

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

#### 4.1 คุณสมบัติของดินก่อนติดตั้งเข็มปูนขาว

ตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลจากการทดสอบในสนามและการทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการของดินจากหลุมทดสอบในบริเวณแปลงทดสอบซึ่งได้แก่ BH-1 (บริเวณ Test Section 1) และ BH-2(บริเวณ Dummy Area) ตามลำดับ ซึ่งแสดงคุณสมบัติของดินที่ความลึกต่างๆ

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงคุณสมบัติของดินด้าน Index Properties และ Strength Characteristics ของข้อใน BH1 และ BH2 ตามลำดับ รูปที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติของดินด้าน Compressibility

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปลักษณะของชั้นดินที่พบได้ดังนี้

1) ชั้นหน้าดิน(Weathered Clay) ที่ความลึกระหว่าง 0-2 ม. ซึ่งในชั้นดินนี้มีค่าปริมาณความชื้นประมาณ 60% และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength,  $S_u$ ) ประมาณ 1.8 ตัน/ตร.ม.

2) ชั้นดินเหนียวอ่อน(Soft Clay) ที่ความลึกระหว่าง 2-9 ม. พบว่าปริมาณความชื้นสูงกว่าพิกัดเหลวของดิน โดยมีค่าปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 90-120% ส่วนพิกัดเหลวของดิน(Liquid Limit)มีค่าระหว่าง 88-111% ค่า LI และ PI มีค่าประมาณ 115% และ 49% ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ( $S_u$ )จากการทดสอบ CPT มีค่าระหว่าง 1.6-2.0 ตัน/ตร.ม. โดยที่ดินตัวอย่างที่เก็บมาทดสอบในห้องปฏิบัติการจะพบซากของเปลือกหอยที่ยังไม่ย่อยสลายปนอยู่กับดินจำนวนมาก ที่ความลึกประมาณ 7-14 ม. โดยเฉพาะที่ความลึกมากกว่า 7 ม. ซึ่งเป็นปัญหาในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ UU Test และเป็นสาเหตุหนึ่ง





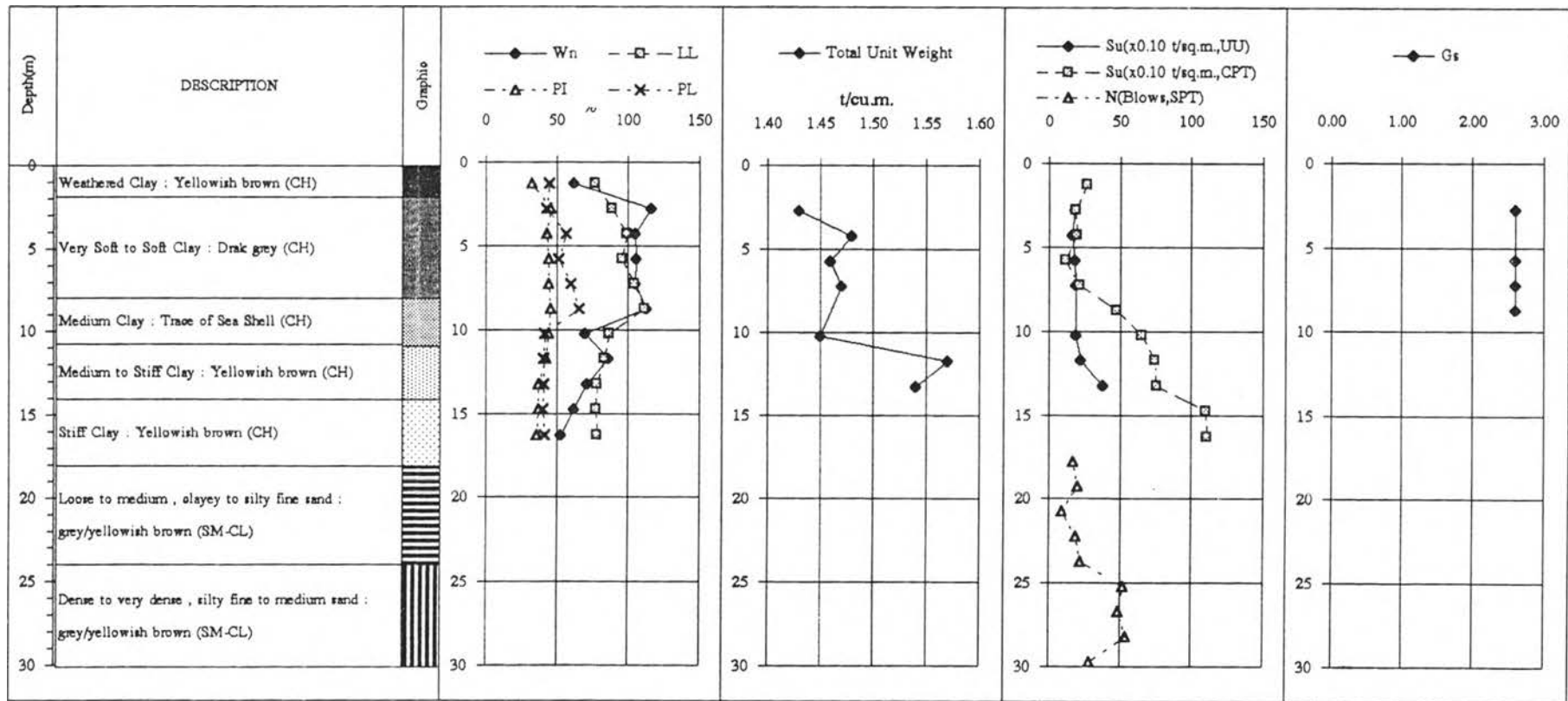
ที่ทำให้กำลังรับแรงเฉือนต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ CPT ในสนาม นอกจากนี้จากข้อมูลของการศึกษาที่ผ่านมาในบริเวณใกล้เคียงยังพบว่า ค่า Sensitivity มีค่าประมาณ 3-5 (Hanh L.T., 1996) นั่นคือในชั้นดินนี้ดินจะมีความไวตัวสูง (Sensitive Clay) และจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ พบว่ามีค่า CR ประมาณ 0.40 ถึง 0.58 จะเห็นได้ว่าเป็นดินที่มีการทรุดค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังพบว่าเป็นดินประเภทอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidate Clay) โดยมีค่า OCR อยู่ระหว่าง 1.0-3.7 และมีค่า  $C_v$  ระหว่าง 0.95-5.0  $m^2/ปี$

3) ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งมาก (Medium to Stiff Clay) ที่ความลึกระหว่าง 9-14 ม. มีค่าปริมาณความชื้นระหว่าง 50-85% ใน BH-1 ส่วน BH-2 มีค่าระหว่าง 55-105% ซึ่งต่ำกว่าค่าพิกัดเหลวของดินที่มีค่าระหว่าง 77-86% มีค่า  $S_u$  จากการทดสอบ CPT ประมาณ 6.0 ตัน/ตร.ม. จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำพบว่า  $e_0$  มีค่าประมาณ 1.3  $C_v$  มีค่าประมาณ 2  $m^2/ปี$  ซึ่งต่ำกว่าในชั้นดินเหนียวอ่อน และ  $\sigma'_{vm}$  มีค่ามากกว่า 10 ตัน/ตร.ม. และ OCR มีค่าประมาณ 1

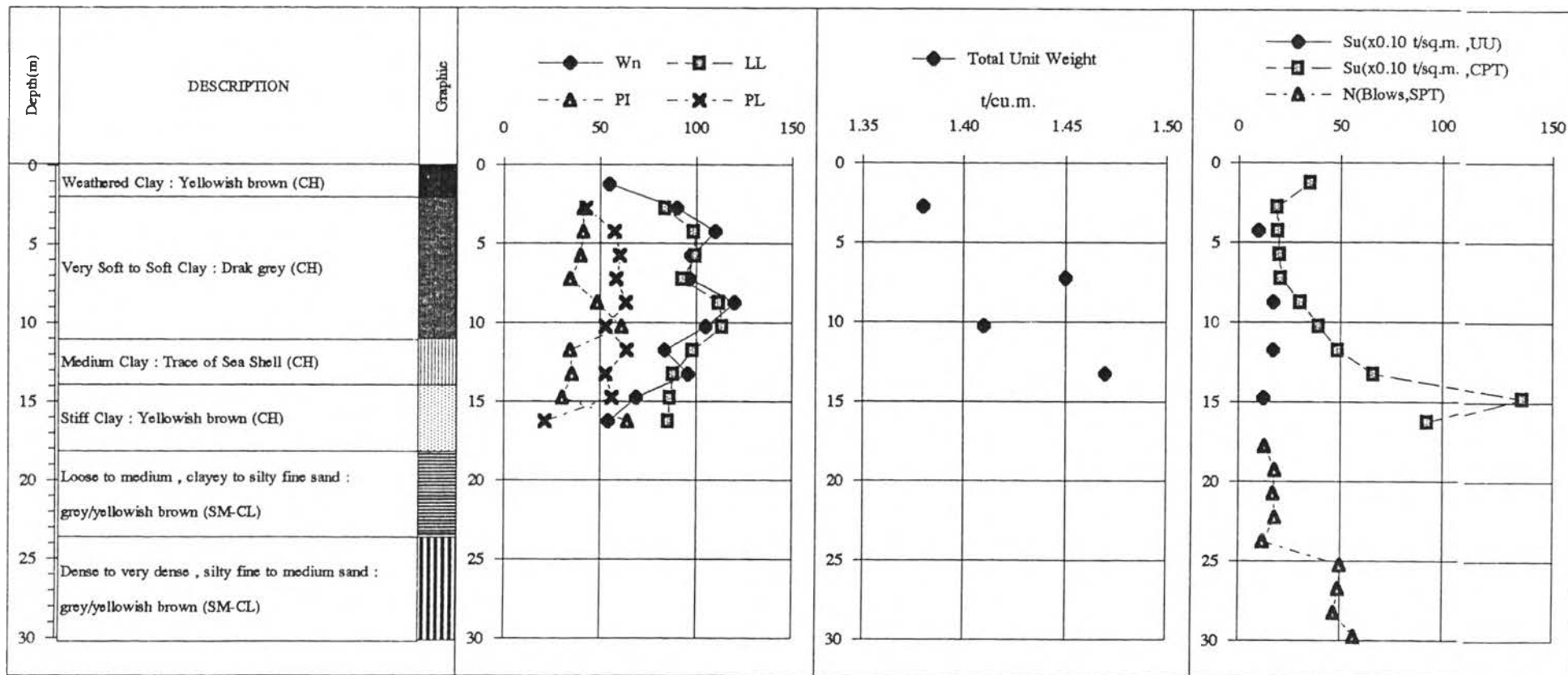
4) ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) ที่ความลึกระหว่าง 14-20 ม. มีค่าปริมาณความชื้นประมาณ 50% พิกัดเหลวมีค่าประมาณ 70% และมีค่า  $S_u$  จากการทดสอบ CPT มากกว่า 10 ตัน/ตร.ม.

5) ชั้นทรายชั้นแรก (First Sand Layer) ที่ความลึก 20 ม. ถึงความลึกที่เจาะสำรวจคือ 30 ม. ลักษณะของดินจะเป็นทรายที่มีอินทรีย์สารปนอยู่เล็กน้อย (Silty Fine Sand) และมีค่า  $N$  จากการทดสอบ SPT ประมาณ 20-60 blows

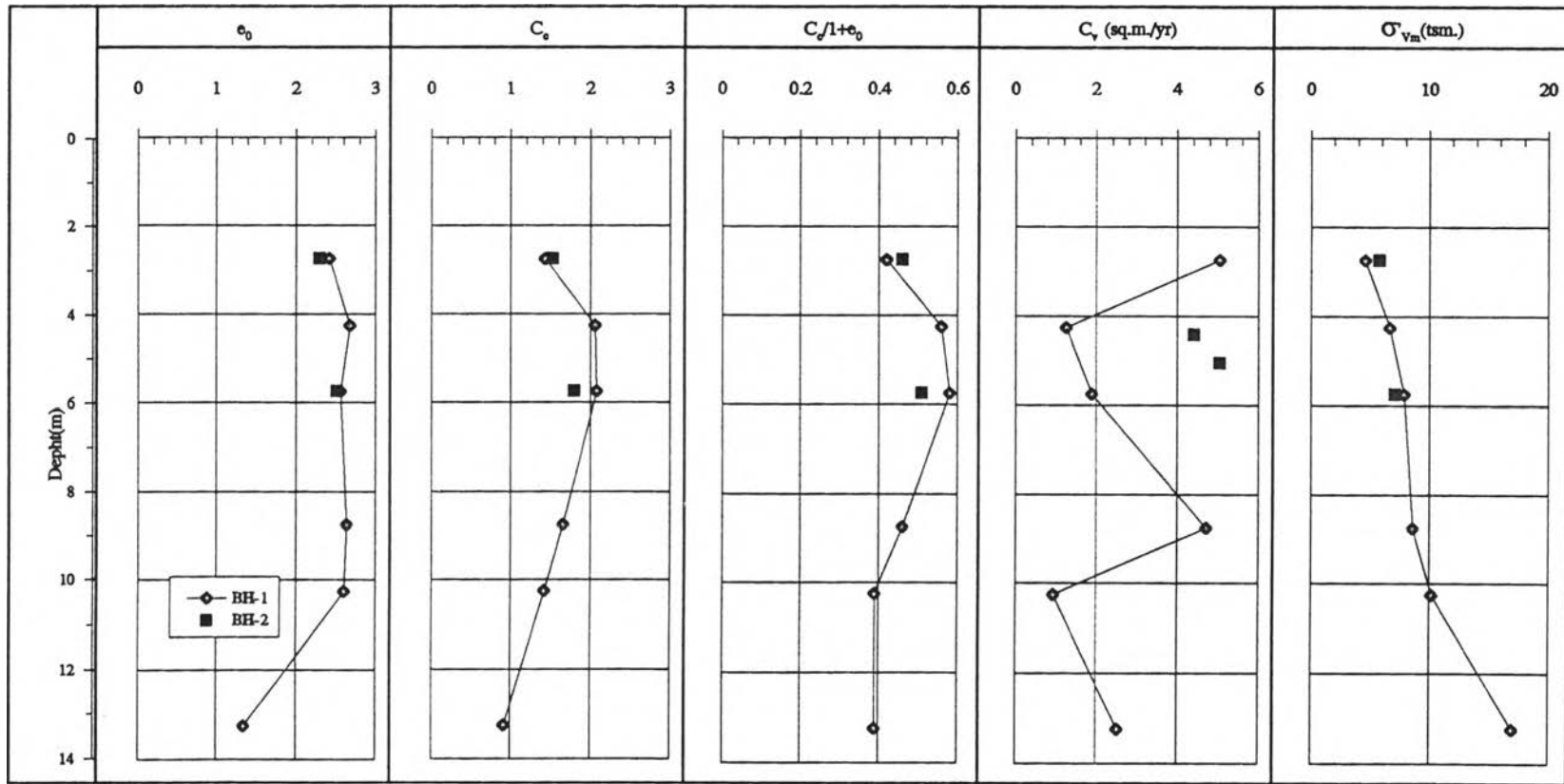
จากการทดสอบทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการจะเห็นว่าชั้นดินที่บริเวณหนองจุกห่ามีการเปลี่ยนแปลงมาก ตลอดจนคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนโดยเฉพาะในเรื่องประวัติของหน่วยแรง ซึ่งแสดงว่าดินเหนียวอ่อนที่หนองจุกห่ามีสภาพที่เปลี่ยนแปลงมากในบริเวณใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่มีบ่อปลาอยู่ในบริเวณก่อสร้าง Test Section นั้นเอง



รูปที่ 4.1 ลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติเบื้องต้นของดินบริเวณแปลงทดสอบ TS1(BH-1)



รูปที่ 4.2 ลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติเบื้องต้นของดินบริเวณ Dummy Area(BH-2)



รูปที่ 4.3 คุณสมบัติของดินบริเวณแปลงทดสอบ TS-1(BH-1) และ Dummy Area(BH-2)

ข้อมูลที่ได้จาก BH1 และ BH2 แสดงว่าที่ BH2 ซึ่งอยู่ไม่ไกลจาก BH1 นั้น สภาพดินเหนียวอ่อนและแข็งปานกลางมีคุณสมบัติแตกต่างกันมากทั้งในด้านกำลังรับแรงเฉือน และการทรุดตัว เพื่อลดปัญหาด้านการทรุดตัวที่แตกต่างกันเนื่องจากสภาพชั้นดินและการขุดบ่อปลาที่ความลึกไม่เท่ากัน ทำให้การก่อสร้างต่่างบนดินอ่อนต้องอาศัยวิธีการปรับปรุงดิน และต้องทำการสำรวจดินอย่างละเอียดในปัญหาทางด้าน stability

#### 4.2 คุณสมบัติของดินหลังติดตั้งเข็มปูนขาว

จากการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินระหว่างเข็มปูนขาวภายหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวไปแล้ว 7,15,30,60,90, และ 160 วัน โดยเจาะสำรวจและกับตัวอย่างดินที่ระยะ 1 ใน 3 และ ระยะ 1 ใน 2 ระหว่างเข็มปูนขาว สามารถสรุปผลตามหัวข้อได้ดังนี้

- คุณสมบัติของดินด้าน Index Properties
- คุณสมบัติของดินด้าน Strength Characteristic
- คุณสมบัติของดินด้าน Compressibility

##### 4.2.1 คุณสมบัติของดินด้าน Index Properties

คุณสมบัติของดินด้าน Index Properties ที่ได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการติดตั้งเข็มปูนขาวประกอบด้วย ค่าปริมาณความชื้นในมวลดิน และค่า Plasticity Index

##### ก) ปริมาณความชื้นในมวลดิน

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินที่ความลึกและที่ระยะเวลาต่างๆภายหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ และได้เสนอการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวตามรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งพบว่าปริมาณความชื้นในมวลดินลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนภายใน 7-15 วันหลังติดตั้งเข็มปูนขาว เนื่องจากปฏิกิริยา Hydration ของเข็มปูนขาว หลังจากนั้นจะค่อนข้างคงที่หรือลดลงอีกเล็กน้อยจนถึงที่ 90 วันจึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดขึ้นจากการดึงน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาของปูนขาวน้อยลงและเกิดความไม่สมดุลภายในมวลดินด้าน Ion Concentration และ Pressure จึงทำให้เกิด Osmotic และ Matrix Suction ในมวลดิน คือมวลดินดึงน้ำจากภายนอกกลับเข้าไปภายในเพื่อให้เกิดความสมดุล และการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นอาจเกิดจากการเจาะดินที่



#### ตารางที่ 4.3 Natural Water Content of Treated Soils (TS1)

(a) At Distance 1/2 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Natural Water Content(%)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	116.32	91.65	86.86	82.25	83.67	80.24	*
5.00	5.50	105.54	85.44	75.82	74.24	78.65	78.94	83.55
7.00	7.50	105.01	99.10	89.57	83.24	76.86	74.85	95.40
9.00	9.50	112.62	102.17	86.07	81.42	81.77	69.58	82.69

\* No recovery sample

(b) At Distance 1/3 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Natural Water Content(%)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	116.32	96.31	89.79	84.82	85.24	74.89	88.44
5.00	5.50	105.54	89.89	87.00	82.75	88.69	84.24	80.75
7.00	7.50	105.01	87.56	82.08	81.12	82.55	86.48	97.90
9.00	9.50	112.62	89.03	81.28	78.58	80.95	75.96	90.04

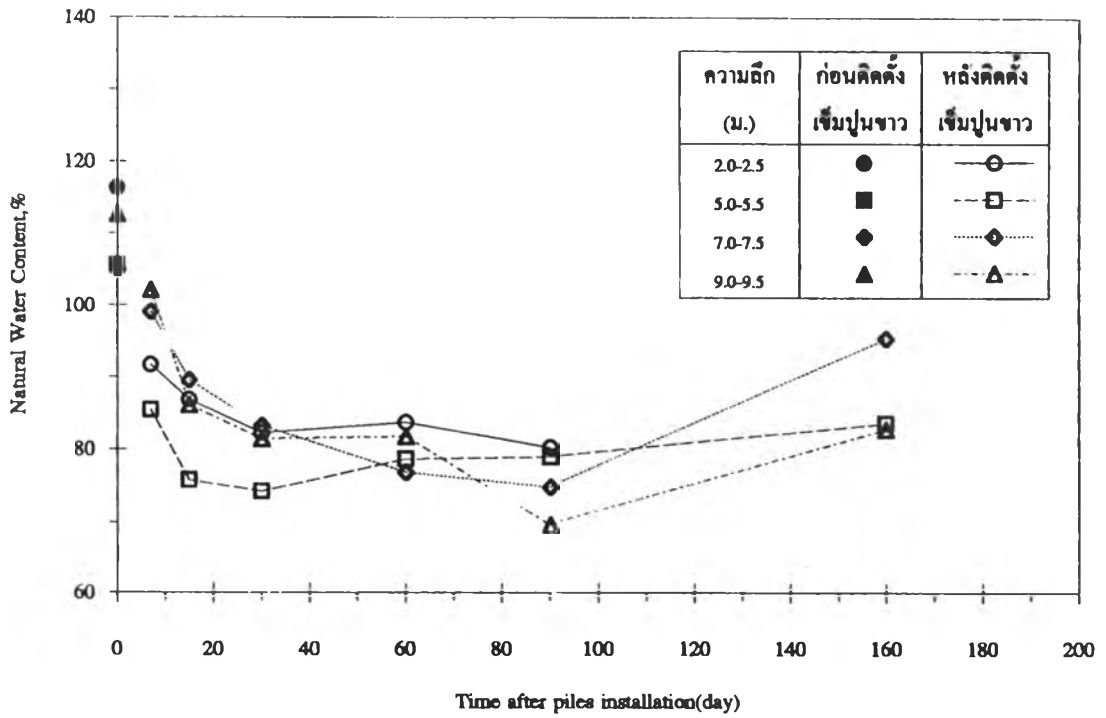
#### ตารางที่ 4.4 Natural Water Content of Treated Soils (TS2)

