

บทที่ 4 ผลการทดลองและข้อมูลในสนาม

4.1 ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพชั้นดินและคุณสมบัติของชั้นดิน บนถนนชนบุรี-ปากท่อ กม.15+000

จากการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ แล้วนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัยปฐพีกลศาสตร์ เพื่อหาคุณสมบัติชั้นพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 ประกอบกับข้อมูลการทดสอบ Vane shear ในสนาม ดังรูปที่ 4.1 และข้อมูลแรงดันน้ำที่ความลึกต่าง ๆ ในบริเวณใกล้เคียง แสดงในรูปที่ 4.2

1) จากผลการทดสอบหาคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดิน พบว่าค่า Water content ในช่วง 0-6.65 เมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 83.34-115.10% ช่วง 6.65-9.65 เมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 50.11-59.29% และความลึก 9.65-15.2 เมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 27.38-33.57% ในการทดสอบ Atterberg's limit พบว่าค่า Plasticity Index มีค่าอยู่ในช่วง 23.77-67.61% และค่า Specific Gravity อยู่ในช่วง 2.66-2.72

2) จากการทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน พบว่า ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำใน 1 มิติของดิน มีค่าอัตราส่วนการอัดตัว (Compression Ratio, CR) มีค่าอยู่ในช่วง 0.118-0.337 และอัตราส่วนการอัดซ้ำ (Recompression Ratio, RR) มีค่าอยู่ในช่วง 0.023-0.048 มีค่า Overconsolidation Ratio (OCR) อยู่ในช่วง 1.7-8 สำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) จะได้ค่า Young's Modulus ของดินประมาณ 159 t/m^2

3) จากผลการทดสอบ Vane Shear ในสนาม และผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ในห้องปฏิบัติการ พบว่า ในช่วงดินอ่อน (Soft Clay) ค่าของ $0.7 S_u (F.V.) / \bar{\sigma}_{vm}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.13-0.24

จากข้อมูลข้างต้น ได้แสดงลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1

4.2 ข้อมูลเกี่ยวกับเสาเข็ม

4.2.1 คุณสมบัติทางด้านรูปร่างและชนิดเสาเข็ม

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางปฐพีกลศาสตร์ กม. 15+000 LT

DEPTH		WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMITS			UNIT WEIGHT t/m ²	G _s	e ₀
FROM	TO		LL	PL	PI			
1.3	1.9	115.1	98.2	43.22	54.98	1.42	2.56	2.939
2.6	3.2	99.47	111.65	44.04	67.61	1.42	2.68	3.128
4.1	4.7	103.54	108.32	49.6	58.72	1.45	2.7	2.879
4.8	5.4	102.63	105.4	50.16	55.24	1.44	2.7	2.907
5.6	6.2	83.34	86.8	37.12	49.68	1.51	2.71	2.417
7.1	7.7	59.29	70.45	32.27	38.18	1.62	2.67	1.809
8.6	9.2	50.11	63.7	28.91	34.79	1.7	2.75	1.481
10.1	10.7	33.57	49.7	25.93	23.77	1.86	2.68	0.992
11.6	12.2	32.42	74.8	30.12	44.68	1.85	2.65	0.725
13.1	13.7	27.38	52.94	26.23	26.71	1.99	2.64	0.934
14.6	15.2	31.45	77	33.28	43.72	1.91	2.72	0.901

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ Consolidation test ที่ กม. 15+000 LT

DEPTH (m)		PI% (t/m ²)	$\bar{\sigma}_{vm}$	OCR	RR	CR	Su (vane) (t/m ²)	$\frac{0.7 Su}{\bar{\sigma}_{vm}}$	C _v x 10 ⁻⁴ cm ² /sec
FROM	TO								
1.3	1.9	54.98	4.55	18	0.036	0.337	1.55	0.24	1.4
2.6	3.2	67.61	4.8	4.29	0.048	0.336	1.27	0.19	3.2
4.1	4.7	58.72	5.1	2.3	0.038	0.260	1.37	0.19	2.0
4.8	5.4	55.24	4.75	2	0.037	0.247	1.42	0.21	1.6
5.6	6.2	49.68	5.1	1.7	0.035	0.228	1.55	0.21	1.9
7.1	7.7	38.18	7.3	1.7	0.040	0.288	1.82	0.17	2.7
8.6	9.2	34.79	12.0	1.7	0.028	0.192	2.55	0.15	2.8
10.1	10.7	23.77	12.8	1.8	0.023	0.152	3	0.16	4.3
11.6	12.2	26.71	23.6	2	0.031	0.130	4.27	0.13	6.27
13.1	13.7	44.68	19.6	2.5	0.026	0.131	6.46	0.23	9.8
14.6	15.2	43.72	27.2	2.8	0.039	0.118	-	-	9.43

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบ Triaxial test ที่ กม. 15+000

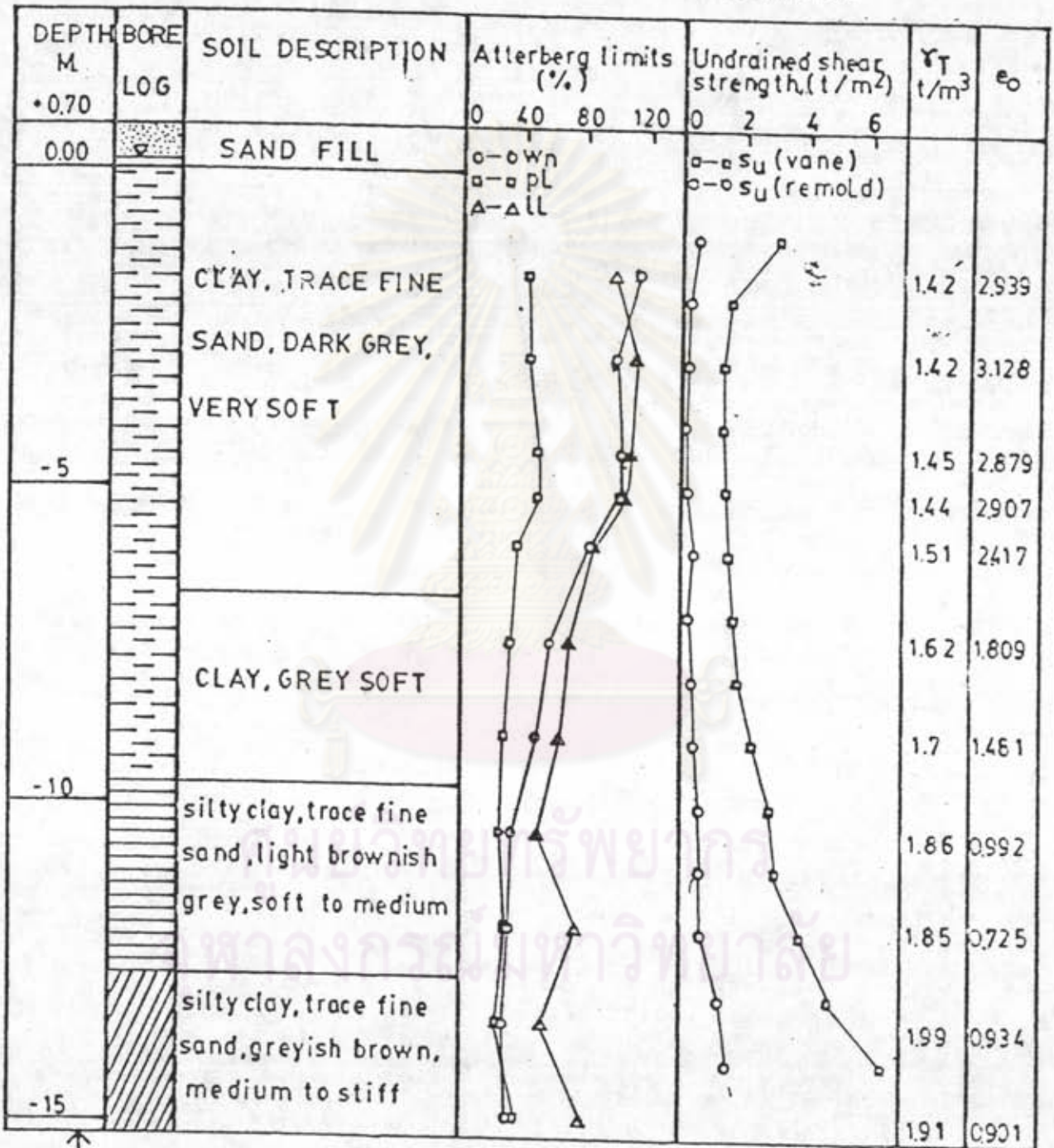
DEPTH (M.)		$\bar{\sigma}_{vm}$ (t/m ²)	$\bar{\sigma}_c$ (t/m ²)	W _n %	E _u (t/m ²)
FROM	TO				
2.6	3.2	4.8	3	99.47	164
4.1	4.7	5.1	2.3	103.54	66
7.1	7.7	7.3	5.2	59.29	123
10.1	10.7	12.8	9.2	33.57	284
14.6	15.2	27.2	15.7	31.45	400

SOIL DATA

BASIC PROPERTIES

LOCATION: THONBUREE - PAKTHO km. 15.000

BORE HOLE : BH-1 REPORTED BY P SIRIPANOSATIEN



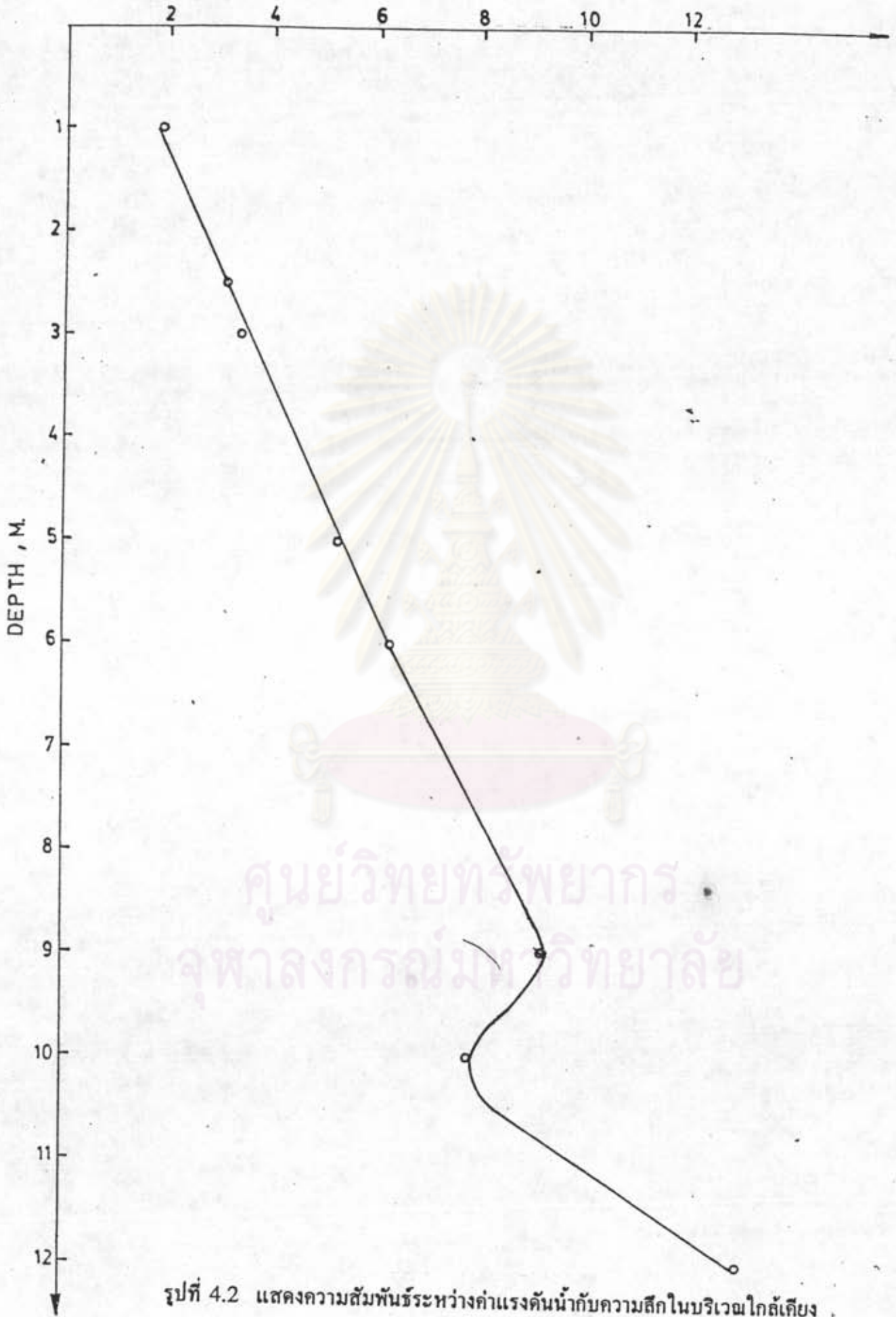
↑ END OF BORING

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน

GATEWAY NATURAL TRACING PAPER 90/95 gm² SIZE A4

United Arab

PORE Pressure ; m H₂O



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำกับความลึกในบริเวณใกล้เคียง

