในหลุมเจาะแนวตั้งที่ระดับความลึกประมาณ 7.50 เมตร จากผิวดิน ซึ่งเมื่อเจาะหลุมได้ความลึกที่ต้องการแล้วจึงทำการหย่อนหัว Piezometer ลงไปในหลุมเจาะให้คล่อมระนาบที่มีโอกาสพังทลายโดยต่อสายนำสัญญาณขึ้นมาที่ปากหลุม จากนั้นเททรายกรวดให้ท่วมหัว Piezometer แล้วเท Bentonite อัดเม็ดลงไปให้มีความหนาประมาณ 0.50 เมตร เพื่อป้องกันน้ำจากชั้นดินอื่นเข้าในชั้นดินที่ต้องการวัดแรงดันน้ำได้ดิน สุดท้ายเกรทส่วนที่เหลือของหลุมเจาะให้เต็ม การตรวจวัดข้อมูลแรงดันน้ำได้ดินใช้ Vibrating Wire Readout Unit ต่อเชื่อมกับสายนำสัญญาณที่ปากหลุมเจาะ

Inclinometer ใช้สำหรับวัดการเคลื่อนตัวได้ดินของมวลดินทดลอง โดยติดตั้งจำนวน 1 หลุม ในชั้นที่ 13 ดำเนินการติดตั้งโดยเจาะหลุมในแนวตั้งลึกประมาณ 20.00 เมตร จากนั้นหย่อนท่อซึ่งมีร่อง 2 แนวซึ่งตั้งฉากกันสำหรับบังคับทิศทางของ Inclinometer Probe จากนั้นเกรทช่องว่างระหว่างท่อและผนังหลุมเจาะด้วยส่วนผสม ปูนซีเมนต์ Bentonite และน้ำ ในอัตราส่วน 8:1:8 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อส่วนผสมแห้งแล้วจะมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับ Grey Claystone ส่วนการตรวจวัดข้อมูลใช้

Inclinometer Probe หย่อนลงไปในกลุ่มทั้ง 2 ทิศทาง โดยแกน A+ ทิศทางเข้าหาเชิงลาด และแกน B+ ทิศทางขวางเชิงลาด บันทึกข้อมูลด้วย Readout Unit ทุกระยะ 1.00 m

Shear Monitor ใช้สำหรับวัดการเคลื่อนตัวได้ดินของมวลดิน โดยติดตั้งจำนวน 2 กลุ่ม ในชั้นที่ 7 และ 18 ดำเนินการติดตั้งโดยเจาะหลุมในแนวตั้งลึกประมาณ 15.00 เมตร จากนั้น หย่อนลูกตุ้มซึ่งทำหน้าที่เป็นสมอยึดอยู่ในชั้นดินที่ไม่มีการเคลื่อนตัว โดยต่อกับเส้นลวดหุ้มด้วย ปลอกพลาสติกดึงมาขึงปากหลุมเจาะ เพื่อให้เส้นลวดสามารถยึดตัวได้อย่างอิสระขณะรับแรงดึง จากนั้นอัดดินปูนเกรทที่ปิดหลุมทั้งหมด สุดท้ายติดตั้งหัววัดระยะการยึดตัวของเส้นลวดที่ด้านบนสุด การตรวจวัดข้อมูลกระทำโดยอ่านระยะยึดตัวของเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลง

หมุดวัดการเคลื่อนตัวใช้สำหรับวัดการเคลื่อนตัวผิวดินของมวลดิน โดยติดตั้งหมุดตั้งเป้า สำหรับวัดข้อมูลด้วยกล้องสำรวจจำนวน 9 จุด ในชั้นที่ 1, 6 และ 13 ชั้นละ 3 จุด เหนือในให้มั่นคง ด้วยคอนกรีต การตรวจวัดข้อมูลใช้กล้องสำรวจ ซึ่งอยู่ห่างออกไปทางทิศตะวันออกของพื้นที่ ประมาณ 1.20 km