(a) At Distance 1/2 of Soil Between Piles

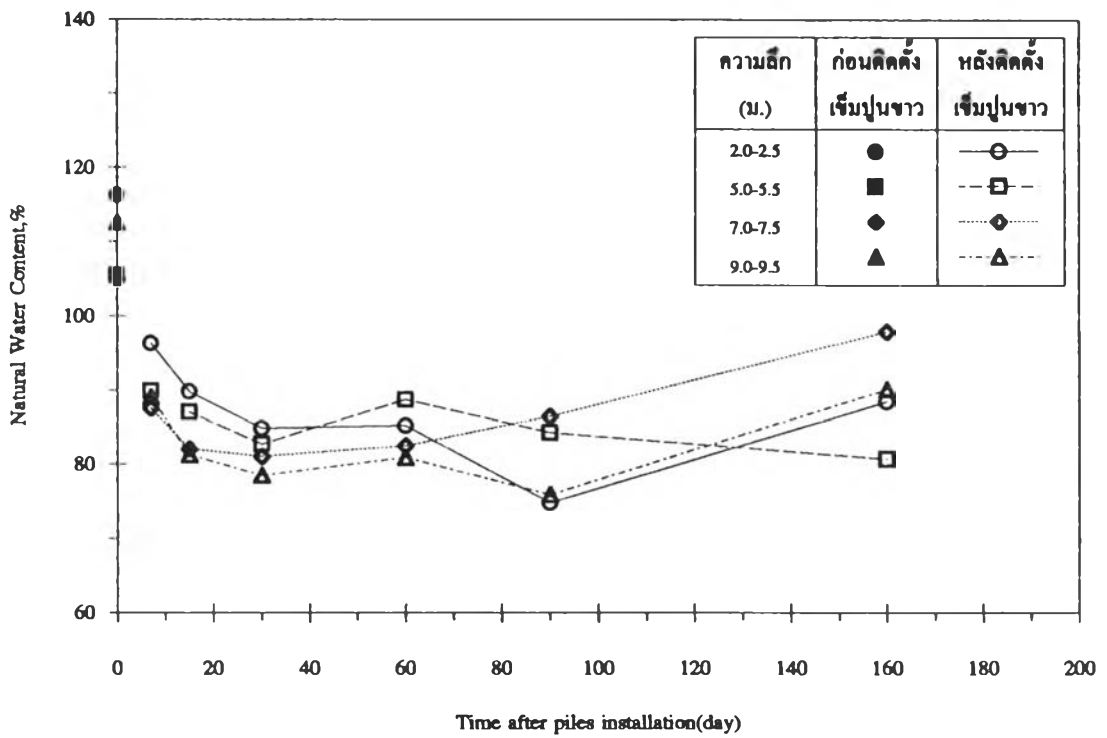
Depth,(m.)		Natural Water Content(%)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	116.32	67.81	90.56	83.87	100.63	102.60	76.15
5.00	5.50	105.54	82.39	86.02	74.24	89.93	90.65	83.46
7.00	7.50	105.01	71.92	83.12	83.24	76.86	80.55	88.25
9.00	9.50	112.62	83.29	95.47	81.42	89.22	94.00	93.52

(b) At Distance 1/3 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Natural Water Content(%)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	116.32	73.56	82.16	93.22	91.80	100.20	94.55
5.00	5.50	105.54	90.09	91.59	85.74	93.96	101.55	73.91
7.00	7.50	105.01	88.68	88.34	81.12	82.55	95.52	93.29
9.00	9.50	112.62	100.49	89.6	72.77	93.34	97.30	88.23

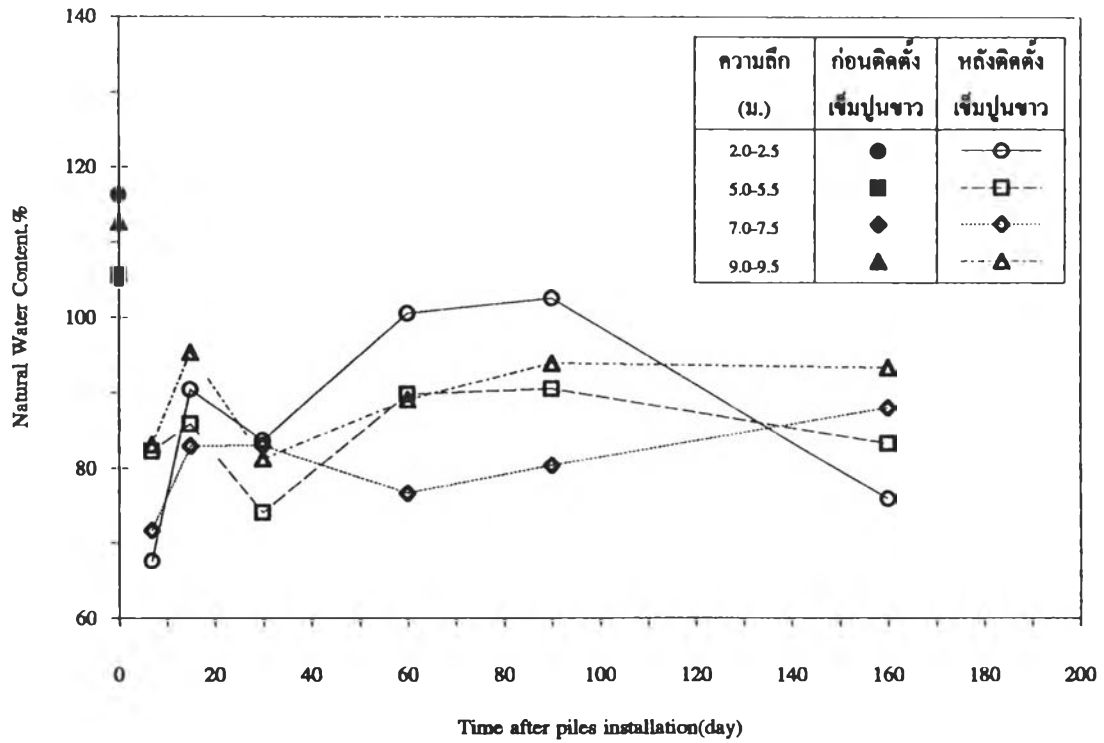


(a) At Distance 1/2 of soil between Piles

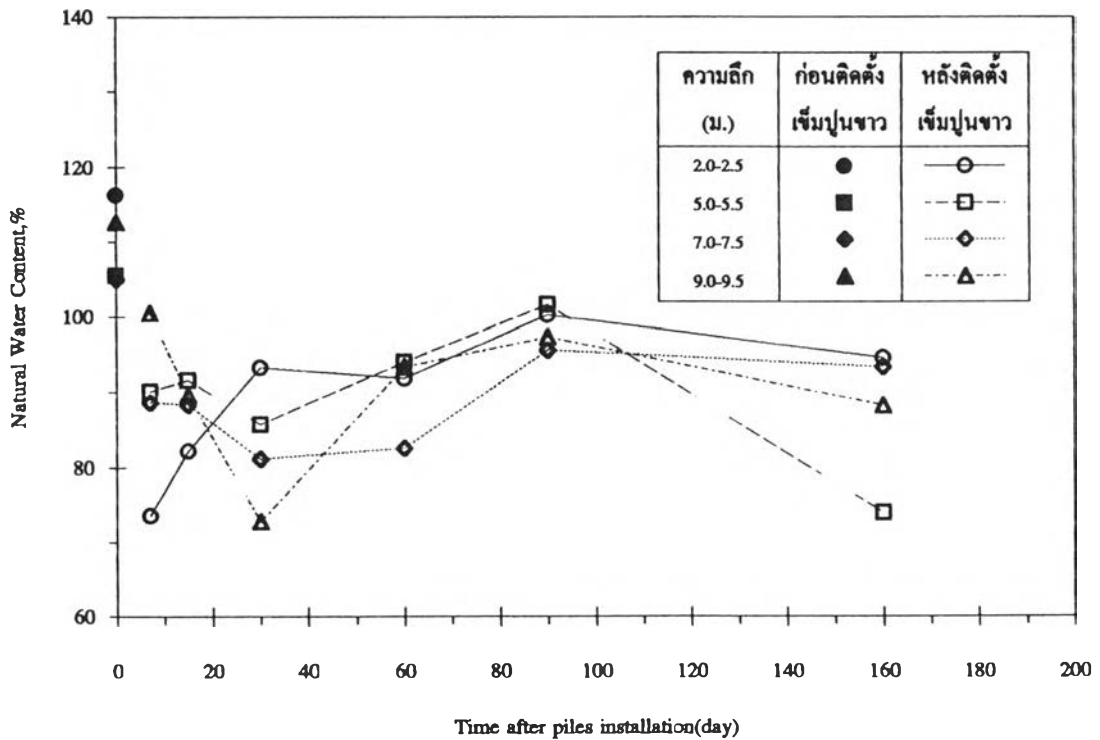


(b) At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.4 Variation of Natural Water Content of Treated Soils with Time(TS1)



(a) At Distance 1/2 of soil between Piles



(b) At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.5 Variation of Natural Water Content of Treated Soils with Time(TS2)

ตำแหน่งแตกต่างกัน โดยที่สภาพดินเหนียวอ่อนมีการเปลี่ยนแปลงมาก และในระยะยาวนั้นค่าปริมาณความชื้นอาจเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากตอนแรกเกิด negative excess pore pressure ขึ้นมา ทำให้ดินเหนียวดูดน้ำเข้ามา

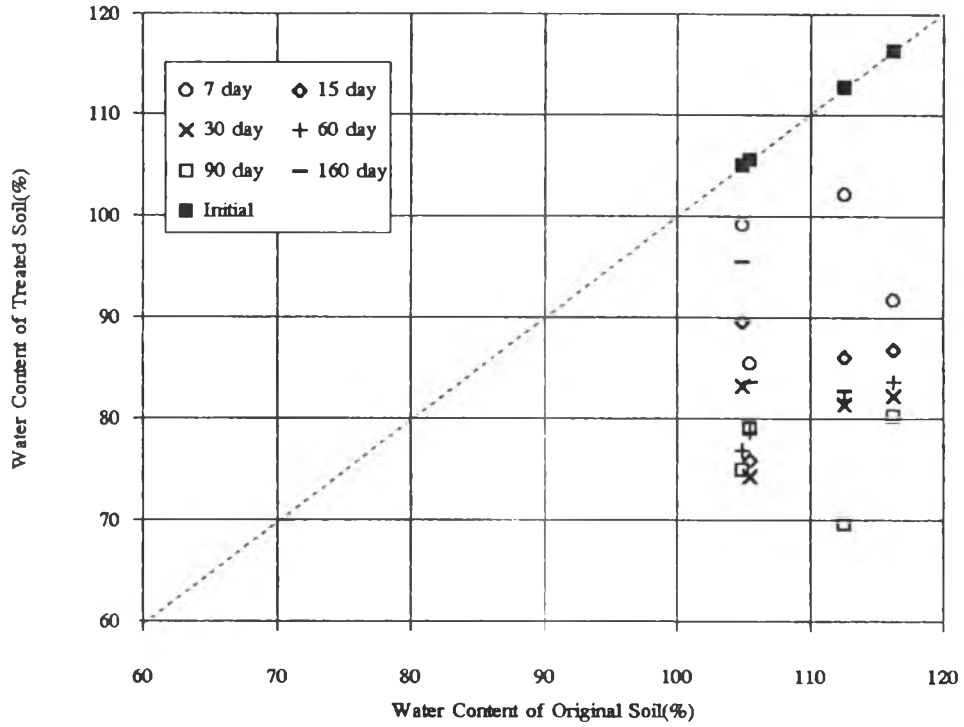
รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นระหว่างดินเดิมและดินภายหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินจากแปลงทดสอบ TS1 จะลดลงมากกว่า ตัวอย่างดินจากแปลงทดสอบ TS2 เนื่องจากระยะห่างระหว่างเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 น้อยกว่า TS2

จากข้อมูลปริมาณความชื้นของดินในแปลงทดสอบ TS1 พบว่าค่าปริมาณความชื้นในชั้นดินเหนียวอ่อนที่ความลึก 2.0 ถึง 8.0 ม. ลดลงจากค่าเริ่มต้นก่อนการติดตั้งเข็มปูนขาวประมาณ 30% และที่ความลึก 9.0 ถึง 10.0 ม. ลดลง 36% ส่วนในแปลงทดสอบ TS2 ค่าปริมาณความชื้นในมวลดินจะลดลงน้อยกว่าแปลงทดสอบ TS1 คือ ที่ความลึก -2.0 ถึง -8.0 ม. ลดลงประมาณ 13% และที่ความลึก -9.0 ถึง -10.0 ม. ลดลงประมาณ 16% จากข้อมูลดังกล่าวสามารถประเมินได้ว่า ปริมาณความชื้นในมวลดินหลังติดตั้งเข็มปูนขาวมีการเปลี่ยนแปลงโดยลดลงต่ำกว่าก่อนติดตั้งเสาเข็มประมาณ 15-35% โดยในชั้นดินเหนียวอ่อนปริมาณความชื้นลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าพิคคิเลทของดินคือประมาณ 80 ถึง 90% สาเหตุที่ทำให้ปริมาณความชื้นลดลง คือ น้ำที่อยู่ในส่วน Free Water ถูกดึงไปใช้ในปฏิกิริยา Hydration ของปูนขาว

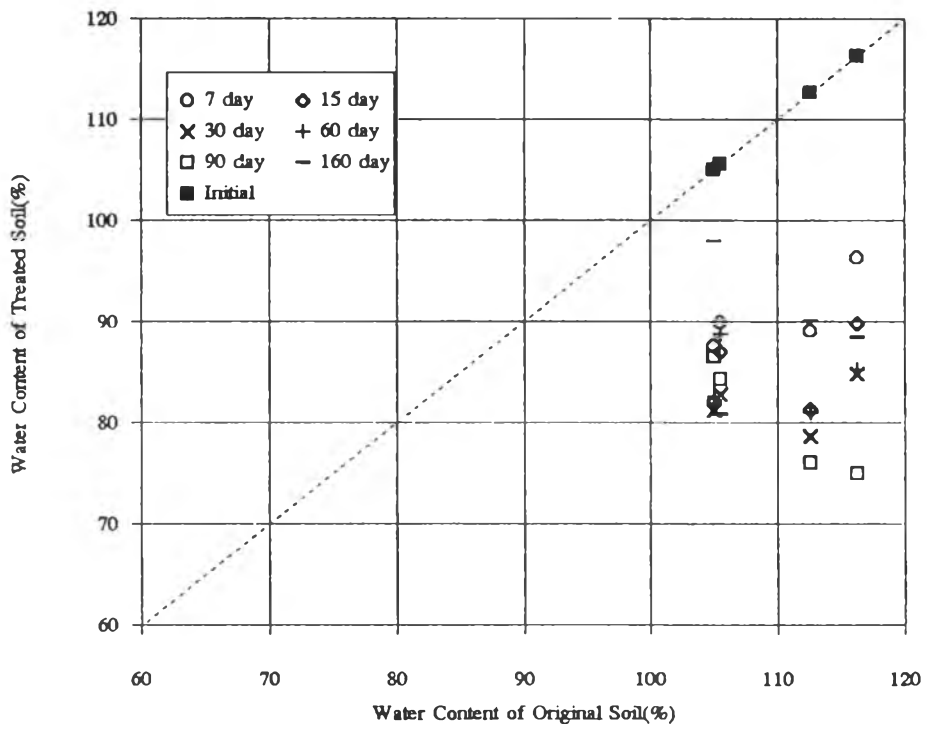
#### ข) ค่า Plasticity Index (PI)

ตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่า PI ของตัวอย่างดินที่ความลึกและที่ระยะเวลาต่างๆ ภายหลังจากการติดตั้งเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ และได้แสดงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งพบว่า ค่า PI ของตัวอย่างดินทั้งที่ระยะ 1 ใน 2 และที่ระยะ 1 ใน 3 ของระยะระหว่างเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 ลดลงเล็กน้อย ส่วนแปลงทดสอบ TS2 ค่า PI จะลดลงในช่วงแรก (7-15 วัน) แต่เมื่อระยะเวลามากขึ้น ค่า PI จะมีค่าใกล้เคียงกับดินเดิม

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่า PI ระหว่างดินเดิมและดินภายหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าข้อมูลของแปลงทดสอบ TS1 ค่า PI ส่วนใหญ่จะลดลงเล็กน้อย ขณะที่แปลงทดสอบ TS2 ค่า PI แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย การที่ค่า PI ของดินระหว่างเข็มปูนขาวจากแปลงทดสอบทั้งสองแปลงไม่

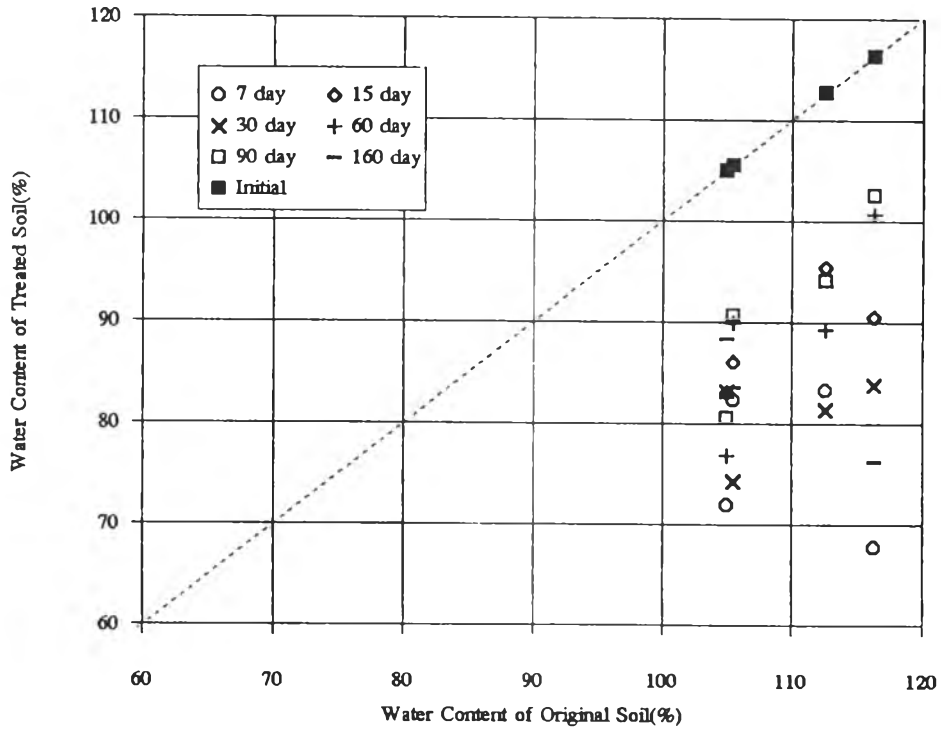


(a)At Distance 1/2 of soil between Piles

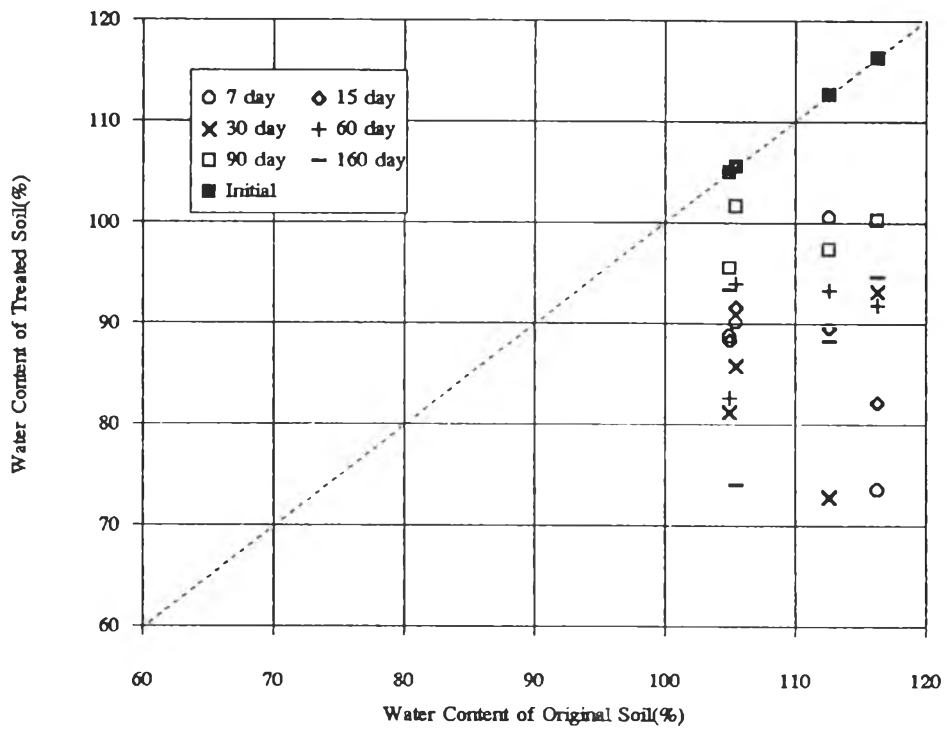


(b)At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.6 Natural Water Content of Treated Soils (TS1)



