

บทที่ 3

ขั้นตอนการวิเคราะห์ห้กลับสำหรับเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง

วิธีดำเนินงานวิจัยโดยรวมแสดงในรูปที่ 3.1 ทั้งนี้ในส่วนการวิเคราะห์ห้กลับ ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหาค่า E_s ด้วยทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on Elastic Foundation, BEF) โดยโปรแกรมจะทำการหาค่า E_s ที่ทำให้ค่าที่ได้จากโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในสนามมากที่สุด

นอกเหนือจากการวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหาค่า E_s ผู้วิจัยยังทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Com624P ของ FHWA (Federal Highway Administration) ที่พัฒนาโดย Reese (1977) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ p-y curve ในการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้าง ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการวิเคราะห์ด้วยวิธี p-y curve

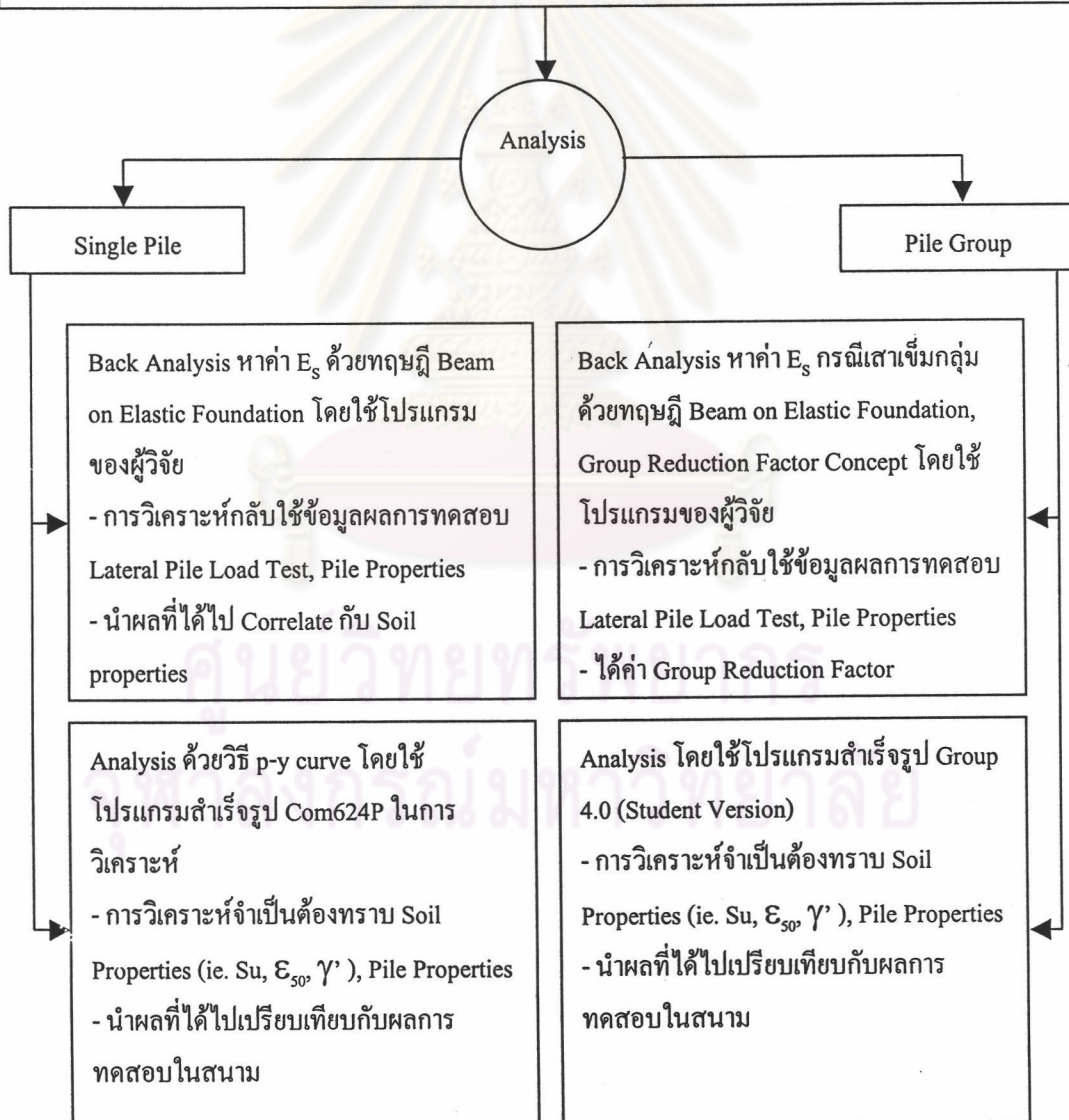
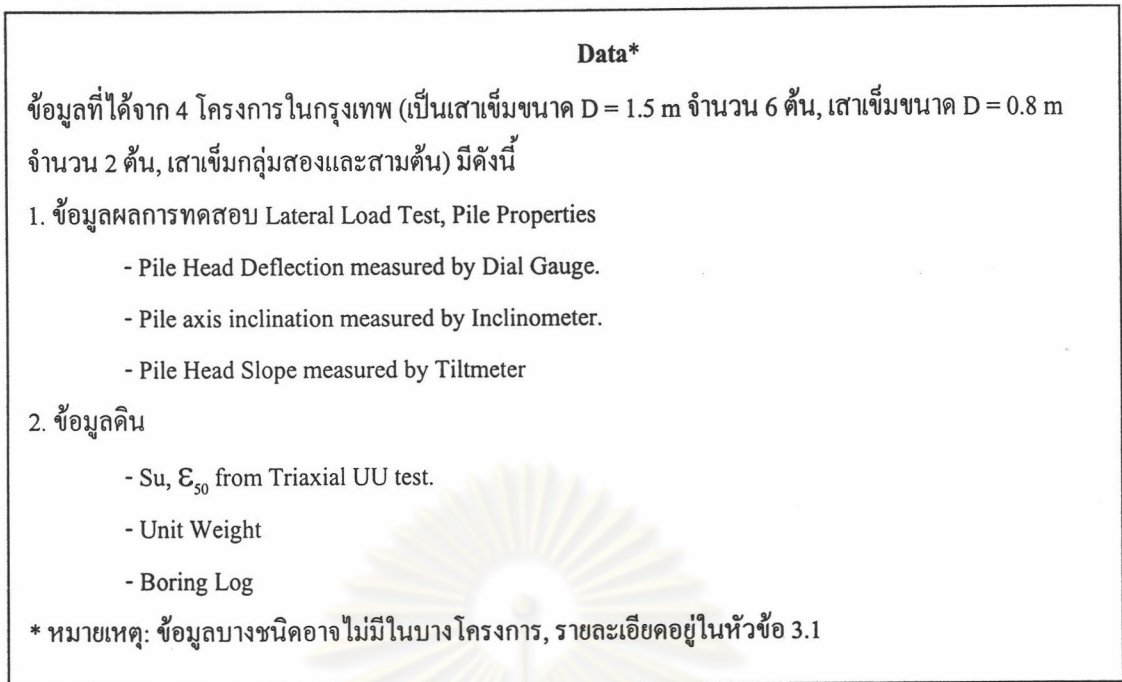
กรณีเสาเข็มกลุ่ม ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Group 4.0 (Student Version, Reese and Van Impe 2001) ซึ่งใช้ p-y curve เป็นโมเดลสำหรับ Lateral Respond ทำการวิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกลุ่มเสาเข็ม เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมดังกล่าว

3.1 รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างและข้อมูลดิน

3.1.1 ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำทางด้านข้าง, ข้อมูลดินในแต่ละโครงการ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างในกรุงเทพฯ 4 โครงการดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 3.2 โดยในแต่ละโครงการได้ทำการติดตั้งเครื่องมือต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1, ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จาก Dial Gauge, Inclinator, Tiltmeter ซึ่งเป็นผลการทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างที่วัดได้จากในสนาม ผู้วิจัยได้นำมาพล็อตรวมกับผลการวิเคราะห์ในบทที่ 4 ส่วนรายละเอียดของเครื่องมือดังกล่าวแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 3.1.2

ตารางที่ 3.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในโครงการต่างๆ

	Dial Gauge	Inclinometer	Tiltmeter
โครงการที่ 1 (คลองตัน)	x	x	
โครงการที่ 2 (ชอยศูนย์วิจัย)	x	x	
โครงการที่ 3 (ห้วยขวาง)	x	x	x
โครงการที่ 4 (บางซื่อ)	x		



รูปที่ 3.1 โปรแกรมแสดงวิธีดำเนินงานวิจัยโดยรวม



รูปที่ 3.2 Site Location

3.1.1.1 ข้อมูลโครงการที่ 1 (คลองคัน)

เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวแบบเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 m จำนวนสองต้น (Bore pile) คือ R1, R2 และแต่ละต้นยาว 46.092 m, 46.249 m และมีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่ 2 ดังรูปที่ 3.3 และสถานที่ทำการทดสอบดังแสดงรูปที่ 3.2 (โครงการที่ 1) Lateral Load ที่ใช้ในการทดสอบสูงสุดเท่ากับ 70 Ton โดยมีการติดตั้ง Inclinator และ Dial Gauge เพื่อวัดพฤติกรรมของเสาเข็มขณะทำการทดสอบ

ทั้งเสาเข็ม R1 และ R2 ใช้เหล็กเสริม 21 DB 40 mm SD50 Covering 7.5 cm ยาว 24 m จากหัวเสาเข็ม ถัดจากนั้นลงไปไม่มีเหล็กเสริม ส่วน $F'c$ ของเสาเข็ม R1 และ R2 มีค่าเท่ากับ 387 ksc และ 384 ksc ตามลำดับ

การทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างในโครงการนี้พบว่า Reference Beam ซึ่งเป็นตัวติดตั้ง Dial Gauge ดังรูปที่ 3.3 ได้มีการเคลื่อนตัว ส่งผลทำให้ข้อมูลที่วัดได้จาก Dial Gauge ไม่มีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นผลที่วัดได้จาก Dial Gauge จะไม่มีการนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่า

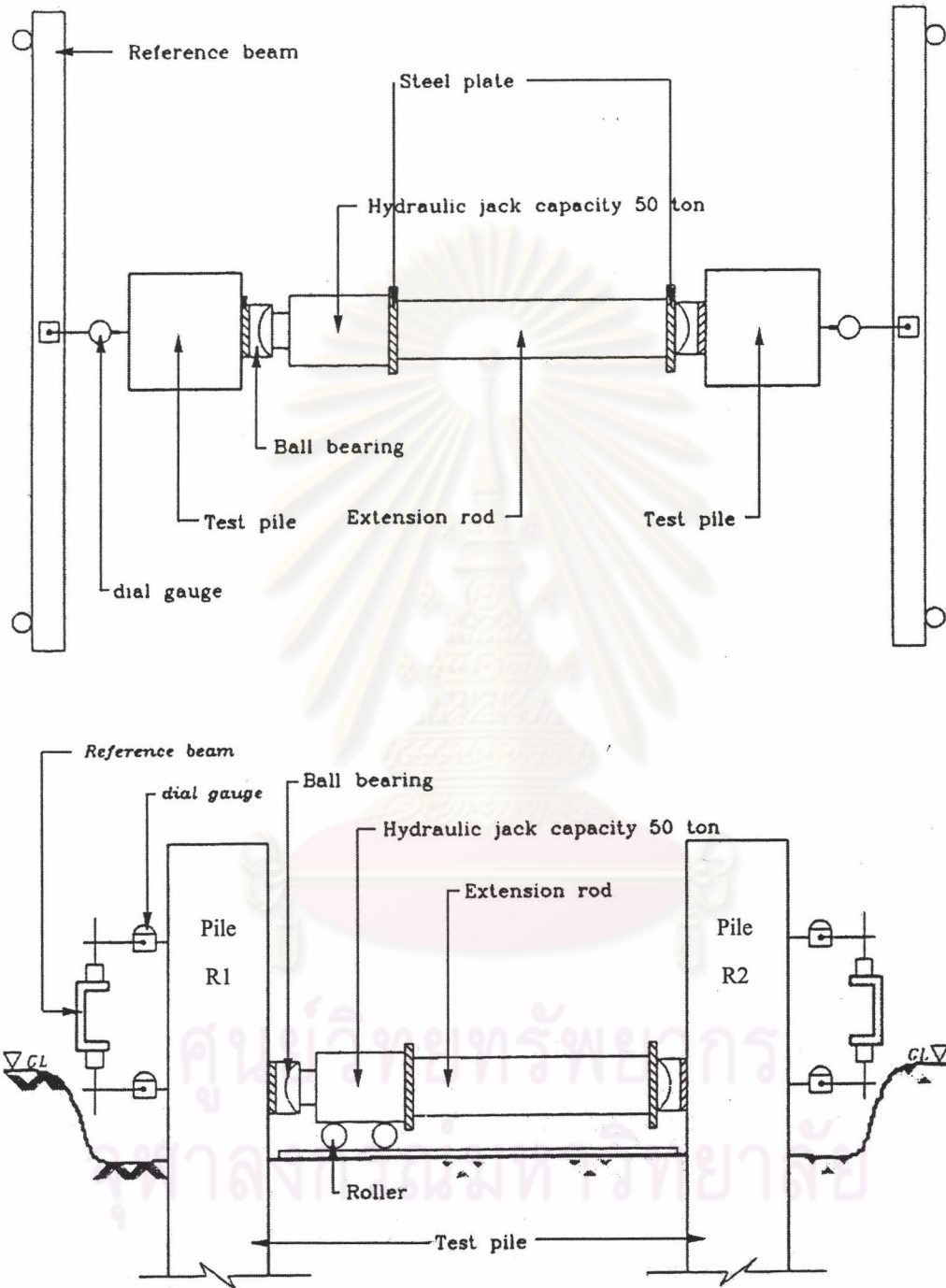
Pile Head Deflection (γ_t) สำหรับการพล็อตกราฟ Load vs Pile Head Deflection จะนำค่า Pile Head Deflection ที่ได้จาก Inclinator แทน

ตารางที่ 3.2 ได้แสดงค่าความลึกเอาไว้สองแบบ โดยค่า Depth (m) refer to Pile Top Level ใช้อ้างอิงในการวิเคราะห์กลับทั้งหมด และได้ดินชั้นแรก - Soft to Medium clay layer อยู่ในช่วง Depth 0 - 13.26 m ส่วนดินชั้นที่สอง - Stiff Clay มีความลึกมากกว่า 13.26 m ทั้งนี้ใช้ค่า S_u (Ton/m^2) เป็นเงื่อนไขในการแบ่งชั้นดิน