5.2.2.5 การทดสอบและดึงสมอยึดพื้น

รูปแบบการดึงและทดสอบสมอยึดพื้นตามคำแนะนำของ FHWA (1999) มี 3 ประเภท คือ Predesign Load Test, Performance Test และ Proof Test

Predesign Load Test เป็นการทดสอบสมอยึดพื้นในกลุ่มทดสอบเพื่อหาค่า Maximum Working Tension ดำเนินการทดสอบโดยขึ้นแรงเป็นขั้นที่ 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 kN โดยรักษาระดับแรงแต่ละขั้นให้คงที่ แล้วบันทึกค่าการยึดตัวของสมอยึดพื้นที่เวลา 0, 1, 5, 10, 20, 30 และ 60 นาที จากนั้นนำข้อมูลไปเขียนกราฟระหว่าง การเคลื่อนตัว (Displacement) และแรงที่ใช้ (Apply Load) เรียกกราฟดังกล่าวว่า Load-Displacement Curve และเขียนกราฟ ระหว่างเวลาเป็น Log Scale กับระยะการเคลื่อนตัว (Displacement) ของแรงแต่ละขั้น เรียกกราฟ ดังกล่าว Creep Curve จากนั้นประเมินระยะการเคลื่อนตัวต่อช่วง 1 Log Time เรียกว่า Creep Coefficient (α) นำข้อมูล Creep Coefficient ไปเขียนกราฟร่วมกับแรงแต่ละขั้น จะสามารถประเมิน Critical Creep Tension (T_c') ซึ่งก็คือจุดเปลี่ยนความโค้งของกราฟนั่นเอง

เกณฑ์ยอมรับคือการยึดตัวของสมอยึดพื้นช่วง 1-72 ชั่วโมง ณ แรงขึ้นดังกล่าวต้องมีค่า ไม่เกิน 0.0002 เท่าของความยาวอิสระของสมอยึดพื้น สุดท้ายประเมิน Maximum Working Tension ได้โดยมีค่าเท่ากับ $0.8T_c'$

Performance Test เป็นการทดสอบสมรรถนะของสมอยึดพื้นเพื่อทดสอบ ความสามารถในการรับแรง พฤติกรรมการยึดตัว และความเพียงพอของส่วนความยาวอิสระ ดำเนินการทดสอบ

โดยการขึ้นแรง (Loading) และลดแรง (Unloading) จำนวนหลายรอบ แรงสูงสุดของการทดสอบคือ 1.33 เท่าของแรงที่ออกแบบ การทดสอบที่แรงสูงสุดให้คงแรงไว้นานประมาณ 10 นาที ในการทดสอบบันทึกข้อมูลแรงที่ใช้ (Apply Load) กับการยืดตัวของสมอยึดพื้น (Movement) โดยมีเกณฑ์ยอมรับคือ Apparent Free Length ต้องอยู่ในช่วง Minimum Apparent Length หรือ 80% ของส่วนความยาวอิสระ และ Maximum Apparent Length หรือ 100% ของส่วนความยาวอิสระ บวก 50% ของส่วนความยาวพันธะ

Proof Test เป็นการทดสอบพิสูจน์สมอยึดพื้น ดำเนินการทดสอบโดยการขึ้นแรง (Loading) และลดแรง (Unloading) จำนวนรอบเดียว โดยแรงสูงสุดของการขึ้นแรงคือ 1.33 เท่าของแรงที่ออกแบบ การทดสอบที่แรงสูงสุดให้คงแรงไว้นานประมาณ 10 นาที บันทึกข้อมูลและใช้เกณฑ์ยอมรับเหมือนกับ Performance Test

การเจาะหลุมทดสอบสมอยึดพื้นจำนวน 8 หลุม มีวัตถุประสงค์หลักคือการทำควมคุ้นเคยกับเทคนิคการเจาะหลุม เทคนิคการติดตั้งสมอยึดพื้น เทคนิคการดึงสมอยึดพื้น และเทคนิคการทดสอบสมอยึดพื้น โดยดำเนินการเหมือนกับการเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นทุกประการ ในการดำเนินการจริงสามารถดำเนินการทดสอบ Predesign Load Test จำนวน 3 หลุม คือ T3, T4 และ T5 และสามารถดำเนินการทดสอบ Performance Test จำนวน 1 หลุม คือ T5

