

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการศึกษาในอดีต

#### 2.1 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติของดิน

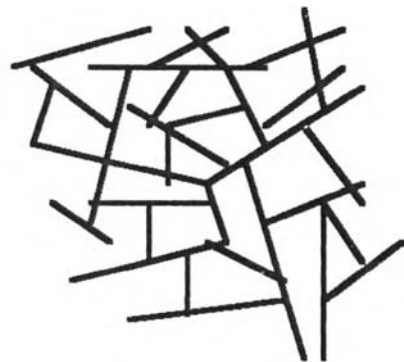
##### 2.1.1 โครงสร้างของดิน

โครงสร้างของดินเหนียวจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินในรูปแบบต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปโครงสร้างของดินที่เกิดตามธรรมชาติจะมี 2 รูปแบบ คือ

ก) โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ(Dispersed Structure) จะเกิดขึ้นเมื่อผลรวมของแรงระหว่างอนุภาคดินเหนียวเป็นแรงผลัก แต่ละอนุภาคดินเหนียวจะผลักกันพยายามที่จะเคลื่อนจากกัน และมีการจัดเรียงอนุภาคให้ขนานกัน ดังนั้นจึงได้โครงสร้างที่เป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก)



ก) โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ  
(Dispersion Structure)



ข) โครงสร้างแบบระเกะระกะ  
(Flocculation Structure)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินเหนียว

ข) โครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculated Structure) จะเกิดขึ้นเมื่อผลรวมของแรงระหว่างอนุภาคดินเหนียวเป็นแรงดึงดูด แต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหากันและเกาะกันอย่างไม่เป็นระเบียบได้โครงสร้างที่ระเกะระกะดังรูปที่ 2.1 ข)

โครงสร้างของดินที่เกิดขึ้นทั้งสองชนิดนี้ จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 และโครงสร้างของดินอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้จากสาเหตุหลายประการ คือ

ก) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในมวลดินจะพยายามผลักดันอนุภาคดินเหนียวเข้าหากันเป็นการลดช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียว ทำให้เกิด Particle Contact ระหว่าง Particle มากขึ้นและช่วยให้อนุภาคดินเหนียวจัดเรียงตัวในแนวตั้งฉาก

ข) Environmental changes การเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง การเปลี่ยนแปลงใดๆก็ตามใน soil-water system ซึ่งเป็นการขยาย double layer จะเป็นการลดกำลังรับแรงเฉือนของดินลง เช่น การลดลงของความเข้มข้นของ Salt concentration การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากวาเลนซ์สูงไปเป็นวาเลนซ์ต่ำ การเพิ่มขึ้นของค่า dielectric constant ของน้ำในมวลดิน การลดลงของอุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในมวลดิน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของโครงสร้างดินแบบเป็นระเบียบและแบบระเกะระกะ

คุณสมบัติทางวิศวกรรม	โครงสร้างแบบระเกะระกะ	โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ
1.ความหนาแน่น	น้อย	มาก
2.สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	สูงในทุกทิศทาง	ในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของอนุภาคดินต่ำกว่าในทิศทางขนานกับการเรียงตัวของอนุภาค
3.ความต้านทานแรงเฉือน	สูงในทุกทิศทาง	ในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของอนุภาคดินต่ำกว่าในทิศทางขนานกับการเรียงตัวของอนุภาค
4.ความสามารถยุบอัดตัว	ยุบตัวได้มากเมื่อมีแรงกระทำ	ยุบตัวได้น้อยเมื่อมีแรงกระทำ

ค) การรบกวนดินจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวและแรงระหว่างอนุภาคดิน เช่น การเพิ่มหน่วยแรงภายนอกเข้าไป จะไปทำลายแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคดิน ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบเป็นระเบียบ

### 2.1.2 น้ำในมวลดิน

น้ำเป็นส่วนประกอบส่วนหนึ่งในมวลดินที่เรียกว่า liquid phase ซึ่งจะมีผลต่อพฤติกรรมของดิน ในงานทางด้านปฐพีวิศวกรรมจะคำนึงถึงปริมาณของน้ำในมวลดิน ธรรมชาติของน้ำที่ยึดเกาะในมวลดิน เช่น ชนิดและความเข้มข้นของประจุไฟฟ้า และหน่วยแรงในช่องว่างที่มีน้ำอยู่