ในการออกแบบทางหลวงพิเศษหมายเลข 35 สายพระรามที่ 2 ในช่วง กม. 12+000 ถึง กม.27+500 ได้ออกแบบให้มีเสาเข็มช่วยในการรับน้ำหนักของคันทาง (Embankment) เพื่อช่วยลดค่าการทรุดตัวของถนน โดยใช้เสาเข็มมีหน้าตัด 0.22×0.22 เมตร ยาว 12 เมตร ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 2 เมตร มีแท่นหัวเข็ม (pile cap) ขนาด $0.80 \text{ ม.} \times 0.80 \text{ ม.}$ ซึ่งแท่นหัวเข็มของเสาเข็มแต่ละต้นไม่ยึดติดกัน และได้มีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มที่ กม.15+000

4.2.2 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

เนื่องจากพฤติกรรมการทรุดตัวของเสาเข็มค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้น วิธีที่ดีที่สุดในการหาค่า Soil Modulus ของดิน คือ การคำนวณกลับจากผลการทดสอบเสาเข็ม แต่ในทางปฏิบัติผลการทดสอบเสาเข็มจะถูกต้องเพียงใดขึ้นกับลักษณะและวิธีการทดสอบเสาเข็ม ซึ่งทำให้ค่าการทรุดตัวในการทดสอบผิดไปจากการทรุดตัวจริงในสนาม จึงต้องมีการปรับแก้ผลเหล่านี้ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ลักษณะ

1) ผลของการทดสอบเสาเข็มโดยใช้เสาสมอ (Anchore Pile) จะมีแรงกระทำในการทดสอบเสาเข็มเนื่องจากเสาสมอรับแรงดึง ซึ่งจะทำให้เสาเข็มทดสอบมีค่าการทรุดตัวน้อยกว่าที่เป็นจริง ค่าการทรุดตัวที่ปรับแก้จะมีค่าเท่ากับค่าการทรุดตัวที่วัดได้รวมกับผลกระทบเนื่องจากเสาสมอ ดังสมการ

$$p \text{ (ที่ปรับแก้)} = p \text{ (วัดได้)} / (1-\alpha)$$

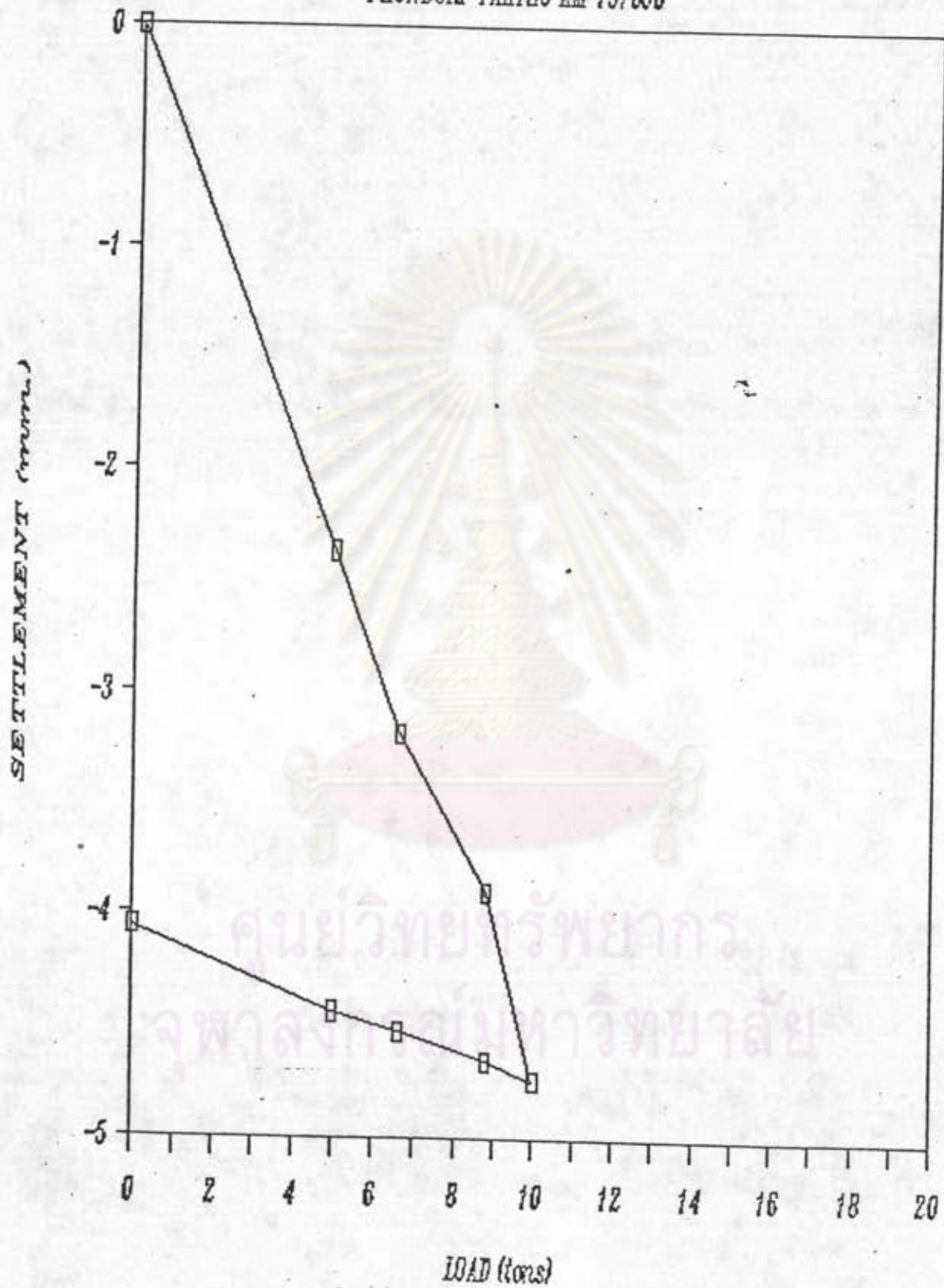
α หาได้จากสมการ 2.18

2) ผลจากการวางคานอ้างอิง (Reference Beam) ไว้ใกล้เสาเข็มที่รับน้ำหนักจะทำให้คานอ้างอิงเกิดการเคลื่อนตัวลงตามเสาเข็ม เป็นผลให้ค่าการทรุดตัวที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็นค่าการทรุดตัวที่ปรับแก้แล้วจะมีค่าเท่ากับการทรุดตัวที่วัดได้ รวมถึงผลกระทบเนื่องจากเสาเข็มที่รับน้ำหนักไปยังคานอ้างอิง (Poulos and Davis, 1980)

จากผลการทดสอบเสาเข็ม พบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในการทดสอบของเสาเข็มทดสอบมีค่า 10 ตัน (ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดคาดคะเนด้วยข้อมูลดินประมาณ 12 ตัน) การทรุดตัวสูงสุดที่วัดได้เท่ากับ 4.745 มม. ดังแสดงในรูป 4.3

PILE LOAD TEST

THONBURI-PAETHO KM 15+000



รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบเสาเข็ม

4.2.3 การคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) จากการทดสอบเสาเข็ม

Poulos & Davis (1980) ได้เสนอวิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน (E_s) และค่าสตีฟเนส (K) ของเสาเข็มเดี่ยว จากผลการทดสอบเสาเข็ม ดังนี้

1) หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากสมการ

$$E_s = \frac{PI_o R_k R_h R_v}{pd}$$

โดยใช้ค่าการทรุดตัวจากการทดสอบเสาเข็ม, น้ำหนักที่กระทำต่อเสาเข็ม และขนาดของเสาเข็มจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_s กับ R_k , R_h , R_v , I_o

2) หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) ในรูปความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสของเสาเข็ม (E_p) และค่าสตีฟเนส (K) จากสมการ

$$E_s = \frac{E_p}{K}$$

3) จากความสัมพันธ์ที่ได้ในข้อ (1) และข้อ (2) นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง E_s กับ K ลงในกราฟ log - log scale

4) จะได้จุดตัดของเส้นกราฟที่จุด ๆ หนึ่ง ซึ่งจะเป็นค่า E_s กับ K เมื่อพิจารณาพฤติกรรมร่วมระหว่างดินกับเสาเข็มเดี่ยว

จากการทำการคำนวณกลับจากผลการทดสอบเสาเข็ม ปรากฏว่าได้ค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำ (E_s) เท่ากับ 220 t/m^2 และค่าสตีฟเนส (K) มีค่า 2300 และได้ค่าโมดูลัสแบบระบายน้ำ (E'_s) เท่ากับ 208 t/m^2 และค่าสตีฟเนส (K) มีค่า 2450 โดยกำหนดให้ค่า poisson ratio (ν) เท่ากับ 0.3

4.3 ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะรูปแบบฐานราก และน้ำหนักระทำ

ลักษณะรูปแบบของฐานรากจะใช้เสาเข็มช่วยในการถ่ายน้ำหนักจากคันทาง (Embankment) เพื่อลดค่าการทรุดตัวของถนน โดยวางระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 2 เมตร และจะหล่อแท่นหัวเข็ม (Pile Cap) ที่เสาเข็มแต่ละต้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับน้ำหนักบรรทุกของคันทาง

น้ำหนักบรรทุกเกิดจากน้ำหนักของคันทาง (Embankment) และน้ำหนักจากยานพาหนะ การคิมน้ำหนักบรรทุกจึงสามารถแยกได้เป็น 2 ลักษณะ

1) คิเฉพาะน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ของตัวถนนที่ถ่ายน้ำหนักบรรทุกไปยังเสาเข็ม ซึ่งใช้ในการคำนวณหาปริมาณการทรุดตัว

2) คิมน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) รวมกับน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) เนื่องจากยานพาหนะและปริมาณจราจร ในที่นี้คิมน้ำหนักบรรทุกจร 0.5 ตัน/ม^2

4.4 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของถนนสายธนบุรี-ปากท่อ กม.15+000

การวิเคราะห์ที่ใช้พิจารณาแยกกัน ระหว่างผลของการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มที่ถ่ายลงสู่มวลดินและการทรุดตัวของมวลดิน เนื่องจากน้ำหนักของคันทางส่วนที่เสาเข็มไม่ได้รับ และน้ำหนักของชั้นทรายถม โดยที่ผลของ soil structure interaction ไม่ได้รับการพิจารณา

4.4.1 การทรุดตัวของเสาเข็ม

ในการวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มบนถนนสายธนบุรี-ปากท่อ กม.15+000 จะใช้วิธี Modified Theory of Elasticity ซึ่งวิธีนี้จะพิจารณาการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเป็นแบบ 3 มิติ โดยสมมติให้ดินมีคุณสมบัติเป็น Isotropically linear elastic material และใช้ทฤษฎี Elasticity ในการหาค่าการทรุดตัวจะพิจารณาเป็นเสาเข็มเดี่ยว โดยคิดผลกระทบของเสาเข็มต้นข้างเคียงด้วย ซึ่งในการคำนวณจะแบ่งการทรุดตัวเป็น 2 ส่วน คือ

1) การทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate Settlement, p_i) เมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักจะเกิดการทรุดตัวขึ้นโดยไม่มีภาระระบายน้ำออกจากมวลดิน ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือ

1.1 การทรุดตัวของเสาเข็มเนื่องจากชั้นดินที่เสาเข็มฝังอยู่ (Founding Layer, p_{fd}) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