การเจาะหลุมติดตั้งสมอยึดพื้นจำนวน 176 หลุม โดยดำเนินการทดสอบสมอยึดพื้นแบบ Performance Test จำนวน 12 หลุมคือ E3, K3, F6, L6, E9, K9, F12, L12, E15, K15, F18 และ E19 จากนั้นดำเนินการดึงสมอยึดพื้นแล้วปล่อยด้วยแรงดึงออกแบบ การดึงสมอยึดพื้นในระยะแรกพบว่าผิวดินที่รับแรงจากแผ่นคอนกรีตเกิดการทรุดตัวเมื่อรับแรงมากกว่าประมาณ 300 kN เนื่องจากผิวดินดังกล่าวเสียสภาพทำให้รับแรงแบกทานได้น้อยลง ดังนั้นจึงตัดสินใจดึงสมอยึดพื้นด้วยแรงประมาณ 300 kN ไว้ก่อน (Prestressing) พบว่าหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นไม่สามารถรับแรงได้จำนวน 39 หลุม ทำให้สมอยึดพื้นสามารถใช้งานได้จำนวน 137 หลุม จากนั้นจึงก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยรับแรงในลักษณะเสาและคานเพื่อค้ำยันแผ่นคอนกรีตทั้งหมดในลักษณะโครงข่าย รายละเอียดตามรูป 5.27



รูป 5.27 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยรับแรง

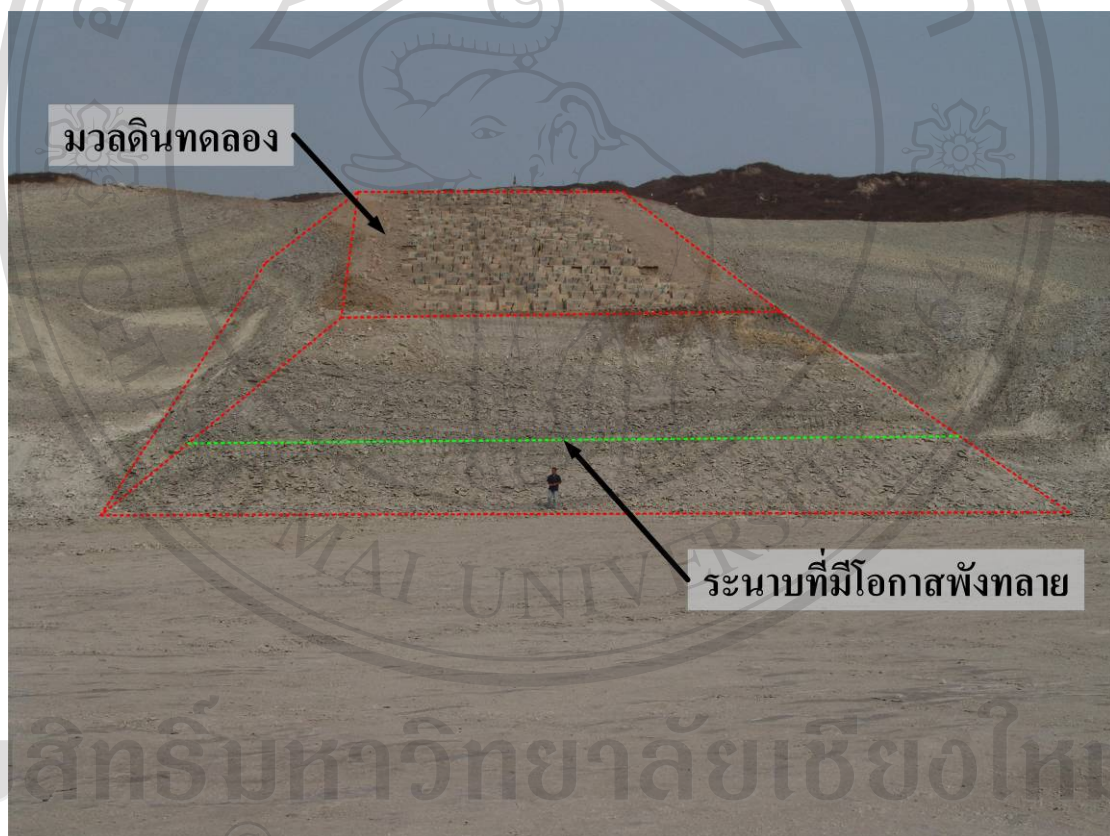
หลังจากก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยรับแรงเสร็จแล้ว จึงดำเนินการดึงสมอยึดพื้นด้วยแรงที่มากกว่าแรงออกแบบเพื่อชดเชยแรงที่หายไปเนื่องจากหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่เสียหายไป โดยมวลดินทั้งหมดต้องการแรงดึงจากสมอยึดพื้นทั้งหมด $82,720 \text{ kN}$ ดังนั้นสมอยึดพื้นที่เหลือต้องดึงด้วยแรงหลุมละประมาณ 600 kN จึงจะทำให้แรงทั้งหมดเท่าเดิม จากการดำเนินการดึงสมอยึดพื้นจริงพบว่า ไม่สามารถล๊อคแรงได้ตามที่ต้องการทั้งหมด โดยสามารถล๊อคแรงดึงในสมอยึดพื้นได้เฉลี่ยหลุมละ 400 kN เท่านั้น จึงดำเนินการประเมินเสถียรภาพใหม่พบว่ามวลดินมีสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.28 รายละเอียดการล๊อคแรงของสมอยึดพื้นตามรูปที่ 5.28 ซึ่งแต่ละช่องหมายถึงหลุมเจาะติดตั้งสมอยึดพื้น โดยมีตัวอักษรกำกับเพื่อแสดง เบอร์หลุมเจาะ และแรงดึงที่สามารถล๊อคสมอยึดพื้นได้จริงในสนาม