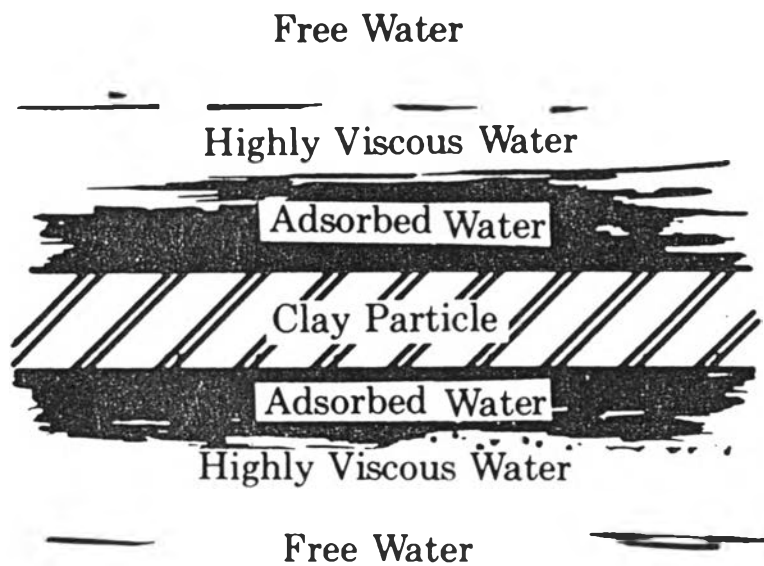
โดยทั่วไปผลึกของแร่ดินเหนียวจะประกอบด้วยประจุไฟฟ้า ซึ่งเกิดจาก Isomorphous substitution และ local charge ประจุไฟฟ้าลบ(anion) จะกระจายอยู่รอบๆ ผิวของอนุภาคดิน ทำให้น้ำที่เกาะตามผิวของอนุภาคดินจะถูกดูดโดยตรงด้วยแรงที่สูงมาก ส่วนในวงน้ำ (Double layer) จะถูกดูดภายใต้สนามไฟฟ้ารอบอนุภาคดิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระยะทางคือ เมื่อระยะห่างจากผิวของอนุภาคดินเหนียวเพิ่มมากขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของประจุบวกก็จะลดน้อยลง ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุบวกในวงน้ำกับประจุที่ผิวของอนุภาคดินก็จะลดน้อยลงด้วย

รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของน้ำในมวลดิน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

ก) Adsorbed water เป็นน้ำส่วนที่อยู่ติดกับผิวของอนุภาคดินเหนียว เนื่องจากระยะห่างจากผิวของอนุภาคน้อย จึงมีความเข้มข้นของประจุบวกมาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดกับประจุลบที่ผิวของอนุภาคดินสูง น้ำส่วนนี้จึงเป็นส่วนที่แข็งแรงที่สุดของน้ำในมวลดิน

ข) Double layer water คือ น้ำส่วนที่อยู่รอบอนุภาคดินถัดจาก adsorbed water ออกมาทั้งหมด น้ำส่วนนี้จะอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ารอบอนุภาคดิน ซึ่งจะมีความหนา มากกว่า adsorbed water แต่แข็งแรงน้อยกว่า

ค) Free water คือ น้ำส่วนที่ไม่ได้อยู่รอบดินภายใต้สนามไฟฟ้า กล่าวคือเป็นส่วนที่อยู่อิสระในมวลดิน น้ำส่วนนี้เท่านั้นที่จะมีการเคลื่อนที่และเป็นน้ำส่วนใหญ่ใน void ratio



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของน้ำในมวลดิน

### 2.1.3 แรงระหว่างอนุภาค

แรงระหว่างอนุภาคดินที่กระทำต่อกันนั้นมีทั้งแรงผลัก (Repulsive force) และแรงดึงดูด (Attractive force) ซึ่งแรงแต่ละชนิดมีสาเหตุที่เกิดขึ้นดังนี้

### ก) แรงผลักรวม (Repulsive force)

(1) Born repulsion เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคดินเหนียวเข้ามาใกล้กันมาก จึงเกิดแรงผลักระหว่าง ประจุลบของอนุภาคดิน