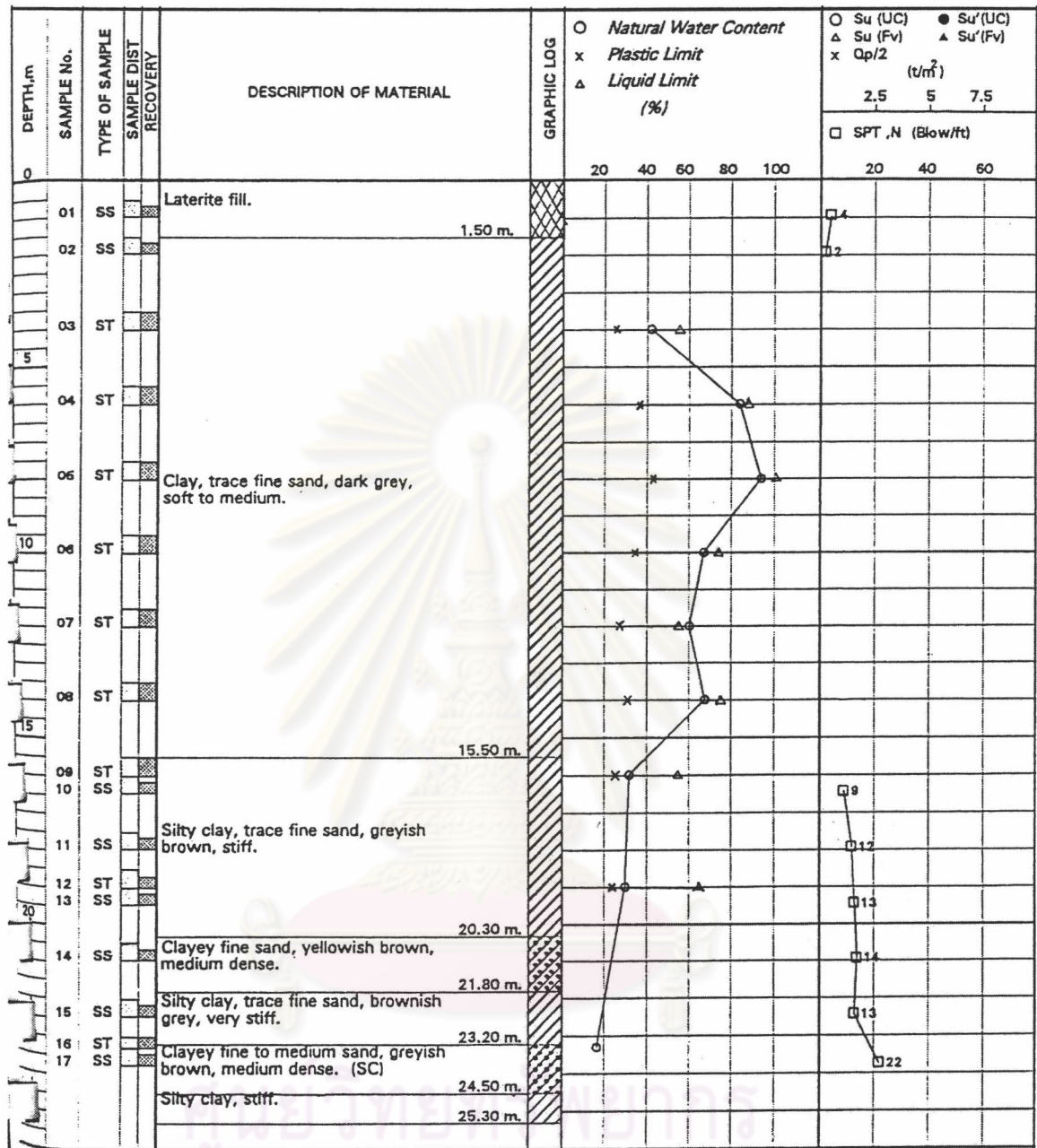
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลดินของโครงการที่ 1 (คลองตัน)

Depth (m) refer to Ground Level (Use in Boring Log Only)	Depth (m) refer to Pile Top Level	S_u (Ton/m^2) from Triaxial UU Test	γ_t (Ton/m^3)	ϵ_{50}
3.5 - 4	1.014	2.57	1.63	0.0071
5.5 - 6	3.014	1	1.55	0.0025
7.5 - 8	5.014	2.35	1.47	0.0052
9.5 - 10	7.014	3.36	1.54	0.0046
11.5 - 12	9.014	3.09	1.68	0.005
13.5 - 14	11.014	2.5	1.63	0.0072
15.5 - 16	13.014	4.19	1.88	0.0062
18.5-19	16.014	14.05	1.95	0.0083
23-23.3	20.414	14.3	2.12	0.0135

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

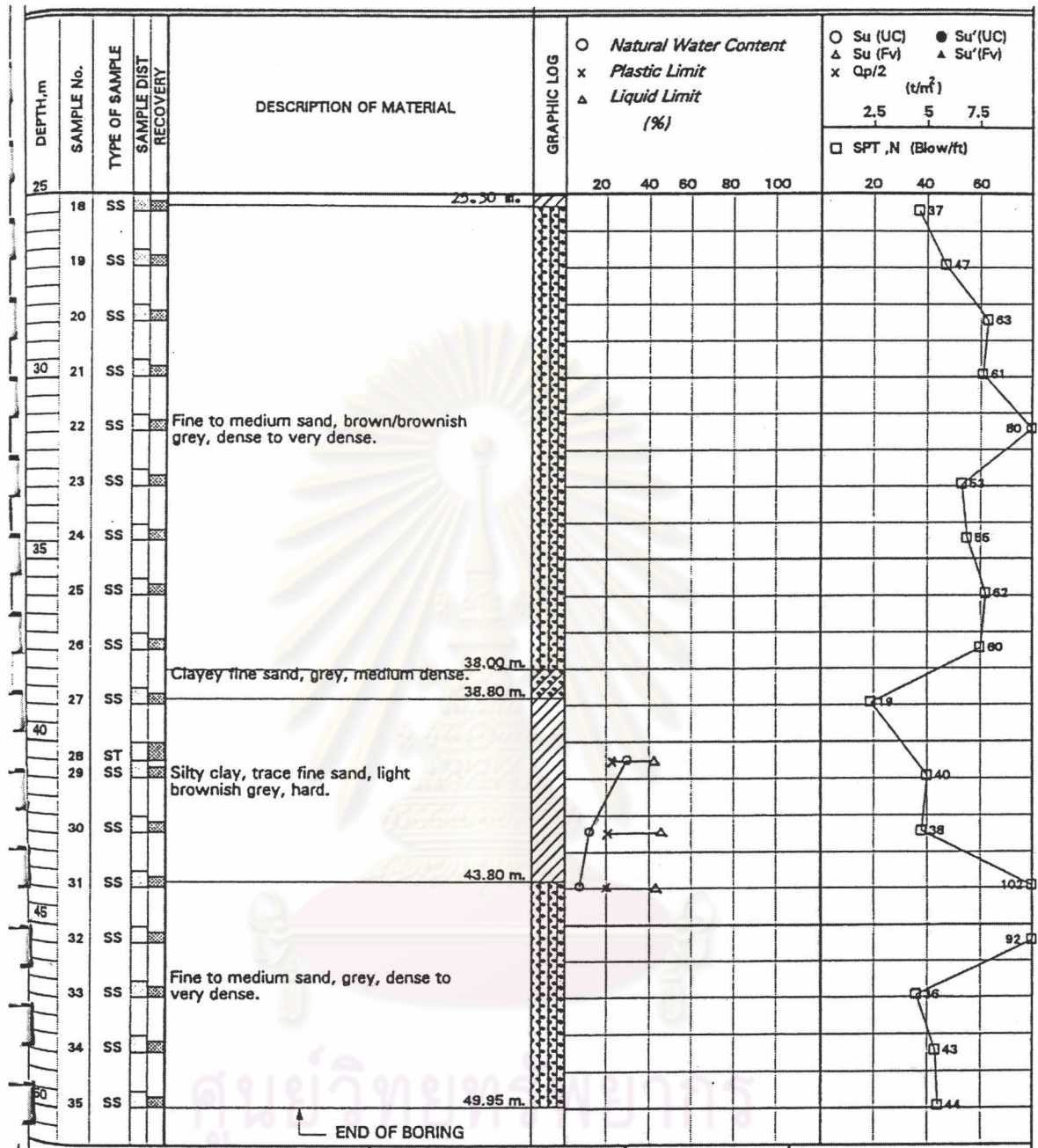


รูปที่ 3.3 Test Configuration ของโครงการ 1 (คลองตัน)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 Boring Log ของโครงการที่ 1 (คลองตัน)



รูปที่ 3.4 Boring Log ของโครงการที่ 1 (คลองตัน) - ต่อ

3.1.1.2 ข้อมูลโครงการที่ 2 (ขอยศุนยวิจัย)

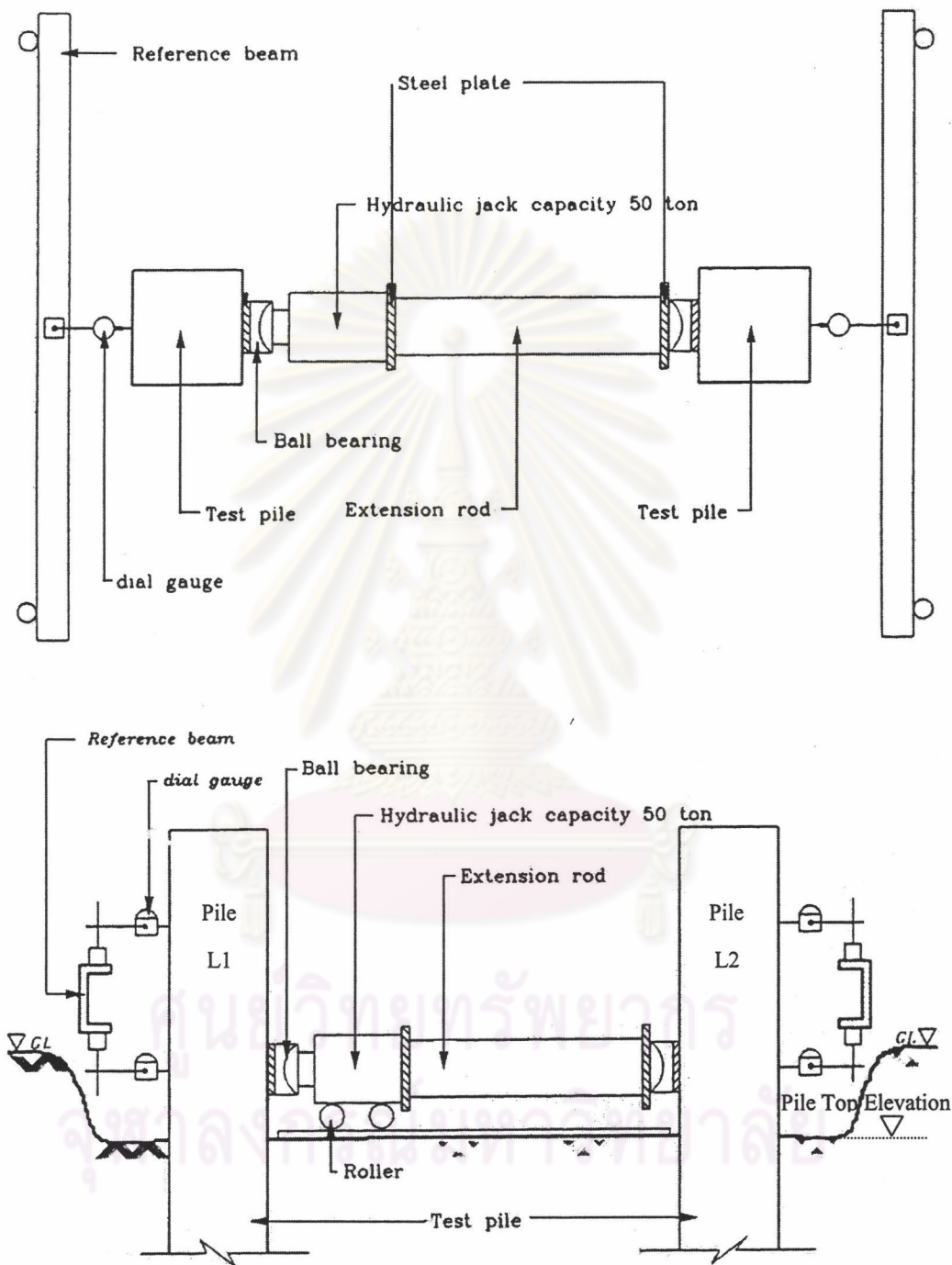
เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวแบบเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 m จำนวนสองต้น (Bore pile) คือ L1, L2 และแต่ละต้นยาว 38.144 m, 38.732 m และมีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก ดังรูปที่ 3.5 และสถานที่ทำการทดสอบดังแสดงรูปที่ 3.2 (โครงการที่ 2) Lateral Load ที่ใช้ในการทดสอบสูงสุดเท่ากับ 56.3 Ton โดยมีการติดตั้ง Inclinomater และ Dial Gauge เพื่อวัดพฤติกรรมของเสาเข็มขณะทำการทดสอบ

ทั้งเสาเข็ม L1 และ L2 ใช้เหล็กเสริม 21 DB 40 mm SD50 Covering 7.5 cm ยาว 12 m และ 21 DB 32 mm SD50 Covering 7.5 cm ยาว 12 m ถัดจากนั้นลงไปไม่มีเหล็กเสริม ส่วน $F'c$ ของเสาเข็ม L1 และ L2 มีค่าเท่ากับ 384 ksc และ 386 ksc ตามลำดับ

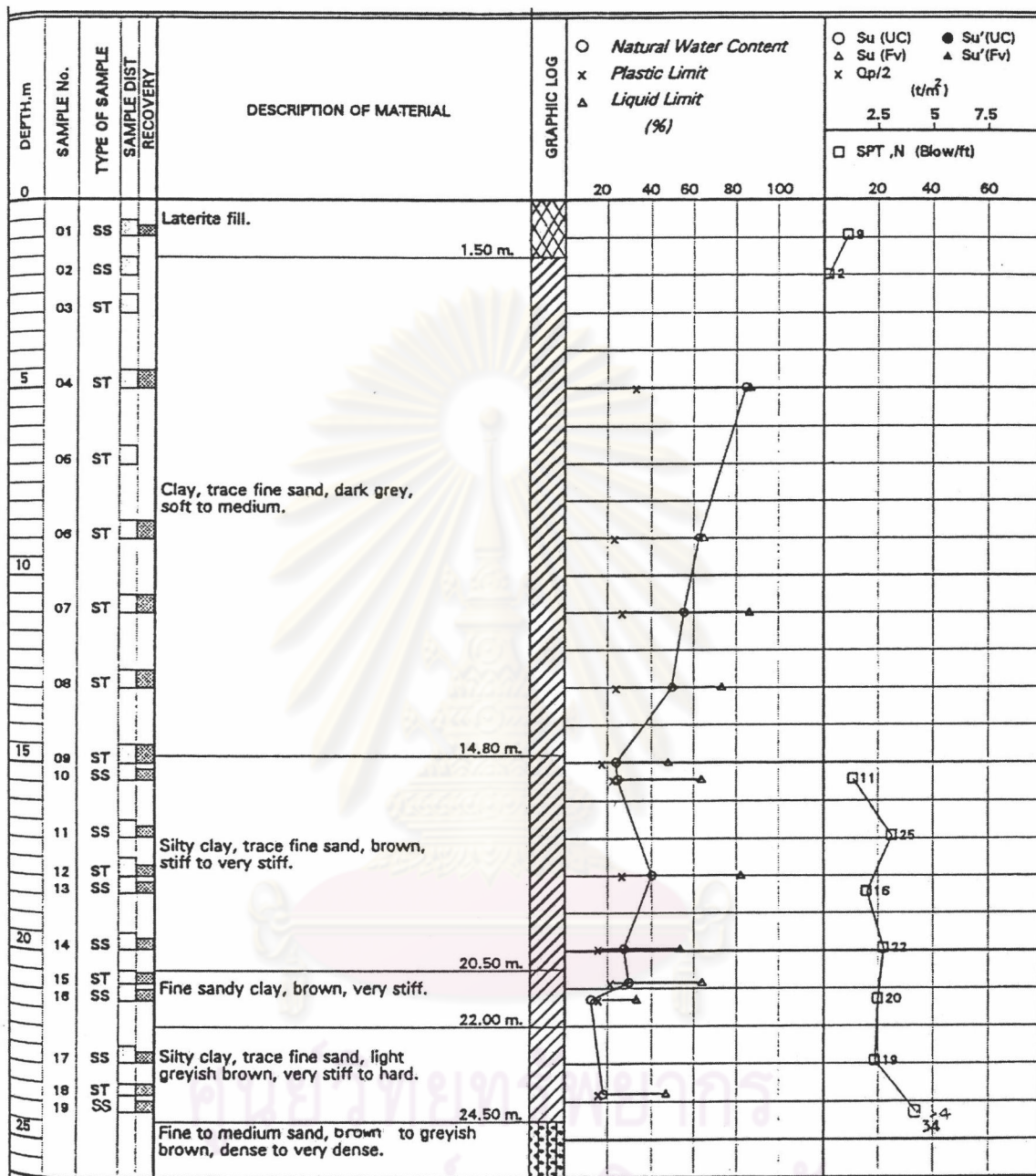
ตารางที่ 3.3 ได้แสดงค่าความลึกเอาไว้สองแบบ โดยค่า Depth (m) refer to Pile Top Level ใช้อ้างอิงในการวิเคราะห์หากลั้บทั้งหมด และได้ดินชั้นแรก - Soft to Medium clay layer อยู่ในช่วง Depth 0 - 9.67 m ส่วนดินชั้นที่สอง - Stiff Clay มีความลึกมากกว่า 9.67 m ทั้งนี้ใช้ค่า S_u (Ton/m²) เป็นเงื่อนไขในการแบ่งชั้นดิน