ก. หาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว เนื่องจากดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็ม และ ปลายเสาเข็มรวมทั้งตัวเสาเข็ม ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 2.2 โดยหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นบนเสาเข็ม หาได้จากการกระจายน้ำหนักบรรทุกของคันทางลงบนแท่นหัวเสาเข็มบนหัวเสาเข็ม ด้วยข้อมูลของ earth pressure cell บนหัวเสาเข็ม (ดูข้อ 4.5) ซึ่งน้ำหนักบรรทุกของคันทางจะมีรูปทรงเรขาคณิต เป็นรูปกรวยเหลี่ยมปลายตัด มีความสูง 1.50 ม. จากแท่นหัวเข็ม โดยมีพื้นที่ฐานมีค่า 0.64 m^2 และพื้นที่ด้านบนมีค่า 4 m^2 ส่วนค่า E_s ในสมการ เป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างเสาเข็มกับดิน ซึ่งได้จากการคำนวณกลับจากผลการ ทดสอบเสาเข็ม ซึ่งจะได้ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว ณ จุดที่พิจารณา

ข. พิจารณาผลกระทบของเสาเข็มข้างเดียว ภายในกลุ่มเสาเข็มไปยังเสาเข็มต้นที่พิจารณา โดยใช้สมการ 2.14 เมื่อค่า α (Interaction factor) หาได้จากรูปที่ 2.15

1.2 การทรุดตัวของดินใน Underlying layer, (ρ_{ud})

การทรุดตัวเป็นการทรุดตัวทันทีเมื่อเสาเข็มได้รับแรงเค้นที่เกิดจากการบรรทุก น้ำหนัก ทำให้ชั้นดินที่อยู่ใต้ปลายเสาเข็มเกิดการยุบตัว ซึ่งหาจาก

การทรุดตัวของชั้นดินใต้ปลายเสาเข็มเดี่ยวสมมูลย์ ที่จุดพิจารณาตามสมการที่ 2.17 โดยใช้ค่า I_p ในรูปที่ 2.12 และ E_s จากคุณสมบัติการยุบอัดตัวของชั้นดินในสภาพไม่มีการระบายน้ำ (E_u) ของชั้นดินแต่ละชั้น

การทรุดตัวทันทีทันใดที่เกิดขึ้นทั้งหมด เป็นผลรวมของค่าการทรุดตัวเนื่องจาก ดินและเสาเข็มใน Founding layer, ρ_{fd} กับการทรุดตัวของดินใน Underlying layer, ρ_{ud} ดังแสดงในข้อ 1.1) และ 1.2) ข้างต้น

2. การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Settlement, ρ_c) ในการคำนวณ สามารถกระทำได้เช่นเดียวกับการทรุดตัวของดินใน Underlying layer แต่ต้องใช้อพารามิเตอร์ที่มีการระบายน้ำ เช่นค่า E' (drained modulus) และ ν' (drain Poisson's Ratio) ที่ดินต่ำกว่าปลายเสาเข็ม

4.4.2 การทรุดตัวของมวลดินระหว่างเสาเข็ม

การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของมวลดินระหว่างเสาเข็ม บนถนนสายธนบุรี-ปากท่อ กม.15+000 จะเกิดจากทรายนมปรับระดับหนา 0.70 ม. และน้ำหนักที่ถ่ายลงมาจากชั้น Soil cement และคันทางในส่วนที่ไม่ใช่ load ลงเสาเข็ม ดังนั้น ในการวิเคราะห์จึงคิดค่าการ

ทรุดตัวของมวลดิน โดยวิธีของ Terzaghi โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการอัดตัว
 คายน้ำใน 1 มิติ จากการศึกษาของพินิจ (2528)

น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากทรายถมปรับระดับหาได้จาก

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left\{ \alpha + \sin \alpha \cos (\alpha + 2\delta) \right\}$$

$$\alpha = \tan^{-1} (x/z) - \tan^{-1} ((x-B)/z)$$

$$\delta = \tan^{-1} ((x - B)/z)$$

ส่วนน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Soil cement และคันทาง จะมีรูปทรงทาง
 เรขาคณิตในการถ่ายน้ำหนักเป็นปริมาตร ในการคำนวณจะถือเหมือนเป็น Point Load กระทำที่
 มวลดิน และคิดผลเนื่องจาก Point Load ข้างเคียงด้วย โดยใช้สมการ

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2 \left(\left(\frac{r}{z} \right)^2 + 1 \right)^{5/2}}$$

โดยที่ $\Delta\sigma_z$ = หน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่ง

Q = Point Load ที่กระทำ

q = Strip Load ที่กระทำ

r = ระยะห่างจากแนวแรงกระทำไปยังจุดที่พิจารณาของ Point

load

x = ระยะห่างจากแนวแรงกระทำไปยังจุดที่พิจารณาของ Strip

load

z = ความลึกใด ๆ

4.4.3 การวิเคราะห์การทรุดตัวของมวลดินในกรณีที่ไม่ใช่เสาเข็มช่วยลดค่าการทรุดตัว

จะแบ่งการวิเคราะห์เป็นการทรุดตัวแบบทันทีทันใด และการทรุดตัวแบบอัดตัว
 คายน้ำ โดยการทรุดตัวแบบทันทีทันใดจะคำนวณได้จากสมการที่ 2.22 และการทรุดตัวแบบอัดตัว
 คายน้ำจะคำนวณได้จากวิธีของ Terzaghi โดยใช้พารามิเตอร์จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ
 ใน 1 มิติ

4.5 ผลการทดลองและวิเคราะห์

จากข้อมูลการตรวจสอบค่าการทรุดตัวและพฤติกรรมของคันทาง โดยใช้เครื่องมือทางธรณีเทคนิค ของถนนสายธนบุรี-ปากท่อ กม.15+000 พบว่า

1. Earth Pressure Cell มีการติดตั้งในสนาม ดังนี้

1.1 บนแท่นหัวเสาเข็ม ได้มีการเก็บข้อมูลของหน่วยแรงดันที่กระทำบนแท่นหัวเข็ม และได้พล็อตกราฟระหว่างหน่วยแรงดันกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากกราฟพบว่า ค่าหน่วยแรงดันสูงสุดที่กระทำบนแท่นหัวเข็มมีค่า 14.944 ตัน/ม^2 คิดเป็นน้ำหนักที่กระทำบนแท่นหัวเสาเข็มเท่ากับ 9.56 ตัน ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำบนเสาเข็มและชั้นทรายปรับระดับรอบเสาเข็ม ซึ่งมีพื้นที่ 4 ม^2 จะพบว่า น้ำหนักที่กระทำบนแท่นหัวเสาเข็มจะมีค่า 75% ของน้ำหนักทั้งหมด และอีก 25% ของน้ำหนักทั้งหมดได้กระทำบนชั้นทรายปรับระดับ

หลังจากก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วและได้เปิดการจราจร จะพบว่าค่าหน่วยแรงดันไม่ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าผลของน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากยานพาหนะมีผลกระทบต่อทรุดตัวของเสาเข็มน้อยมาก

ค่าหน่วยแรงดันจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาหลังจากก่อสร้าง เนื่องจากได้มี redistribution ของหน่วยแรงที่มากกระทำต่อเสาเข็มและต่อมวลดินเหนียวอ่อนโดยตรง

1.2 บนทราย ได้มีการพล็อตกราฟระหว่างหน่วยแรงดันกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะพบว่าหน่วยแรงดันสูงสุดที่กระทำบนชั้นทรายปรับระดับมีค่า 2.72 ตัน/ม^2 จะเห็นว่าให้ผลน้อยกว่าหน่วยแรงดันของคันทางทั้งหมด ซึ่งมีค่า $3 \text{ ตัน/ม}^2 - 3.15 \text{ ตัน/ม}^2$

1.3 บน Soil cement ได้มีการพล็อตกราฟหน่วยแรงดันกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะพบว่าหน่วยแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นบน Soil cement มีค่า 1.967 ตัน/ม^2 ซึ่งจากการคำนวณหน่วยแรงดันที่กระทำบน Soil cement จะมีค่า 1.89 ตัน/ม^2 ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

1.4 จากข้อมูลหน่วยแรงดันในสนามและหลักการออกแบบคันทางด้วย relief pile จะพบว่าลักษณะการถ่ายน้ำหนักของคันทางไปยังชั้นทรายระหว่างเสาเข็มโดยประมาณ มีรูปทรงของคันทางเป็นรูปปิรามิด โดยมีพื้นที่ฐาน 4 ม^2 โดยประมาณ และมีความสูง 1.5 ม . ส่วนน้ำหนักของคันทางที่ถ่ายไปยังเสาเข็มมีรูปทรงกรวยเหลี่ยมปลายตัดที่มีความสูง 1.5 ม . จากแท่นหัวเสาเข็ม มีพื้นที่ฐาน 0.64 ม^2 และพื้นที่ด้านบน 4 ม^2



2. Horizontal Inclinometer ได้ติดตั้งไว้ 2 ชุด คือ

2.1 วางบนแท่นหัวเสาเข็ม เพื่อวัดค่าการทรุดตัวทั้งหมดของเสาเข็มและหา Profile Settlement ของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยมีค่าการทรุดตัวสูงสุดของเสาเข็มที่ 520 วัน มีค่า 12.7 ซม.

2.2 วางอยู่บนชั้นทราย เพื่อวัดค่าการทรุดตัวของมวลดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยมีค่าการทรุดตัวของมวลดินที่ 520 วัน มีค่า 13.2 ซม.

จากข้อมูล Horizontal Inclinometer จะพบว่า การทรุดตัวของเสาเข็มและมวลดินจะมีการทรุดตัวไปพร้อม ๆ กัน แต่จะมีค่าการทรุดตัวที่เริ่มแตกต่างกันที่ 520 วัน โดยมวลดินจะมีการทรุดตัวที่มากกว่าการทรุดตัวที่เสาเข็ม

3. Extensometer ได้แสดงรายละเอียดดังในกราฟรูปที่ 4.9 ซึ่งจะพบ Extensometer ที่ติดตั้งที่ความลึก 11 เมตร จะแสดงค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ความลึก 11-15.2 เมตร จะมีการทรุดตัว 2.1 ซม. ที่เวลา 520 วัน Extensometer ที่ติดตั้งที่ความลึก 8 เมตร จะแสดงค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ความลึก 8-15.2 เมตร จะมีการทรุดตัว 6.26 ซม. ที่เวลา 520 วัน ดังนั้น การทรุดตัวระหว่างระดับ 8-11 เมตร เท่ากับ 4.16 ซม. และ Extensometer ที่ติดตั้งที่ความลึก 4 เมตร จะแสดงค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ความลึก 4-15.2 เมตร จะมีการทรุดตัว 11.27 ซม. ดังนั้น การทรุดตัวระหว่างระดับ 4-8 ม. เท่ากับ 5.01 ซม. ที่เวลา 520 วัน

Horizontal Inclinometer บนชั้นทราย แสดงรายละเอียดดังในรูปที่ 4.8 ซึ่งจะพบว่า การทรุดตัวที่เวลา 520 วัน มีค่า 13.2 ซม. (ซึ่งแสดงระหว่างระดับ +1 ถึง -4 เท่ากับ 1.93 ซม.)

4. ข้อมูลดังกล่าวแสดงว่า การทรุดตัวส่วนใหญ่เกิดที่ระดับ -4 ถึง -11 เมตร โดยมีการทรุดตัวถึง 9.17 ซม. จากการทรุดตัวทั้งหมด 13.2 ซม.