A1		C1		E1		G1		I1		K1		M1		O1	
70.00		70.00		70.00		70.00		70.00		70.00		70.00		70.00	
	B2		D2		F2		H2		J2		L2		N2		P2
	70.00		70.00		0.00		70.00		70.00		70.00		70.00		0.00
A3		C3		E3		G3		I3		K3		M3		O3	
70.00		70.00		70.00		70.00		0.00		70.00		70.00		60.00	
	B4		D4		F4		H4		J4		L4		N4		P4
	70.00		70.00		0.00		70.00		70.00		70.00		70.00		55.00
A5		C5		E5		G5		I5		K5		M5		O5	
35.00		35.00		35.00		35.00		35.00		35.00		35.00		0.00	
	B6		D6		F6		H6		J6		L6		N6		P6
	70.00		70.00		65.00		70.00		55.00		55.00		65.00		60.00
A7		C7		E7		G7		I7		K7		M7		O7	
50.00		32.50		55.00		35.00		40.00		40.00		35.00		42.50	
	B8		D8		F8		H8		J8		L8		N8		P8
	45.00		40.00		35.00		35.00		35.00		45.00		50.00		45.00
A9		C9		E9		G9		I9		K9		M9		O9	
0.00		65.00		65.00		65.00		65.00		52.50		22.50		27.50	
	B10		D10		F10		H10		J10		L10		N10		P10
	45.00		22.50		20.00		40.00		0.00		47.50		35.00		37.50
A11		C11		E11		G11		I11		K11		M11		O11	
65.00		60.00		0.00		60.00		32.50		47.50		35.00		27.50	
	B12		D12		F12		H12		J12		L12		N12		P12
	50.00		45.00		45.00		20.00		47.50		60.00		55.00		52.50
A13		C13		E13		G13		I13		K13		M13		O13	
45.00		45.00		60.00		62.50		50.00		60.00		55.00		50.00	
	B14		D14		F14		H14		J14		L14		N14		P14
	45.00		45.00		35.00		25.00		50.00		30.00		42.50		30.00
A15		C15		E15		G15		I15		K15		M15		O15	
42.50		40.00		40.00		35.00		50.00		60.00		50.00		45.00	
	B16		D16		F16		H16		J16		L16		N16		P16
	40.00		42.50		40.00		40.00		40.00		50.00		45.00		65.00
A17		C17		E17		G17		I17		K17		M17		O17	
45.00		45.00		60.00		60.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
	B18		D18		F18		H18		J18		L18		N18		P18
	65.00		65.00		60.00		50.00		0.00		0.00		0.00		0.00
A19		C19		E19		G19		I19		K19		M19		O19	
50.00		62.50		60.00		65.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
	B20		D20		F20		H20		J20		L20		N20		P20
	0.00		0.00		0.00		70.00		0.00		50.00		0.00		0.00
A21		C21		E21		G21		I21		K21		M21		O21	
0.00		0.00		0.00		0.00		35.00		0.00		0.00		0.00	
	B22		D22		F22		H22		J22		L22		N22		P22
	60.00		0.00		0.00		0.00		0.00		60.00		0.00		0.00