(a)At Distance 1/2 of soil between Piles



(b)At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.7 Natural Water Content of Treated Soils (TS2)

#### ตารางที่ 4.5 Plasticity Index of Treated Soil (TS1)

(a) At Distance 1/2 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Plasticity Index ,PI(%)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	43.04	59.01	55.68	49.93	35.73	39.54	*
5.00	5.50	51.63	51.59	48.69	43.56	49.22	43.48	42.15
7.00	7.50	59.93	62.94	48.24	55.75	53.21	56.21	57.84
9.00	9.50	65.82	69.32	55.29	60.58	52.22	49.26	50.27

\* No recovery sample

(b) At Distance 1/3 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Plasticity Index ,PI(%)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	43.04	38.99	43.09	42.05	37.58	37.01	38.50
5.00	5.50	51.63	46.25	53.98	47.07	36.54	55.67	52.36
7.00	7.50	59.93	57.06	56.47	57.14	47.42	60.89	58.63
9.00	9.50	65.82	73.82	54.80	50.13	56.74	58.29	54.55

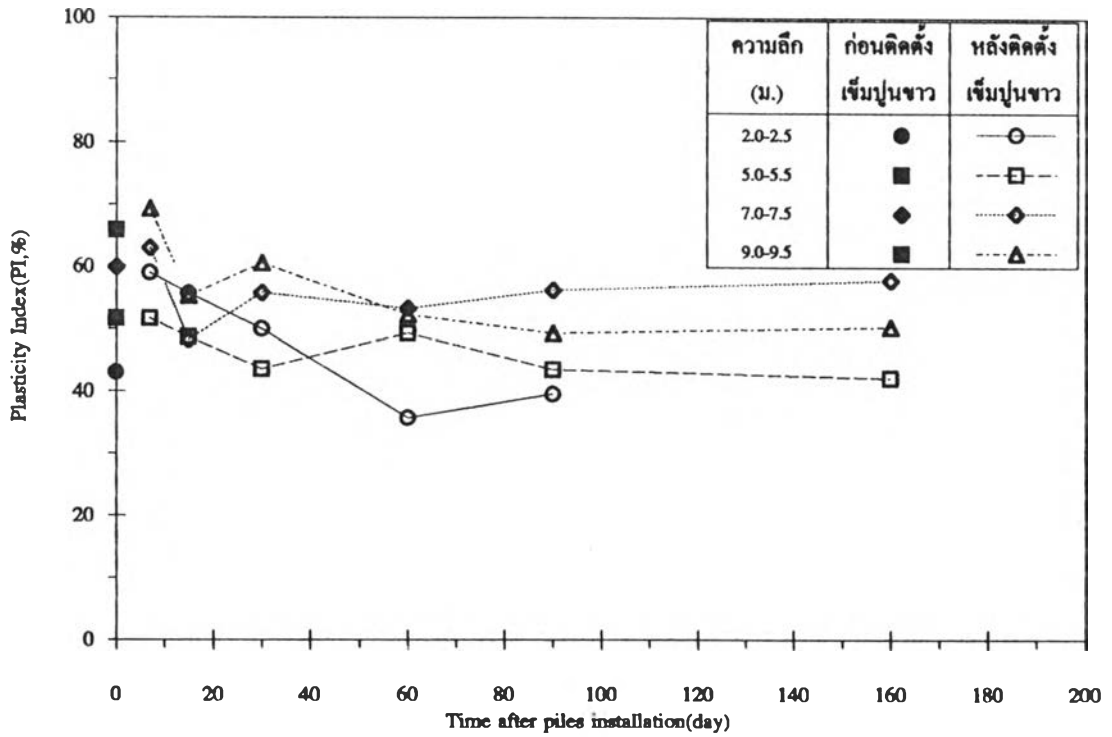
#### ตารางที่ 4.6 Plasticity Index of Treated Soil (TS2)

(a) At Distance 1/2 of Soil Between Piles

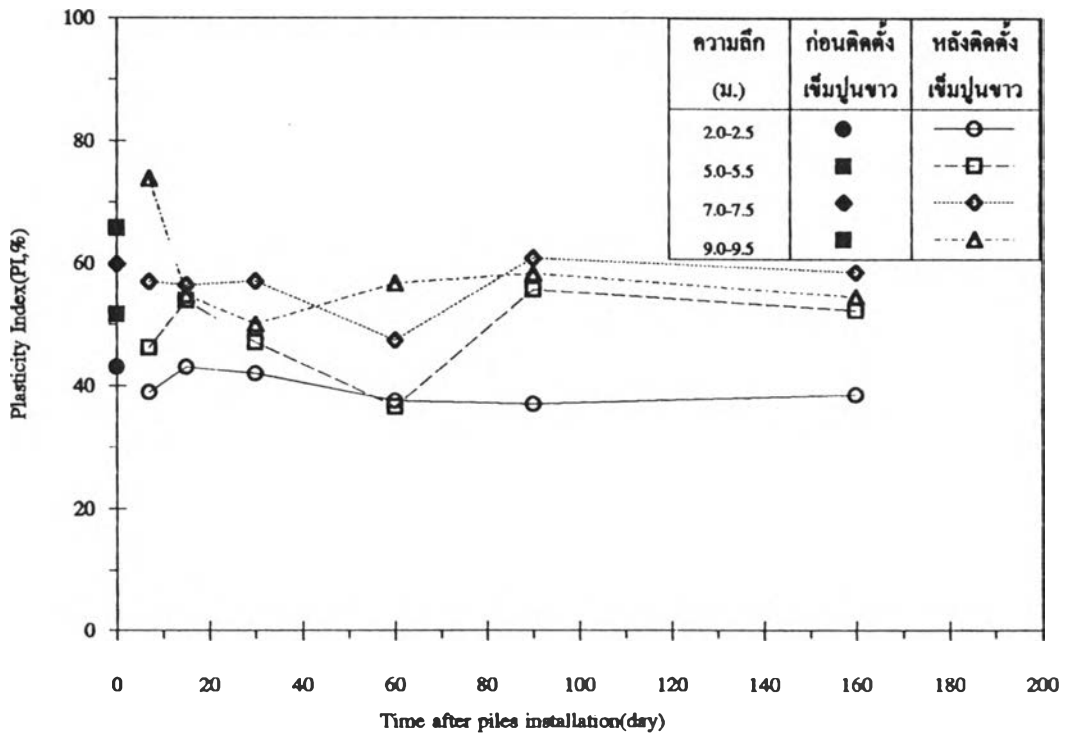
Depth,(m.)		Plasticity Index ,PI(%)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	43.04	58.77	33.69	64.43	56.87	55.74	47.56
5.00	5.50	51.63	32.01	29.30	38.20	35.21	61.18	61.62
7.00	7.50	59.93	51.54	34.41	34.72	57.26	67.95	67.14
9.00	9.50	65.82	71.43	33.04	36.28	67.05	66.81	72.78

(b) At Distance 1/3 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Plasticity Index ,PI(%)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	43.04	33.47	49.08	58.59	56.24	65.77	49.41
5.00	5.50	51.63	64.43	32.65	51.75	44.09	82.63	58.90
7.00	7.50	59.93	57.51	51.04	44.18	64.32	80.76	69.40
9.00	9.50	65.82	63.18	40.86	49.94	63.92	79.11	75.89



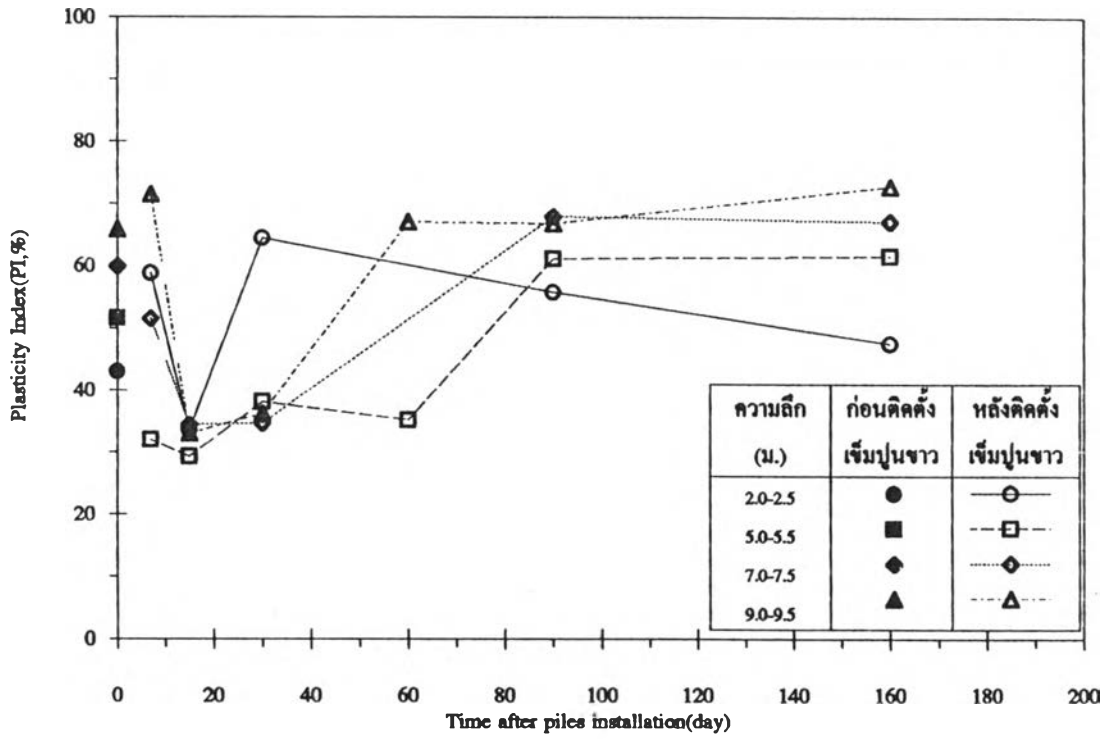
(a) At Distance 1/2 of soil between Piles



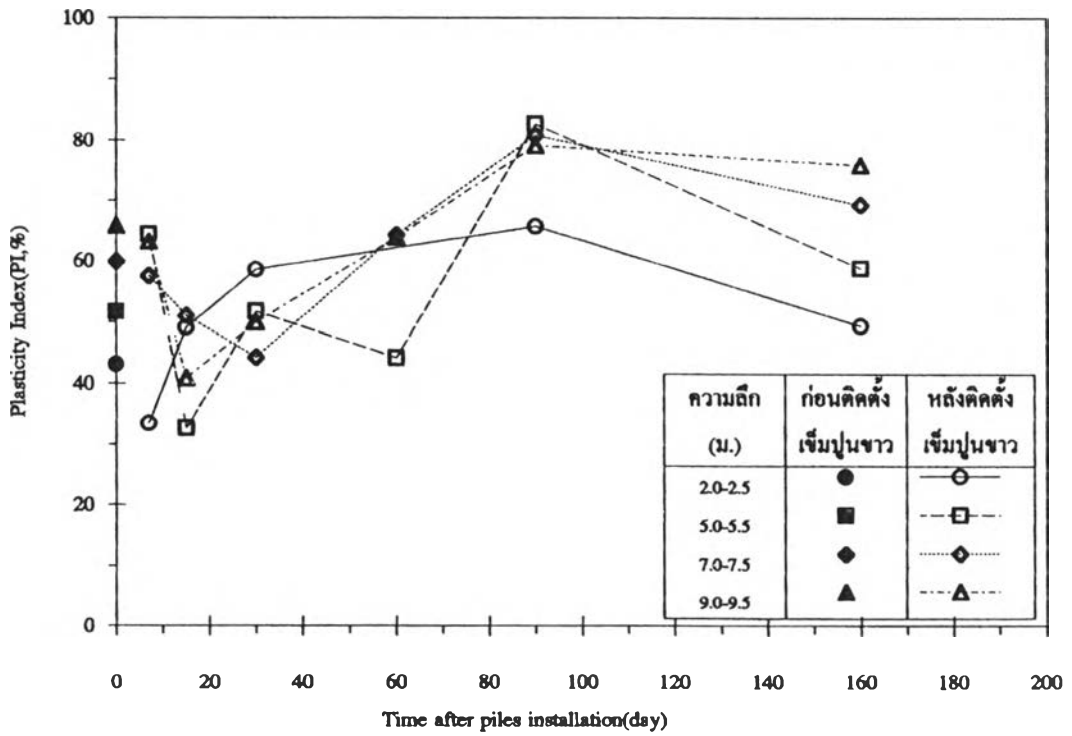
(b) At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.8 Variation of Plasticity Index of Treated Soils with Time(TS1)



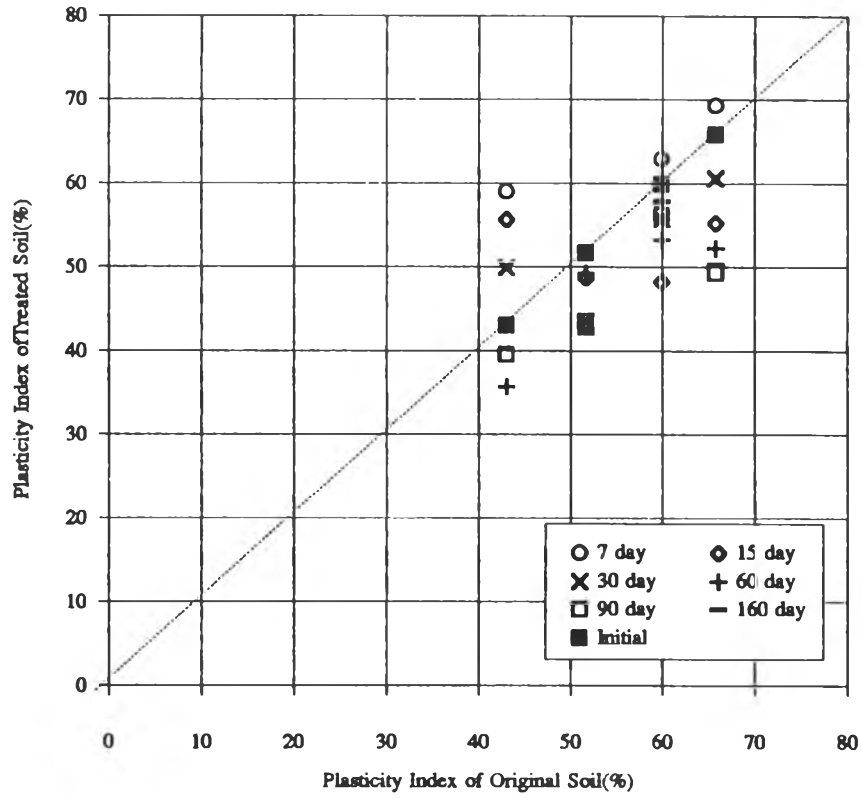


(a) At Distance 1/2 of soil between Piles

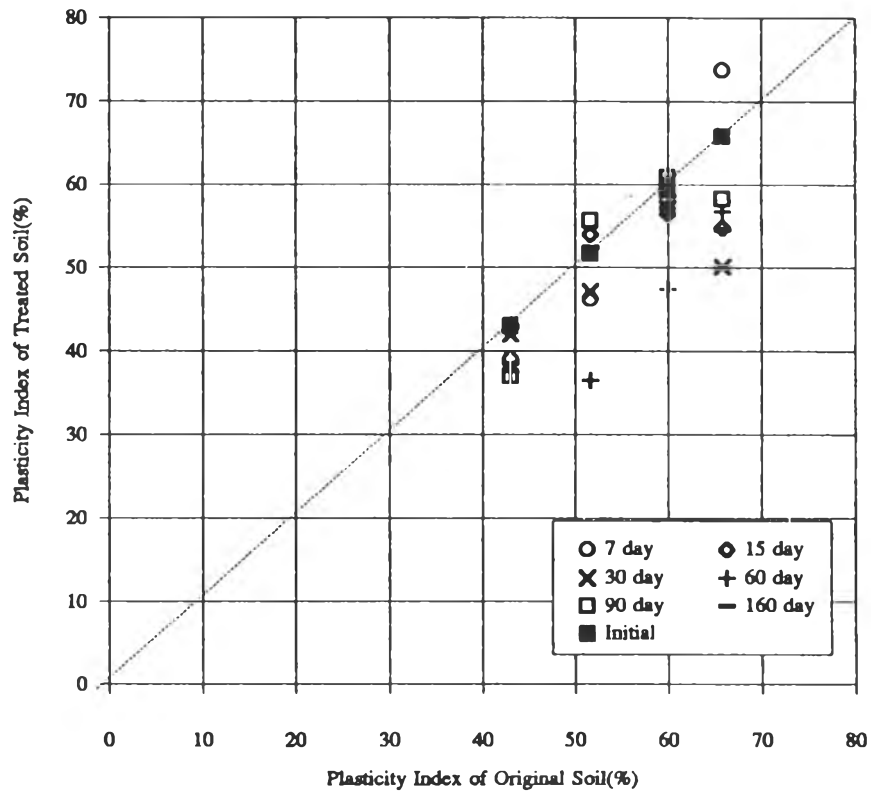


(b) At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.9 Variation of Plasticity Index of Treated Soils with Time(TS2)

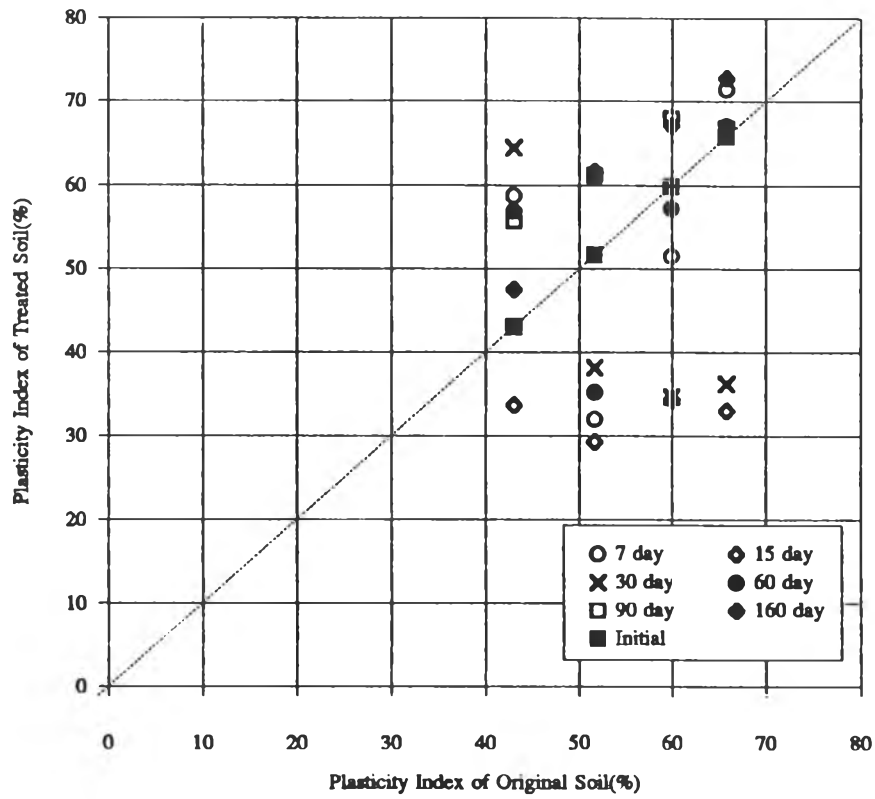


(a) At Distance 1/2 of soil between Piles

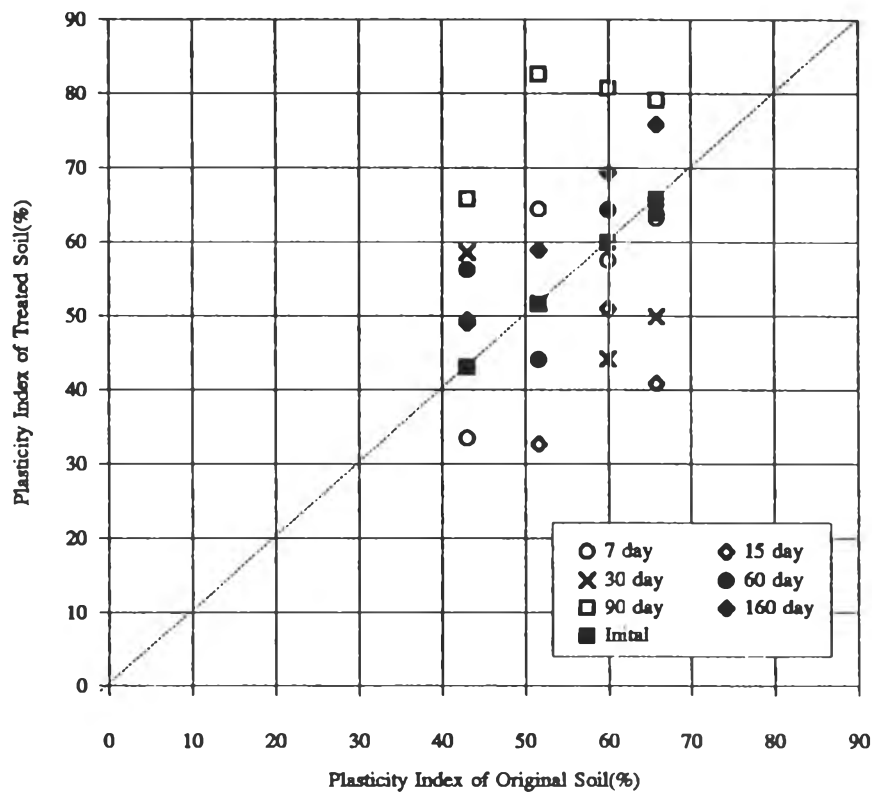


(b) At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.10 Plasticity Index of Treated Soils (TS1)