จากการเปรียบเทียบข้อมูลของ Extensometer และ Horizontal Inclinometer บนชั้นทราย จะพบว่า ในช่วงความลึก 0-4 เมตร และ 8-11 เมตร จะมีการทรุดตัวเกิดขึ้น 15% ของการทรุดตัวทั้งหมด ส่วนในช่วงความลึกโดยประมาณจากผิวดิน 4-8 เมตร เกิดการทรุดตัว 70% ของการทรุดตัวทั้งหมด

Piezometer ได้มีการติดตั้งทั้งหมด 4 ชุด คือ ที่ความลึก 2, 6, 10 และ 12 เมตร ได้มีการ plot กราฟระหว่างแรงดันน้ำกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.13

จากกราฟจะพบว่าที่ความลึก 10 เมตร จะให้ค่า excess pore pressure สูงสุด เมื่อพิจารณาผลของ Declined pore pressure ด้วย โดยระดับ -10 เมตร มีค่า 3.813 t/m^2 ซึ่งเมื่อดูจากข้อมูลการทรุดตัวที่วัดโดย Extensometer ซึ่งมีการทรุดตัวในช่วง 4-11 เมตร ประมาณ 70% ของการทรุดตัวทั้งหมด มีสาเหตุเนื่องมาจาก แรงดันน้ำโพรงเพิ่มในช่วง 4-11 เมตร มีค่าสูง จึงเกิดการแพร่กระจายของแรงดันน้ำโพรงเพิ่มอย่างรวดเร็วประการหนึ่ง และเนื่องมาจากผลของ Plastic flow & Undrained creep ของมวลดิน ซึ่งเกิดจากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกเกิน 65% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

อัตราการแพร่กระจายของแรงดันน้ำโพรงเพิ่ม มีอัตราการแพร่กระจายที่เร็วมาก ซึ่งเป็นลักษณะของฐานรากเสาเข็ม

จากผลของการทรุดตัวของมวลดินที่มีมากกว่าเสาเข็มใน long terms จะส่งผลให้เกิด Bending ใน Soil cement มากขึ้น และ Soil cement ที่อยู่ระหว่างเสาเข็มจะต้องสามารถรับแรง Tension ที่เกิดขึ้นใน Soil cement เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกได้ ซึ่งถ้า Soil cement ไม่สามารถรับแรง Tension ที่เกิดขึ้นได้ จะเป็นผลให้ถนนเกิดความเสียหายได้

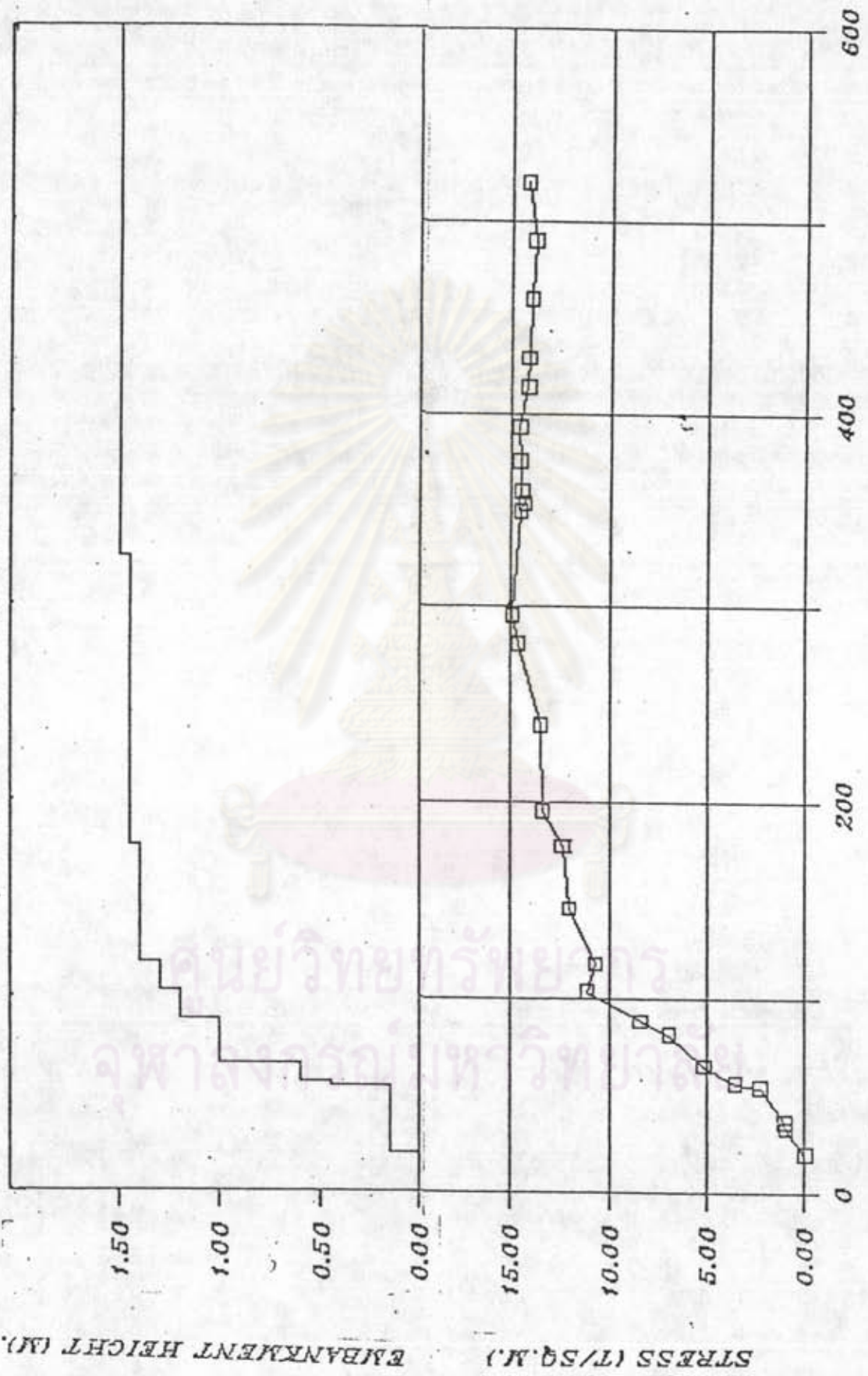
จากการวิเคราะห์ผลของการทดลอง และข้อมูลที่วัดพฤติกรรมในสนาม พบว่า

1. จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า ค่า Young's Modulus ของดินมีค่า 159 t/m^2 โดยประมาณ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของ Young's Modulus ที่ได้จากการคำนวณกลับของผลการทดสอบเสาเข็มมีค่า 220 t/m^2 โดยประมาณ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า Young's Modulus ของดินในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่า Young's Modulus ของดิน จากการคำนวณกลับของผลการทดสอบเสาเข็มประมาณ 30%

2. จากการหาค่า Coefficient of Consolidation (C_v) จากข้อมูลแรงดันน้ำมีค่า $0.109 \text{ m}^2/\text{วัน}$ และค่า C_v ได้จากข้อมูลการทรุดตัวของมวลดินมีค่า $0.1682 \text{ m}^2/\text{วัน}$ จะพบว่าค่า C_v ที่ได้จากข้อมูลการทรุดตัวจะให้ค่าการทรุดตัวมีเวลาต่าง ๆ ได้ใกล้เคียงกับในสนาม ดังแสดงในรูป 4.14

STRESS & TIME

THONBUREE PAKTHO KM 15+000



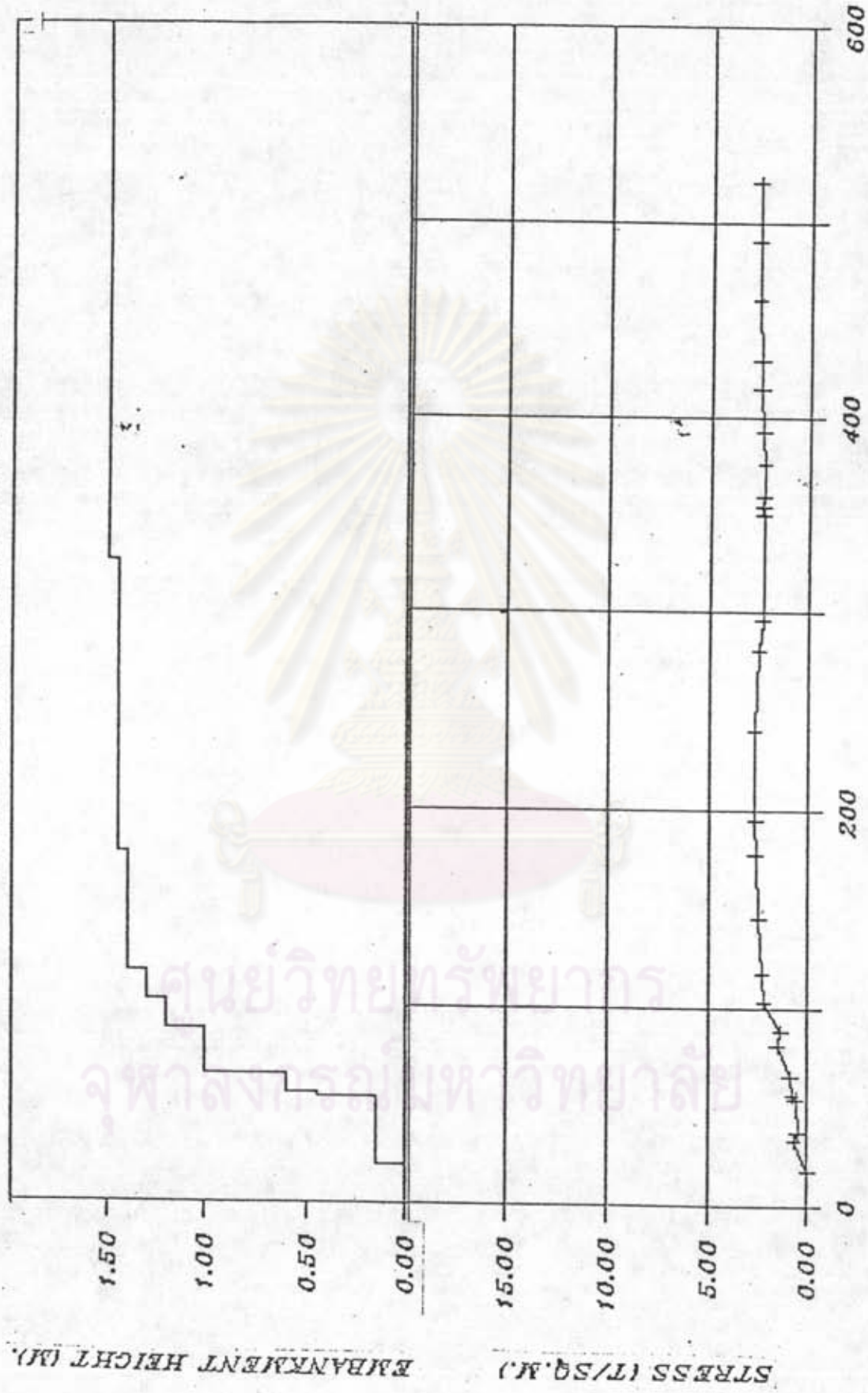
TIME (DAYS)
□ ON PILE CAP

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่กระทำบนเสาเข็มกับเวลา

EMBANKMENT HEIGHT (M.) STRESS (T/SQ.M.)

STRESS & TIME

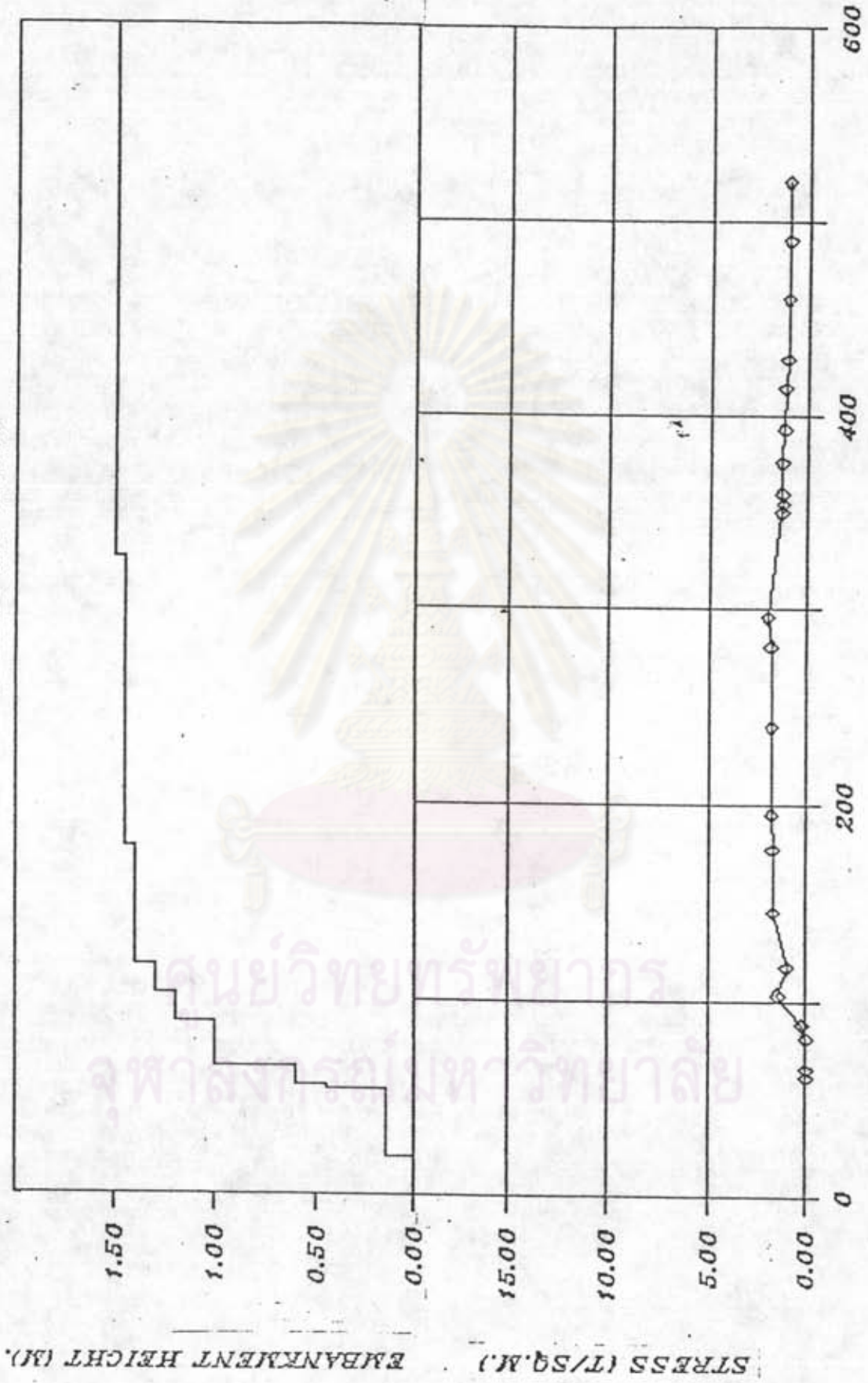
THONBUREE PAKTHO KM 15+000



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงต้นที่กระทำบนชั้นทรายกับเวลา
TIME (DAYS)
+ ON SAND.