รูป 5.28 การลือกแรงในสมอยัดพื้น

5.2.2.6 การขุดตัดดินรอบพื้นที่

หลังจากการติดตั้งสมอยึดพื้นแล้วเสร็จ จึงดำเนินการขุดดินด้านข้างและด้านหน้าของพื้นที่ ออกจนพื้นระนาบที่มีโอกาสพังทลาย ทำให้มวลดินที่เสริมเสถียรภาพด้วยสมอยึดพื้นประมาณ $20,000 \text{ m}^3$ วางลอยอยู่บนระนาบที่มีโอกาสพังทลาย โดยไม่มีผลกระทบจากมวลดินด้านข้างและมวลดินค้ำยันด้านหน้า ซึ่งถือเป็นกรณีเลวร้ายที่สุด เนื่องจากหากนำสมอยึดพื้นไปใช้งานจริงจะไม่มี การขุดตัดดินด้านข้างและด้านหน้าออก ส่งผลให้มีแรงเสริมจากมวลดินด้านข้างและแรงค้ำยันจาก มวลดินด้านหน้า ทำให้มวลดินที่เสริมเสถียรภาพด้วยสมอยึดพื้นจริงมีเสถียรภาพดีกว่ามวลดินทดลอง รายละเอียดการขุดตัดดินรอบพื้นที่ทดลองตามรูป 5.29



รูป 5.29 สภาพมวลดินหลังการติดตั้งสมอยึดพื้น

5.2.3 ขั้นตอนการตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้น

หลังการติดตั้งสมอยึดพื้นและชุดตัดดินด้านข้างและด้านหน้าแล้วเสร็จจึงเริ่มดำเนินการตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้น โดยดำเนินการตรวจติดตามพฤติกรรมการรับแรงของสมอยึดพื้นด้วย Load Cell จำนวน 12 จุด พฤติกรรมแรงดันน้ำใต้ดินด้วย Vibrating Wire Piezometer จำนวน 3 หลุม พฤติกรรมการเคลื่อนตัวใต้ดินของมวลดินทดลองด้วย Inclinator จำนวน 1 หลุม พฤติกรรมการเคลื่อนตัวใต้ดินของมวลดินทดลองด้วย Shear Monitor จำนวน 2 หลุม และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวผิวดินของมวลดินทดลองด้วยกล้องสำรวจจำนวน 9 จุด โดยวางแผนตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้นเป็นระยะเวลา 12 เดือนจาก พฤศจิกายน 2550 ถึง ตุลาคม 2551

ตรวจติดตามพฤติกรรมการรับแรงของสมอยึดพื้นด้วยการติดตั้ง ELC-30S Strain Gage Type Center-Hole Load Cell ของบริษัท ENCARDIO RITE จำนวน 12 จุด ที่หลุมติดตั้งสมอยึดพื้น E3, K3, F6, L6, E9, K9, F12, L12, E15, K15, F18 และ E19 แล้วตรวจวัดข้อมูลด้วย Readout Unit รุ่น EDI-53 ของบริษัท ENCARDIO RITE ด้วยการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากตัว Load Cell รายละเอียดของ Readout Unit ตามรูปที่ 5.30 โดยวางแผนตรวจวัดข้อมูลด้วยความถี่ 8 ครั้งต่อเดือน รวมทั้งรวม 96 ครั้ง แต่การดำเนินการจริงสามารถตรวจวัดข้อมูลได้ทั้งหมด 140-150 ครั้ง