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลดินของโครงการที่ 1 (ขอยศุนยวิจัย)

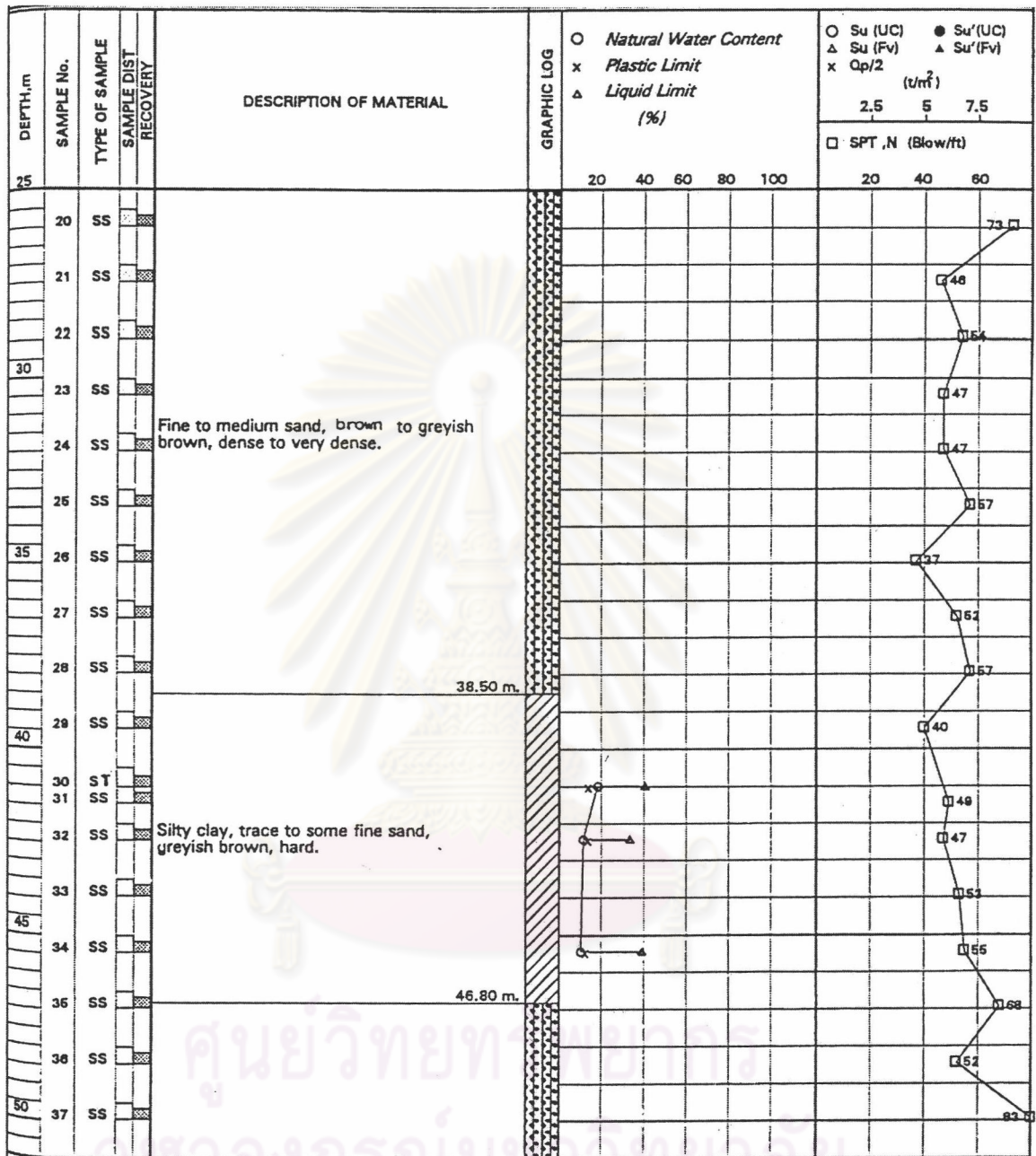
Depth (m) refer to Ground Level (Use in Boring Log Only)	Depth (m) refer to Pile Top Level	S_u (Ton/m ²) from Triaxial UU Test	γ_t (Ton/m ³)	ϵ_{50}
4.5-5	1.93	1.56	1.52	0.005
8.5 - 9	5.93	0.74	1.6	0.00167
10.5 - 11	7.93	2.81	1.57	0.0033
12.5 - 13	9.93	5.33	1.74	0.005
14.5 - 15	11.93	5.56	2.01	0.0048
17.5 - 18	14.93	5.86	1.85	0.005
20.5-20.85	17.855	11.81	2.09	0.00354
23.5-23.8	20.83	16.28	2.13	0.00271
40.5-41	37.93	24.33	2.17	0.01092



รูปที่ 3.5 Test Configuration ของโครงการ 2 (ขอยศูนย์วิจัย)



รูปที่ 3.6 Boring Log ของโครงการ 2 (ซอยศูนย์วิจัย)



รูปที่ 3.6 Boring Log ของโครงการ 2 (ขอยศุนยวิจัย) - ต่อ

3.1.1.3 ข้อมูลโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง)

เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 m (Bore pile, BPL1, BPL2) ยาว 30.998 m, 34.8 m และมีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรก ดังรูปที่ 3.7 และสถานที่ทำการทดสอบ ดังแสดงรูปที่ 3.2 (โครงการที่ 3) Lateral Load ที่ใช้ในการทดสอบสูงสุดเท่ากับ 30 Ton, 15 Ton ตามลำดับ โดยมีการติดตั้ง Inclinomater, Tiltmeter และ Dial Gauge เพื่อวัดพฤติกรรมของเสาเข็ม ขณะทำการทดสอบ

เสาเข็ม BPL1, BPL2 ใช้เหล็กเสริม 12 DB 25 mm SD40 Covering 7.5 cm ตลอดความยาว เสาเข็มส่วน F'c ของเสาเข็ม BPL1 และ BPL2 มีค่าเท่ากับ 368 ksc, 346.6 ksc

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลดินของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) – BPL1

Depth (m) refer to Ground Level (Use in Boring Log Only)	Depth (m) refer to Pile Top Level	Su (Ton/m ²) from Triaxial UU Test	γ_t (Ton/m ³)	ϵ_{50}
2.2-2.3	1.82	1.21	1.43	0.0078
3.2-3.3	2.82	2.05	1.45	0.0078
4.7-4.8	4.42	1.76	1.46	0.0048
6.2-6.3	5.92	1.38	1.45	0.007
7.7-7.8	7.42	1.97	1.64	0.0130
9.2-9.3	8.92	1.79	1.82	0.0053
10.7-10.8	10.42	2.09	1.66	0.0065
12.2-12.3	11.92	2.2	1.63	-
13.7-13.8	13.42	3.16	1.6	0.0078
41.1-41.2	40.82	18.55	2.02	0.0110

จากตารางที่ 3.6 พบว่าดินชั้นแรก - Soft to Medium clay layer อยู่ในช่วง Depth 0 – 18 m ส่วนดินชั้นที่สอง – Stiff Clay มีความลึกมากกว่า 18 m ทั้งนี้ใช้ค่า Su (Ton/m²) เป็นเงื่อนไขในการแบ่งชั้นดิน

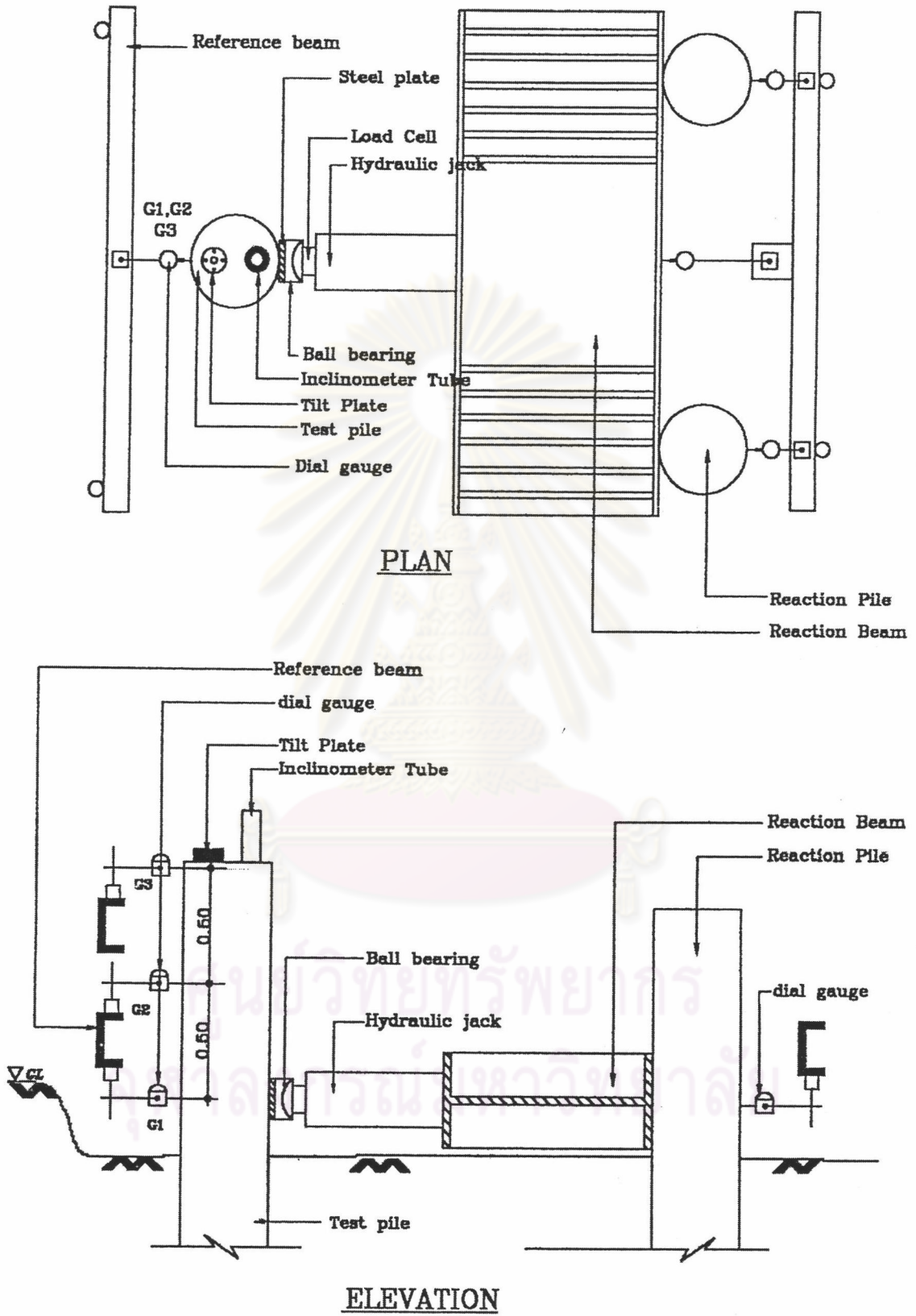
จากตารางที่ 3.7 Boring Log สำหรับเสาเข็ม BPL2 ดังรูปที่ 3.9 พบว่าน่าจะมีชั้น Crust อยู่ในช่วง 0 – 2 m (refer to pile head) ดังนั้นการวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้ $E_s = k$ (2-layer) กำหนดให้ upper layer เป็น Crust หนา 2 m ส่วนดินที่ถัดลงไปเป็น lower layer

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลดินของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) – BPL2

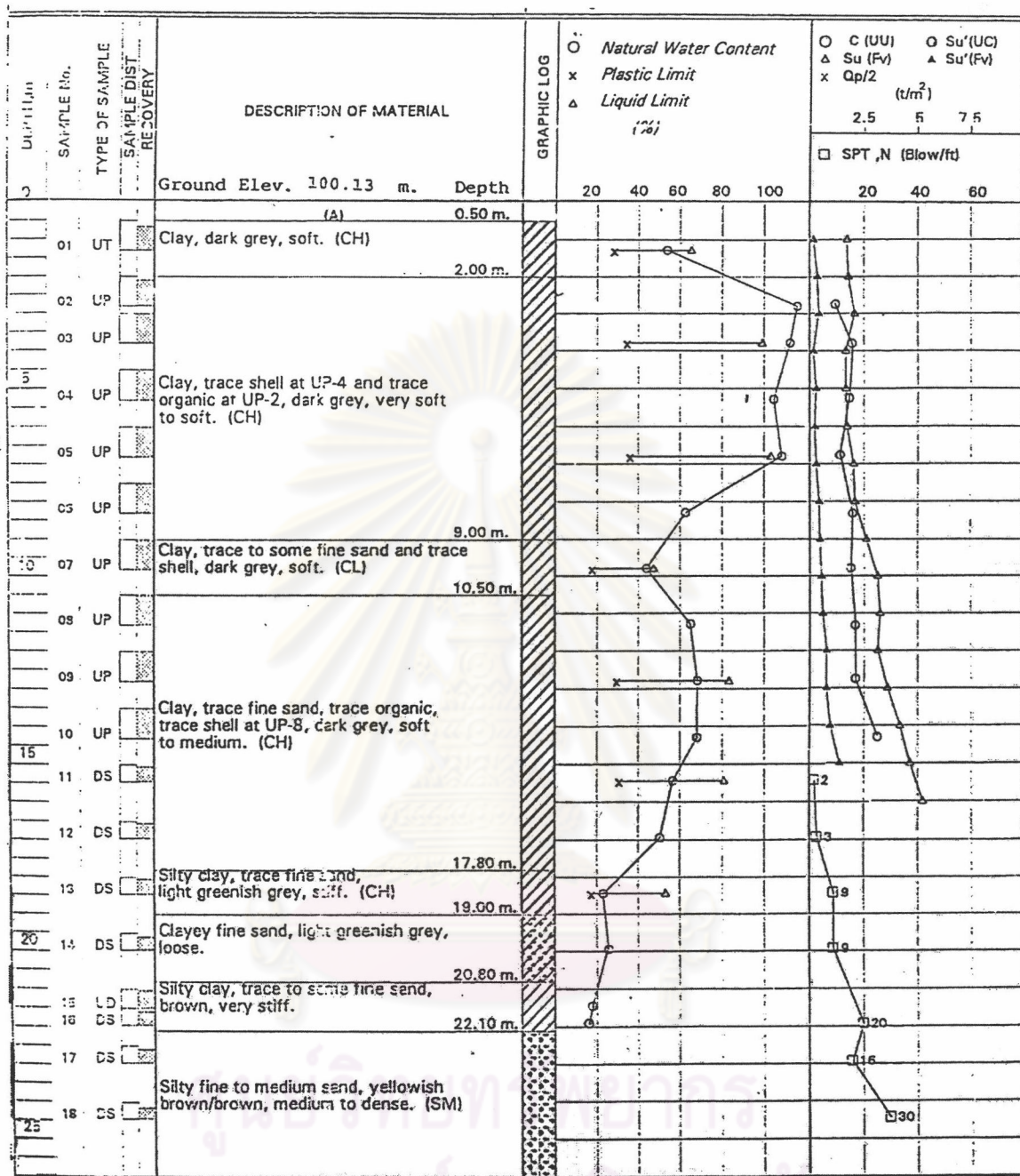
Depth (m) refer to Ground Level (Use in Boring Log Only)	Depth (m) refer to Pile Top Level	Su (Ton/m ²) from Triaxial UU Test	γ_t (Ton/m ³)	ϵ_{50}
1.7	1.7	4*	-	-
2.85	2.85	1*	-	-
3.2-3.3	3.25	2.85	1.6	0.0065
4.7-4.8	4.75	1.69	1.47	0.0065
4.9-5	4.95	2.07	1.49	0.0065
6.3-6.4	6.35	1.29	1.49	0.005
7.7-7.8	7.75	2.06	1.6	0.0052
9.2-9.3	9.25	2.03	1.63	0.00561
12.2-12.3	12.25	3.26	1.56	0.01
13.65-13.75	13.7	4.14	1.63	0.005