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STRESS & TIME
THONBUREE PAKTHO KM 15+000



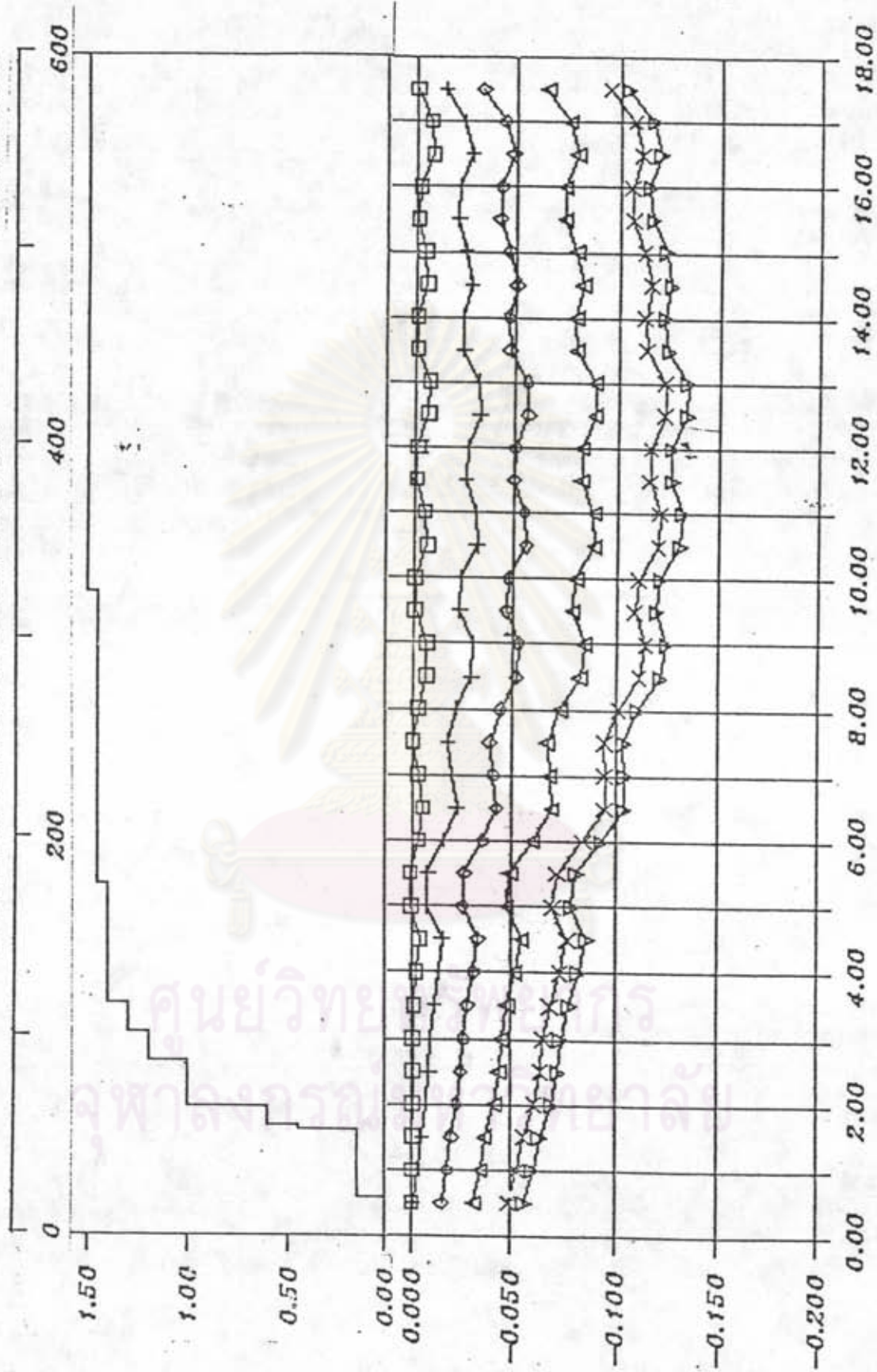
◇ ON SOIL CEMENT.
 TIME (DAYS)

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงแก่ดินที่กระทำบน Soil cement กับเวลา

SETTLEMENT PROFILE

THONBURI PAKTHO KM 15:0N PILE CAP

TIME (DAYS)



SETTLEMENT PROFILE (M.) EMBANKMENT HEIGHT (M.)

DISTANCE (m.)

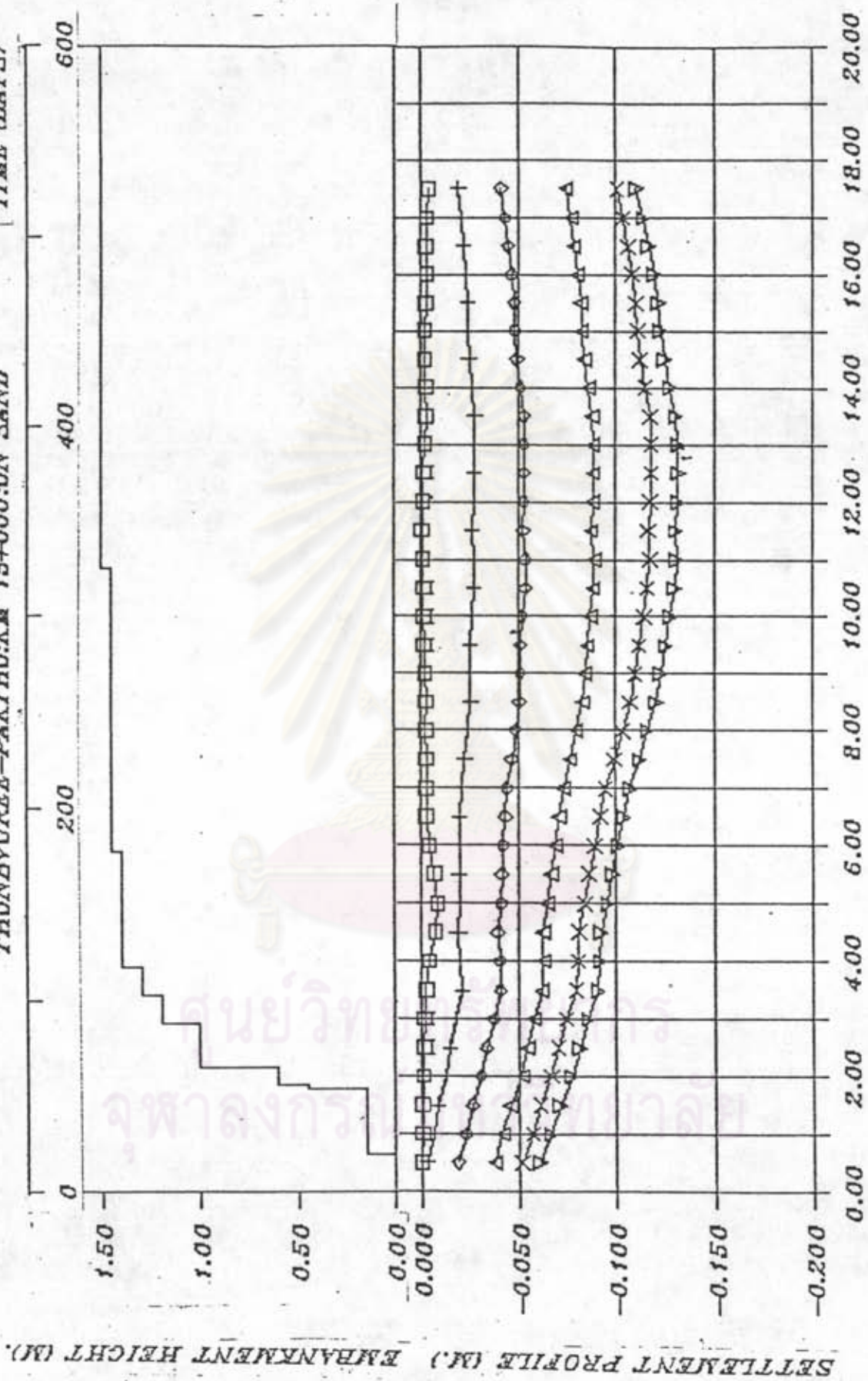
□ 56 + 145 ◇ 240 △ 325 X 429 ▽ 520

รูปที่ 4.7 แสดง Settlement Profile ของเสาเข็ม

SETTLEMENT PROFILE

THONBURI-PAKTHO:KM 15+000:ON SAND

TIME (DAYS)



□

56

+

145

◇

240

△

325

x

429

▽

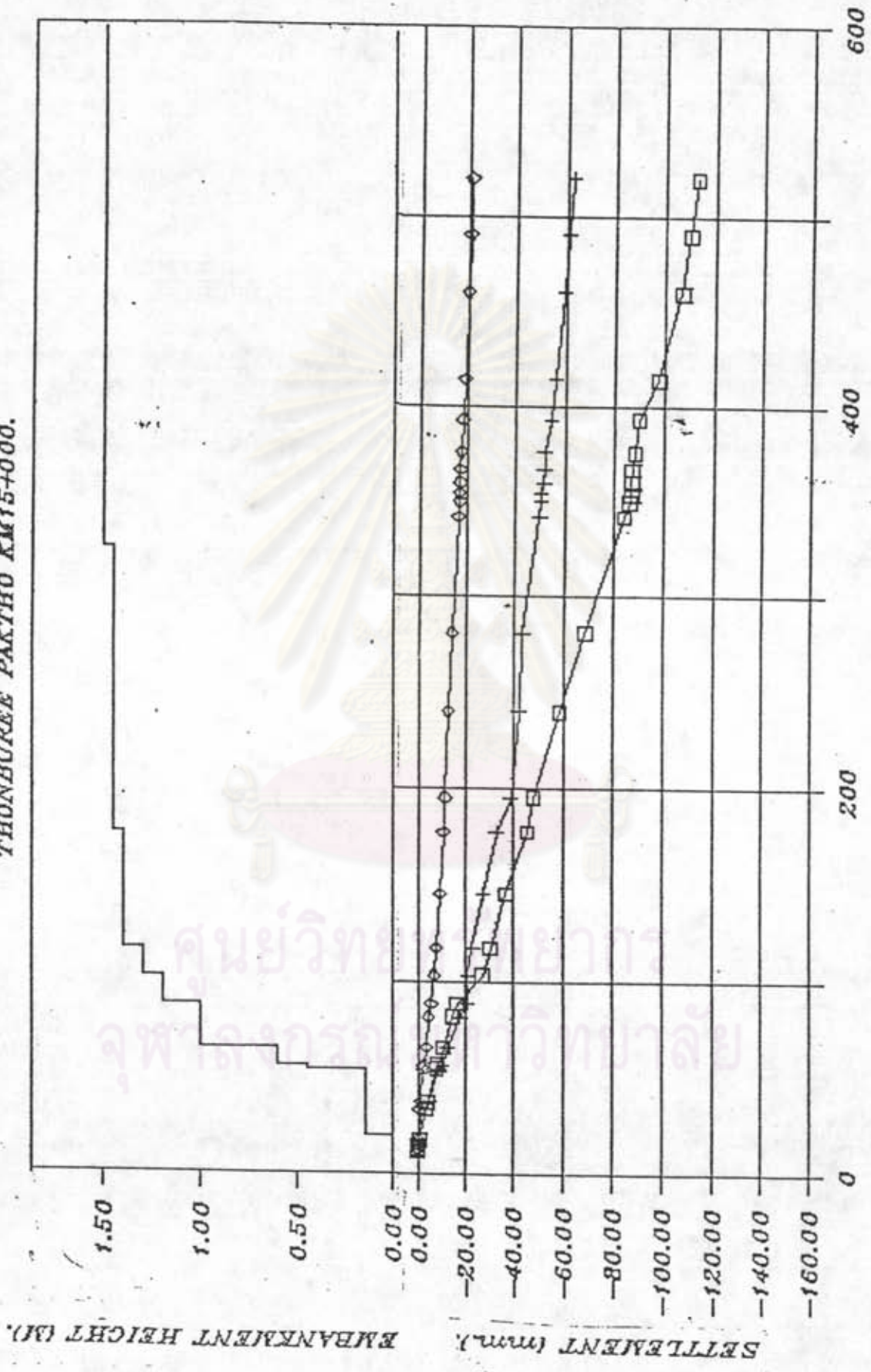
520

81

รูปที่ 4.8 แสดง Settlement Profile ของมวลดิน

DEEP SETTLEMENT & TIME

THONBUREE PAKTHO KM15+000.