(a)At Distance 1/2 of soil between Piles



(b)At Distance 1/3 of soil between Piles

រូបភាព 4.11 Plasticity Index of Treated Soils (TS2)

เปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าปริมาณความชื้นในมวลดินที่ลดลงนั้นสืบเนื่องมาจากการลดลงของ free water ในมวลดินเป็นส่วนใหญ่

#### 4.2.2 คุณสมบัติของดินด้าน Strength Characteristics

คุณสมบัติของดินด้าน Strength Characteristics ที่ได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ(Undrained Shear Strength, Su)ของดินระหว่างเข็มปูนขาวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการติดตั้งเสาเข็มปูนขาว ประกอบด้วย การทดสอบ Cone Penetration Test(CPT) ในสนามและการทดสอบตัวอย่างดินที่เจาะสำรวจในห้องปฏิบัติการโดยทำการทดสอบ Triaxial Compression (UU) Test

##### ก) ผลการทดสอบ Cone Penetration Test ในสนาม

ตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสนามของดินระหว่างเข็มปูนขาวที่ระยะ 1 ใน 2 และ 1 ใน 3 ระหว่างเข็มปูนขาวด้วยวิธี CPT ที่ระยะเวลา 7,15,30,60,90, และ 160 วันภายหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ และได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.12 และ 4.13

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 2.0-8.0 เมตร, 8.0-11.0 เมตร และ 11.0-14.0 เมตร กับระยะเวลาภายหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินระหว่างเข็มปูนขาวลดลงประมาณ 50% ในแปลงทดสอบ TS1 และ 60% ในแปลงทดสอบ TS2 โดยจะลดลงตามระยะเวลาจนมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 30 วันหลังติดตั้งเข็มปูนขาว และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นกับเวลาจนถึงประมาณ 90 วัน ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินจะเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำที่สุดประมาณ 25% ในแปลงทดสอบ TS1 และ 15% ในแปลงทดสอบ TS2 หลังจากนั้นกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินในชั้นดินเหนียวอ่อน(ความลึกระหว่าง 2.0-8.0 ม.)ค่อนข้างคงที่หรือลดลงเล็กน้อย ส่วนในชั้นดินเหนียวแข็ง(ความลึกระหว่าง 8.0-14.0 ม.)ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นกับเวลา

บทที่ 4.7 Dutch Cone Penetration Test of Treated Soil (TS-1)

(a) At distance 1/2 of soil between piles

Depth		Undrained Shear Strength ( $S_u$ ,ton/sq.m.)						
(m. from Surface)		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	2.66	0.96	1.81	1.81	1.81	2.66	2.66
2.50	3.00	1.86	1.86	1.86	1.86	2.71	2.71	2.71
3.00	3.50	1.86	1.86	1.86	2.71	2.71	2.71	1.86
3.50	4.00	1.91	1.06	1.91	1.91	2.76	2.76	2.76
4.00	4.50	1.91	1.06	1.06	1.91	2.76	2.76	2.76
4.50	5.00	1.96	1.11	1.11	1.96	2.82	2.82	2.82
5.00	5.50	1.11	1.11	1.11	1.96	2.82	2.82	3.67
5.50	6.00	2.02	1.16	1.16	2.02	2.87	2.87	4.57
6.00	6.50	1.16	2.02	1.16	1.16	2.87	2.87	2.87
6.50	7.00	2.07	1.22	1.22	2.07	2.92	2.92	2.07
7.00	7.50	2.07	1.22	1.22	2.07	2.92	2.92	2.92
7.50	8.00	2.12	2.12	2.12	2.12	2.97	2.97	3.82
8.00	8.50	2.97	2.12	2.12	2.12	2.97	2.97	2.97
8.50	9.00	4.73	2.17	2.17	2.17	3.02	3.02	3.88
9.00	9.50	4.73	2.17	3.02	2.17	3.02	3.02	3.88
9.50	10.00	5.63	3.08	3.08	2.22	3.08	3.08	3.93
10.00	10.50	6.49	3.08	3.08	3.08	3.08	3.08	3.93
10.50	11.00	6.54	3.98	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13
11.00	11.50	6.54	3.98	3.13	3.13	3.13	3.98	3.98
11.50	12.00	7.44	4.03	3.18	3.18	4.88	4.03	4.88
12.00	12.50	7.44	4.88	3.18	3.18	4.03	4.03	4.88
12.50	13.00	9.20	4.94	4.94	3.23	4.08	4.94	5.79
13.00	13.50	8.35	4.94	4.08	4.08	4.08	4.94	5.79
13.50	14.00	7.55	4.14	4.99	4.14	5.84	4.99	8.40
14.00	14.50	9.25	4.99	4.99	4.99	4.99	5.84	9.25
14.50	15.00	11.01	7.60	5.04	5.04	6.74	7.60	13.46
15.00	15.50	11.01	5.89	5.04	5.89	8.45	8.45	13.46
15.50	16.00	12.76	7.65	5.94	6.80	10.21	6.80	13.51

(b) At distance 1/3 of soil between piles

Depth		Undrained Shear Strength ( $S_u$ ,ton/sq.m.)						
(m. from Surface)		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	2.66	0.96	0.96	0.96	2.66	3.51	2.66
2.50	3.00	1.86	1.86	1.86	1.86	2.71	3.57	2.71
3.00	3.50	1.86	1.86	2.71	1.01	3.57	2.71	2.71
3.50	4.00	1.91	2.76	3.62	1.06	2.76	2.76	2.76
4.00	4.50	1.91	1.91	2.76	1.06	2.76	2.76	2.76
4.50	5.00	1.96	2.82	1.96	1.96	2.82	3.67	2.82
5.00	5.50	1.11	1.96	1.96	1.96	2.82	3.67	2.82
5.50	6.00	2.02	1.16	1.16	1.16	3.72	4.57	2.02
6.00	6.50	1.16	1.16	1.16	2.02	2.87	4.57	2.02
6.50	7.00	2.07	2.07	2.07	2.07	3.77	6.33	2.07
7.00	7.50	2.07	2.92	2.92	2.07	2.07	6.33	2.07
7.50	8.00	2.12	2.12	2.12	2.12	2.97	7.23	2.12
8.00	8.50	2.97	2.12	2.12	2.97	2.97	8.09	2.12
8.50	9.00	4.73	3.88	3.02	3.02	3.88	8.14	2.17
9.00	9.50	4.73	3.02	3.02	3.02	3.02	7.29	2.17
9.50	10.00	5.63	1.37	4.78	3.08	3.93	7.34	3.08
10.00	10.50	6.49	2.22	3.93	3.08	3.08	7.34	3.93
10.50	11.00	6.54	3.13	4.83	3.98	3.98	7.39	3.98
11.00	11.50	6.54	3.13	4.83	3.98	3.98	8.24	3.13
11.50	12.00	7.44	3.18	5.74	4.03	4.88	8.29	4.88
12.00	12.50	7.44	3.18	5.74	5.74	4.03	8.29	4.03
12.50	13.00	9.20	4.08	6.64	4.08	4.94	8.35	4.94
13.00	13.50	8.35	3.23	7.49	4.94	4.08	6.64	4.94
13.50	14.00	7.55	4.99	7.55	15.22	5.84	7.55	9.25
14.00	14.50	9.25	4.99	11.81	15.94	4.99	7.55	8.40
14.50	15.00	11.01	5.04	8.45	21.91	7.60	10.15	10.15
15.00	15.50	11.01	5.04	7.60	30.37	8.45	11.01	11.01
15.50	16.00	12.76	8.50	5.09	26.19	8.50	12.67	9.28

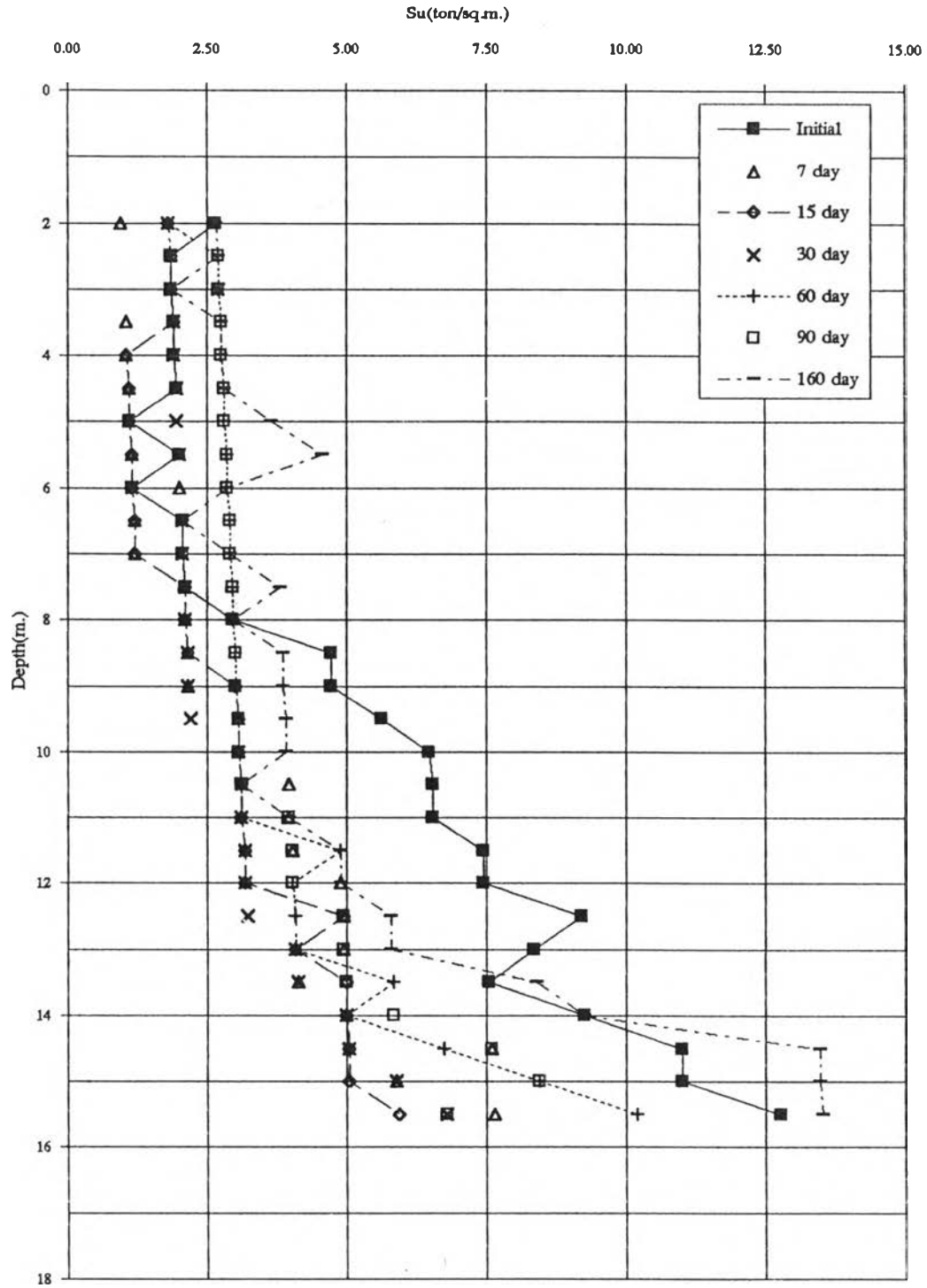
ภาพที่ 4.8 Dutch Cone Penetration Test of Treated Soil (TS-2)

(a) At distance 1/2 of soil between piles

Depth		Undrained Shear Strength ( $S_u$ , ton/sq.m.)						
(m. from Surface)		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	2.66	0.96	2.66	2.66	1.81	1.81	3.51
2.50	3.00	1.86	1.01	1.86	2.71	2.71	1.86	2.71
3.00	3.50	1.86	1.01	2.71	2.71	2.71	1.86	2.71
3.50	4.00	1.91	1.06	2.76	2.76	2.76	1.91	2.76
4.00	4.50	1.91	1.06	2.76	2.76	2.76	2.76	2.76
4.50	5.00	1.96	1.11	1.96	1.96	2.82	1.96	2.82
5.00	5.50	1.11	1.11	1.96	1.96	2.82	1.96	2.82
5.50	6.00	2.02	1.16	1.16	2.02	2.02	2.02	2.02
6.00	6.50	1.16	1.16	1.16	2.02	2.02	2.02	2.02
6.50	7.00	2.07	1.22	2.07	2.07	2.07	2.07	2.07
7.00	7.50	2.07	1.22	2.07	2.07	2.07	2.07	2.07
7.50	8.00	2.12	1.27	1.27	2.97	2.97	2.12	2.12
8.00	8.50	2.97	1.27	1.27	2.12	3.82	2.97	2.12
8.50	9.00	4.73	2.17	2.17	3.02	3.02	3.02	2.17
9.00	9.50	4.73	2.17	2.17	3.02	3.02	3.02	3.02
9.50	10.00	5.63	2.22	2.22	3.08	2.22	3.08	3.08
10.00	10.50	6.49	1.37	2.22	3.08	3.08	3.08	3.08
10.50	11.00	6.54	2.28	2.28	3.13	3.13	3.13	3.13
11.00	11.50	6.54	2.28	2.28	3.13	3.13	3.98	3.13
11.50	12.00	7.44	2.33	2.33	3.18	3.18	4.03	4.03
12.00	12.50	7.44	2.33	2.33	2.33	3.18	4.03	4.03
12.50	13.00	9.20	2.38	3.23	3.23	3.23	4.08	4.94
13.00	13.50	8.35	2.38	3.23	3.23	4.08	4.94	4.94
13.50	14.00	7.55	2.43	3.28	2.43	4.14	4.99	4.14
14.00	14.50	9.25	2.43	3.28	3.28	4.14	4.99	4.14
14.50	15.00	11.01	2.48	5.04	3.33	5.04	5.89	5.89
15.00	15.50	11.01	3.33	6.74	3.33	5.04	6.74	5.89
15.50	16.00	12.76	5.94	6.80	5.64	5.80	7.65	8.50

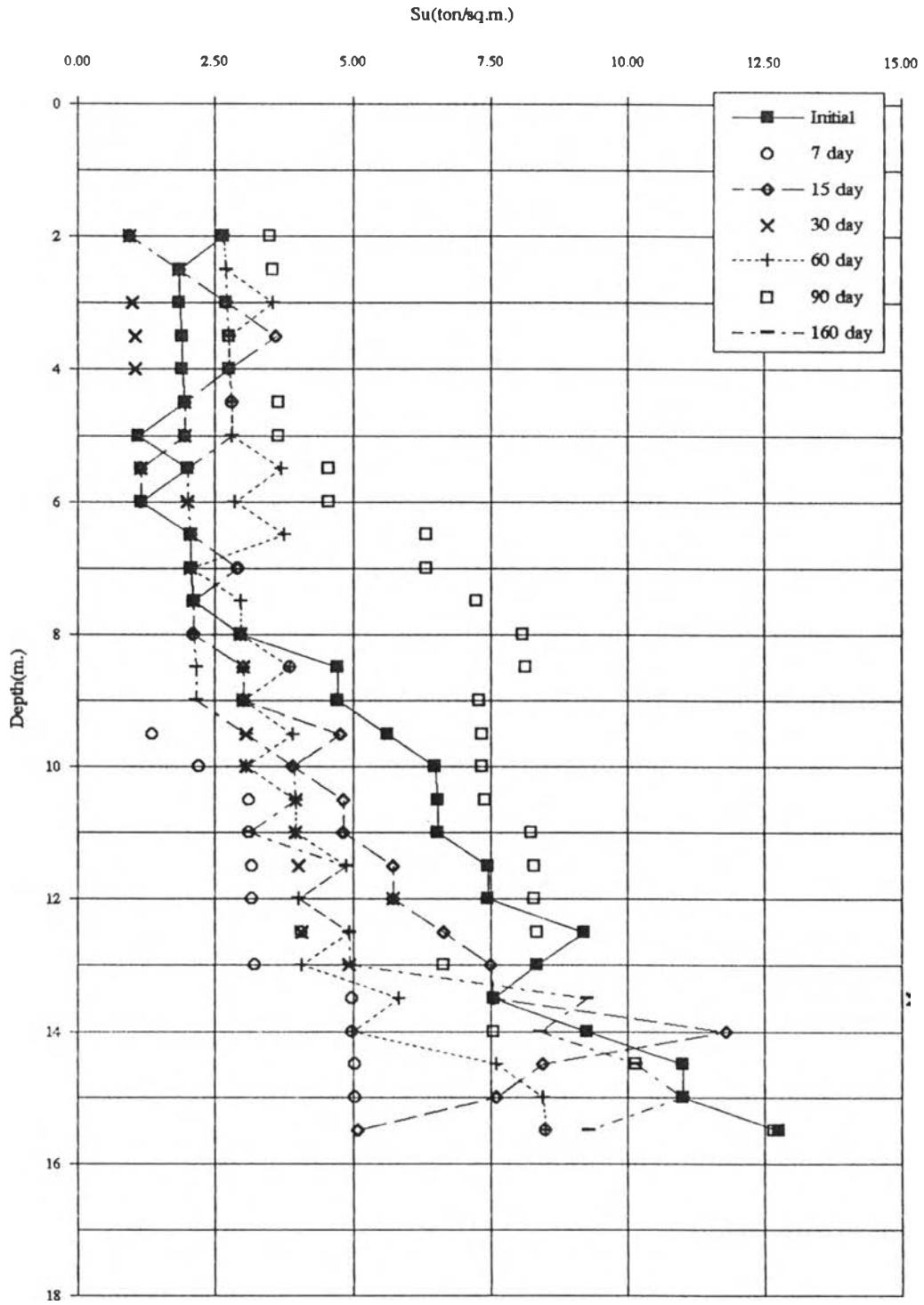
(b) At distance 1/3 of soil between piles

Depth		Undrained Shear Strength ( $S_u$ , ton/sq.m.)						
(m. from Surface)		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	2.66	0.96	1.81	1.81	2.66	2.66	2.66
2.50	3.00	1.86	1.01	1.86	1.86	2.71	1.86	1.86
3.00	3.50	1.86	1.01	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86
3.50	4.00	1.91	1.06	1.91	1.91	1.91	2.76	1.91
4.00	4.50	1.91	1.06	1.91	1.91	1.91	3.62	1.91
4.50	5.00	1.96	1.11	1.96	1.96	1.96	3.67	1.96
5.00	5.50	1.11	1.11	1.96	1.96	1.96	3.67	1.96
5.50	6.00	2.02	1.16	2.02	2.02	2.02	2.87	2.02
6.00	6.50	1.16	1.16	1.16	2.02	2.02	2.02	2.02
6.50	7.00	2.07	1.22	2.07	2.07	2.07	2.92	2.07
7.00	7.50	2.07	1.22	2.07	2.07	2.07	2.92	2.92
7.50	8.00	2.12	1.27	2.12	2.12	2.12	2.97	2.12
8.00	8.50	2.97	1.27	2.12	2.12	2.97	2.97	2.12
8.50	9.00	4.73	2.17	2.17	3.02	3.02	3.02	2.17
9.00	9.50	4.73	2.17	2.17	2.17	3.02	3.02	3.02
9.50	10.00	5.63	2.22	3.08	2.22	3.08	3.08	2.22
10.00	10.50	6.49	2.22	4.78	2.22	3.08	3.08	2.22
10.50	11.00	6.54	2.28	4.83	2.28	3.13	3.13	2.28
11.00	11.50	6.54	2.28	3.98	3.13	3.98	3.13	3.13
11.50	12.00	7.44	4.03	4.88	3.18	4.03	3.18	3.18
12.00	12.50	7.44	4.03	4.88	3.18	4.03	3.18	2.33
12.50	13.00	9.20	4.08	5.79	4.08	4.08	4.08	2.38
13.00	13.50	8.35	4.08	4.94	4.08	4.08	4.08	3.23
13.50	14.00	7.55	4.99	7.55	3.28	4.14	5.84	3.28
14.00	14.50	9.25	4.99	6.69	4.14	4.14	5.84	4.14
14.50	15.00	11.01	5.89	8.45	5.89	5.89	5.89	5.04
15.00	15.50	11.01	5.89	9.30	5.89	5.89	6.74	5.89
15.50	16.00	12.76	6.80	9.35	7.65	7.65	7.65	7.65