ตรวจติดตามพฤติกรรมของแรงดันน้ำใต้ดินด้วยการติดตั้ง Vibrating Wire Piezometer รุ่น 4500 ของบริษัท GEOKON ในระนาบที่มีโอกาสพังทลาย จำนวน 3 หลุม ที่ชั้นที่ 6 (P1_6), 12 (P2_12) และ 20 (P3_20) แล้วตรวจวัดข้อมูลด้วย Readout Unit รุ่น GK-401 ของบริษัท GEOKON ด้วยการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากตัว Vibrating Wire Piezometer รายละเอียดของ Readout Unit ตามรูป 5.31 โดยวางแผนตรวจวัดข้อมูลด้วยความถี่ 8 ครั้งต่อเดือน รวมทั้งรวม 96 ครั้ง แต่การดำเนินการจริงสามารถตรวจวัดข้อมูลได้ทั้งหมด 91 ครั้ง โดยหลุมเจาะติดตั้ง Vibrating Wire Piezometer เสียหายจำนวน 1 หลุมคือหลุม P1_6 ตั้งแต่ปลายเดือน กันยายน 2550 อย่างไรก็ตามแนวโน้มของข้อมูลต่อเนื่องจึงไม่น่ามีผลกระทบต่อการศึกษาวิจัย

ตรวจติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนตัวใต้ดินของมวลดินทดลองด้วยการติดตั้ง Inclinator จำนวน 1 หลุม ที่ชั้นที่ 13 (SWIN2) ความลึกประมาณ 20 เมตร แล้วตรวจวัดข้อมูลด้วย Readout Unit รุ่น GK-603 ของบริษัท GEOKON ด้วยการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณจาก Inclinator Probe ซึ่งจะถูกหย่อนลงไปในหลุมเจาะติดตั้ง Inclinator และบันทึกข้อมูลทุกระยะ 1 เมตร ตลอดความลึกของหลุมเจาะ รายละเอียดของ Readout Unit ตามรูป 5.32 โดยวางแผนตรวจวัดข้อมูลด้วยความถี่ 4 ครั้งต่อเดือน รวมทั้งรวม 48 ครั้ง แต่การดำเนินการจริงสามารถตรวจวัดข้อมูลได้ทั้งหมด 38 ครั้ง โดยหลุมเจาะติดตั้ง Inclinator ขาดที่ความลึกประมาณ 12 เมตร เนื่องจากการเจาะติดตั้งสมอยึดพื้นที่ระดับล่างทะลุเจอหลุมเจาะติดตั้ง Inclinator พอดี อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้นี้มีความต่อเนื่องดี



รูป 5.30 เครื่องมืออ่านข้อมูลแรงดันรุ่น EDI-53 ของบริษัท ENCARDIO RITE



รูป 5.31 เครื่องมืออ่านข้อมูลแรงดันน้ำใต้ดิน รุ่น GK-401 ของบริษัท GEOKON



รูป 5.32 เครื่องมืออ่านข้อมูลการเคลื่อนตัวได้ดินรุ่น GK-603 ของบริษัท GEOKON

ตรวจติดตามพฤติกรรม การเคลื่อนตัวได้ดินของมวลดินทดลองด้วยการติดตั้ง Shear Monitor จำนวน 2 หลุม ที่ชั้นที่ 7 (SWSN2A) และ 18 (SWSN2B) ความลึกประมาณ 15 เมตร แล้วตรวจวัดข้อมูลด้วยหัวอ่านระยะการเคลื่อนตัวได้ดินของมวลดินทดลอง ความละเอียดของหัวอ่านสามารถอ่านระยะการเคลื่อนตัวได้เป็นมิลลิเมตร โดยวางแผนตรวจวัดข้อมูลด้วยความถี่ 8 ครั้งต่อเดือน รวมทั้งหมด 96 ครั้ง แต่การดำเนินการจริงสามารถตรวจวัดข้อมูลได้ทั้งหมด 94 ครั้ง ใกล้เคียงกับที่วางแผนไว้