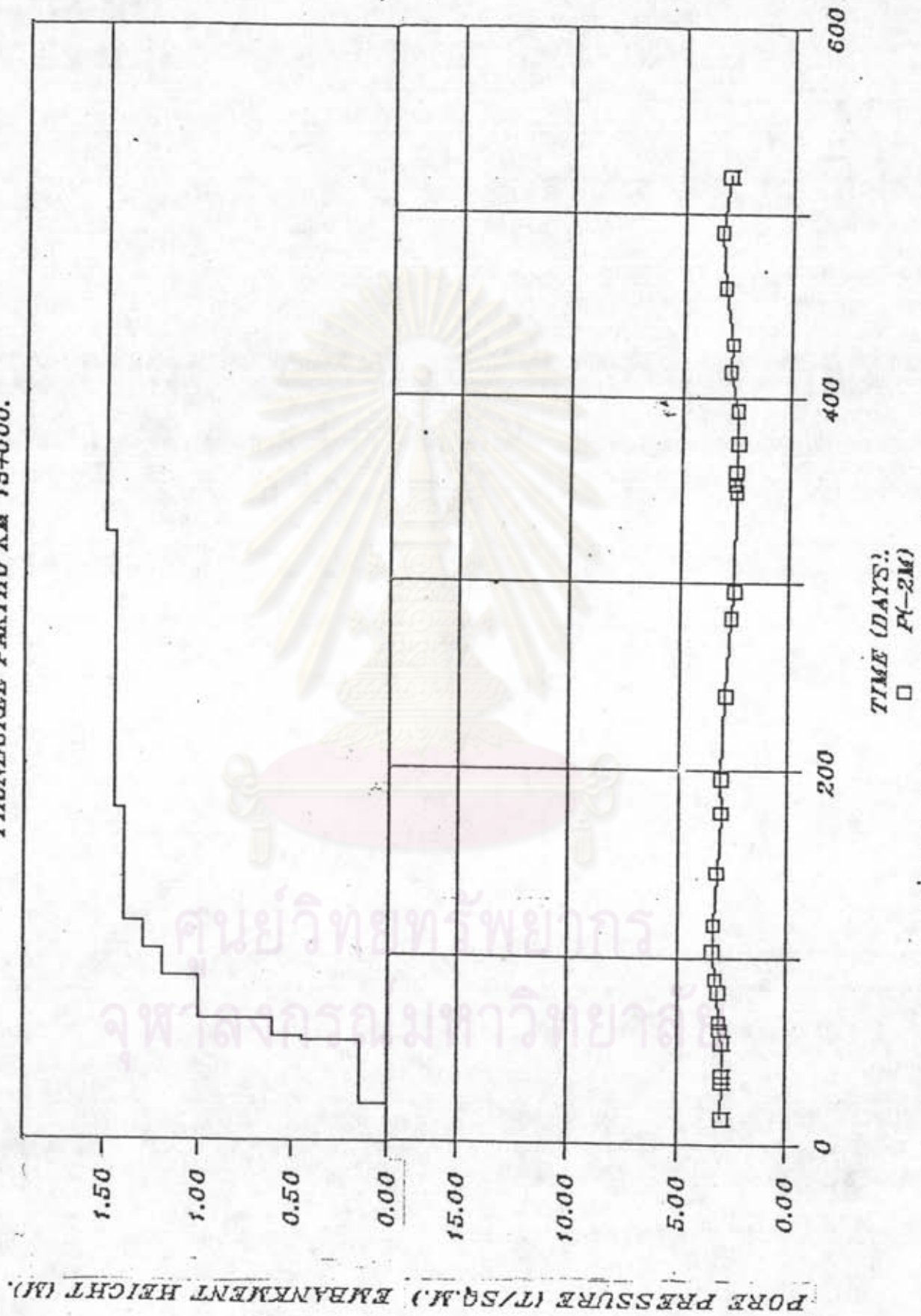


□ AT 4M.
 + AT 8M.
 ◇ AT 11M.

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลาที่ความลึก 4, 8 และ 11 เมตร

PORE PRESSURE & TIME

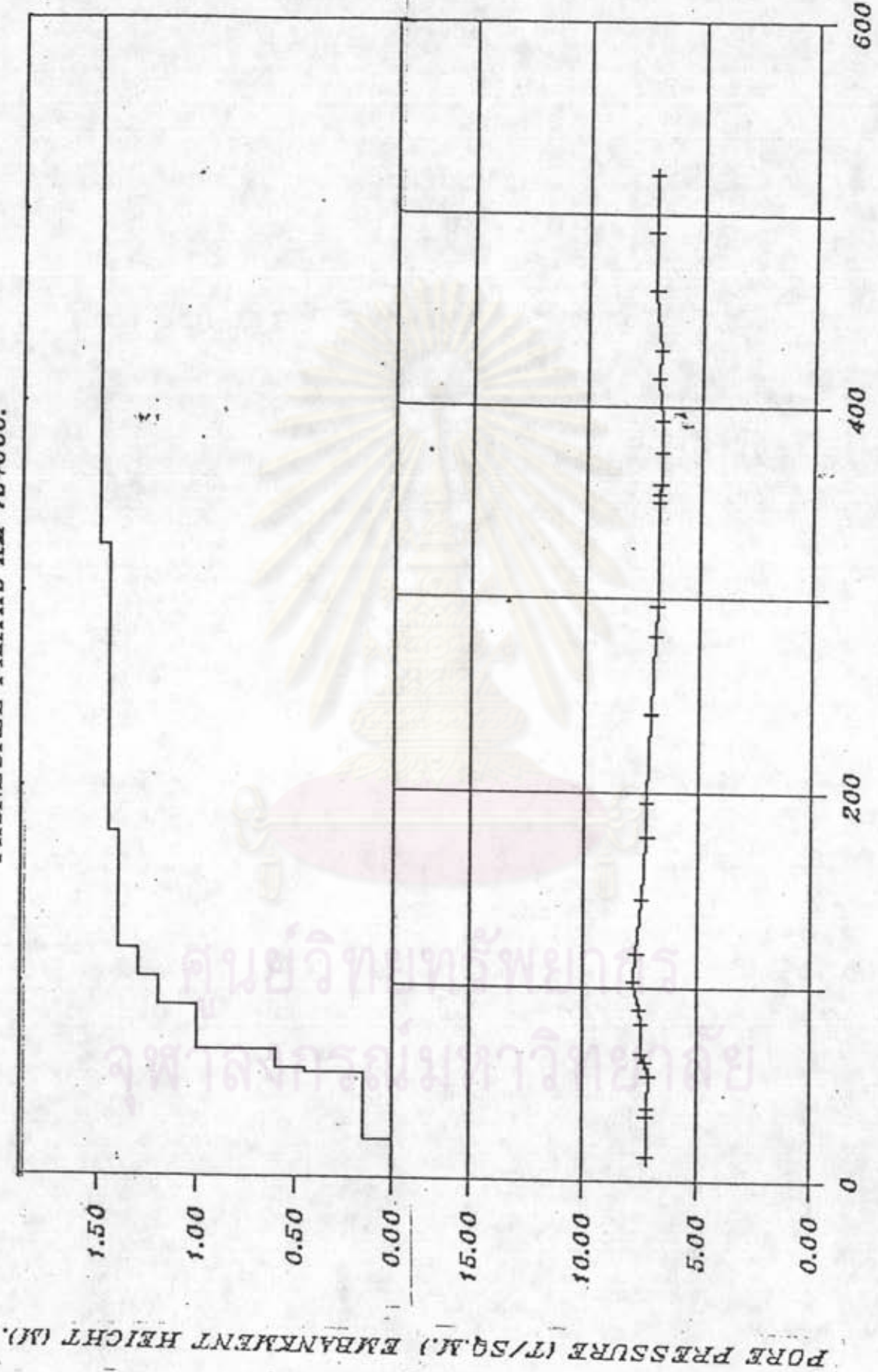
THONBUREE PAKTHO KM 15+000.



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับเวลาที่ความลึก 2 เมตร

PORE PRESSURE & TIME

THONBUREE PAKTHO KM 15+000.

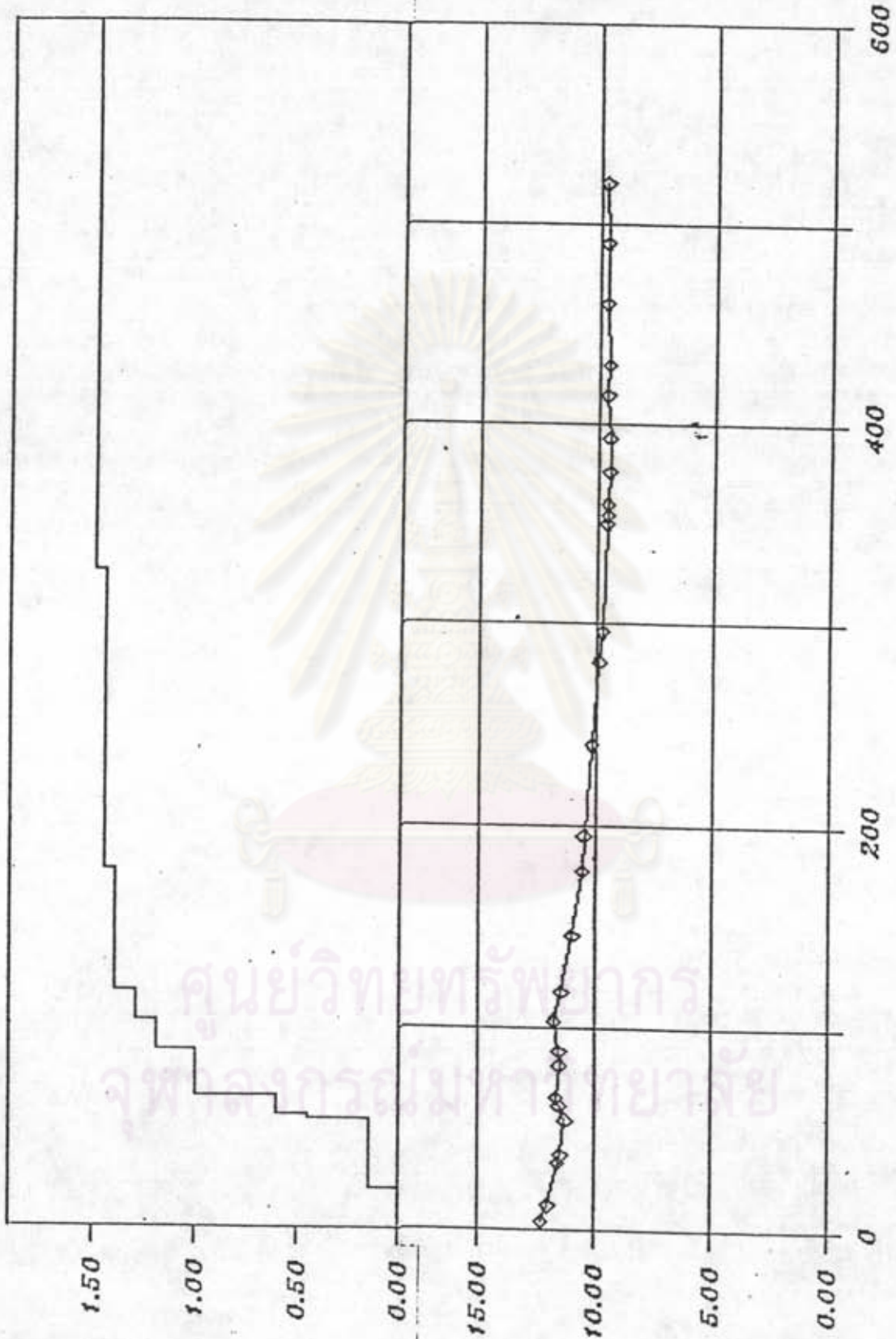


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับเวลาที่ความลึก 6 เมตร

PORE PRESSURE & TIME

THONBUREE PAKTHO KM 15+000.