(a) At Distance 1/2 of soil between Piles

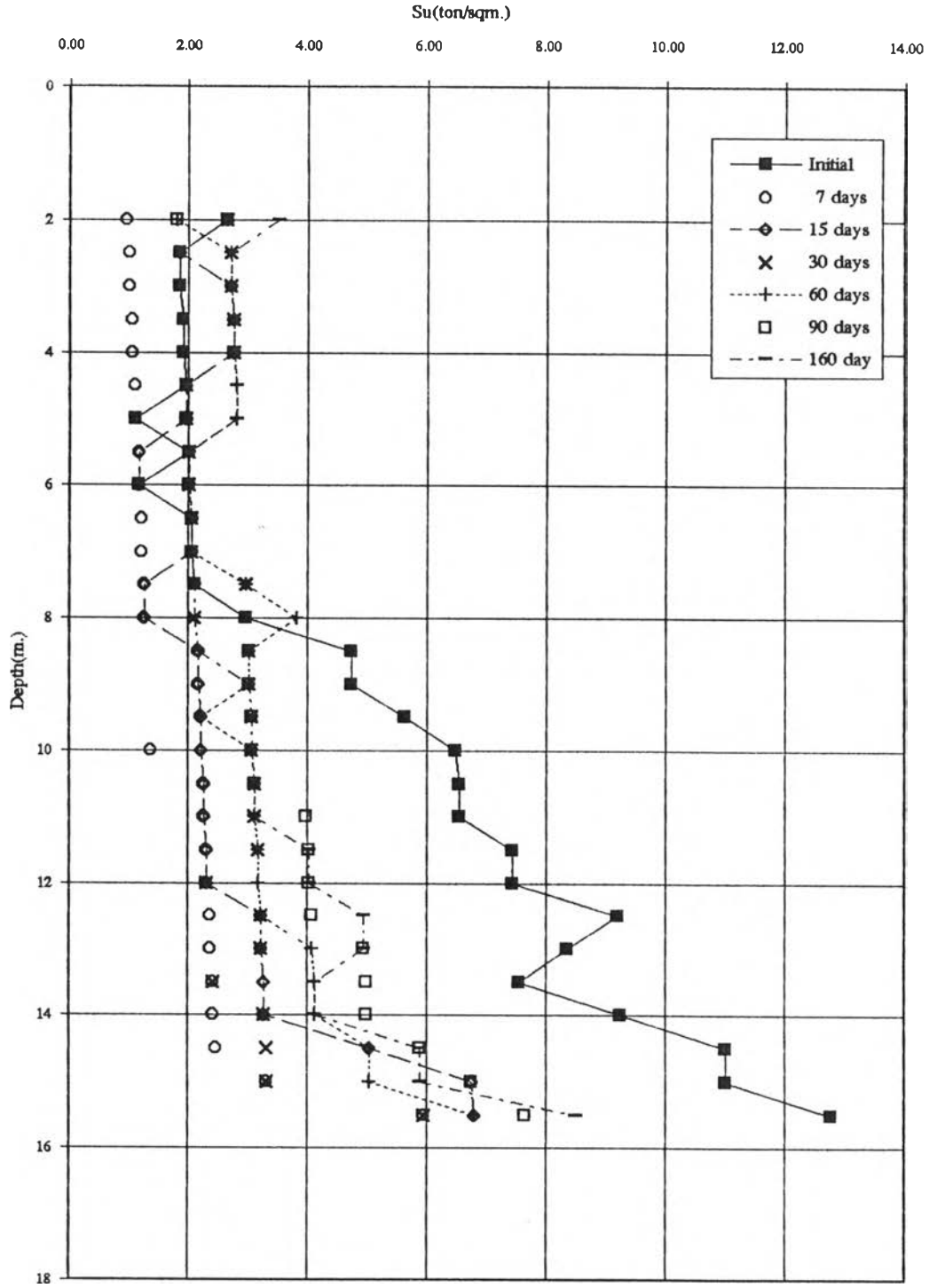
รูปที่ 4.12 Variation of Undrained Shear Strength (CPT) of Treated Soil (TS1)



(b)At Distance 1/3 of soil between Piles

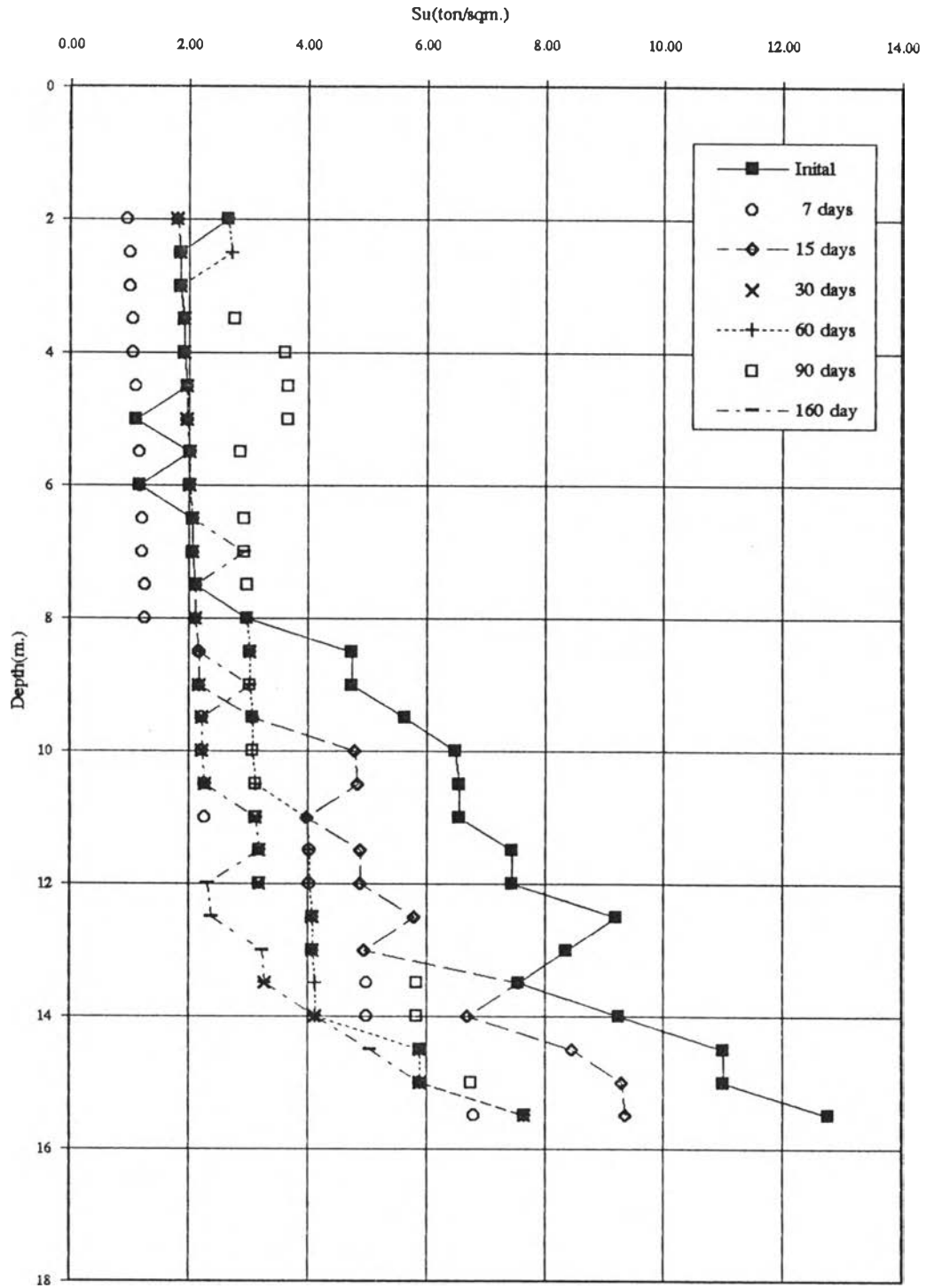
รูปที่ 4.12 (ต่อ) Variation of Undrained Shear Strength (CPT) of Treated Soil (TS1)





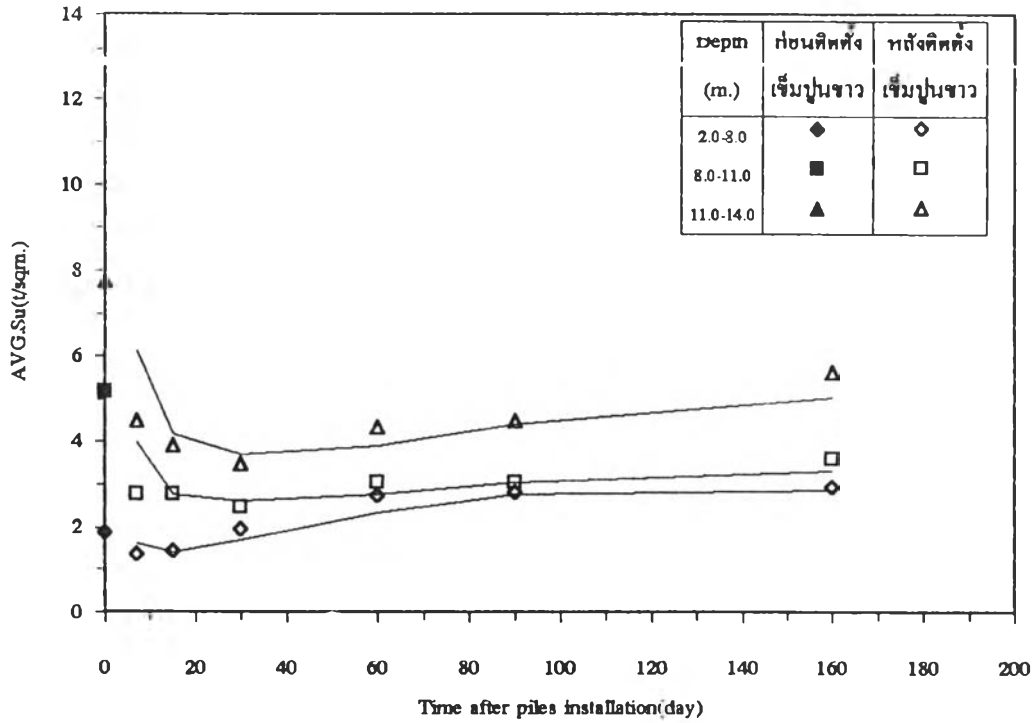
(a) At Distance 1/2 of soil between Piles

รูปที่ 4.13 Variation of Undrained Shear Strength (CPT) of Treated Soil (TS2)

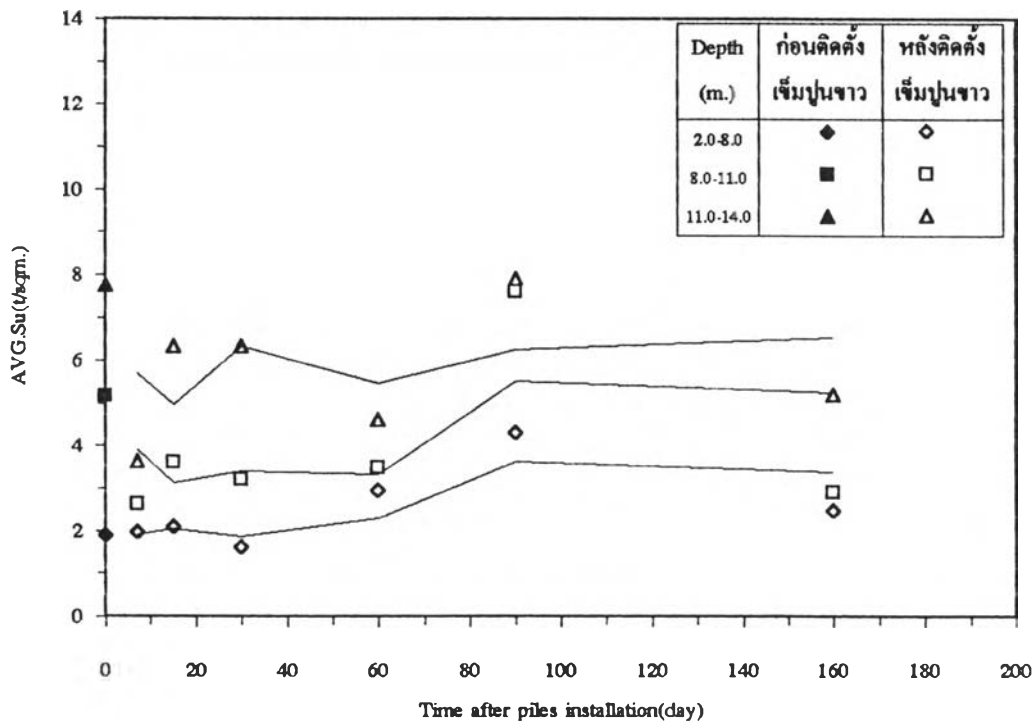


(b) At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.13 (ต่อ) Variation of Undrained Shear Strength (CPT) of Treated Soil (TS2)

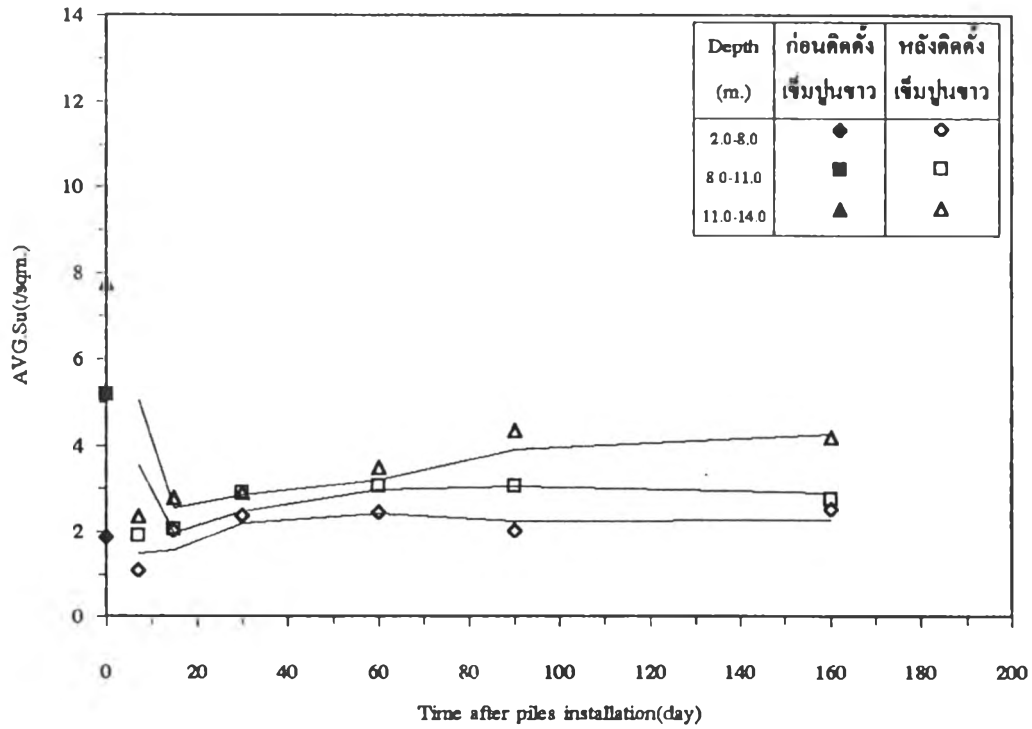


(a) At distance 1/2 of soil between piles

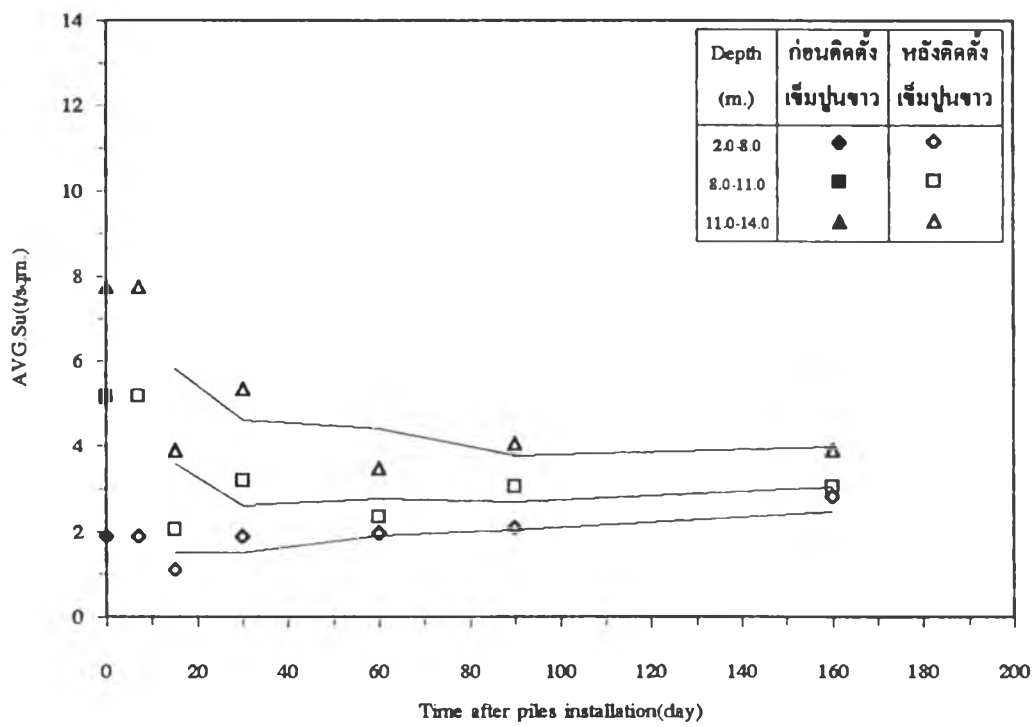


(b) At distance 1/3 of soil between piles

รูปที่ 4.14 Variation of Undrained Shear Strength (CPT) of Treated Soils(TS1) with time



(a) At distance 1/2 of soil between piles



(b) At distance 1/3 of soil between piles

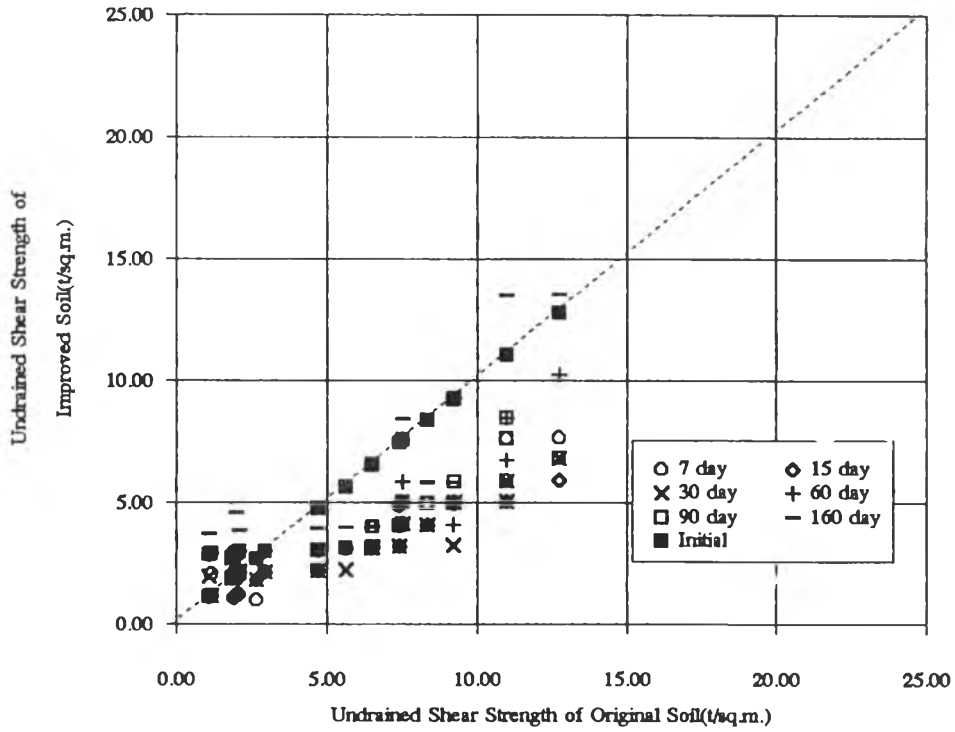
รูปที่ 4.15 Variation of Undrained Shear Strength (CPT) of Treated Soils(TS2) with time

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเดิมกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินที่ระยะ 1 ใน 2 และ 1 ใน 3 ของระยะระหว่างเข็มปูนขาวภายหลังการติดตั้งเสาเข็มปูนขาวของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินภายหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวในแปลงทดสอบ TS2 ลดลงมากกว่าดินในแปลงทดสอบ TS1 นั่นคือ ดินระหว่างเข็มปูนขาวในแปลงทดสอบ TS2 จะถูกรบกวนมากกว่าดินในแปลงทดสอบ TS1 และการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินที่ระยะ 1 ใน 3 ของระยะระหว่างเข็มปูนขาวจะดีกว่าที่ระยะ 1 ใน 2 ของระยะระหว่างเข็มปูนขาวในแปลงทดสอบ TS1 ส่วนในแปลงทดสอบ TS2 จะไม่แตกต่างกันมากนักซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