*เป็นค่าที่ได้จาก UC

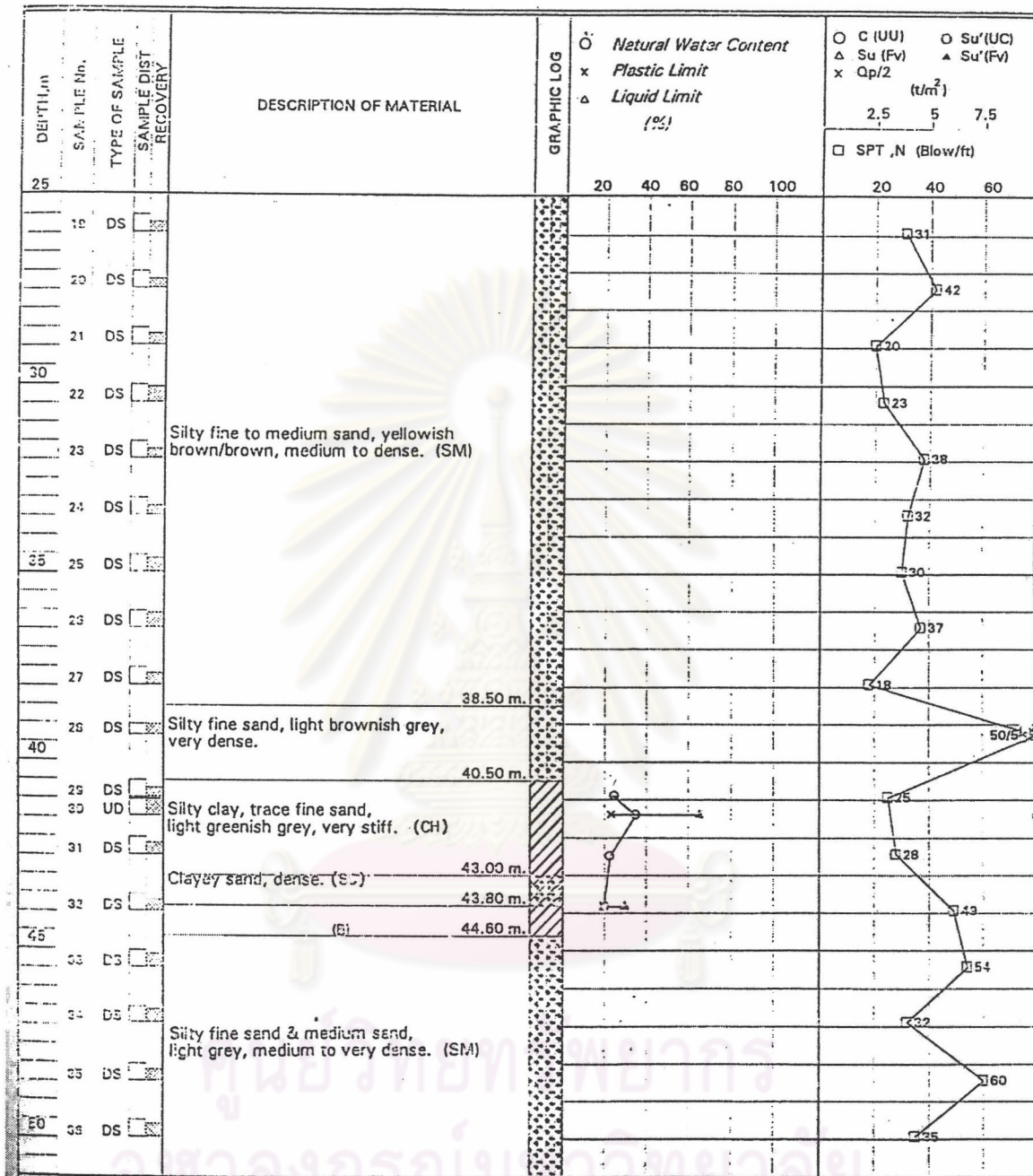
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



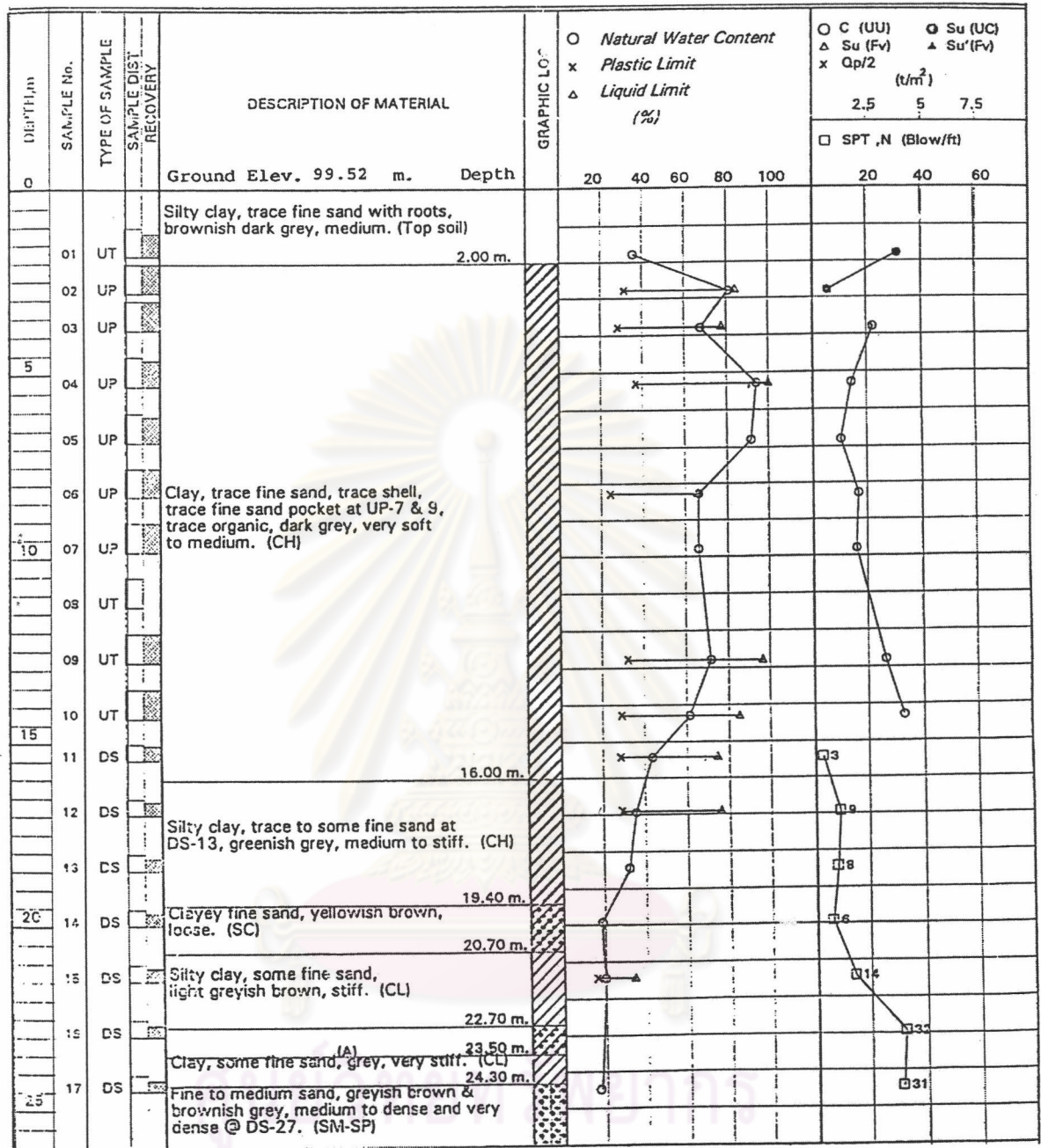
รูปที่ 3.7 Test Configuration ของโครงการ 3 (ห้วยขวาง)



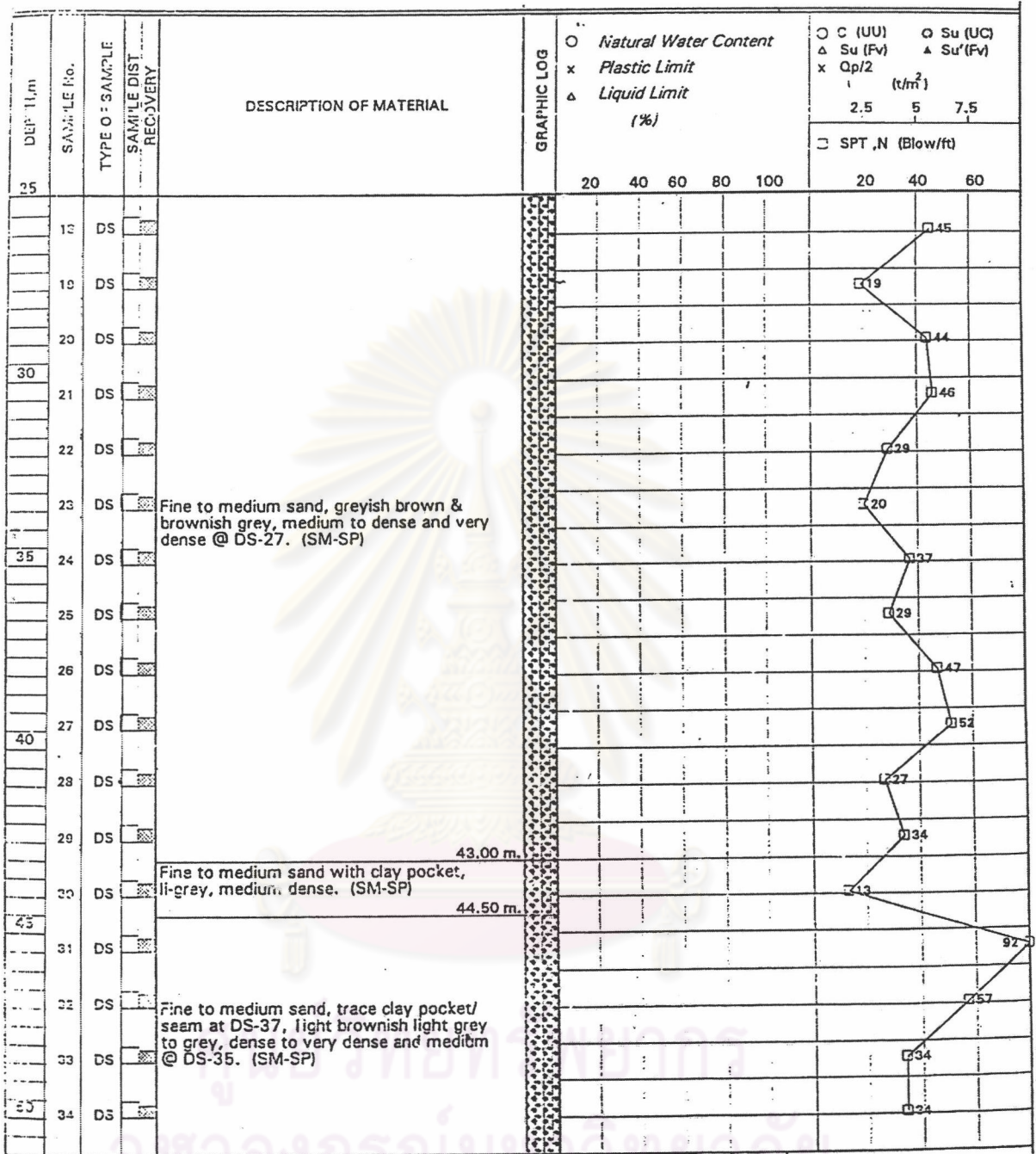
รูปที่ 3.8 Boring Log ของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) - Pile BPL1



รูปที่ 3.8 Boring Log ของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) – Pile BPL1 - ต่อ



รูปที่ 3.9 Boring Log ของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) - Pile BPL2



รูปที่ 3.9 Boring Log ของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) - Pile BPL2 - ต่อ

3.1.1.4 ข้อมูลโครงการที่ 4 (บางชื่อ)

เป็นการทดสอบเสาเข็มกลุ่มสองต้นและสามต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 m (Bore pile) ดังรูปที่ 3.14 นอกจากนี้ยังมีการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 m (Bore pile) ดังรูปที่ 3.13 โดยแต่ละต้นยาวประมาณ 36 m โดยมีการติดตั้ง Inclinator, Electrolevel และ Dial Gauge เพื่อวัดพฤติกรรมของเสาเข็มขณะทำการทดสอบ ทว่าข้อมูล Inclinator รวมทั้งข้อมูล Electrolevel ได้สูญหาย จึงเหลือเพียงข้อมูล Dial Gauge เท่านั้นสำหรับการวิเคราะห์กลับ

เสาเข็มทุกต้น (PL1-PL7) ใช้เหล็กเสริม 44 DB 32 mm SD40 Covering 7.5 cm ยาว 24 m จากหัวเสาเข็ม และ 23 DB 20 mm SD40 Covering 7.5 cm ยาวต่อลงไปจนถึงปลายเสาเข็ม ส่วน F_c ของเสาเข็มทุกต้นมีค่าเท่ากับ 407.7 ksc

ข้อมูลดินของเสาเข็มเดี่ยว (PL1-PL2) ได้แสดงดังตารางที่ 3.6, รูปที่ 3.16 และพบว่าดินชั้นแรก - Soft to Medium clay layer อยู่ในช่วง Depth 0 – 11.98 m ส่วนดินชั้นที่สอง – Stiff Clay มีความลึกมากกว่า 11.98 m ทั้งนี้ใช้ค่า S_u (Ton/m²) เป็นเงื่อนไขในการแบ่งชั้นดิน

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลดินของโครงการที่ 4 - Bore Hole P5 (บางชื่อ)

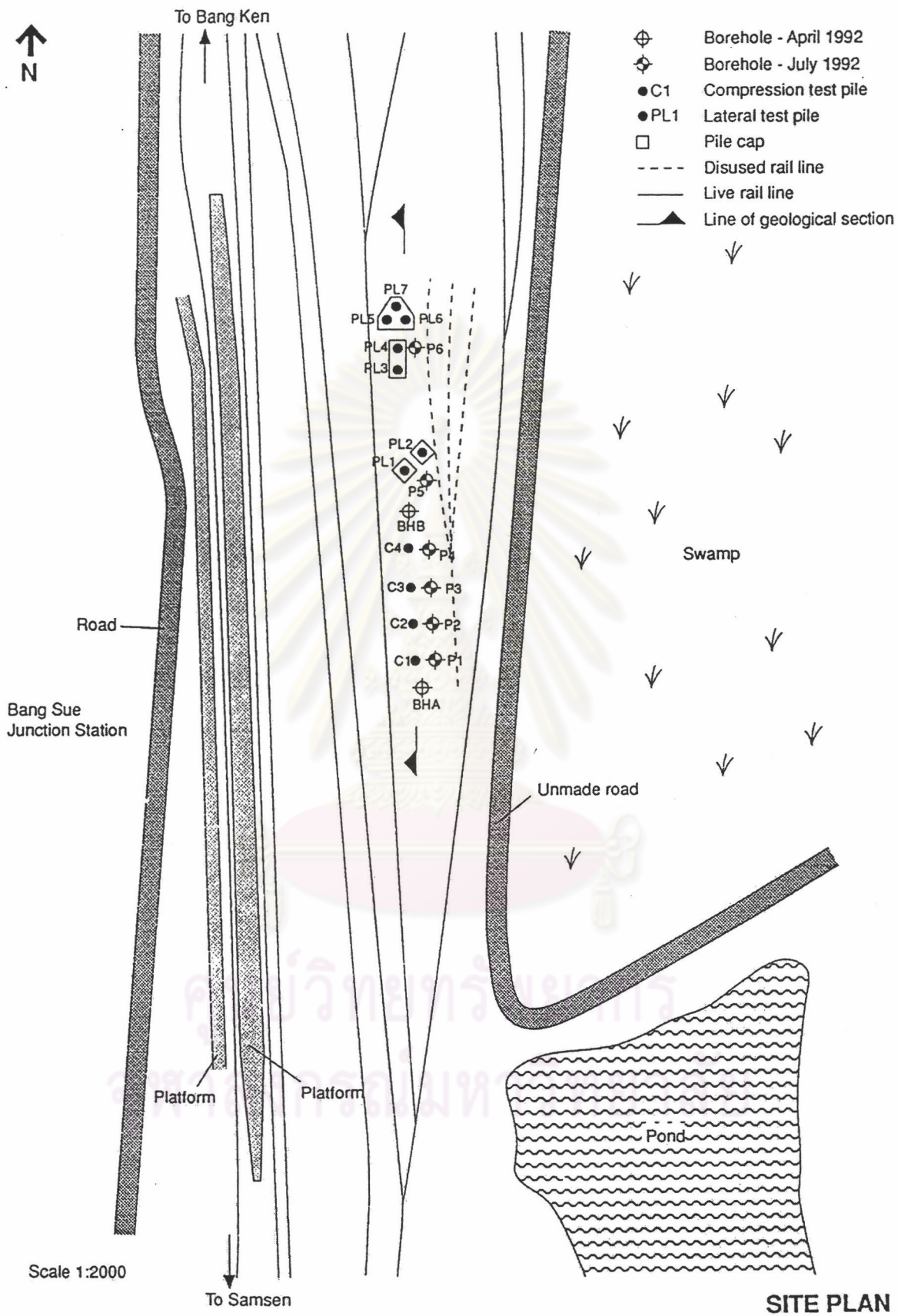
Depth (m) refer to Ground Level (Use in Boring Log Only)	Depth (m) refer to Pile Top Level	S_u (Ton/m ²) from Triaxial UU Test	γ_t (Ton/m ³)
2.75	1.25	2.55	1.7
4-4.5	2.75	2.1	1.7
8-8.5	6.75	4.7	1.64
10-10.5	8.75	3.4	1.59
13-13.5	11.75	4.47	2.03
16-16.5	14.75	11.48	1.87
19-19.5	17.75	24.49	2.07
22-22.5	20.75	3.54	2.05
32.5-33	31.25	13.3	2.05
41.5-42	40.25	38.92	2.1