ตรวจติดตามการเคลื่อนตัวผิวดินของมวลดินทดลองด้วยการติดตั้งหมุดสำรวจบนฐานคอนกรีตที่มั่นคงจำนวน 9 จุด ที่ชั้นที่ 1 (SW-12, SW-13, SW-14), 6 (SW-15, SW-16, SW-17) และ 13 (SW-18, SW-19, SW-20) แล้วตรวจวัดข้อมูลด้วยกล้องสำรวจความละเอียดสูง ซึ่งจุดตั้งกล้องอยู่ห่างจากพื้นที่ทดลองประมาณ 1.20 กิโลเมตร โดยวางแผนวัดข้อมูลด้วยความถี่ 1 ครั้งต่อเดือน แต่สามารถตรวจวัดข้อมูลได้จริงจำนวน 60 ครั้ง ซึ่งมากกว่าที่วางแผนไว้มาก ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลละเอียดและแม่นยำมากขึ้น

5.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการใช้งานสมอยึดพื้น

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมอยึดพื้น และการตรวจติดตามพฤติกรรมของสมอยึดพื้น ได้แก่ ข้อมูลการทดสอบสมอยึดพื้น ข้อมูลการรับแรงของสมอยึดพื้น ข้อมูลระดับแรงดันน้ำใต้ดิน ข้อมูลการเคลื่อนตัวของมวลดินทดลอง โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะทำการวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝน เพื่อพิจารณาผลกระทบของน้ำฝนต่อพฤติกรรมของสมอยึดพื้นและเสถียรภาพของมวลดินทดลอง โดยสถานีวัดน้ำฝนตั้งอยู่ห่างจากพื้นที่โครงการประมาณ 1.50 กิโลเมตร ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้

การทดสอบสมอยึดพื้นแบบ Predesign Load Test ดำเนินการโดยตรวจวัดข้อมูล เวลาแรงดึงในสมอยึดพื้น การยืดตัวของสมอยึดพื้น และการทรุดตัวของแผ่นคอนกรีตรับแรง แล้วเขียนกราฟดังต่อไปนี้

- กราฟระหว่างการยืดตัวของสมอยึดพื้นเป็นแกนนอน กับแรงดึงในสมอยึดพื้นเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Load-Displacement Curve
- กราฟระหว่างเวลาเป็นแกนนอนแบบ Log Scale กับ การยืดตัวของสมอยึดพื้นเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Creep Curve จะสามารถคำนวณ Creep Coefficient ซึ่งก็คือระยะการยืดตัวในช่วงเวลา 1 Log Cycle
- กราฟระหว่างแรงดึงในสมอยึดพื้นเป็นแกนนอน กับ Creep Coefficient เป็นแกนนอน เรียกว่า Creep Coefficient Plot จะสามารถคำนวณ Critical Creep Tension เพื่อคำนวณหา Maximum Working Tension ได้

การทดสอบสมอยึดพื้นแบบ Performance Test ดำเนินการโดยตรวจวัดข้อมูล เวลาแรงดึงในสมอยึดพื้น การยืดตัวของสมอยึดพื้น และการทรุดตัวของแผ่นคอนกรีตรับแรง แล้วเขียนกราฟดังต่อไปนี้

- กราฟระหว่างการยืดตัวของสมอยึดพื้นเป็นแกนนอน กับแรงดึงในสมอยึดพื้นเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Load-Displacement Curve
- กราฟระหว่าง Elastic Movement และ Residual Movement เป็นแกนนอน กับกับแรงดึงในสมอยึดพื้นเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Acceptance Criteria Plot

พฤติกรรมการรับแรงของสมอยึดพื้นดำเนินการโดยตรวจวัดข้อมูล วันที่เก็บข้อมูล และแรงดึงในสมอยึดพื้น จะสามารถคำนวณร้อยละของการสูญเสียแรงดึงในสมอยึดพื้น แล้วเขียนกราฟดังต่อไปนี้