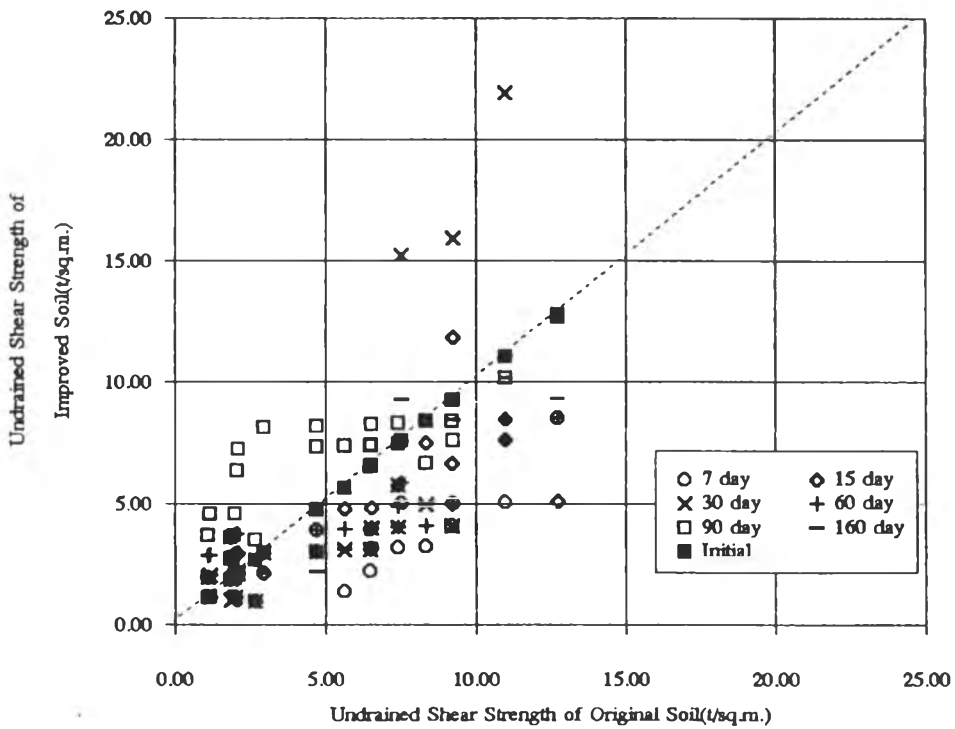
#### ข) ผลการทดสอบ Triaxial Compression (UU) Test

ตารางที่ 4.9 และ 4.10 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Triaxial Compression (UU) Test ของตัวอย่างดินที่เจาะสำรวจระหว่างเข็มปูนขาวที่ระยะเวลา 7,15,30,60,90, และ 160 วันหลังการติดตั้งเข็มปูนขาว ของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ (ข้อมูลการทดสอบรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก.) และได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.18 และ 4.19 ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินจากการทดสอบ UU Test มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับการทดสอบ CPT คือ ลดลงกับเวลาจนถึงประมาณ 30 วันหลังการติดตั้งเข็มปูนขาว หลังจากนั้นกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินจึงเพิ่มขึ้นจนถึงเวลาที่ 90 วันกำลังรับแรงเฉือนจึงมีแนวโน้มที่จะคงที่ อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินจากการทดสอบ UU Test จะต่ำกว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ CPT เนื่องจากตัวอย่างดินในการทดสอบ UU Test ถูกรบกวนในขั้นตอนการเก็บและเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ

จากข้อมูลกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ CPT และ UU Test ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินจะลดลงจนถึงระยะเวลา 30 วันหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวแล้วจึงเพิ่มขึ้นกับเวลาจนถึงระยะเวลา 90 วันจึงมีแนวโน้มที่จะคงที่ หลังจากนั้นกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินในชั้นดินเหนียวอ่อนจะค่อนข้างคงที่หรือลดลงเล็กน้อย ส่วนในชั้นดินเหนียวแข็งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นกับเวลา ซึ่งพอสรุปสาเหตุได้ดังนี้

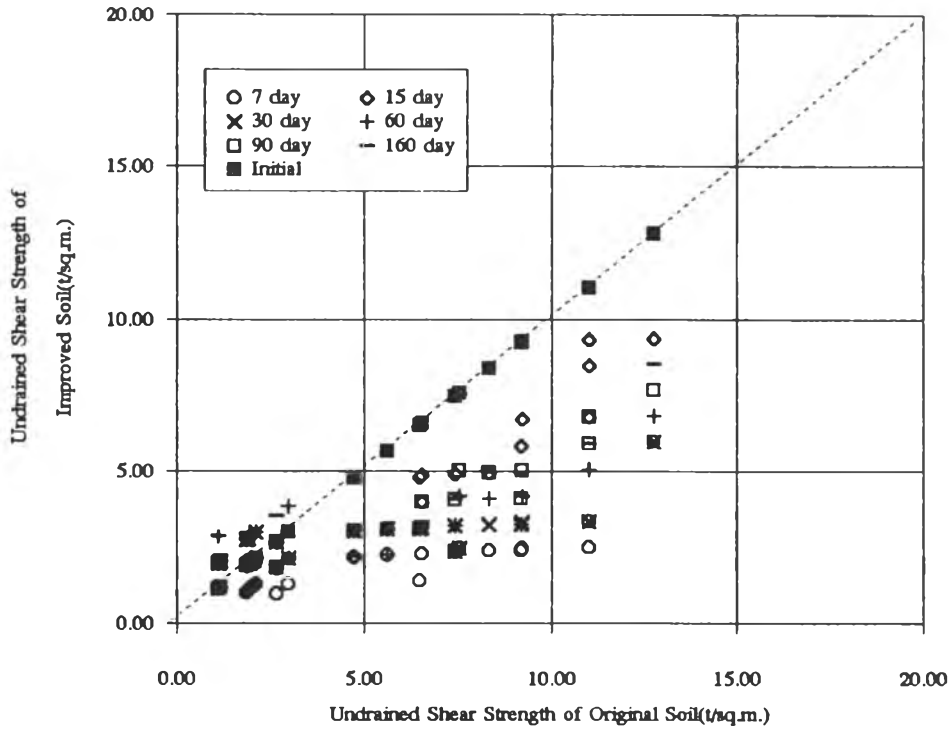


(a)At Distance 1/2 of soil between Piles

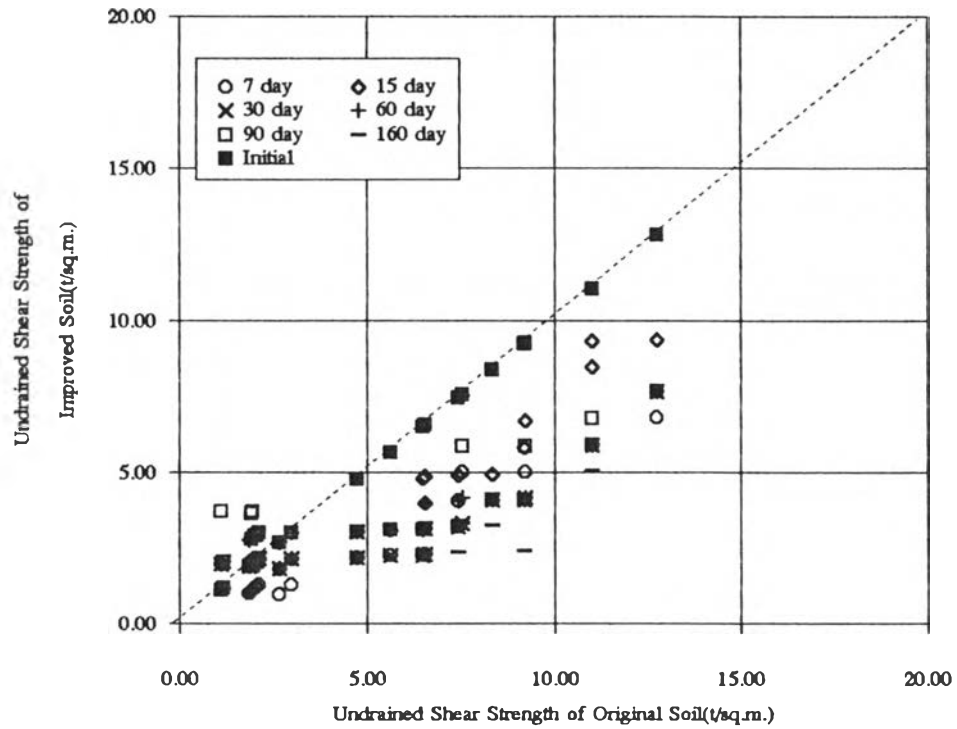


(b)At Distance 1/3 of soil between Piles

ပုံ ၅၂၇ 4.16 Undrained Shear Strength (CPT) of Treated Soils (TS1)



(a) At Distance 1/2 of soil between Piles



(b) At Distance 1/3 of soil between Piles

รูปที่ 4.17 Undrained Shear Strength (CPT) of Treated Soils (TS2)

ตารางที่ 4.9 Triaxial Compression Test(UU) of Treated Soil (TS1)

(a) At Distance 1/2 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Undrained Shear Strength (ton/sq.m.)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	1.80	1.45	1.15	0.85	1.26	1.60	*
5.00	5.50	1.85	1.11	0.73	0.60	0.61	1.34	1.02
7.00	7.50	1.90	1.40	0.88	0.87	0.89	1.10	1.33
9.00	9.50	1.90	1.45	0.93	0.96	1.49	2.66	2.56

\* No recovery sample

(b) At Distance 1/3 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Undrained Shear Strength (ton/sq.m.)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	1.80	0.80	0.60	0.70	0.72	0.90	0.90
5.00	5.50	1.85	0.80	0.75	0.70	0.82	1.50	1.32
7.00	7.50	1.90	1.70	0.98	0.86	0.76	1.40	1.35
9.00	9.50	1.90	1.73	1.03	0.87	0.96	1.70	1.73

ตารางที่ 4.10 Triaxial Compression Test(UU) of Treated Soil (TS2)

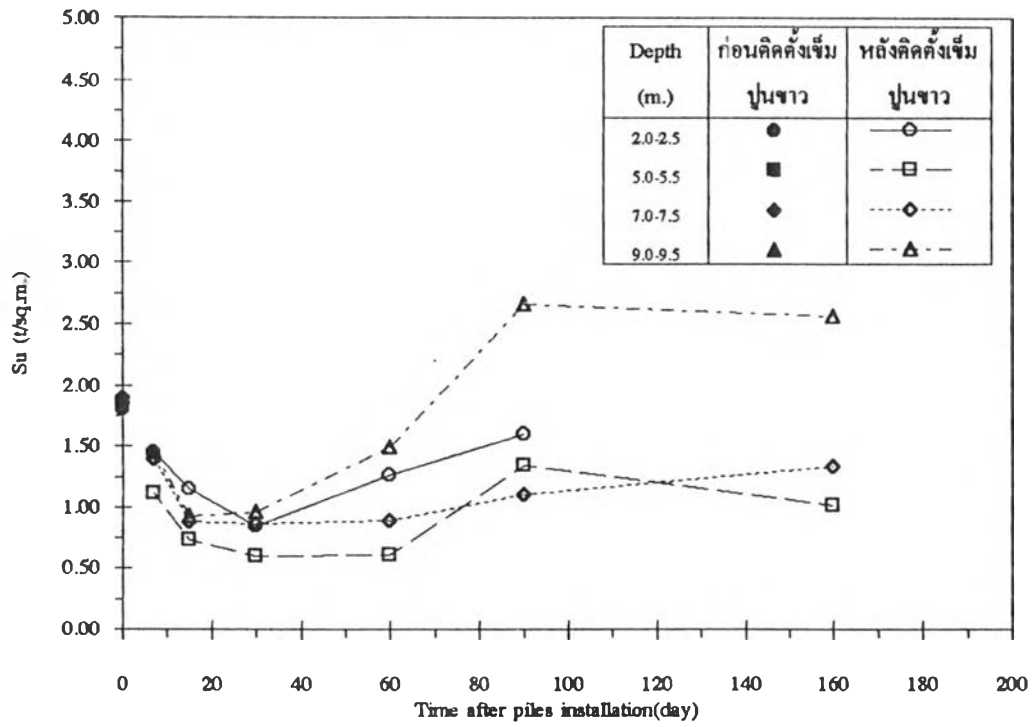
(a) At Distance 1/2 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Undrained Shear Strength (ton/sq.m.)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	1.80	1.74	1.02	1.02	0.91	1.26	1.74
5.00	5.50	1.85	0.61	0.65	0.49	0.76	1.55	1.54
7.00	7.50	1.90	1.09	0.76	0.20	1.26	1.66	1.50
9.00	9.50	1.90	0.50	0.50	0.33	1.08	1.70	1.86

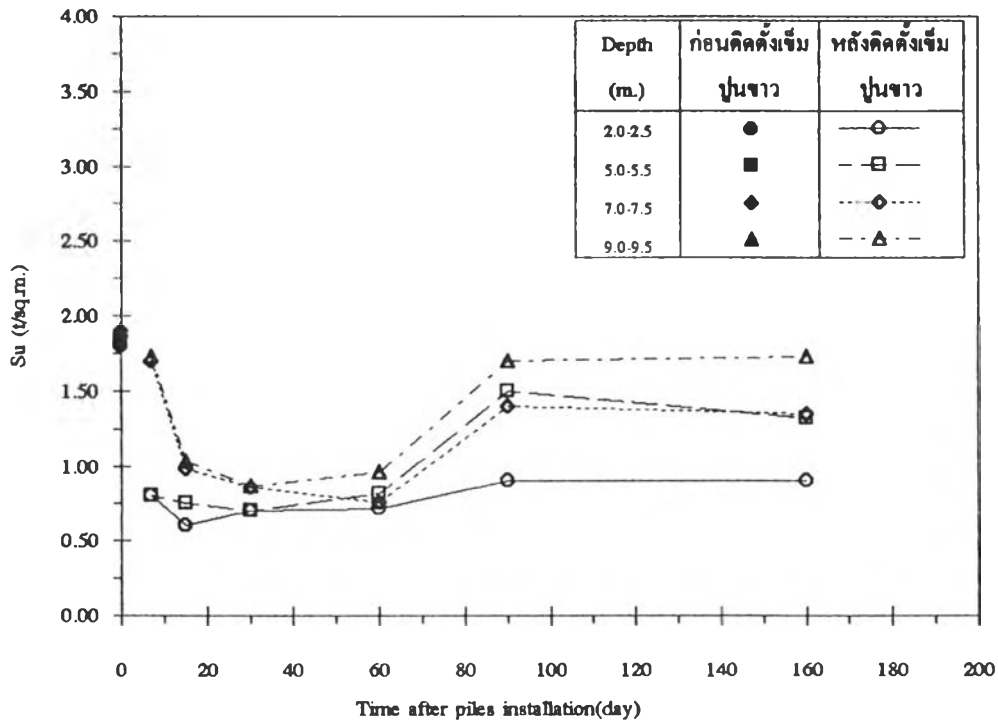
(b) At Distance 1/3 of Soil Between Piles

Depth,(m.)		Undrained Shear Strength (ton/sq.m.)						
		Time after piles installation(day)						
From	To	0	7	15	30	60	90	160
2.00	2.50	1.80	0.78	0.53	0.80	1.10	0.91	0.97
5.00	5.50	1.85	0.91	0.38	0.55	0.65	1.32	1.81
7.00	7.50	1.90	0.63	0.64	0.79	0.95	1.16	1.58
9.00	9.50	1.90	0.50	0.49	0.59	0.96	2.52	2.66



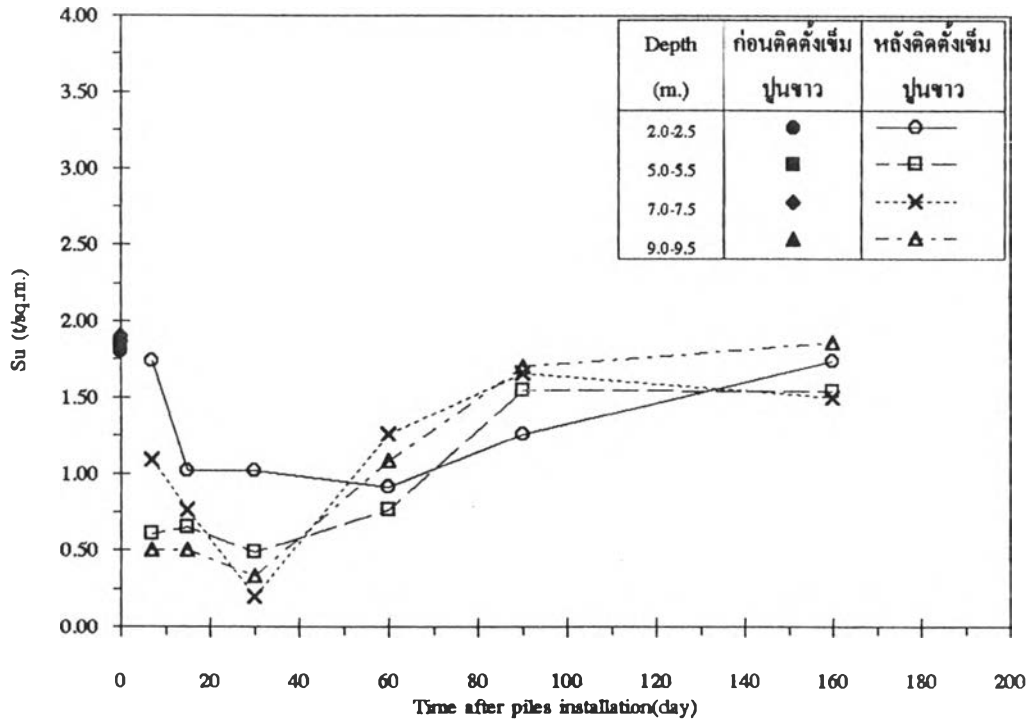


(a) At distance 1/2 of soil between piles

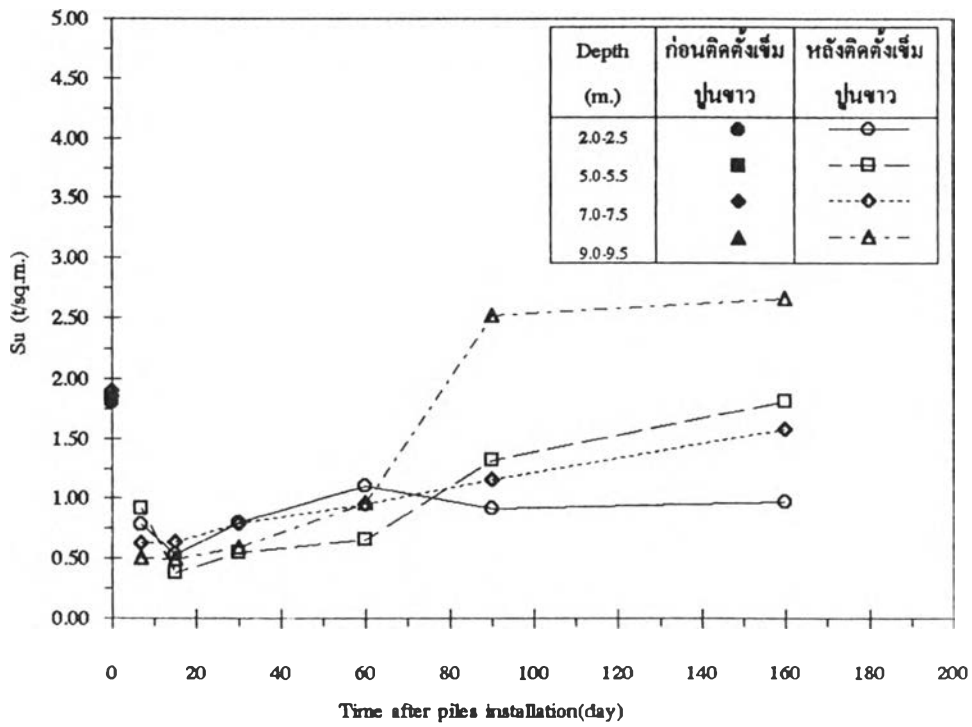


(b) At distance 1/3 of soil between piles

รูปที่ 4.18 Variation of Undrained Shear Strength (UU Test) of Treated Soils with Time(TS1)



(a) At distance 1/2 of soil between piles



(b) At distance 1/3 of soil between piles

รูปที่ 4.19 Variation of Undrained Shear Strength (UU Test) of Treated Soils with Time(TS2)

1) การลดลงของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ มีสาเหตุมาจากการระบายดินซึ่งทำให้ excess pore pressure ( $\Delta u$ ) ในดินเพิ่มขึ้น โดย  $\Delta u$  นี้อาจมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบซึ่งขึ้นอยู่กับสาเหตุของการระบาย คือ

- Positive excess pore pressure ( $+\Delta u$ ) จะเกิดขึ้นจาก
  - การระบายดินในขั้นตอนการติดตั้งเสาเข็มปูนขาว
  - การระบายดินจากการขยายตัวของเข็มปูนขาวในปฏิกิริยา Hydration
- Negative excess pore pressure ( $-\Delta u$ ) จะเกิดขึ้นจาก
  - อุณหภูมิของดินที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยา Hydration ของปูนขาว
  - ปริมาณน้ำในมวลดินที่ลดลงทำให้เกิด Soil Suction

2) การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ เกิดขึ้นจากสองสาเหตุ คือ Thixotropy hardening process และ Consolidation effect จากปฏิกิริยาของปูนขาว (กรณีผลรวมของ excess pore pressure เป็นบวก)

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินมีการเปลี่ยนแปลง โดยการระบายดินจากการติดตั้งเข็มปูนขาวจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงทันที ส่วนการระบายดินที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Hydration ของปูนขาวจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงกับเวลา (กรณีผลรวมของ excess pore pressure เป็นลบ) จนกระทั่งปฏิกิริยา Hydration ของปูนขาวสิ้นสุด (ประมาณ 30 วันหลังการติดตั้งเข็มปูนขาว) หลังจากนั้นกำลังรับแรงเฉือนจึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

เมื่อพิจารณาข้อมูลกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินระหว่างเข็มปูนขาวจากการทดสอบ CPT จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนทำให้ทราบได้ว่า net excess pore pressure ในชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีค่าเป็นลบ และ ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางจะมีค่าเป็นบวก ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับข้อมูล initial excess pore pressure ( $\Delta u_0$ ) ของวิโรจน์ (2541) ซึ่งพบว่า  $\Delta u_0$  ในชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าประมาณ -2.0 ตัน/ตร.ม. และ +1.0 ตัน/ตร.ม. ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง และจากข้อมูลนี้เองทำให้ทราบว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินหลังปรับปรุงยังต่ำกว่าดินเดิมเนื่องจาก excess pore pressure ยัง dissipate ออกไปไม่หมดนั่นเอง

#### 4.2.3 คุณสมบัติของดินทางด้าน Compressibility

ตารางที่ 4.11 แสดงคุณสมบัติของดินเดิมที่ความลึกต่างๆก่อนติดตั้งเข็มปูนขาว ตารางที่ 4.12-4.13 แสดงคุณสมบัติของดินด้าน Compressibility (ข้อมูลการทดสอบ Consolidation Test แสดงอยู่ในภาคผนวก ข) ของดินหลังติดตั้งเข็มปูนขาว 90 วันและ 160 วันของแปลงทดสอบ TS1 และ TS2 ตามลำดับ จากข้อมูลในตารางที่ 4.11 ถึง 4.13 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ซึ่งพบคุณสมบัติด้าน Compressibility ของดินระหว่างเข็มปูนขาวที่เวลา 160 วันหลังการติดตั้งเข็มปูนขาวมีการเปลี่ยนแปลง คือ ค่า Void Ratio( $e_0$ ) มีค่าระหว่าง 1.9-2.3 ลดลงจากค่าเริ่มต้นก่อนการติดตั้งเข็มปูนขาวประมาณ 20% ในแปลงทดสอบ TS1 และมีค่าระหว่าง 2.4-2.7 ลดลงประมาณ 9% ในแปลงทดสอบ TS2 ค่า Compression Index( $C_c$ ) ในแปลงทดสอบ TS1 มีค่าประมาณ 0.85 และ 1.1 ในแปลงทดสอบ TS2 โดยลดลงจากค่าเริ่มต้นประมาณ 40% และ 35% ตามลำดับ ค่า Coefficient of Consolidation( $C_v$ ) ในแปลงทดสอบ TS1 มีค่าระหว่าง 1.26-2.8 ตร.ม./ปี ลดลงประมาณ 60% และในแปลงทดสอบ TS2 มีค่าระหว่าง 0.95-3.8 ตร.ม./ปี ลดลงประมาณ 55%

รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของ  $e$ -log P ที่เปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มที่จะลดต่ำลงจากเดิม เป็นผลมาจากการรบกวนดิน(สุรฉัตร สัมพันธ์ชาวัณน์ ,2529) จากการติดตั้งเข็มปูนขาวและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากน้ำในมวลดินได้ถูกดึงไปใช้ในปฏิกิริยา Hydration และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดังได้กล่าวแล้วในข้อ 4.2 ทำให้ค่า  $e_0$ ,  $C_v$  และค่า  $C_c$  ของดินลดลง

#### 4.3 การเปรียบเทียบการปรับปรุงดินแบบใช้เข็มปูนขาวกับการใช้ PVD

นอกจากการพิจารณาคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงจากผลของการปรับปรุงด้วยเข็มปูนขาวโดยวิธีแทนที่ดังกล่าวในข้างต้นแล้ว ในข้อนี้เสนอการพิจารณาผลการปรับปรุงด้าน Bearing capacity , Slope stability และ Total primary settlement โดยทำ test section โดยใช้การปรับปรุงด้วยวิธีเข็มปูนขาว ตลอดจนการวิเคราะห์ผลของ test section โดยใช้ PVD ซึ่งทำโดย AIT ในปี 1994 โดยพิจารณาปัญหาเรื่องการทรุดตัวเป็นหลัก

ในข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบ performance ของการปรับปรุงดินที่หนองงูเห่า โดยใช้ PVD (รายละเอียดของข้อมูลอยู่ในบทที่ 2)กับการปรับปรุงดินโดยใช้เสาเข็มปูนขาวโดย

ตารางที่ 4.11 Compressibility Characteristics ของดินก่อนปรับปรุงด้วยเข็มปูนขาว

Depth(m)		$\gamma_r$ (tcm.)	$\sigma'_{vo}$ (tsm.)	$\sigma'_{vm}$ (tsm.)	$u_o$ (tsm.)	$e_o$	Cc	Cr	Cv (m <sup>2</sup> /yr)	CR	RR	OCR
From	To											
2.50	3.00	1.57	2.52	4.60	1.80	2.42	1.43	0.25	5.05	0.42	0.07	1.83
4.00	4.50	1.41	2.49	6.70	3.50	2.68	2.06	0.19	1.26	0.56	0.05	2.69
7.00	7.50	1.44	4.24	7.90	6.20	2.56	2.08	0.20	1.89	0.58	0.06	1.86
8.50	9.00	1.47	6.16	8.60	6.70	2.64	1.66	0.23	4.73	0.46	0.06	1.40
10.00	10.50	1.28	5.82	10.00	7.30	2.61	1.42	0.18	0.95	0.39	0.05	1.72
12.00	13.00	1.87	16.88	17.00	6.50	1.35	0.92	0.25	2.52	0.39	0.11	1.01

Remark : Cv at stress level  $\sigma'_v = \sigma'_{vm}$

ตารางที่ 4.12 Compressibility Characteristics of Treated Soils at TS1

ก) ที่ระยะเวลา 90 วัน

Depth(m)		$\gamma_T$ (tcm.)	$\sigma'_{vo}$ (tsm.)	$\sigma'_{vm}$ (tsm.)	$u_o$ (tsm.)	$e_o$	Cc	Cr	Cv (m <sup>2</sup> /yr)	CR	RR	OCR
From	To											
2.00	2.50	1.56	2.01	4.20	1.50	1.93	0.84	0.21	0.88	0.29	0.07	2.09
4.00	4.50	1.33	2.15	6.50	3.50	1.98	0.83	0.15	0.88	0.28	0.05	3.02
7.00	7.50	1.52	4.82	7.10	6.20	2.27	0.90	0.10	1.89	0.28	0.03	1.47
9.00	9.50	1.48	6.59	8.20	7.10	2.01	0.88	0.12	0.95	0.29	0.04	1.24
11.00	11.50	1.66	11.18	16.00	7.50	1.63	0.88	0.13	1.58	0.33	0.05	1.43
12.00	12.50	1.61	12.42	16.00	7.30	1.78	0.90	0.14	1.26	0.32	0.05	1.29

ข) ที่ระยะเวลา 180 วัน

Depth(m)		$\gamma_T$ (tcm.)	$\sigma'_{vo}$ (tsm.)	$\sigma'_{vm}$ (tsm.)	$u_o$ (tsm.)	$e_o$	Cc	Cr	Cv (m <sup>2</sup> /yr)	CR	RR	OCR
From	To											
2.00	2.50	1.51	1.90	4.20	1.50	2.32	1.03	0.20	1.01	0.31	0.06	2.21
5.00	5.50	1.56	3.49	6.00	4.70	2.01	0.90	0.16	0.79	0.30	0.05	1.72
7.00	7.50	1.49	4.60	8.30	6.20	2.39	1.49	0.07	1.26	0.44	0.02	1.80
9.00	9.50	1.48	6.59	8.00	7.10	2.37	1.21	0.09	1.58	0.36	0.03	1.21
13.00	13.50	1.60	14.70	18.00	6.50	1.85	1.00	0.13	4.48	0.35	0.05	1.22

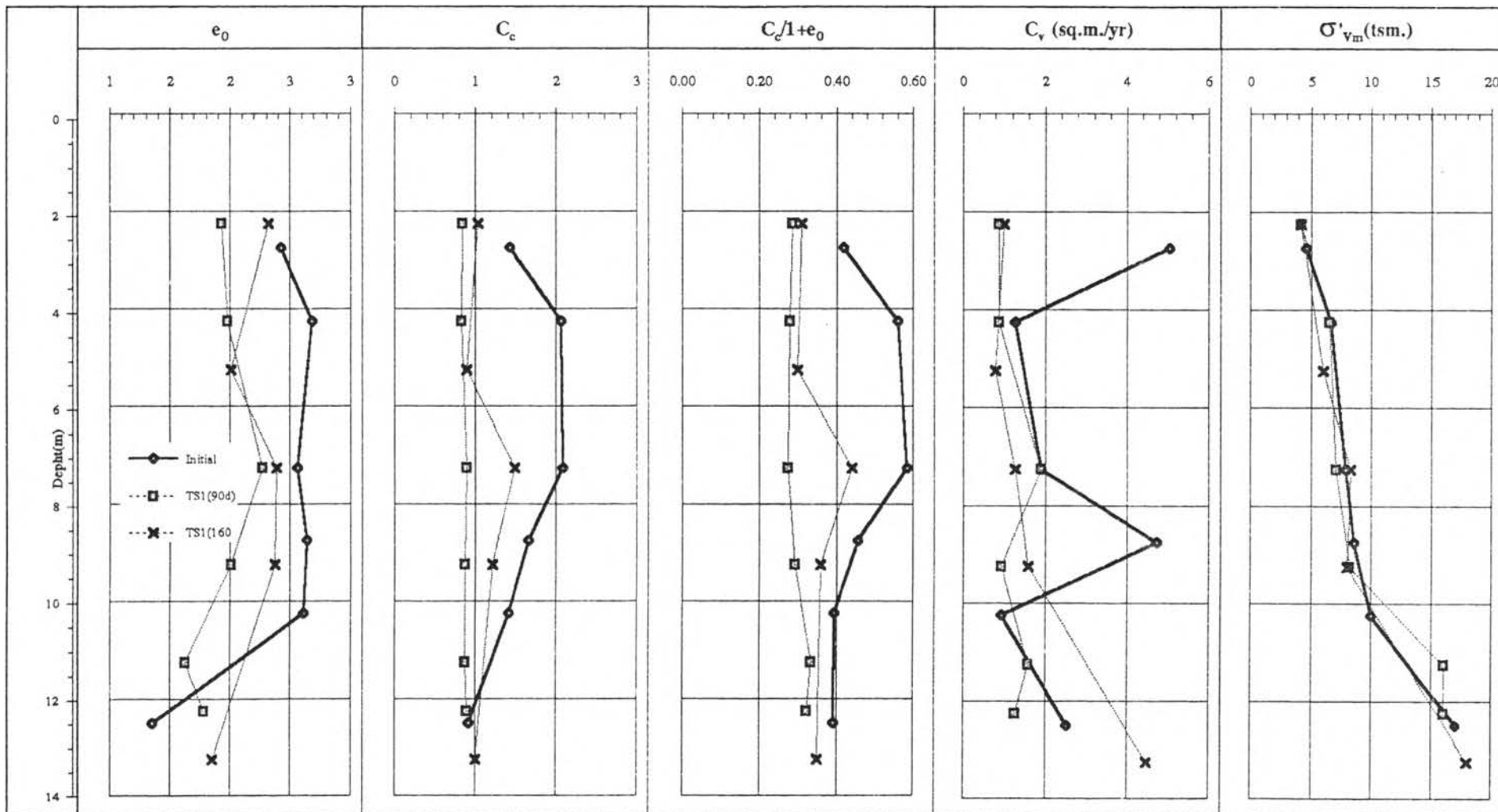
ตารางที่ 4.13 Compressibility Characteristics of Treated Soils at TS2

ก) ที่ระยะเวลา 90 วัน

Depth(m)		$\gamma_T$	$\sigma'_{vo}$	$\sigma'_{vm}$	$u_o$	$e_o$	Cc	Cr	Cv	CR	RR	OCR
From	To	(tcm.)	(tsm.)	(tsm.)	(tsm.)				(m <sup>2</sup> /yr)			
2.00	2.50	1.43	1.72	4.50	1.50	2.52	0.83	0.26	1.26	0.24	0.07	2.62
4.00	4.50	1.47	2.75	5.40	3.50	2.42	1.33	0.14	0.95	0.39	0.04	1.97
7.00	7.50	1.39	3.88	5.80	6.20	2.75	1.16	0.26	0.95	0.31	0.07	1.50
9.00	9.50	1.45	6.31	8.00	7.10	2.42	1.19	0.10	1.58	0.35	0.03	1.27
11.00	11.50	1.47	9.04	8.00	7.50	2.28	0.93	0.13	0.95	0.28	0.04	0.89

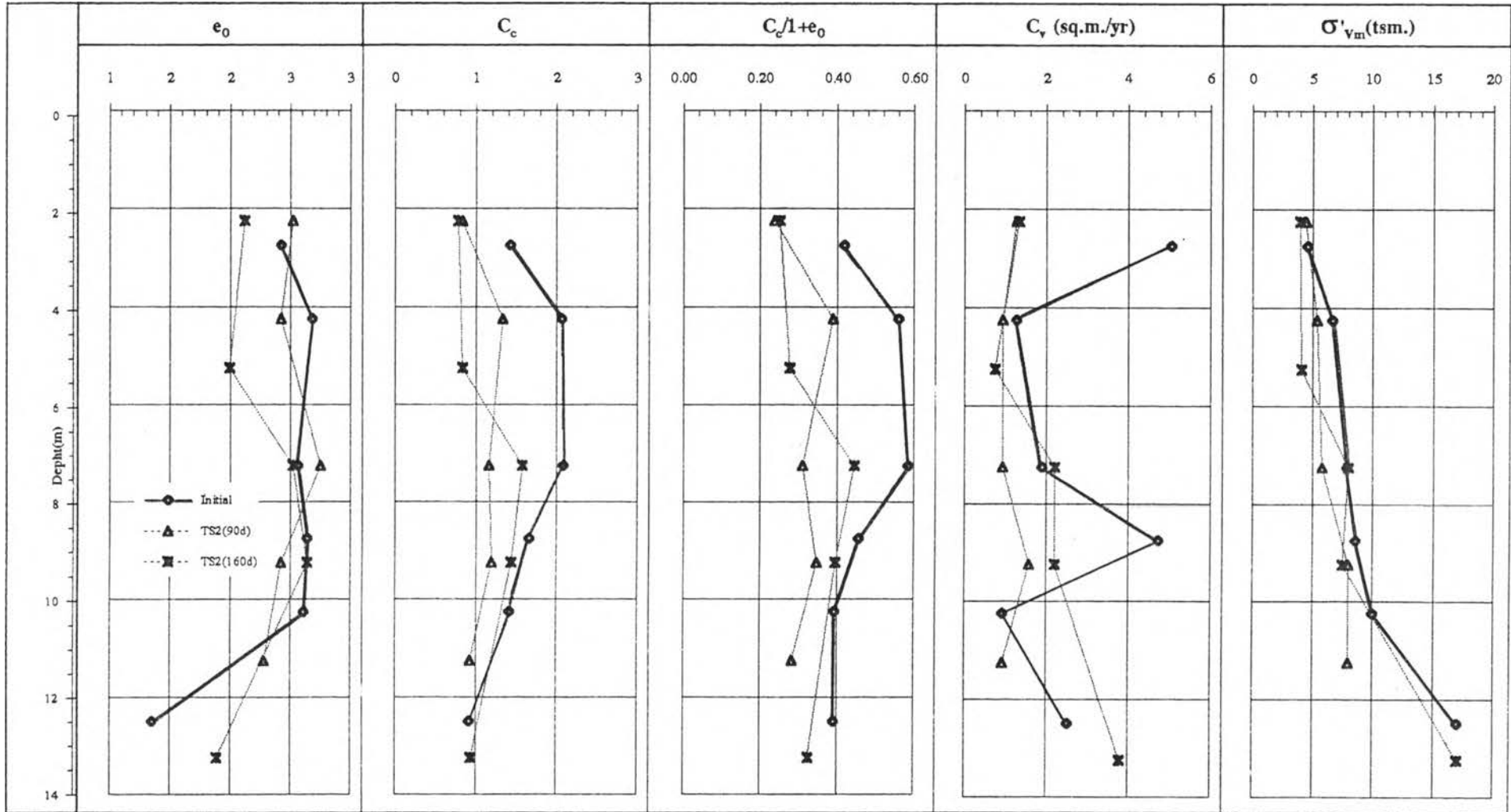
ข) ที่ระยะเวลา 180 วัน

Depth(m)		$\gamma_T$	$\sigma'_{vo}$	$\sigma'_{vm}$	$u_o$	$e_o$	Cc	Cr	Cv	CR	RR	OCR
From	To	(tcm.)	(tsm.)	(tsm.)	(tsm.)				(m <sup>2</sup> /yr)			
2.00	2.50	1.50	1.88	4.00	1.50	2.12	0.78	0.23	1.32	0.25	0.07	2.13
5.00	5.50	1.60	3.90	4.10	4.50	1.99	0.83	0.20	0.76	0.28	0.07	1.05
7.00	7.50	1.49	4.60	8.00	6.20	2.52	1.57	0.03	2.21	0.45	0.01	1.74
9.00	9.50	1.46	6.41	7.50	7.10	2.64	1.44	0.03	2.21	0.40	0.01	1.17
13.00	13.50	1.51	13.51	17.00	6.50	1.89	0.94	0.10	3.78	0.33	0.03	1.26

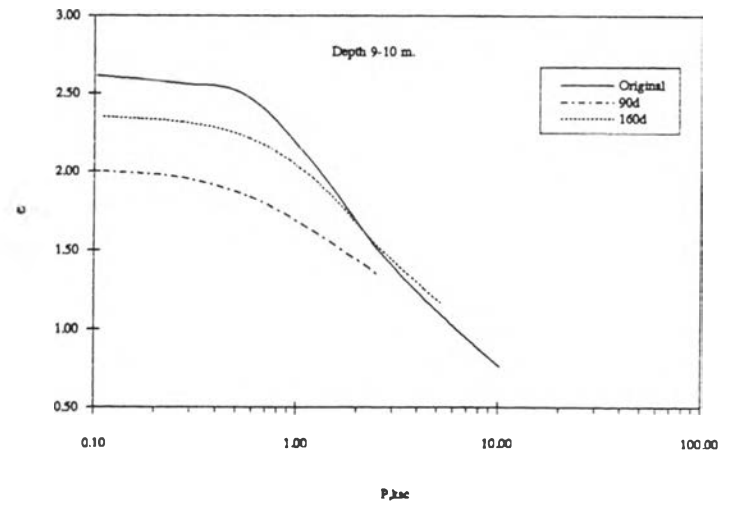
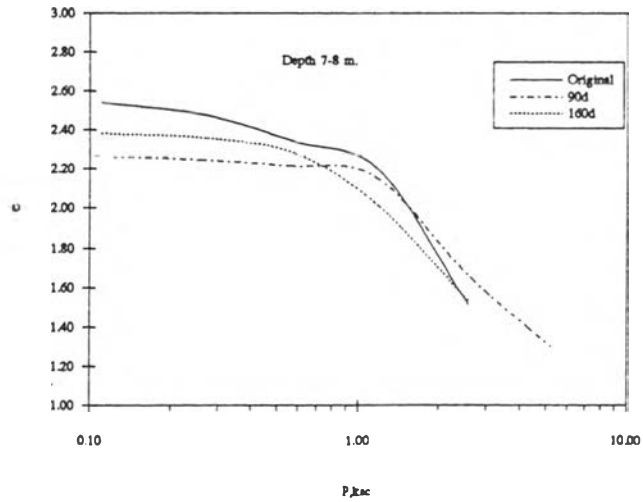
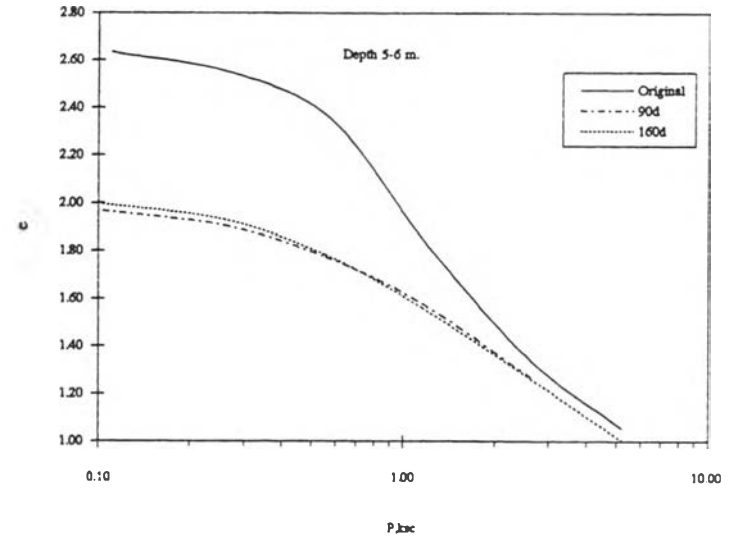
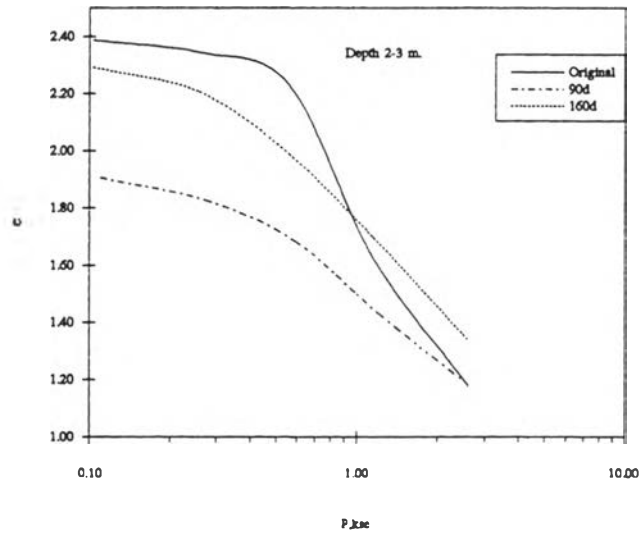