(2) Double layer repulsion เกิดขึ้นเนื่องจากการผลักกันของประจุใน ผนังรอบอนุภาคดินที่ใกล้กัน

(3) Osmotic repulsion เกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของประจุในของ เหลวที่กึ่งกลางระหว่างอนุภาคสูงกว่าสารละลายภายนอก น้ำจึงไหลจากภายนอกเข้าสู่ของเหลว ทำให้เกิดความดันซึ่งจะผลักให้อนุภาคแยกจากกัน

### ข) แรงดึงดูด (Attractive force)

(1) Primary valence bonds เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทาง เคมีระหว่างอนุภาคหรือระหว่างอนุภาคกับของเหลวที่อยู่รอบๆ เป็นแรงยึดเกาะที่แข็งแรงที่สุด ซึ่งจะยึดอะตอมในหน่วยโครงสร้างของแร่เข้าไว้ด้วยกัน

(2) Hydrogen bond เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมของไฮโดรเจน กับอะตอมที่มี electronegativity สูง เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และฟลูออรีน เป็นต้น

(3) Secondary valence bonds หรือ Van der Waals forces เกิดขึ้น เนื่องจาก อิเล็กตรอนด้านหนึ่งของ atomic nucleus มากกว่าอีกด้าน จึงทำให้เกิดเป็นขั้วบวก ขั้วลบ (Dipole) และเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างขั้วตรงข้ามของสองอะตอม

โดยทั่วไปแรงผลักรวมจะแปรผันตามขนาดของวงน้ำหรือขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม เช่น ถ้าความเข้มข้นของประจุเพิ่มขึ้น หรือวาเลนซ์ของประจุเพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดของวงน้ำ ลดลง ทำให้แรงผลักรวมลดลงด้วย ในขณะที่แรงดึงดูดจะไม่เปลี่ยนแปลง

## 2.2 เข็มนปูนขาว

### 2.2.1 ชนิดของปูนขาว

โดยทั่วไปปูนขาวจะแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

- 1) High calcium quick lime{CaO}
- 2) Dolomitic quick lime{CaO+MgO}
- 3) Hydrated high calcium lime{Ca(OH)<sub>2</sub>}
- 4) Normal hydrated or monohydrated dolomitic lime  
{Ca(OH)<sub>2</sub>+MgO}
- 5) Pressure hydrated or dihydrated dolomitic lime  
{Ca(OH)<sub>2</sub>+Mg(OH)<sub>2</sub>}

ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ปูนขาวประเภทแรก คือ High Calcium Quick Lime ซึ่งมีคุณสมบัติจากการทดสอบโดยบริษัทผู้ผลิตคือบริษัทสยามปูนขาว มีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้

Avialable CaO	85.0% min.
Total CaO	90.0% min.
Residue CO <sub>2</sub>	3.5% max.
%SiO <sub>2</sub>	1.0% max.
%MgO	1.0% max.
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0% max.
%SO <sub>3</sub>	1.0% max.

### 2.2.2 ปฏิกิริยาของปูนขาว

ปฏิกิริยาของปูนขาวที่เกิดขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

ก) ปฏิกริยาระหว่างปูนขาวกับน้ำ (Hydration )

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง Quick Lime กับน้ำจะให้ Hydrated Lime หรือ Slake Lime พลังงานความร้อนและการเพิ่มขึ้นของปริมาตร ดังจะเห็นได้จากสมการที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 ผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Hydration

	Quick Lime	+ Water	= Slake Lime	Remark
Chemical Reaction	CaO	H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	15.6 Kcal/mol
Molecular Weight	56	18	74	
Specific Gravity	3.3	1.8	2.2	
Relative Weight	1	0.32	1.32	Water absorption
Relative Volumn	1	1	2	Expansion

ข) ปฏิกริยาระหว่างปูนขาวกับดินเหนียว

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ในช่วงเวลาสั้นๆ (Short Term) ช่วงแรก จะเกิดปฏิกิริยา Flocculation หรือ ion exchange และ carbonation โดยปฏิกิริยาทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณปูนขาวสัมผัสกับอนุภาคดินเหนียว