- กราฟระหว่างวันที่เก็บข้อมูลเป็นแกนนอน กับแรงดึงในสมอยึดพื้นและปริมาณน้ำฝนเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Ground Anchor Load Monitoring Plot
- กราฟระหว่างวันที่เก็บข้อมูลเป็นแกนนอน กับร้อยละของการสูญเสียแรงดึงในสมอยึดพื้นและปริมาณน้ำฝนเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Ground Anchor Load Loss Monitoring Plot

พฤติกรรมแรงดันน้ำใต้ดิน ดำเนินการโดยตรวจวัดข้อมูล วันที่เก็บข้อมูล และแรงดันน้ำใต้ดิน แล้วเขียนกราฟดังต่อไปนี้

- กราฟระหว่างวันที่เก็บข้อมูลเป็นแกนนอน กับแรงดันน้ำใต้ดินและปริมาณน้ำฝนเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Water Pressure Monitoring Plot

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวใต้ดินของมวลดินทดลองด้วยเครื่องมือ Inclinator ดำเนินการโดยตรวจวัดข้อมูล วันที่เก็บข้อมูล การเคลื่อนตัวในแนวนานเชิงลาด (A-Axis) ทุกระยะ 1.00 เมตร ตลอดความลึกหลุมเจาะ การเคลื่อนตัวในแนวขวางเชิงลาด (B-Axis) ทุกระยะ 1.00 เมตร ตลอดความลึกหลุมเจาะ แล้วเขียนกราฟดังต่อไปนี้

- กราฟระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวนานเชิงลาดเป็นแกนนอน กับความลึกเป็นแกนตั้ง เรียกว่า A-Axis Slope Movement Monitoring by Inclinator Plot จะสามารถคำนวณอัตราการเคลื่อนตัวที่แต่ละความลึกได้
- กราฟระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวขวางเชิงลาดเป็นแกนนอน กับความลึกเป็นแกนตั้ง เรียกว่า B-Axis Slope Movement Monitoring by Inclinator Plot จะสามารถคำนวณอัตราการเคลื่อนตัวที่แต่ละความลึกได้
- กราฟระหว่างวันที่เป็นแกนนอน กับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวนานเชิงลาดเป็นแกนตั้ง เรียกว่า A-Axis Rate of Movement by Inclinator Plot
- กราฟระหว่างวันที่เป็นแกนนอน กับอัตราการเคลื่อนตัวในแนวขวางเชิงลาดเป็นแกนตั้ง เรียกว่า B-Axis Rate of Movement by Inclinator Plot

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของมวลดินทดลองด้วยเครื่องมือ Shear Monitor ดำเนินการโดย
ตรวจวัดข้อมูล วันที่เก็บข้อมูล การเคลื่อนตัวของมวลดิน แล้วเขียนกราฟดังต่อไปนี้

- กราฟระหว่างวันที่เป็นแกนนอน กับ การเคลื่อนตัวของมวลดินเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Slope Movement Monitoring by Shear Monitor Plot จะสามารถคำนวณอัตราการเคลื่อนตัวของมวลดินทดลอง

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของผิวดินของมวลดินทดลองด้วยกล้อง ดำเนินการโดยตรวจวัดข้อมูล
วันที่เก็บข้อมูล การเคลื่อนตัวของมวลดิน แล้วเขียนกราฟดังต่อไปนี้

- กราฟระหว่างวันที่เป็นแกนนอน กับ การเคลื่อนตัวของมวลดินเป็นแกนตั้ง เรียกว่า Slope Movement Monitoring by EDM Plot จะสามารถคำนวณอัตราการเคลื่อนตัวของมวลดินทดลอง
- กราฟระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตกเป็นแกนนอน กับ การเคลื่อนตัวในแนวเหนือ-ใต้เป็นแกนตั้ง เรียกว่า Absolute Surface Displacement Monitoring by EDM Plot จะสามารถคำนวณทิศทางการเคลื่อนตัวของมวลดิน