รูปที่ 4.20 Summary of Oedometer Test Results ของแปลงทดสอบ TS1





รูปที่ 4.21 Summary of Oedometer Test Results ของแปลงทดสอบ TS2



รูปที่ 4.22  $e$ -logP from Oedometer Test Result (TS1)

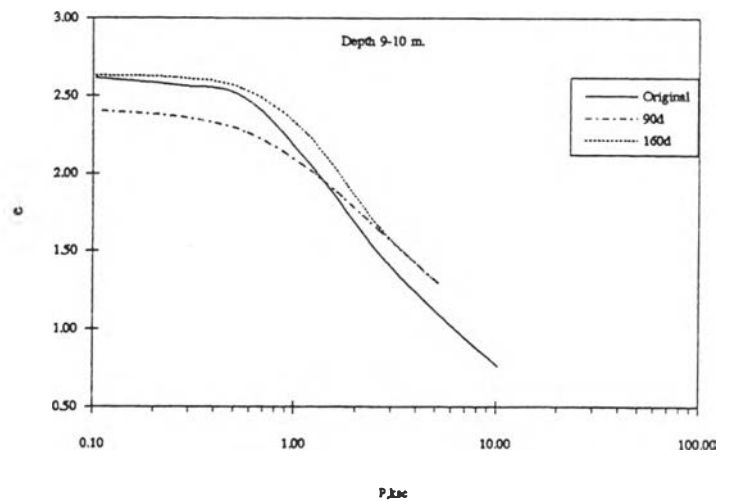
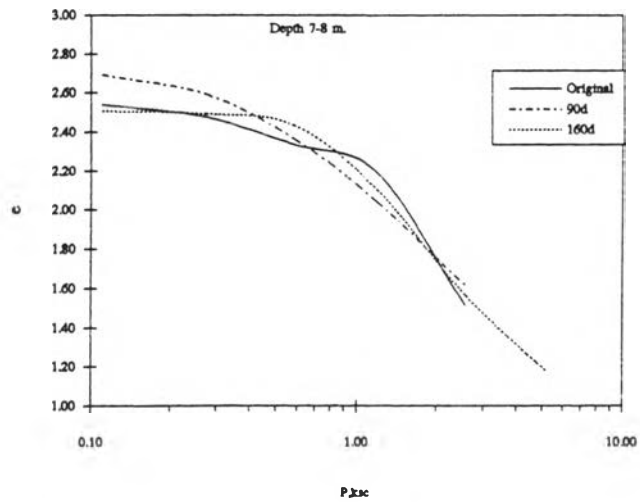
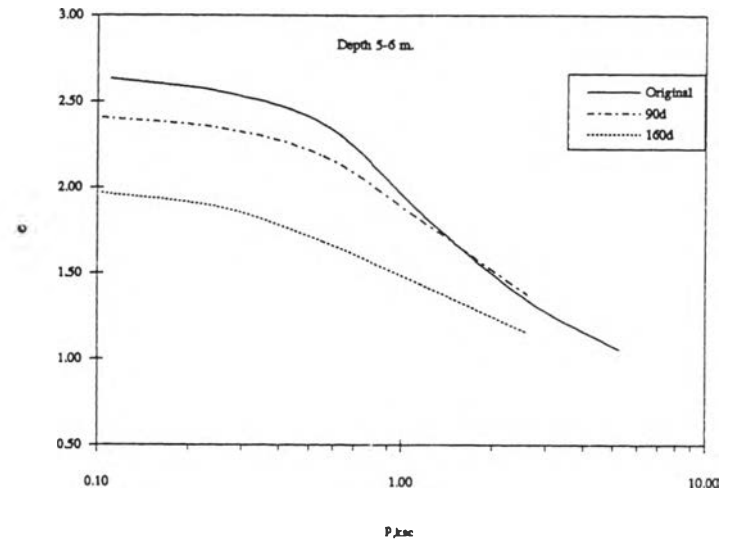
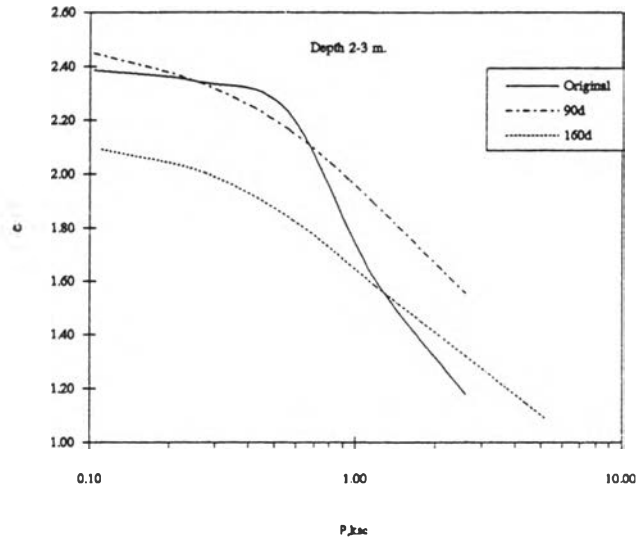


Figure 4.29 e-logP from Oedometer Test Result (TS2)

วิธีแทนที่โดยมีปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึกประมาณ 15 ม.ซึ่งอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง การเปรียบเทียบทำได้โดยการเปรียบเทียบที่ความสูง embankment เท่ากัน ในกรณีของการใช้ PVD ได้ใช้ผลการทดสอบ test section ของ AIT (The Full Scale Field Test of Prefabricated Vertical Drains for the Second Bangkok International Airport (SBIA) Agreement No. 24/2537, 2537) ผู้วิจัยได้ทำการคาดคะเนการทรุดตัวทั้งหมดเนื่องจาก consolidation โดยวิธี fit curve ควบคู่กับทฤษฎี consolidation แบบมี Radial drainage ของ Barron (TAN et al., 1996) เพื่อคาดคะเนความสูงของคันดินโดยใช้ PVD เมื่อการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลง(นั่นคือไม่คิดผลของ Secondary Compression) แล้วจึงนำเอาความสูงของ embankment (หรือ stress) มาวิเคราะห์กับกรณีการใช้เข็มปูนขาวเพื่อหา settlement และ Factor of Safety

การหา consolidation settlement เพื่อการคาดคะเนการทรุดตัวเนื่องจาก consolidation ทั้งหมด ทำโดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้ในสนามลบด้วยการทรุดตัวแบบ undrained (Time dependent undrained settlement) ซึ่งคาดคะเนโดยใช้ข้อมูลจาก lateral movement ที่วัดได้ในสนาม

ส่วนการหาความสูงของ embankment หลังจาก consolidation settlement สิ้นสุดลง ทำโดย initial height of embankment ลบด้วยการทรุดตัวรวม (Time dependent undrained settlement รวมกับ time consolidation settlement)

จากข้อมูลการวัดค่า Time-Settlement ในสนามของแปลง PVD ทำให้ผู้วิจัยสามารถประมาณค่าการทรุดตัวเริ่มแรกทั้งหมด (Total primary settlement,  $\rho_1$ ) โดยวิธี Hyperbolic Curve Fitting, การทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำทั้งหมด (Total Consolidation Settlement,  $\rho_c$ ) โดยวิธี Hyperbolic Curve Fitting ซึ่งลบค่า Undrained Settlement จากข้อมูล Lateral Movement ตามรายละเอียดในบทที่ 2 และรายละเอียดการวิเคราะห์ในภาคผนวก จ. ได้ค่าการทรุดตัวเริ่มแรกดังตารางที่ 4.14 โดยแปลงทดสอบ TS1 มีค่า  $\rho_1$  ประมาณ 1.835 ม. แปลงทดสอบ TS2 มีค่า  $\rho_1$  ประมาณ 1.842 ม. และแปลงทดสอบ TS3 มีค่า  $\rho_1$  ประมาณ 1.957 ม. จากข้อมูลการวัดค่าในสนามและการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าแปลงทดสอบ

ตารางที่ 4.15 ปริมาณการทรุดตัวและ Degree of Consolidation ของแปลงทดสอบ PVD จากคำนวณและวัดค่าจากเครื่องมือที่ติดตั้งในสนาม

PVD Test Section		Calculation				Measured at 400 days			Degree of Consolidation		
Test Section (Type of PVD)	Spacing (m)	Hyperbolic method			Asaoka's method, $\rho$ (m)	(m)			U (%)		
		$\rho_t$ (m)	$\rho_c$ (m)	$\rho_u$ (m)		total settlement	undrained settlement	consolidation settlement	from measured total settlement	from measured consolidation settlement	from measured pore pressure (Bv AIT)
TS1 (Flordrain)	1.50	1.835	1.026	0.809	1.403	1.040	0.292	0.748	57%	73%	75%
TS2 (Castle Board)	1.20	1.842	1.170	0.672	1.741	1.230	0.358	0.872	67%	75%	76%
TS3 (Mebra)	1.00	1.957	1.230	0.727	1.817	1.420	0.377	1.043	73%	85%	84%

Remark : Final embankment height 4.20 m.

$\rho_t$  - total primary settlement by hyperbolic method used time-settlement data of PVD test section(AIT)

$\rho_c$  - total consolidation settlement calculated by hyperbolic method(Barron Theory) used time dependent consolidation settlement

{total settlement - undrained settlement (from lateral movement data)}

$$\rho_u = \rho_t - \rho_c$$

Consolidation settlement(measured) = total settlement(measured) - undrained settlement(measured)

Undrained settlement(measured) calculated from lateral movement monitoring data

ตารางที่ 4.15 ค่าสัดส่วนความปลอดภัยและการทรุดตัวของแปลงทดสอบเข็มปูนขาวจากการทำคันดินสูง H

PVD Test Section	$\rho_f$ (m)	H (m)	Q (t/m <sup>2</sup> )	TS1 - lime pile spacing 1.20 m.				
				Load on pile,P (ton/pile)	FS of Bearing Capacity		FS of Slope Stability	$\rho$ (m)
					Single Pile	Block Failure		
TS1-Flordrain spacing 1.50 m.	1.835	2.365	4.26	5.73	2.92	14.54	7.22	0.209
TS2-Castle Board spacing 1.20 m.	1.842	2.358	4.25	5.72	2.93	14.58	7.77	0.209
TS3-Mebra spacing 1.00 m.	1.957	2.243	4.04	5.49	3.05	15.17	8.45	0.208

	$\rho_f$ (m)	H (m)	Q (t/m <sup>2</sup> )	TS2-lime pile spacing 1.50 m.				
				Load on pile,P (ton/pile)	FS of Bearing Capacity		FS of Slope Stability	$\rho$ (m)
					Single Pile	Block Failure		
TS1-Flordrain spacing 1.50 m.	1.835	2.365	4.26	8.96	1.87	6.01	5.61	0.309
TS2-Castle Board spacing 1.20 m.	1.842	2.358	4.25	8.94	1.87	6.02	6.04	0.309
TS3-Mebra spacing 1.00 m.	1.957	2.243	4.04	8.59	1.95	6.27	6.56	0.305

H - embankment height of PVD test section at the end of final primary settlement ( $H = h_i - \rho_f$ )

$h_i$  - initial embankment height of PVD test section(4.20 m)

Q - distributed load on lime pile from H and density of sand fill 1.8 ton/cu.m.

$\rho$  - total primary settlement of lime pile test section by Polous' method with negative skin friction

$\rho_f$  - final primary settlement of PVD test section by Hyperbolic method

ทดสอบ TS3 จะเกิดการทรุดตัวมากที่สุด และ Average Degree of consolidation(U) จะเกิดขึ้นมากที่สุดในการแปลงทดสอบ TS3 โดย U มีค่าประมาณ 84% ซึ่งสอดคล้องกับ spacing ในการติดตั้ง PVD

เมื่อนำความสูงของคันดินหลังการทรุดตัวของแปลงทดสอบ PVD สิ้นสุดลงมาพิจารณาเป็นน้ำหนักที่กระทำต่อแปลงทดสอบเข็มปูนขาวโดยใช้คุณสมบัติของดินและ spacing ของเสาเข็มปูนขาวของ section TS1 และ TS2 จากตารางที่ 4.15 พบว่าค่าการทรุดตัวจากการคำนวณเกิดขึ้นเพียง 0.20 ม.ในแปลงทดสอบ TS1 และ 0.30 ม.ในแปลงทดสอบ TS2 พบว่าน้อยกว่าการทรุดตัวของดินก่อนปรับปรุงด้วยเข็มปูนขาวประมาณ 30% โดยค่าการทรุดตัวของชั้นดินก่อนปรับปรุงมีค่าประมาณ 0.778 ม.(รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงอยู่ในภาคผนวก ฉ) จากตารางที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าค่าความปลอดภัย(Factor of Safety) จาก Bearing capacity มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ Single pile ในแปลงทดสอบ TS2

เมื่อพิจารณาจากค่า F.S. ต่ำสุดจาก Single Pile พบว่าแปลงทดสอบ TS1 จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักโดยไม่เกิดการพังทลายนั้น(F.S.>1.5) น้ำหนักที่มากกระทำต่อแปลงทดสอบต้องไม่มากกว่า 9.25 ตัน/ตร.ม. หรือ มีน้ำหนักกระทำต่อเข็มไม่มากกว่า 11.12 ตัน/ตัน นั่นคือ ความสูงของคันดินต้องไม่เกิน 5.14 ม.(หน่วยน้ำหนักของวัสดุที่ทำคันดิน 1.80 ตัน/ลบ.ม.) ส่วนแปลงทดสอบ TS2 น้ำหนักที่มากกระทำต่อแปลงทดสอบต้องไม่มากกว่า 5.56 ตัน/ตร.ม. หรือ มีน้ำหนักกระทำต่อเข็มไม่มากกว่า 11.15 ตัน/ตัน หรือ ความสูงของคันดินไม่เกิน 3.09 ม.

ส่วนในกรณีที่เปรียบเทียบระยะเวลาการทรุดตัวระหว่างการใช้เข็มปูนขาวกับ PVD โดยพิจารณาว่า embankment ของเสาเข็มปูนขาวมีความสูงเท่ากับ embankment ที่ทำโดย AIT เมื่อการทรุดตัวของ primary consolidation สิ้นสุดลง(ไม่คิด secondary compression) การปรับปรุงด้วยวิธี PVD ต้องใช้เวลาในการ Preload มากกว่า 1 ปีเพื่อให้การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุด ส่วนการปรับปรุงเข็มปูนขาวนั้นใช้เวลาในการพัฒนากำลังของเข็มและดินน้อยกว่าเนื่องจากปลายเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบ performance ระหว่าง test embankment ที่มีความสูงเท่ากัน โดยพิจารณาหลังการทรุดตัวสิ้นสุดลงแล้ว(ไม่คิดผลของ secondary compression ใน PVD section และการทรุดตัวของเสาเข็มปูนขาวที่มีประมาณ 20 เซนติเมตร เพราะพิกัดความปลอดภัยมากกว่า 2) ผลการวิเคราะห์ให้ข้อมูลดังนี้

(i) การปรับปรุงด้วยเสาเข็มปูนขาวเมื่อใช้ embankment height เท่ากับกรณีของ PVD จะพบว่าค่า F.S.ของการปรับปรุงด้วยเข็มปูนขาวให้ค่าต่ำสุดในแปลงทดสอบ TS2 กรณี Single Pile in Group มีค่าประมาณ 1.8

(ii) การทรุดตัวชนิด post construction settlement ด้วยผลของ secondary compression (อายุการใช้งานเท่ากับ 20 ปี) มีค่าเท่ากับ 84 เซนติเมตรในแปลงทดสอบ PVD ส่วนการปรับปรุงด้วยเสาเข็มปูนขาวจะมีการทรุดตัวประมาณ 30 เซนติเมตร และการทรุดตัวเนื่องจาก land subsidence ของการปรับปรุงแบบ PVD จะมีมากกว่าในกรณีของเสาเข็มปูนขาว

(iii) การปรับปรุงด้วย PVD จะใช้เวลามากกว่าการใช้เสาเข็มปูนขาวมาก(โดยพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากวิโรจน์(2541))แต่เข็มปูนขาวต้องใช้เวลาในการพัฒนากำลังประมาณ 3 เดือน

(iv) การควบคุมงานก่อสร้าง PVD ดีกว่าและการก่อสร้างก็ไม่กระทบ performance มากนัก ส่วนในเสาเข็มปูนขาววิธีการก่อสร้างสำคัญมากและอาจเกิดปัญหาทางด้าน structural capacity ของตัวเข็ม ที่สำคัญคือ ทำให้ดินถูกรบกวนระหว่างการก่อสร้าง และเมื่อเข็มยาวถึงดินแข็งเพื่อเกิดการทรุดตัวน้อย จะเกิด negative skin friction ขึ้น



การเปรียบเทียบแบบนี้เป็นทางเดียวที่จะดู performance ของวิธีการปรับปรุงได้ ส่วนในการใช้งานนั้น embankment height อาจมีความสูงไม่เท่ากัน นอกจากนี้ผู้วิจัยมีความคิดเห็นว่า

1) การปรับปรุงดินโดยใช้ PVD มีจุดประสงค์เพื่อ

- ลดเวลาในการทรุดตัวเนื่องจาก consolidation
- ลดการทรุดตัวเนื่องจาก secondary compression

2) ในบริเวณกรุงเทพมหานครการปรับปรุงดินแบบ PVD จะไม่สามารถขจัด post construction consolidation settlement ได้ทั้งหมด เนื่องจาก PVD จะไม่ effective ตั้งแต่ความลึก 10.0-12.0 ม. ลงไป เนื่องจากผลของการสูบน้ำบาดาล (ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีการทรุดตัวมากมีความหนาระหว่าง 14.0-16.0 ม.) และการมี post construction consolidation settlement ซึ่งมาจากชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางที่อยู่ต่ำกว่าการติดตั้ง PVD (>12 ม.) อาจทำให้เกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันได้หลังจากสิ่งก่อสร้างถูกใช้งาน

3) เพื่อลดปัญหาเรื่อง plastic movement ,local yielding และ undrained creep และเพื่อให้ PVD ใช้งานได้ จำเป็นต้อง

- ก่อสร้าง berm เพื่อให้ได้ F.S. อย่างน้อย 1.5
- ต้องใช้ sand blanket ที่มีความหนาเพียงพอ(AIT ใช้ sand blanket 1.5 ม.)โดยทรายต้องมี % passing No.200 ประมาณ 5%
- Embankment ต้องสูงเพียงพอเพื่อทำให้เกิด hydraulic gradient จนน้ำไหลได้

4) จากเหตุผลของข้อ (3) ทำให้การใช้ PVD ต้องกรเวลามากกว่าปกติ เนื่องจากในขั้นตอนการก่อสร้างครั้งแรกไม่ได้ใส่ berm เพื่อให้ F.S. สูงเพียงพอเสียก่อน เพราะ F.S. ที่ใช้ในการก่อสร้างเพียง 1.3 ซึ่งมีปัญหาทางด้านดินเหนียวไหลแน่นอน

5) การปรับปรุงดินหนองงูเห่าด้วย PVD จะมีปัญหาเรื่อง non linear stress strain characteristics

6) การใช้ lime column ไม่เหมาะสมกับ sensitive clay เนื่องจากผลของ sample disturbance และจำเป็นต้องใช้เวลาเพื่อให้ได้ strength ตามต้องการ

7) Lime column มีการทรุดตัวน้อยกว่าเนื่องจากปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง ทำให้มีปัญหาทางด้าน negative skin friction อาจทำให้เข็มเกิดการวิบัติทางโครงสร้างและ bearing capacity ได้

8) ผลกระทบของวิธีการก่อสร้างและความลึกของเสาเข็ม ตลอดจน spacing มีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ทำให้การออกแบบและก่อสร้างด้วยความยาก ตลอดจนการควบคุมการก่อสร้างต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์