PORE PRESSURE (T/SQ.M.) EMBANKMENT HEIGHT (M).

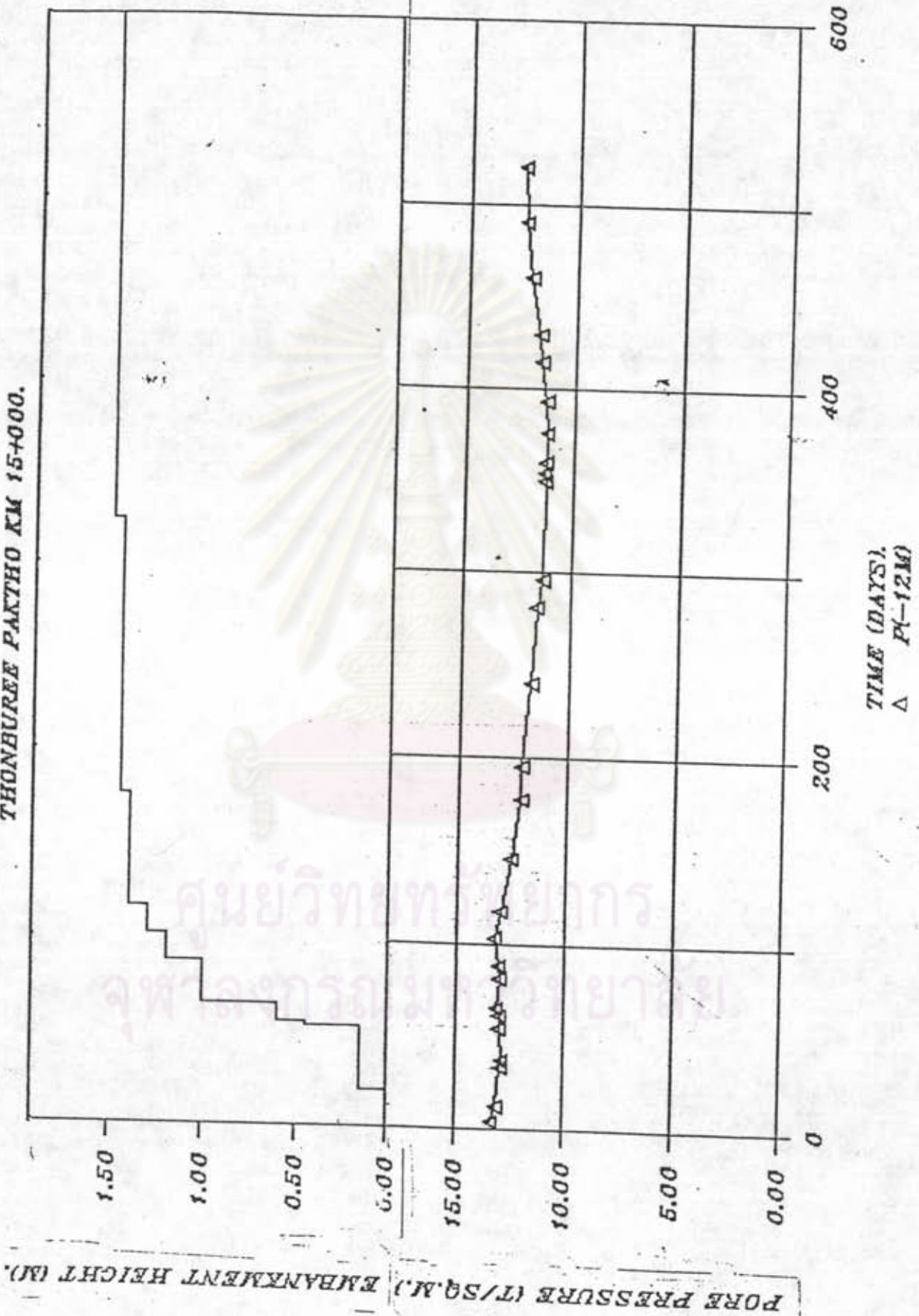


TIME (DAYS).
◇ P(10M)

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับเวลาที่ความลึก 10 เมตร

PORE PRESSURE & TIME

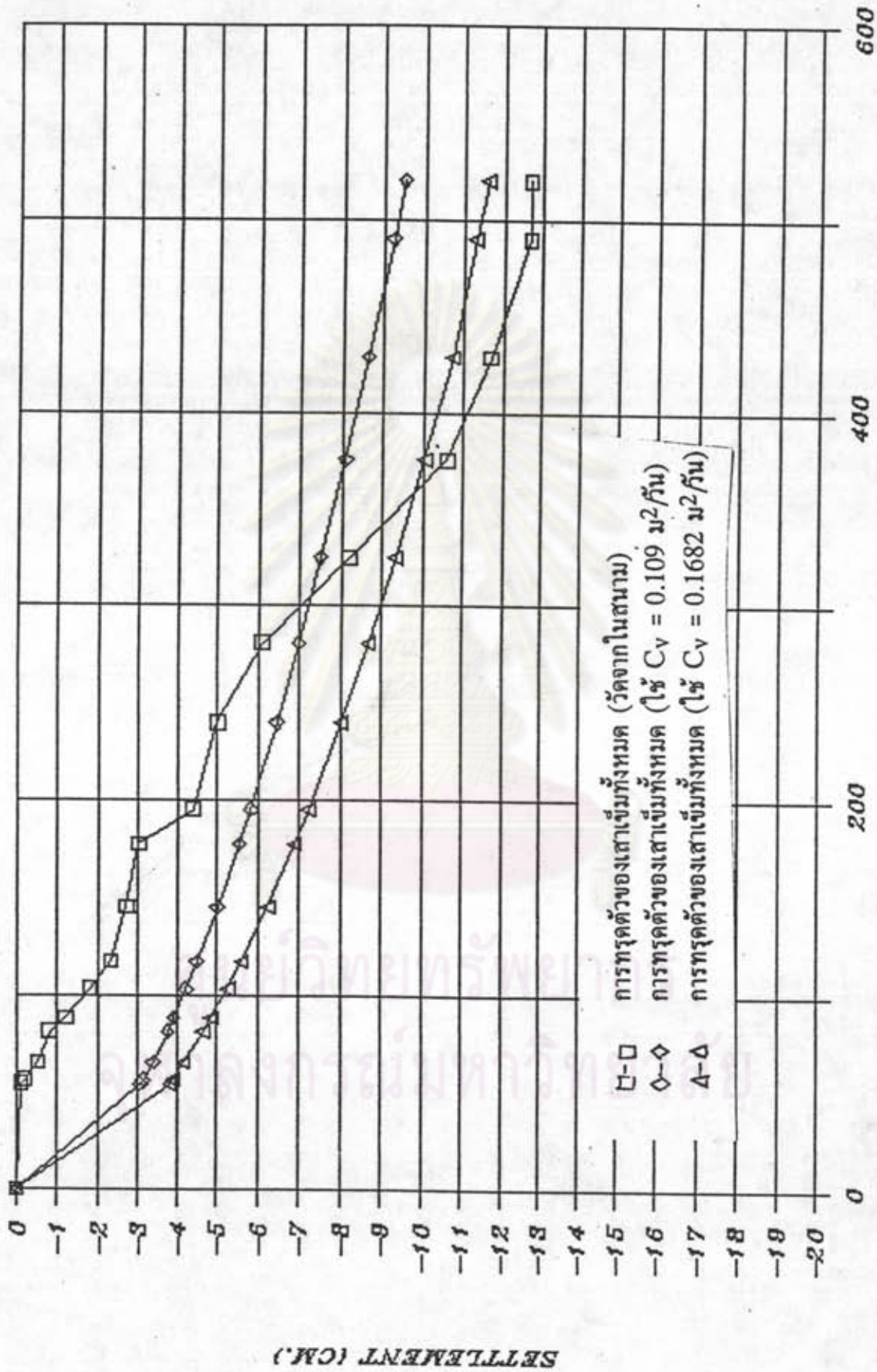
THONBUREE PAKTHO KM 15+000.



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับเวลาที่ 12 เมตร

ศูนย์วิทยเทคโนโลยีการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

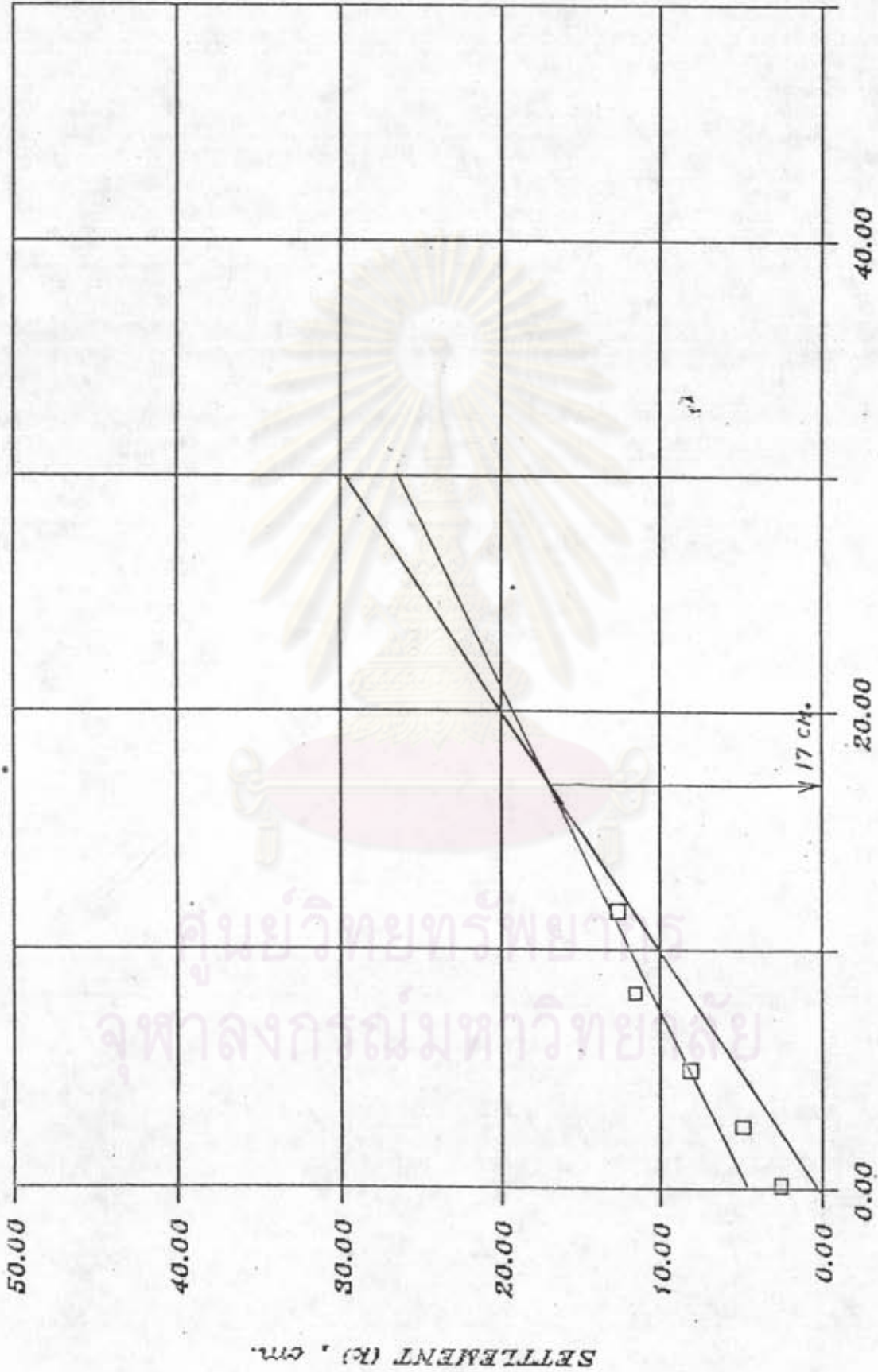
GRAPH SHOW PILE SETTLEMENT & TIME



รูปที่ 4.14 แสดงอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มกับเวลา

ASAOKA

THONHURI PAKHO KM15:ON PILE CAP



SETTLEMENT (k-1) , cm

รูปที่ 4.15 แสดงวิธีการหาค่าการทรุดตัวทั้งหมดของเสาเข็ม โดยวิธีของ Asaoka

3. จากการนำข้อมูลของการทรุดตัวของเสาเข็ม นำมาหาค่าการทรุดตัวทั้งหมดของเสาเข็ม โดยวิธีของ Asaoka จะได้ค่าการทรุดตัวเท่ากับ 17 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.15