ข้อมูลดินของเสาเข็มกลุ่ม (PL3-PL7) ได้แสดงดังตารางที่ 3.7, รูปที่ 3.16 และพบว่าดินชั้นแรก - Soft to Medium clay layer อยู่ในช่วง Depth 0 – 8.57 m ส่วนดินชั้นที่สอง – Stiff Clay มีความลึกมากกว่า 8.57 m ทั้งนี้ใช้ค่า S_u (Ton/m²) เป็นเงื่อนไขในการแบ่งชั้นดิน

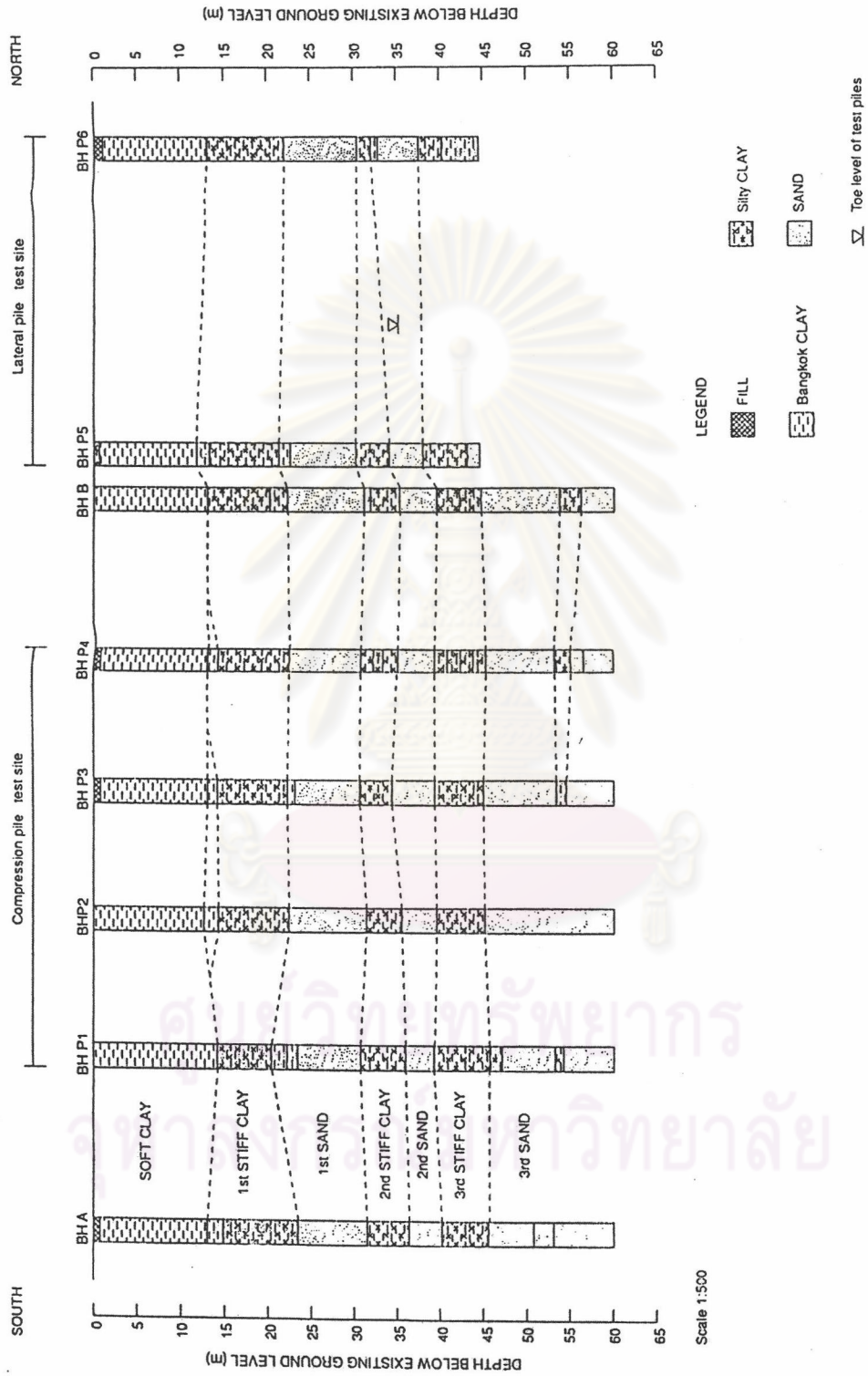
ตารางที่ 3.7 ข้อมูลดินของโครงการที่ 4 - Bore Hole P6 (บางซื่อ)

Depth (m) refer to Ground Level (Use in Boring Log Only)	Depth (m) refer to Pile Top Level	S_u (Ton/m ²) from Triaxial UU Test	γ_t (Ton/m ³)
2.5-3	0.75	5.6	1.83
6.5-7	4.75	1.5	1.76
10.8-11	8.9	5.3	1.61
16-16.5	14.25	16.2	1.9
19-19.5	17.25	11.02	1.91
22-22.5	20.25	30.09	2.15

ส่วนรูปที่ 3.15 แสดงค่า Pile Cap Rotation ของทั้งเสาเข็มกลุ่มสองต้นและสามต้นซึ่งวัดได้จากเครื่องมือ Eletrolevel โดยค่า Pile Cap Rotation มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Average Pile Head Shear (= Apply Lateral Load at Pile Cap / number of pile in group) เพิ่มขึ้น โดยผู้วิจัยใช้เป็นข้อมูลที่ขอบเขต (Boundary Condition at Pile Head) สำหรับการวิเคราะห์ห้กลับในหัวข้อที่ 3.3.1



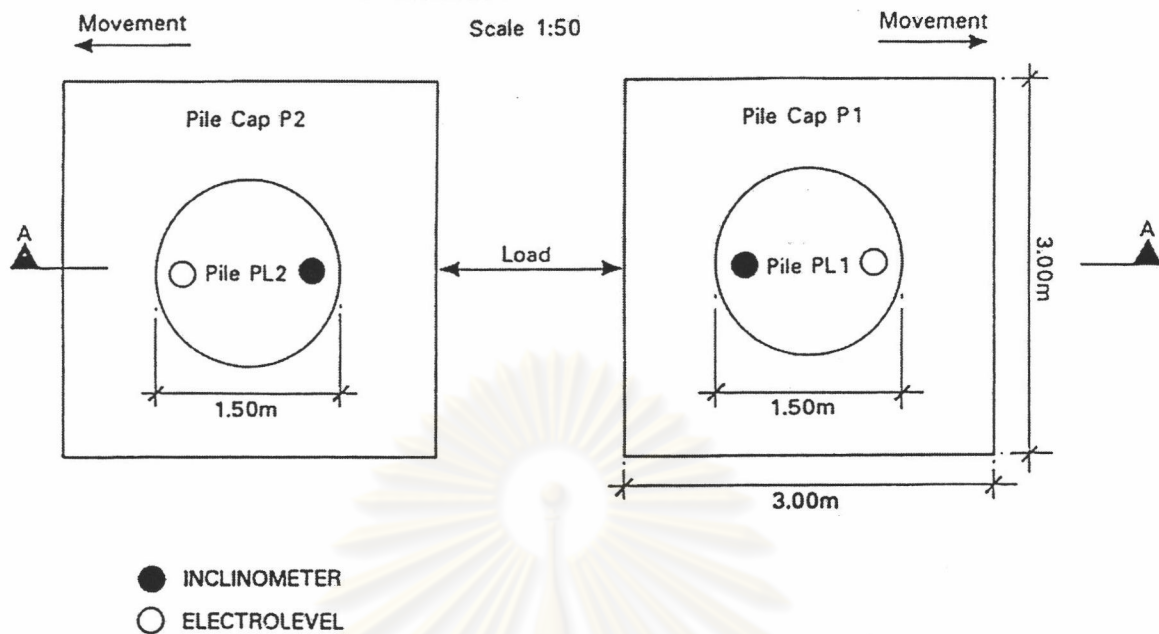
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งหลุมเจาะและการทดสอบเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างของโครงการ 4 (บางซื่อ)



GEOLOGICAL CROSS-SECTION THROUGH TEST PILE AREA

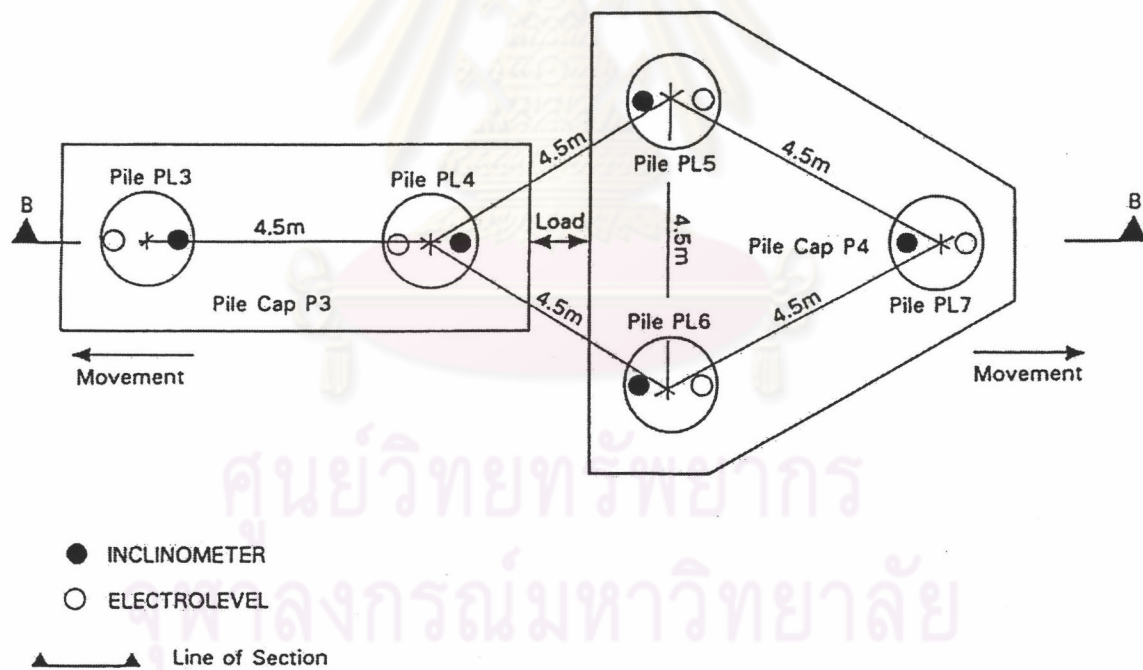
รูปที่ 3.11 สภาพชั้นดินในบริเวณที่ทำการทดสอบเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างของโครงการ 4 (บางซื่อ)

PLAN OF SINGLE PILE LATERAL LOAD TEST



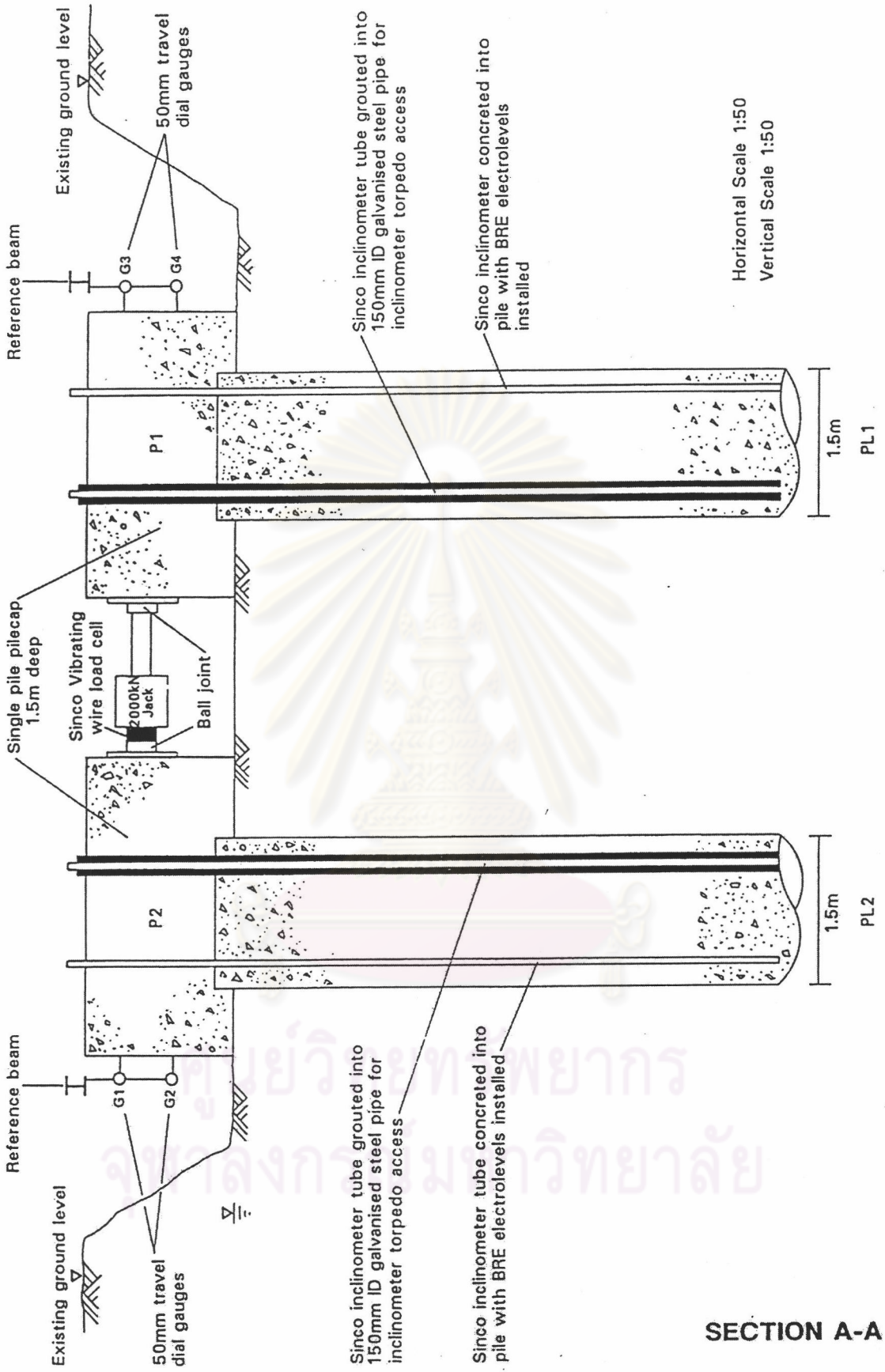
PLAN OF TWO AND THREE PILE LATERAL LOAD TEST

Scale 1:100

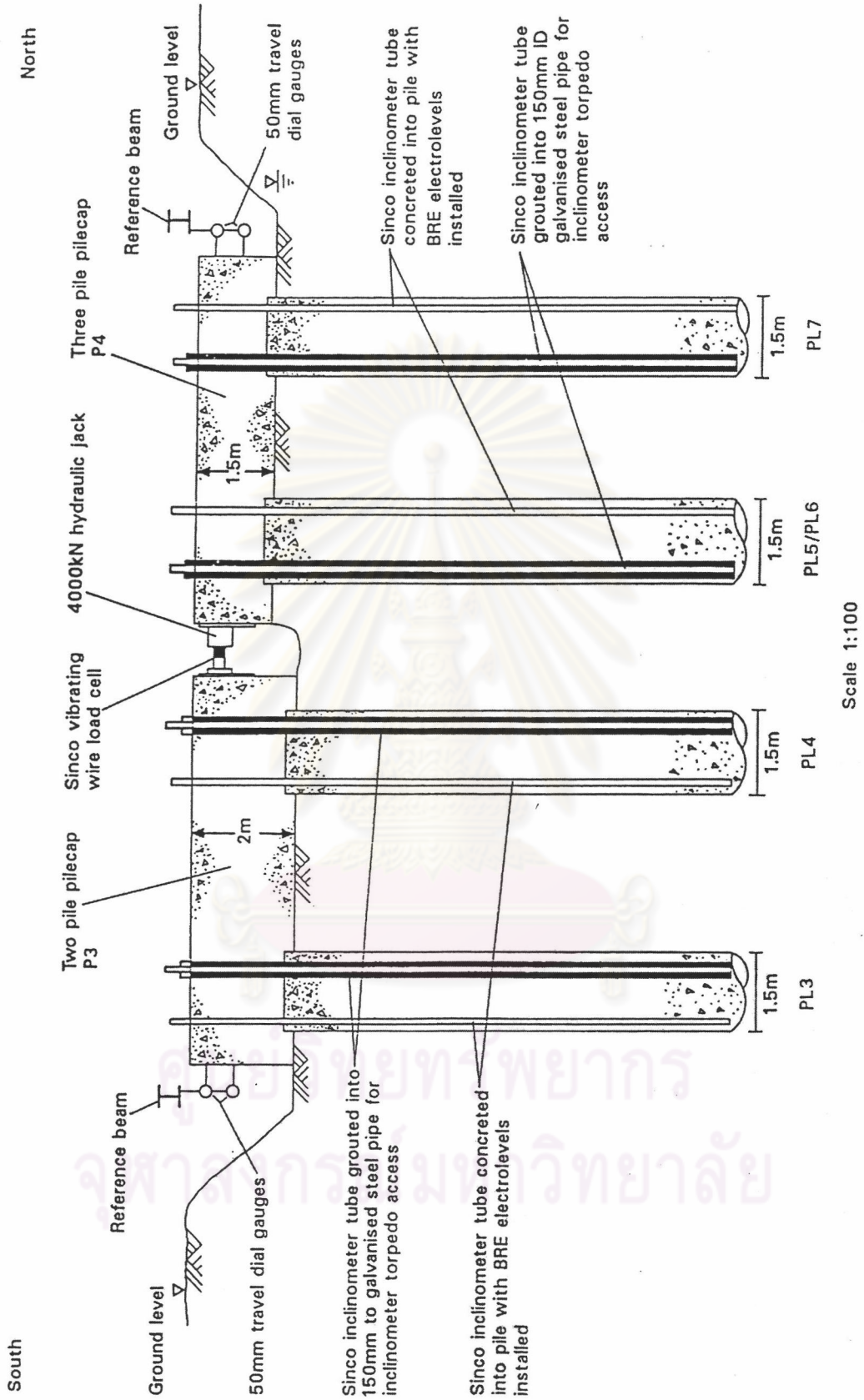


LATERAL LOAD TEST
GENERAL ARRANGEMENT

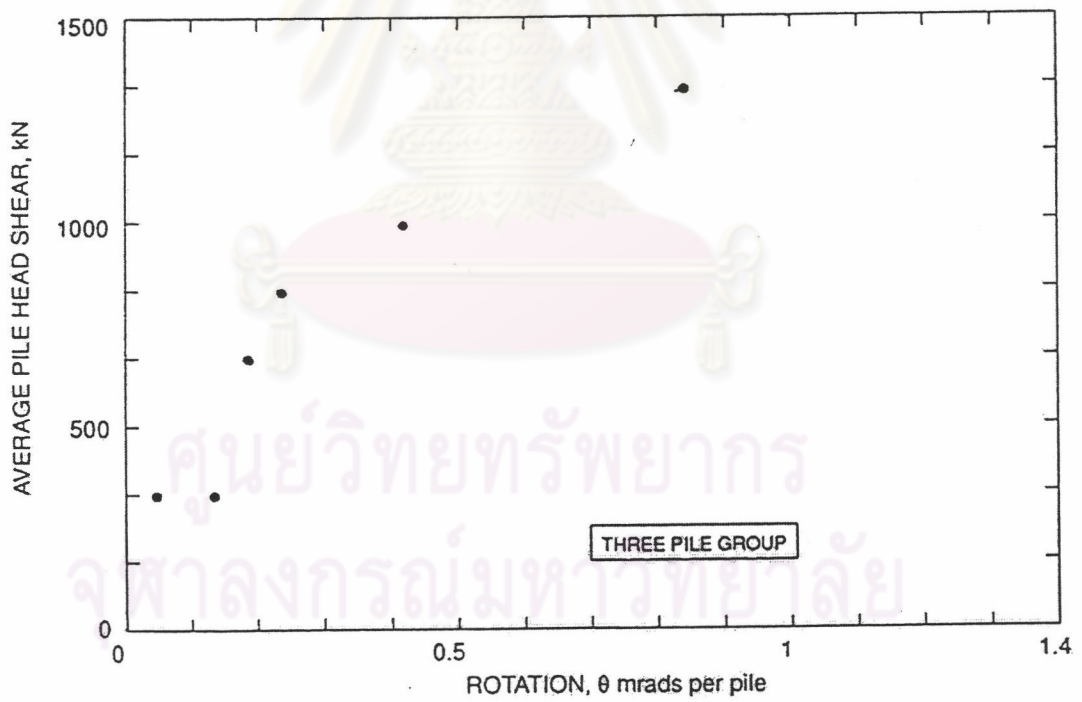
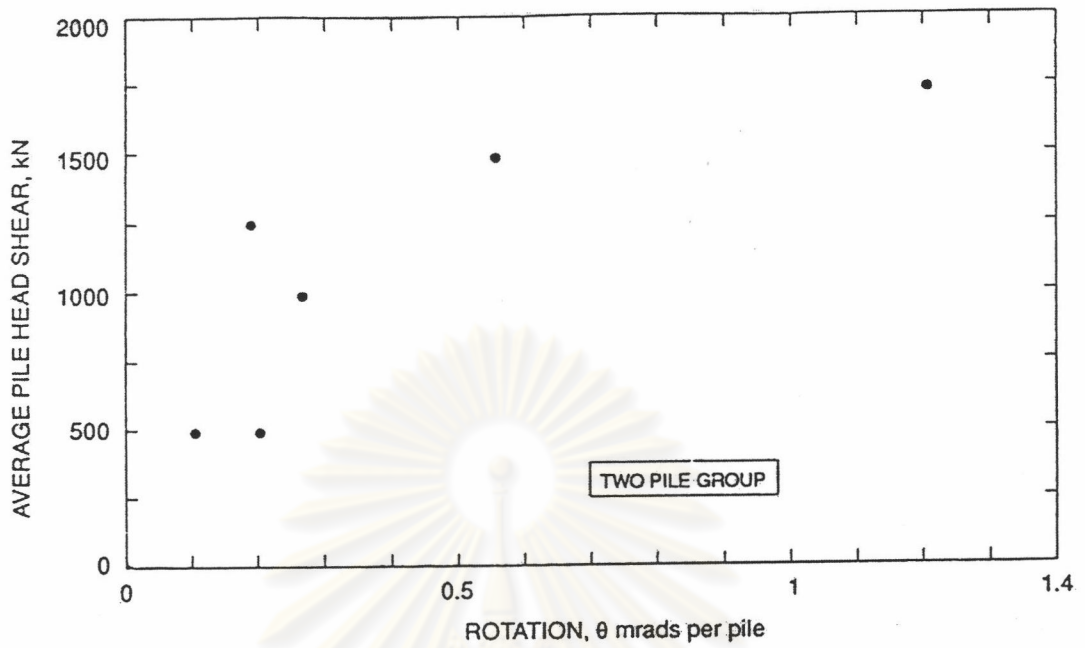
รูปที่ 3.12 Test Configuration ของโครงการ 4 (บางซื่อ)



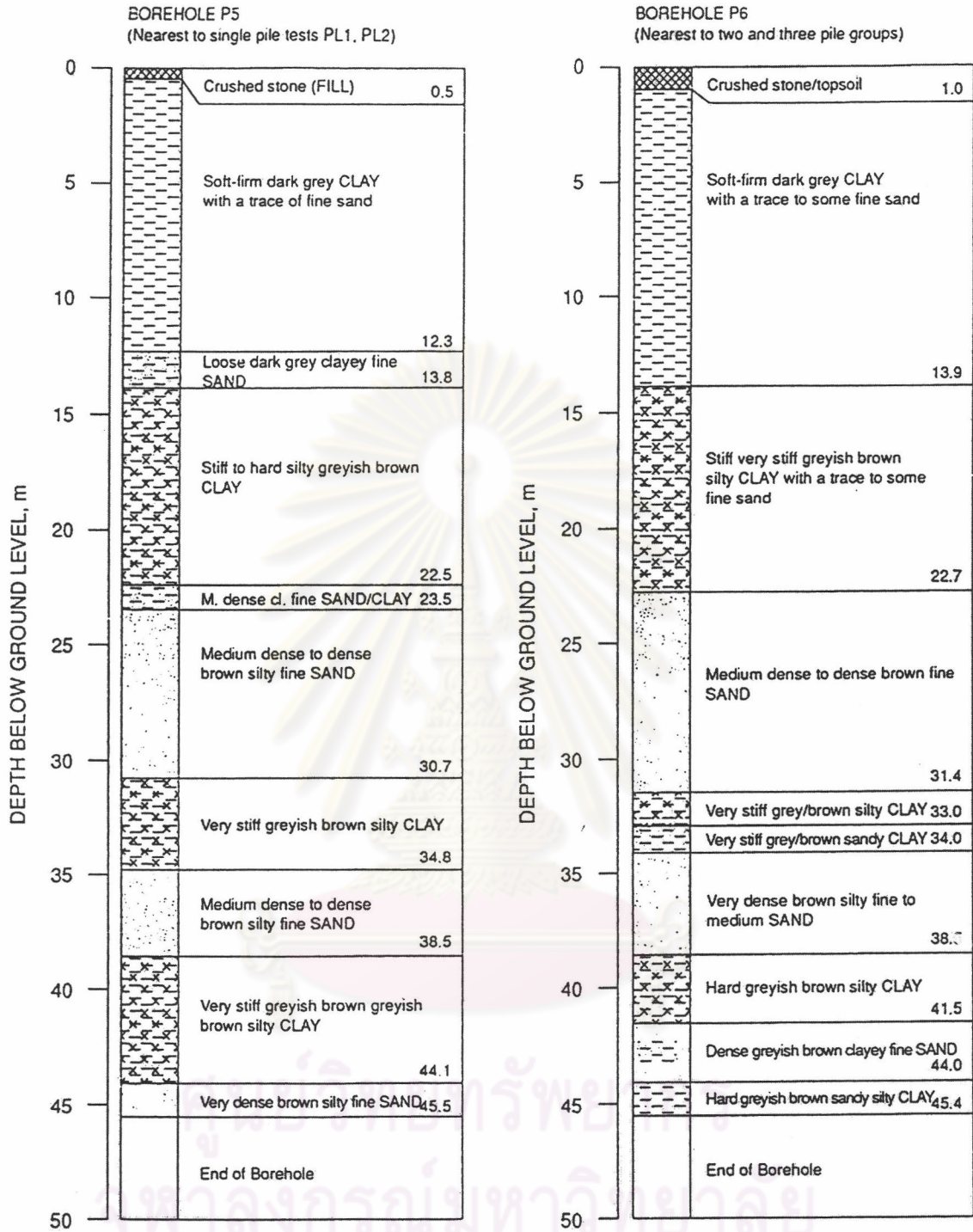
รูปที่ 3.13 Test Configuration ของโครงการ 4 (บางข้อ) หน้าตัด A-A



รูปที่ 3.14 Test Configuration ของโครงการ 4 (บางข้อ) หน้าตัด B-B



รูปที่ 3.15 Pile Cap Rotation ของโครงการ 4 (บางซื่อ)



SUMMARY LOGS OF BOREHOLES P5 AND P6

รูปที่ 3.16 Boring Log ของโครงการที่ 4 (บางซื่อ)

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดพฤติกรรมเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง

เครื่องมือที่ใช้วัดพฤติกรรมของเสาเข็มในขณะทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างมีดังนี้

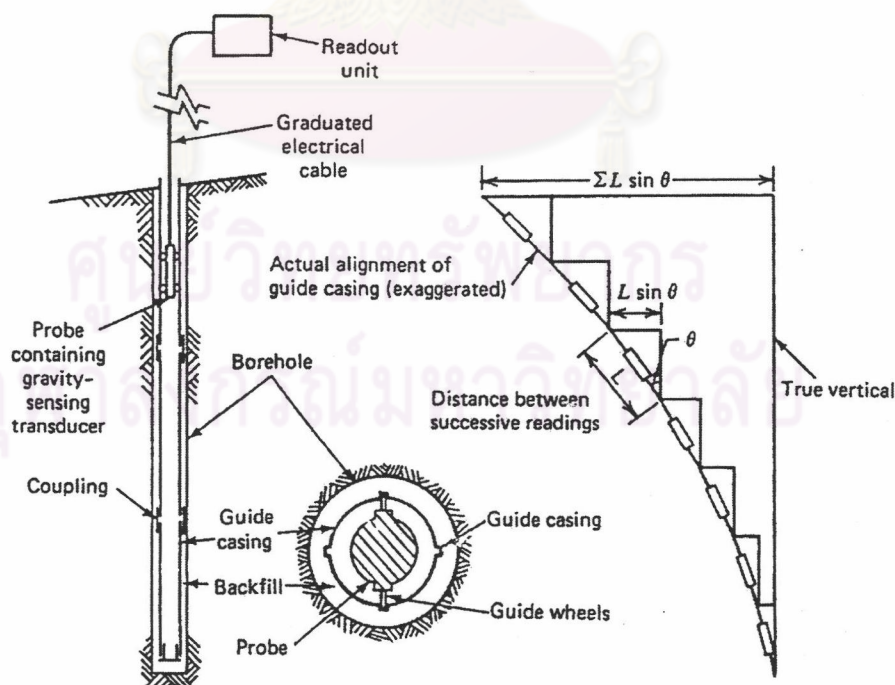
1) Dial Gauge : Precision 0.01 mm , Travel length 50 mm ทำการติดตั้งที่บริเวณหัวเสาเข็ม 2-3 ตัวโดยแต่ละตัวห่างกัน 50 cm ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่มีความถูกต้องสูง ยกเว้นในโครงการที่ 1 (คลองตัน) ซึ่งพบว่า reference beam ที่ไว้วัด Dial Gauge มีการเคลื่อนตัว