4. จากข้อมูลการวัดค่าการทรุดตัวที่ความลึกต่าง ๆ พบว่า

ระดับความลึกของชั้นดิน (เมตร)	% การทรุดตัวของทั้งหมด
0-4	15
4-11	70
11-14	15

5. การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำส่วนใหญ่ เกิดเนื่องจาก Dead Load

6. การทรุดตัวระหว่างเสาเข็ม และมวลดินระหว่างเสาเข็มจะมีค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันในช่วง 145 วันแรก ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงก่อสร้างและมี load เปลี่ยนแปลง หลังจากนั้นการทรุดตัวของเสาเข็มและมวลดินระหว่างเสาเข็มจะไม่แตกต่างกันมากนัก

7. หน่วยแรงเค้นที่ทำให้เกิดการทรุดตัว ของถนนสายธนบุรี-ปากท่อ กม. 15+000 เนื่องจาก

1. ทรายถมปรับระดับหนา 0.70 ม. มีหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1.25 ตัน/ม^2 ซึ่งทำให้เกิดค่าการทรุดตัวของมวลดินเท่ากับ 10.92 ซม.

2. น้ำหนักของคันทางทำให้เกิดการทรุดตัวในส่วนของเสาเข็ม และเกิดการทรุดตัวในชั้นดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็ม

การทรุดตัวของเสาเข็มเนื่องจากน้ำหนักของคันทางจะมีค่าเท่ากับ 8.15 ซม. แบ่งเป็นการทรุดตัวใน Founding layers 6.31 ซม. และในช่วง Underlying layers 1.35 ซม. และมีการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 0.49 ซม.

การทรุดตัวของมวลดิน เนื่องจากน้ำหนักคันทางที่อยู่ระหว่างเสาเข็มส่วนที่เสาเข็มไม่ได้รับ เนื่องจากน้ำหนักของคันทาง จะทำให้มวลดินเกิดการทรุดตัว 3.76 ซม.

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปค่าการทรุดตัวของเสาเข็มและมวลดินที่ถนนสายธนบุรี-ปากท่อ กม.15+000 ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของถนนสายธนบุรี-ปากท่อ กม.15+000

	วิธีคำนวณ	ค่าการทรุดตัว (ซม)
การทรุดตัวของมวลดิน เนื่องจากทรายนมปรับระดับหนา 0.70 ม	Terzaghi	10.92
การทรุดตัวของเสาเข็ม	Poulos	8.15
การทรุดตัวของมวลดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็มเนื่องจากน้ำหนักของคันทาง	Terzaghi	3.76

รวมการทรุดตัวของมวลดินทั้งสิ้นประมาณ 15-19 ซม. โดยเกิดการทรุดตัวในช่วงที่มีและไม่มีผลของเสาเข็มอยู่ 4 ซม.

8. น้ำหนักของคันทางที่ลงสู่เสาเข็ม และชั้นทรายนมปรับระดับจะมีการกระจายน้ำหนักของคันทางโดย Soil Cement เพื่อให้การทรุดตัวของเสาเข็มและมวลดินทรุดตัวไปพร้อมกัน

จะเห็นได้จากข้อ 7 และข้อ 8 ว่า การทรุดตัวแตกต่างระหว่างดินในตำแหน่งที่มีเสาเข็มและไม่มีเสาเข็มจะมีค่าประมาณ 4 ซม. ซึ่งมากกว่าที่ soil cement จะรับได้ ดังนั้นการ redistribution ของ load ในส่วนของคันทางและแรงจุด (negative skin friction load) ใน เสาเข็มอาจเกิดขึ้น ส่วนของแรงจุดเกิดจากอัตราการทรุดตัวของมวลดินรอบเสาเข็มทรุดเร็วกว่าบริเวณเสาเข็ม

พฤติกรรมของการทรุดตัวของคันทางในปัจจุบัน ยังไม่ได้แสดงถึงปัญหาของการทรุดตัวที่แตกต่างในขณะนี้ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นยังเท่ากันอยู่ ซึ่งขณะนี้การทรุดตัวที่เหลืออยู่ประมาณ 4 ซม. (โดยใช้วิธีการของ Asaoka) และประมาณ 6 ซม. จากการคำนวณโดยแยกแต่ละ mechanism พฤติกรรมของการทรุดตัวจึงต้องได้รับการตรวจสอบต่อไปเพื่อดูผลของการใช้ soil cement ในการ redistribution ของ load

จากข้อมูลหลัง 400 วันไปแล้ว มีแนวโน้มที่จะแสดงว่ามีการ redistribution ของ load เกิดขึ้น โดยหน่วยแรงวัดจาก earth pressure cell ในชั้นทรายนมเพิ่มขึ้น และใน soil cement ซึ่งตรงกับแนวหัวเสาเข็มก็ลดลง

9. อาจเป็นไปได้ว่าชั้นดินรอบเสาเข็ม อาจเกิดอัตราการทรุดตัวเร็วกว่าตัวเสาเข็ม negative skin friction จึงอาจเกิดขึ้น นอกจากนั้นเครื่องมือวัดการทรุดตัวไม่สามารถแยกผล

ของ negative friction ออกได้ แต่จากข้อมูลของ earth pressure cell บนหัวเข็มไม้ได้ แสดงการลดลงของ pressure ซึ่งเป็นการแสดงว่า การทรุดตัวของเสาเข็มจึงน่าจะเกิดจากน้ำหนักของคันทางที่ถ่ายลงยังเสาเข็ม

10. เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มมีค่าประมาณ 9.6 ตัน ซึ่งคิดเป็น 76% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม จะทำให้เกิดการทรุดตัวที่แปรผันตามเวลาที่เกิดขึ้น เนื่องมาจาก Plastic flow & Undrained Creep

เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นเกิน 66% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมวลดิน จะมีพฤติกรรมทรุดตัวเป็นแบบ Plastic

11. จากการวิเคราะห์พบว่า ถ้าไม่มีการใช้เสาเข็มช่วยรับน้ำหนักของ Soil Cement และคันทางจะมีการทรุดตัวเกิดขึ้น 83.6 ซม. ซึ่งมีค่าการทรุดตัวมากกว่ากรณีใช้เสาเข็มช่วยรับน้ำหนักถึงเกือบ 4 เท่า

ความแตกต่างของ Stress distribution ในกรณีมีเสาเข็ม และไม่มีเสาเข็มของน้ำหนักที่ลงเฉพาะเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.16

12. การทรุดตัวของคันทางที่ใช้ relief pile ที่พิจารณา จะมีผลมาจากทรายถมปรับระดับและน้ำหนักของคันทางที่ถ่ายไปยังชั้นทรายปรับระดับเป็นส่วนสำคัญ

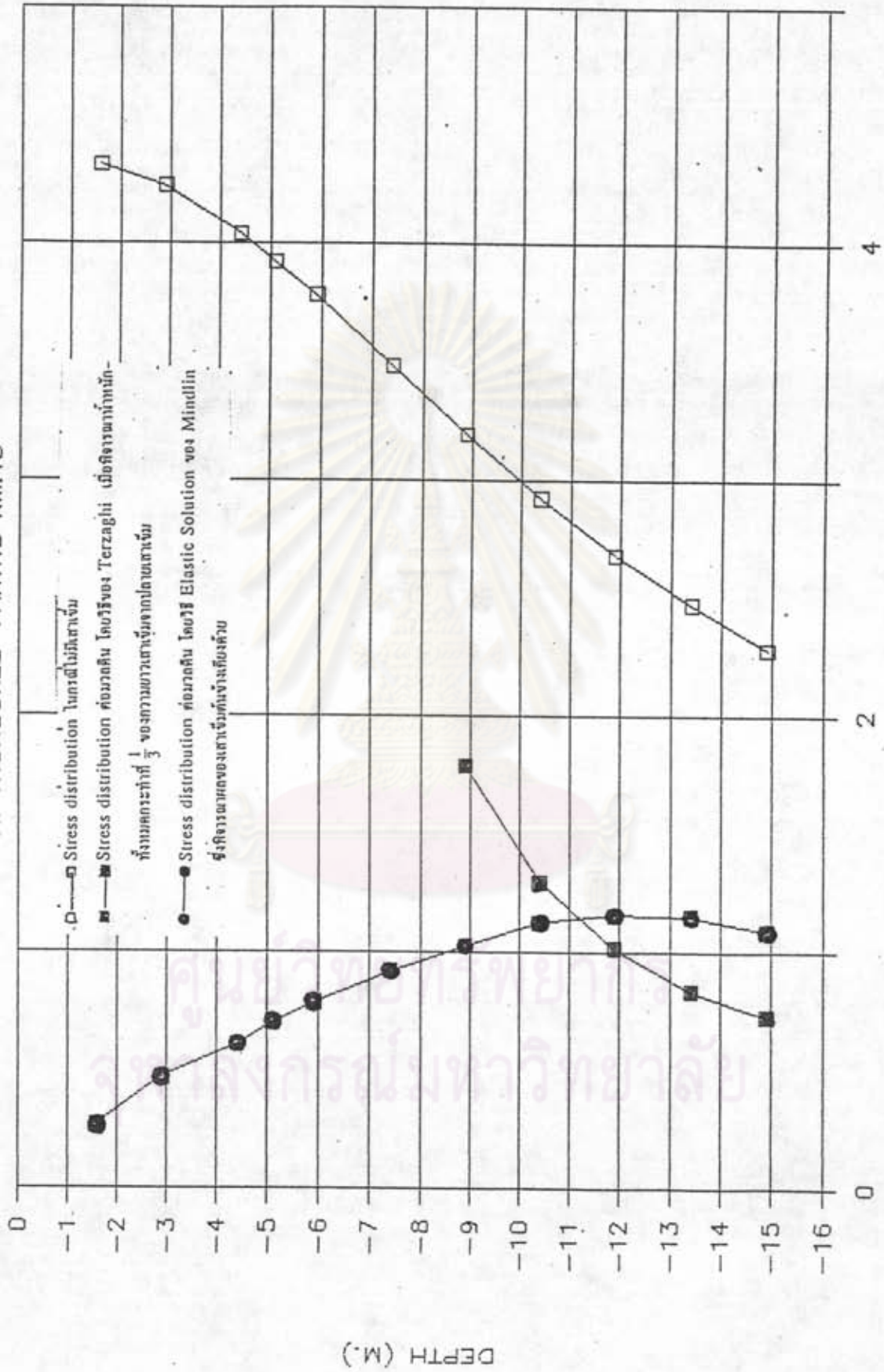
13. ในระยะ long term จะต้องดูพฤติกรรมของ Soil Cement เมื่อเกิด Bending ขึ้นระหว่างเสาเข็ม เนื่องจากมีการ distribution ของ load

14. จากการวิเคราะห์ โดยวิธีของ Terzaghi ซึ่งสมมติน้ำหนักกระทำที่ $\frac{1}{3}$ จากปลายเสาเข็ม พบว่าการทรุดตัวส่วนที่เป็นเสาเข็ม เพียง 1.32 ซม. โดยประมาณซึ่งแตกต่างกับวิธีของ Poulos ซึ่งได้เท่ากับ 8.15 ซม.

15. โดยการใช้การคำนวณวิธี Elastic Solution Stress ในดินเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าการทรุดตัวได้เท่ากับ 3.71 ซม. เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีของ Poulos ซึ่งได้เท่ากับ 8.15 ซม.

STRESS DISTRIBUTION

AT THONBUREE-PAKTHO KM.15



รูปที่ 4.16 แสดงการกระจายหน่วยแรงตามแกนในกรณีที่มีเสาเข็มและไม่มีเสาเข็ม