2) Inclinometer

2.1) Pile Axis inclination data เป็นข้อมูลที่ได้โดยตรงจาก inclinometer เป็นค่าที่มีความถูกต้องมากกว่าในข้อที่ 2.2)

2.2) Pile Deflection Profile: Error ± 6 mm every 25 m of inclinometer tube เป็นค่าที่มีความถูกต้องลดน้อยลงจากข้อ 2.1 โดยเฉพาะค่า Deflection at pile head ที่ได้มักจะมี ความคลาดเคลื่อนมากเนื่องจากการคำนวณจะต้องหาผลรวม $L \sin \theta$ จาก tip จนถึง head of inclinometer (โดย θ เป็นค่า Pile Axis inclination ที่วัดได้โดยตรงจากเครื่องมือ) ซึ่งแน่นอนว่าการวัดค่าแต่ละจุดย่อมมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นค่า Deflection at pile head ที่ได้ก็จะรวมค่าความคลาดเคลื่อนตั้งแต่ tip จนถึง head of inclinometer เข้าไปด้วย

MEASUREMENT OF DEFORMATION



รูปที่ 3.17 หลักการของเครื่องมือ Inclinomater

จาก Inclinometer manual เขียนเอาไว้ชัดเจนว่า “The greatest asset of the inclinometer is its ability to measure precisely the change in inclination at a specific depth rather than to provide an exact profile of the bore hole. Therefore, the determination of movement over a limited depth interval is much more precise than overall accuracy of the deep hole ”

ดังนั้นข้อมูล Pile Axis inclination data จึงถูกเลือกใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์กลับ

3) Tiltmeter : Resolution 8 arc seconds เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของมุม โดยมีการติดตั้งเครื่องมือนี้ที่หัวเสาเข็มเฉพาะที่โครงการที่ 3 (ห้วยขวาง)

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์กลับ,วิเคราะห์สำหรับเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้าง

3.2.1 การวิเคราะห์กลับหาค่า E_s โดยใช้ทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่น โดยใช้โปรแกรมของผู้วิจัย

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่า E_s ด้วยทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on Elastic Foundation, BEF) ทั้งนี้โปรแกรมดังกล่าวใช้การคำนวณแบบมีมิติ (การคำนวณแบบไร้มิติหรือการใช้ชาร์ตไร้มิติของ Reese and Matlock (1956) ได้แสดงอยู่ในบทที่ 2) ซึ่งข้อดีของการคำนวณแบบมีมิติก็คือผู้ใช้สามารถกำหนดค่า $E_p I_p$ ของแต่ละส่วนของเสาเข็มได้, การกำหนดค่า E_s สำหรับการวิเคราะห์กลับทำได้ง่าย

3.2.1.1 การกำหนดฟังก์ชัน E_s ต่อความลึก(x)

ในการวิเคราะห์กลับ ผู้วิจัยจะกำหนดช่วงของค่า E_s และฟังก์ชันของ E_s เพื่อให้โปรแกรมของผู้วิจัยทำการคำนวณและหาค่า E_s ที่ทำให้ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในสนามมากที่สุด เช่นกำหนดใช้ฟังก์ชัน $E_s = kx$ (ค่า k เป็นค่าคงที่) โดยให้โปรแกรมคำนวณในช่วง $k = 50$ ถึง 1550 โดยเปลี่ยนค่า k ไปทีละ 5 หน่วย, โปรแกรมจะคำนวณตามที่ใช้กำหนดและจะแสดงผลค่า k ที่ทำให้ output จากโปรแกรมซึ่งอาจเป็นค่า Slope หรือ Pile head Deflection มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในสนามมากที่สุด

โดยฟังก์ชันที่ใช้ในการวิเคราะห์กลับสำหรับงานวิจัยนี้มีดังนี้ คือ

- 1) $E_s = k$ (1-layer) เป็นฟังก์ชันที่มีค่า E_s คงที่ตลอดความลึก
- 2) $E_s = k$ (2-layer) กำหนดให้ชั้น Soft - Medium Clay เป็นชั้นแรก ส่วนดินชั้นที่สองให้เป็นดินที่อยู่ลึกลงไปจากชั้น Soft - Medium Clay จนถึงปลายเสาเข็ม ยกเว้นโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) - เสาเข็มต้น BPL2 กำหนดให้ Crust เป็นชั้นแรก ส่วนดินชั้นที่สองให้เป็นดินที่อยู่ลึกลงไปจนถึงปลายเสาเข็ม
- 3) $E_s = kx$ เป็นฟังก์ชันที่มีค่า E_s เพิ่มขึ้นตามความลึก

- 4) $E_s = k_0 + k_1x + k_2x^2$ กำหนดให้ $k_0 \geq 0, k_2 \geq 0$ ส่วนค่า k_1 สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและลบ โดยตัวแปรทั้งสามนี้ต้องให้ค่า $E_s \geq 0$ และให้ค่า E_s คงที่หรือเพิ่มขึ้นตามความลึก
- 5) $E_s = kSu$ เป็นฟังก์ชัน E_s ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า Su ของดิน

ทั้งนี้ค่าคงที่ในฟังก์ชัน E_s เช่น k, k_0, k_1, k_2 ที่แสดงไว้ข้างต้น จะมีค่าคงที่ ณ. ขนาดแรงกระทำด้านข้างหนึ่งๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า k, k_0, k_1, k_2 มีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อขนาดแรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้น โดยผู้วิจัยคาดว่าค่า k, k_0, k_1, k_2 ควรมีค่าลดลงเมื่อขนาดแรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้น

สำหรับกรณี $E_s = k_0 + k_1x + k_2x^2$ ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในบทที่ 4 เป็นค่าที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว โดยค่าที่พิดกับในสนามมากที่สุดที่ขนาดของแรงกระทำต่างๆอาจทำให้กราฟ E_s ต่อความลึกติดกันหรือมีค่าค่อนข้างไม่เหมาะสม ซึ่งผู้วิจัยจะมีการบังคับค่าคงที่บางตัว (อาจเป็นค่า k_0, k_1, k_2) ให้มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์กลับที่ได้ทั้งหมด

3.2.1.2 วิธีการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้ในสนาม

การวิเคราะห์กลับจะสมมุติช่วงของค่า E_s เพื่อให้โปรแกรมทำงานหาค่า E_s ที่ทำให้ค่าที่ได้จากโปรแกรม (เช่น ค่า slope, pile head deflection) มีค่าพิดกับค่าที่วัดได้จากในสนาม โดยวิธีที่โปรแกรมใช้พิดกับข้อมูลในสนามมีดังนี้

Fit Inclinomater (slope) หมายถึง โปรแกรมจะพยายามหาค่า E_s ที่ทำให้ผลที่ได้จากโปรแกรมที่เป็นค่า Slope มีค่าใกล้เคียงกับค่า Slope ที่วัดได้จากเครื่องมือ Inclinomater ที่ใช้ในการทดสอบเสาเข็มในสนาม ทั้งนี้ได้กำหนดค่าที่เป็นตัวบ่งบอกว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่วัดได้จากในสนามมีค่าใกล้เคียงกันเพียงใดคือ Slope Sqdev (เป็นผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่า Slope ที่วัดได้จาก Inclinomater กับผลรันที่ได้จากโปรแกรม ณ. ความลึกที่เท่ากันตลอดช่วงความลึกที่มีการวัดค่าด้วย Inclinomater)

Fit DialGauge หมายถึง โปรแกรมจะพยายามหาค่า E_s ที่ทำให้ผลที่ได้จากโปรแกรมที่เป็นค่า Pile head deflection มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ Dial Gauge ที่ใช้ในการทดสอบเสาเข็มในสนาม

Fit DialGauge+/-0.05mm ความหมายคล้าย Fit DialGauge ข้างต้นทว่ายอมให้เกิดความผิดพลาดระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่วัดได้จาก Dial Gauge อยู่ในช่วง ± 0.05 mm ซึ่งในช่วงที่ยอมให้ ± 0.05 mm ดังกล่าว โปรแกรมจะพิจารณาค่า E_s ที่ทำให้ได้ค่า Slope Sqdev มีค่าน้อยที่สุด

ด้วย โดยวิธีนี้เป็นการพิตสำหรับฟังก์ชัน $E_s = kx^n$ กับ $E_s = k_0 + k_1x + k_2x^2$ โดยเฉพาะ เนื่องจากฟังก์ชันทั้งสองนี้มีตัวแปรไม่ทราบค่ามากกว่า 1 (เช่น $E_s = kx^n$ มีตัวแปรไม่ทราบค่าอยู่ 2 ตัวคือ k, n หากใช้ Fit DialGauge ไม่สามารถได้ค่า k, n ที่เหมาะสมได้ เพราะคล้ายว่ามีอยู่ 2 ตัวแปรแต่มีอยู่สมการเดียว)

ทั้งนี้การเลือกวิธีที่จะพิตกับข้อมูลในสนามให้เหมาะสมนั้น ผู้วิจัยถือว่าที่ load น้อย (ประมาณว่า pile head deflection < 4-8 mm) ข้อมูลที่ได้จาก inclinometer มีความเชื่อถือน้อยกว่าข้อมูลจาก Dial Gauge (ความแม่นยำในการวัดค่าของ inclinometer อาจสังเกตได้โดยประมาณจากบริเวณปลายเสาเข็มหรือตำแหน่งที่ลึกมากๆ ซึ่งค่า Slope ของเสาเข็มควรจะมีค่าเป็นศูนย์) ดังนั้นในช่วง load ดังกล่าวก็จะพิตด้วยวิธี Fit DialGauge ส่วนที่ load มีค่าสูงขึ้นมากพอข้อมูลที่ได้จาก inclinometer มีความคลาดเคลื่อนลดลงก็จะพิตด้วยวิธี Fit Inclinometer (slope) ยกเว้นกรณี $E_s = k_0 + k_1x + k_2x^2$ จะทำการพิตด้วยวิธี Fit DialGauge+0.05mm

3.2.1.3 พิจารณาการลดลงของค่า $E_p I_p$ ของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก

เนื่องจากเสาเข็มที่ใช้ทดสอบเป็นเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำมากพอคอนกรีตก็จะแตกในส่วนที่รับแรงดึง ซึ่งส่งผลให้ค่า moment of inertia ของหน้าตัดมีค่าน้อยลง ซึ่งผลดังกล่าวโปรแกรมได้พิจารณาด้วยโดยใช้สูตร Effective moment of inertia ของ ACI Code, 1989 (ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Apply moment กับ $E_p I_p$) นอกจากนั้นยังต้องพิจารณาถึงปริมาณ load ที่ใช้ด้วย กล่าวคือในการทดสอบจริงจะค่อยๆเพิ่ม load การคำนวณเริ่มต้นจะใช้ค่า $E_p I_p$ ตลอดเสาเข็มเป็น $E_p I_p$ ที่ Apply moment = 0 เมื่อคำนวณหาค่าโมเมนต์ได้แล้วก็จะนำมาปรับค่า $E_p I_p$ โดยทำการ interpolate จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Apply moment กับ $E_p I_p$ ทั้งนี้การ interpolate กำหนดให้ค่า $E_p I_p$ มีค่าลดลงหรือมีค่าเท่าเดิมเสมอ ไม่มีการ interpolate ให้ค่า $E_p I_p$ ที่มีค่ามากขึ้น, แล้วก็นำค่า $E_p I_p$ ดังกล่าวไปคำนวณอีกจนค่า $E_p I_p$ Converse โดยสูตรที่ใช้และวิธีการคำนวณได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

3.2.1.4 รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่ากลับ

สำหรับรายละเอียดต่างๆและ Source Code ของโปรแกรมของผู้วิจัย, รวมทั้งสูตรการคำนวณได้แนบอยู่ในภาคผนวก ก.

3.2.1.5 ความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้กลับ

ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้กลับของผู้วิจัย โดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูป Lpile Plus Version 3 (Student Version, Reese and Van Impe 2001) เป็นโปรแกรมที่พัฒนามาจากโปรแกรมสำเร็จรูป Com624P (ทำงานบน DOS) ให้สามารถทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows ได้ ซึ่งหลักการคำนวณของทั้งสองโปรแกรมยังเหมือนกันคือใช้วิธี p-y curve

เปรียบเทียบ Lpile Plus ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิธี p-y curve (ยังคงใช้สมมติฐานของ BEF อยู่) กับโปรแกรมของผู้วิจัย โดยทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลลัพธ์ในส่วนของ BEF เท่านั้น ผู้วิจัยจะสมมติปัญหาเสาเข็มรับแรงด้านข้างให้กับโปรแกรมสำเร็จรูป Lpile Plus ซึ่งผลลัพธ์ของ Lpile Plus ได้แสดงดังตารางที่ 3.8 จากนั้นนำผลของค่า $E_p I_p$ และค่า E_s (ได้จาก $E_s = -p/y$) ไปเป็นค่า input สำหรับโปรแกรมของผู้วิจัย ซึ่งได้ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.8 แสดงผลลัพธ์ของโปรแกรม Lpile Plus Version 3 (Student Version)

Depth (m)	Deflection (m)	moment (Ton*m)	Shear (Ton)	Slope	Flextral Rigidity (Ton*m ²)	Soil Reaction (Ton/m)
0	2.51E-02	-3.26E-12	1.50E+01	-7.47E-03	5.87E+04	-4.52E+00
0.5	2.14E-02	6.94E+00	1.25E+01	-7.44E-03	5.87E+04	-5.51E+00
1	1.77E-02	1.25E+01	9.52E+00	-7.36E-03	5.87E+04	-6.38E+00
1.5	1.40E-02	1.65E+01	6.15E+00	-7.24E-03	5.87E+04	-7.08E+00
2	1.04E-02	1.86E+01	2.49E+00	-7.09E-03	5.87E+04	-7.55E+00
2.5	6.92E-03	1.89E+01	-1.32E+00	-6.93E-03	5.87E+04	-7.71E+00
3	3.50E-03	1.73E+01	-4.48E+00	-5.66E-03	3.67E+03	-4.92E+00
3.5	1.26E-03	1.45E+01	-6.67E+00	-3.50E-03	3.67E+03	-3.81E+00
4	1.87E-06	1.07E+01	-7.83E+00	-1.78E-03	3.67E+03	-7.20E-01
4.5	-5.27E-04	6.63E+00	-7.27E+00	-6.06E-04	3.67E+03	3.07E+00
5	-6.04E-04	3.38E+00	-5.71E+00	7.70E-05	3.67E+03	3.17E+00
5.5	-4.50E-04	9.23E-01	-4.18E+00	3.70E-04	3.67E+03	2.95E+00
6	-2.34E-04	-7.98E-01	-2.81E+00	3.79E-04	3.67E+03	2.50E+00
6.5	-7.12E-05	-1.89E+00	-1.72E+00	1.96E-04	3.67E+03	1.86E+00
7	-3.79E-05	-2.52E+00	-5.75E-01	5.59E-05	5.87E+04	2.66E+00
7.5	-1.53E-05	-2.47E+00	6.39E-01	3.47E-05	5.87E+04	2.12E+00

ตารางที่ 3.9 แสดงผลลัพธ์ของโปรแกรมของผู้วิจัย

Depth (m)	Deflection (m)	E_s (Ton/m ²)	slope	moment (Ton*m)	Shear (Ton)	Soil Reaction (Ton/m)
0	2.512E-02	1.80E+02	-7.475E-03	0.000	15.000	-4.523
0.5	2.138E-02	2.57E+02	-7.445E-03	6.935	12.493	-5.504
1	1.767E-02	3.60E+02	-7.363E-03	12.493	9.525	-6.369
1.5	1.402E-02	5.06E+02	-7.239E-03	16.459	6.161	-7.088
2	1.043E-02	7.26E+02	-7.090E-03	18.654	2.495	-7.572
2.5	6.926E-03	1.11E+03	-6.929E-03	18.955	-1.327	-7.716
3	3.502E-03	1.41E+03	-5.667E-03	17.327	-4.486	-4.922
3.5	1.259E-03	3.02E+03	-3.499E-03	14.468	-6.668	-3.806
4	2.194E-06	3.85E+05	-1.786E-03	10.658	-7.831	-0.845
4.5	-5.275E-04	5.83E+03	-6.068E-04	6.637	-7.274	3.073
5	-6.046E-04	5.25E+03	7.650E-05	3.384	-5.713	3.173
5.5	-4.510E-04	6.56E+03	3.703E-04	0.925	-4.180	2.956
6	-2.343E-04	1.07E+04	3.791E-04	-0.796	-2.815	2.503
6.5	-7.189E-05	2.61E+04	1.959E-04	-1.890	-1.720	1.878
7	-3.837E-05	7.02E+04	5.632E-05	-2.516	-0.577	2.693
7.5	-1.556E-05	1.39E+05	3.509E-05	-2.468	0.635	2.157

ทั้งนี้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่หัวเสาเข็มเป็นแบบทราบค่าแรงกระทำด้านข้างและค่าโมเมนต์ (กำหนดให้มีค่า $P_t = 15$ ตันและ $M_t = 0$ ตัน-เมตร) ส่วนปลายเสาเข็มกำหนดให้เป็นปลายอิสระและเสาเข็มยาว 31 เมตร นอกจากนั้นยังกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า $E_p I_p$ ด้วย

จากค่าที่แสดงในตารางที่ 3.8 และ 3.9 เห็นได้ว่าทั้งสองโปรแกรมถือว่าให้ค่าที่เท่ากัน ซึ่งมีบางค่าที่มีค่าไม่เท่ากันบ้างเนื่องจาก output ของโปรแกรมสำเร็จรูป Lpile Plus มีเลขนัยสำคัญเพียง 3 เท่านั้น ดังนั้น input สำหรับโปรแกรมของผู้วิจัยที่ต้องใช้ค่าจาก output ของโปรแกรมสำเร็จรูป Lpile Plus จึงมีความละเอียดไม่สูงมากพอที่ทำให้ output ทุกค่ามีค่าเท่ากับ output ของโปรแกรมสำเร็จรูป Lpile Plus

3.2.2 การวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้างด้วยโปรแกรม Com624P

นอกจากการวิเคราะห์กลับเพื่อหาพารามิเตอร์สำหรับเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้างแล้ว ผู้วิจัยยังได้ใช้โปรแกรม Com624P ของ FHWA (Federal Highway Administration) ที่พัฒนาโดย Reese (1977) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ p-y curve concept ในการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้าง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการวิเคราะห์ด้วยวิธี p-y curve

การวิเคราะห์ด้วย Com624P สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดใช้ค่า $E_p I_p$ เป็นค่า Gross $E_p I_p$ (ใช้ $I_p = \pi D^4 / 64$ นั่นคือเป็นการหาค่า $E_p I_p$ โดยไม่คำนึงถึงเหล็กเสริมในเสาเข็ม) เนื่องจากโปรแกรม Com624P ถึงแม้จะสามารถใช้ในส่วนของ “Generate Crack Section $E_p I_p$ ” ได้ (เป็นส่วนที่สร้างกราฟ M vs $E_p I_p$ โดยรายละเอียดแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. และกราฟที่ได้จะเป็นในลักษณะดังรูปที่ ก.5 - Analytical) ทว่าโปรแกรมไม่รับค่าจำนวนเหล็กเสริมที่มีจำนวนมากกว่า 25 เส้น อีกทั้ง “Generate Crack Section $E_p I_p$ ” ดังกล่าวให้กราฟค่า M vs $E_p I_p$ ที่ลดลงอย่างมากเมื่อคอนกรีตเริ่มแตกร้าวในส่วนที่รับแรงดึง โดยส่งผลให้ผลการคำนวณได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็มหรือค่าโมเมนต์มากเกินไป

สำหรับโมเดล p-y curve ที่ใช้ในโปรแกรม Com624P ผู้วิจัยเลือกใช้ p-y curve for soft clay ของ Matlock (1970) สำหรับดินเหนียวอ่อนหรือแข็งปานกลาง (soft to medium clay) สำหรับดินเหนียวแข็งใช้ p-y curve for stiff clay below water table ของ Reese (1975)

เพื่อให้สามารถทราบว่าการวิเคราะห์ที่ได้จาก Com624P มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในสนามเท่าใด จึงได้ทำการหาค่า Slope Sqdev (เป็นผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่า Slope ที่วัดได้จาก Inclinometer กับผลรันที่ได้จากโปรแกรม ณ. ความลึกที่เท่ากันตลอดช่วงความลึกที่มีการวัดค่าด้วย Inclinometer) ทว่าผลลัพธ์ที่ได้จาก Com624P มีเลขนัยสำคัญเพียง 3 เท่านั้นซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับการหาค่า Slope Sqdev ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องนำผลลัพธ์ที่ได้จาก Com624P มาหาค่า E_s แล้วนำมารันด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยผู้วิจัยอีกครั้ง

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่กลับสำหรับเสาเข็มกลุ่มรับแรงกระทำด้านข้าง

เนื่องจากทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on Elastic Foundation, BEF) ที่มีสมมุติฐานว่าปฏิกิริยาของดินที่มีต่อเสาเข็มเสมือนแฉวงของสปริงยืดหยุ่นจำนวนอนันต์เรียงกันอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของเสาเข็ม โดยสปริงเหล่านี้เป็น “Isolate spring” ที่ไม่มีส่งถ่ายแรงหรือหน่วยแรงให้สปริงตัวอื่นๆ ซึ่งทำให้ทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่นเป็น โมเดลที่ขาดความต่อเนื่องของดิน ดังนั้นการนำทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่นไปใช้ในการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่มจึงเป็นวิธี Empirical

เนื่องจากข้อมูลการทดสอบเสาเข็มกลุ่มในโครงการที่ 4 (บางชื่อ) ไม่มีการวัดค่าการกระจายของแรงในกลุ่มเสาเข็ม ส่งผลให้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ที่กลับหาค่า E_s ของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็ม ดังนั้นการวิเคราะห์ที่กลับในกรณีที่เป็นเสาเข็มกลุ่มสำหรับงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์ที่กลับหาค่า Group Reduction Factor ตามวิธีของ Davisson (1970) และทำเฉพาะกรณี ฟังก์ชัน $E_s = k$ และ $E_s = kx$ เท่านั้น

นอกจากนั้นยังทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Group 4.0 (Student Version, Reese and Van Impe 2001) ซึ่งใช้วิธี p-y curve และ p-multiplier concept โดยนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มกลุ่มในสนามด้วย

3.3.1 การวิเคราะห์ที่กลับหาค่า Group Reduction Factor

Davisson (1970) ได้เสนอค่า Group Reduction Factor ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่ไปลดค่า E_s ของเสาเข็มเดี่ยวทำให้ได้ค่า E_s สำหรับกรณีเสาเข็มกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.2 งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ที่กลับสำหรับโครงการที่ 4 (บางชื่อ) ซึ่งมีการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวสองต้น และในบริเวณใกล้เคียงกันก็มีการทดสอบกลุ่มเสาเข็มสองต้นและสามต้น (spacing 3D) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ที่กลับเพื่อหาค่า Group Reduction Factor มีดังนี้

1) วิเคราะห์ที่กลับหาค่า E_s ของเสาเข็มเดี่ยวในกรณีที่กำหนดให้ฟังก์ชัน $E_s = k$ และ $E_s = kx$ ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์ที่กลับกรณีเสาเข็มเดี่ยวได้แสดงในหัวข้อที่ 3.2.1

2) การวิเคราะห์ที่กลับหาค่า E_s กรณีเสาเข็มกลุ่ม ได้ทำการสมมุติว่าแรงที่กระทำต่อฐานรากได้กระจายสู่เสาเข็มในกลุ่มเท่ากันทุกต้นและค่า E_s ของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มมีค่าเท่ากันด้วยสมมุติฐานดังกล่าวทำให้สามารถวิเคราะห์ที่กลับกรณีเสาเข็มกลุ่มเหมือนกรณีเสาเข็มเดี่ยวคือสามารถแยกพิจารณาเสาเข็มเพียงต้นเดียวจากกลุ่มเสาเข็มได้ ซึ่งใช้ข้อมูล Pile head deflection จาก Dial Gauge และค่าความชันที่หัวเสาเข็มจากเครื่องมือ Eletrolevel ในการวิเคราะห์ที่กลับ โดยการวิเคราะห์ที่กลับได้ใช้โปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมจะเหมือนในบทที่ 3 เพียงแต่เปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตที่หัวเสาเข็มเท่านั้น ทั้งนี้โปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ที่กลับในส่วนนี้จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมอีกครั้งโดยทำตรวจ

สอบกับโปรแกรมสำเร็จรูป Lpile Plus Version 3 (Student Version, Reese and Van Impe 2001)
ซึ่งผลลัพธ์ได้แสดงในตารางที่ 3.10 และ ตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.10 แสดงผลลัพธ์ของโปรแกรม Lpile Plus Version 3 (Student Version)

Depth (m)	y predict (m)	moment predict (Ton*m)	Shear predict (Ton)	Slope predict	Flextral Rigidity (Ton*m ²)	Soil Reaction (Ton/m)
0	2.47E-02	-328	100	-3.00E-06	1.85E+05	-4.93
0.5	2.45E-02	-279	97.3	-8.22E-04	1.85E+05	-6.01
1	2.39E-02	-231	94	-1.51E-03	1.85E+05	-7.05
1.5	2.30E-02	-185	90.2	-2.07E-03	1.85E+05	-8.03
2	2.18E-02	-140	86	-2.37E-03	7.41E+05	-8.94
2.5	2.06E-02	-98.5	81.3	-2.45E-03	7.41E+05	-9.81
3	1.94E-02	-59.1	76.2	-2.50E-03	7.41E+05	-10.6
3.5	1.81E-02	-22.3	70.7	-2.53E-03	7.41E+05	-11.4
4	1.69E-02	11.6	64.8	-2.53E-03	7.41E+05	-12.1
4.5	1.56E-02	42.5	58.6	-2.51E-03	7.41E+05	-12.7
5	1.44E-02	70.2	52.4	-2.47E-03	7.41E+05	-12.3
5.5	1.31E-02	94.9	46.3	-2.42E-03	7.41E+05	-12
6	1.19E-02	117	40.4	-2.35E-03	7.41E+05	-11.6
6.5	1.08E-02	135	34.7	-2.26E-03	7.41E+05	-11.2
7	9.67E-03	151	29.2	-2.17E-03	7.41E+05	-10.8
7.5	8.61E-03	164	23.9	-2.06E-03	7.41E+05	-10.4
8	7.61E-03	175	18.8	-1.94E-03	7.41E+05	-9.99
8.5	6.67E-03	183	13.9	-1.82E-03	7.41E+05	-9.56
9	5.79E-03	189	9.2	-1.70E-03	7.41E+05	-9.12
9.5	4.97E-03	192	4.75	-1.57E-03	7.41E+05	-8.67
10	4.22E-03	194	0.533	-1.44E-03	7.41E+05	-8.21
10.5	3.53E-03	193	-3.45	-1.31E-03	7.41E+05	-7.74
11	2.91E-03	190	-7.2	-1.18E-03	7.41E+05	-7.25
11.5	2.35E-03	186	-10.7	-1.05E-03	7.41E+05	-6.76

ตารางที่ 3.11 แสดงผลลัพธ์ของโปรแกรมของผู้วิจัย

Depth (m)	y predict (m)	Es (Ton/m ²)	slope predict	Moment predict (Ton*m)	Shear predict (Ton)	Soil Reaction (Ton/m)
0	2.473E-02	200	-3.000E-06	-327.886	100.000	-4.936
0.5	2.451E-02	245	-8.217E-04	-278.503	97.263	-6.012
1	2.391E-02	295	-1.509E-03	-230.623	93.997	-7.053
1.5	2.300E-02	349	-2.070E-03	-184.507	90.226	-8.030
2	2.184E-02	410	-2.366E-03	-140.397	85.979	-8.957
2.5	2.063E-02	476	-2.447E-03	-98.527	81.284	-9.826
3	1.939E-02	546	-2.500E-03	-59.114	76.178	-10.597
3.5	1.813E-02	630	-2.527E-03	-22.349	70.674	-11.421
4	1.687E-02	716	-2.531E-03	11.560	64.799	-12.076
4.5	1.560E-02	814	-2.513E-03	42.450	58.605	-12.702
5	1.435E-02	854	-2.475E-03	70.165	52.364	-12.260
5.5	1.313E-02	916	-2.419E-03	94.815	46.293	-12.026
6	1.193E-02	975	-2.348E-03	116.458	40.378	-11.633
6.5	1.078E-02	1040	-2.263E-03	135.193	34.675	-11.179
7	9.671E-03	1120	-2.166E-03	151.133	29.180	-10.802
7.5	8.614E-03	1210	-2.060E-03	164.372	23.878	-10.405
8	7.612E-03	1310	-1.945E-03	175.011	18.779	-9.992
8.5	6.669E-03	1430	-1.824E-03	183.151	13.891	-9.558
9	5.787E-03	1580	-1.699E-03	188.902	9.223	-9.116
9.5	4.970E-03	1740	-1.570E-03	192.374	4.776	-8.670
10	4.217E-03	1950	-1.440E-03	193.678	0.557	-8.205
10.5	3.530E-03	2190	-1.309E-03	192.931	-3.429	-7.741
11	2.908E-03	2490	-1.180E-03	190.249	-7.176	-7.246
11.5	2.350E-03	2880	-1.053E-03	185.755	-10.678	-6.761

ทั้งนี้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่หัวเสาเข็มเป็นแบบทราบค่าแรงกระทำด้านข้างและค่าความ
 ชั้น (กำหนดให้มีค่า $P_t = 100$ ตันและ $S_t = -3E-6$) ส่วนปลายเสาเข็มกำหนดให้เป็นปลายอิสระและ
 เสาเข็มยาว 35 เมตร นอกจากนั้นยังกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า $E_p I_p$ ด้วย

3) เมื่อได้ค่า E_s ของทั้งกรณีเสาเข็มเดี่ยวและกรณีเสาเข็มกลุ่มจากข้อ 1, ข้อ 2 แล้ว สามารถหาค่า Group Reduction Factor ได้โดย

$$\text{Group Reduction Factor} = (E_s \text{ of pile Group}) / (E_s \text{ of Single pile}) \quad \dots(3.51)$$

3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Group 4.0 (Student Version, Reese and Van Impe 2001))

เนื่องจากเป็นโปรแกรมรุ่นสำหรับนักศึกษาจึงทำให้มีข้อจำกัดในกำหนดค่าต่างๆกับโปรแกรมคือ สามารถกำหนดชั้นดินได้เพียง 1 ชั้นเท่านั้น, ไม่สามารถใช้งานในส่วน “Generate Crack Section $E_p I_p$ ”, จำนวนแถวของเสาเข็มกลุ่มกำหนดได้เพียง 2 แถวเท่านั้น เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดใช้ดินเพียง 1 ชั้นในการวิเคราะห์โดยมีค่า $S_u = 3.4 \text{ ton/m}^2$, $\gamma_t = 1.75 \text{ ton/m}^3$, $\epsilon_{50} = 0.005$ และใช้ p-y curve for soft clay ของ Matlock (1970) สำหรับดินเหนียวอ่อนหรือแข็งปานกลาง (soft to medium clay) ส่วนเงื่อนไขขอบเขตที่หัวเสาเข็มกำหนดให้เป็นแบบยึดแน่น (fix head), ใช้ค่า $E_p I_p$ เท่ากับ Gross Section $E_p I_p$ เท่ากันตลอดความยาวเสาเข็ม สำหรับค่า p-multiplier ให้โปรแกรมกำหนดเองอัตโนมัติ (พบว่าโปรแกรมใช้ค่าเท่ากับ 0.97 สำหรับ Leading Row และ 0.83 สำหรับ Trailing Row สำหรับทั้งเสาเข็มกลุ่ม 3 ต้นและ 2 ต้น)

ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม Group 4.0 นี้จะนำไปพล็อตกราฟและเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์กลับในหัวข้อที่ 3.3.1 ซึ่งแสดงอยู่ในบทที่ 4