(1) ปฏิกิริยา Ion Exchange หรือ Flocculation เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง Slake Lime (Ca(OH)<sub>2</sub>) กับอนุภาคดินเหนียว คือ เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างอนุภาค โดย Ca<sup>++</sup> ในปูนขาวจะเข้าแทนที่ประจุบวกในอนุภาคดินเหนียวที่มีวาเลนซ์ต่ำ ทำให้ double layer มีขนาดเล็กลง และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของอนุภาคดินเพิ่มขึ้น เป็นผลให้โครงสร้างของดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะจัดเรียงตัวแบบระเกะระกะมากขึ้น

(2) ปฏิกิริยา Pozzolanic หรือ Cementation เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง ซิลิกาและ/หรืออลูมินาที่สลายตัวจากแร่ดินเหนียวกับปูนขาว เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มี คุณสมบัติเป็นตัวประสาน

(3) ปฏิกิริยา Carbonation เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจาก CaO ส่วนที่เหลือจากการ ทำปฏิกิริยาอื่นๆ กับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ( $\text{CO}_2$ ) เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งเป็นตัวประสานอย่างอ่อนที่ทำให้กำลังของดินลดลง และทำให้ปฏิกิริยา Pozzolanic เกิดขึ้นช้าและน้อยลง

### 2.2.3 การติดตั้งเข็มปูนขาว (Lime Column Installation)

เข็มปูนขาวแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการติดตั้ง คือ

#### ก) Mixing Lime Column

เข็มปูนขาวที่ติดตั้งโดยวิธี Mixing จะใช้ปูนขาวผสมกับดินเหนียวตามอัตราส่วน ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และติดตั้งโดยการดันปลอกเหล็ก (Casing) ลงไปในดิน จนถึงระดับความลึกที่ต้องการ แล้วจึงใช้ Auger นำดินขึ้นมาจากหลุม หลังจากนั้นจึงผสมดิน ปูนขาวกับน้ำตามอัตราส่วน ซึ่งอาจจะผสมนอกหลุมเจาะแล้วจึงอัดด้วยแรงดันลงไปใภายใน หลุม หรืออัดปูนขาวลงไปผสมกับดินในหลุมระหว่างเจาะก็ได้

#### ข) Placing Lime Column

เข็มปูนขาวชนิดนี้มีวิธีการติดตั้งคล้ายกับวิธี Mixing ต่างกันที่วิธี Placing จะไม่ผสมปูนขาวกับดิน ซึ่งสามารถทำได้สองวิธี คือ วิธีแรก queเรียกว่า วิธีมาตรฐาน (Standard method) จะติดตั้งเข็มโดยดันปลอกเหล็กที่มีลักษณะปลายปิด (Close End) ลงไป ในดินจนถึงระดับความลึกที่จะทำการติดตั้งแล้วจึงอัดปูนขาวที่มีลักษณะเป็น coarse grain ลง ไปด้วยแรงดัน ซึ่งนับว่าเป็นวิธีที่ได้สะดวกและรวดเร็วและนิยมใช้กันมาก



ส่วนอีกวิธีเรียกว่า pre-boring method จะดำเนินการในลักษณะคล้ายกับการทำเสาเข็มเจาะ (Bore Pile) คือ ดันปลอกเหล็กที่มีลักษณะปลายเปิดลงไปถึงระดับที่คาดว่าจะไม่เกิดการพังทลายของดินในหลุมเจาะ แล้วจึงใช้ Auger เจาะและนำดินขึ้นมาจากหลุมจนถึงระดับความลึกที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจึงอัดปูนขาวลงไปในหลุมเจาะด้วยแรงดัน ซึ่งในการทำเข็มเจาะบางครั้งอาจจะใช้เบนโทไนท์ช่วยป้องกันการพังทลายของดินหรือป้องกัน Heave effect ของดินในส่วนที่อยู่ลึกกว่าปลอกเหล็ก แต่ในการติดตั้งเสาเข็มปูนขาวจะไม่ใช้เนื่องจากน้ำที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์จะทำปฏิกิริยากับปูนขาวทำให้ผลที่จะเกิดขึ้นกับดินน้อยลงได้ เครื่องมือและขั้นตอนการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 2.3

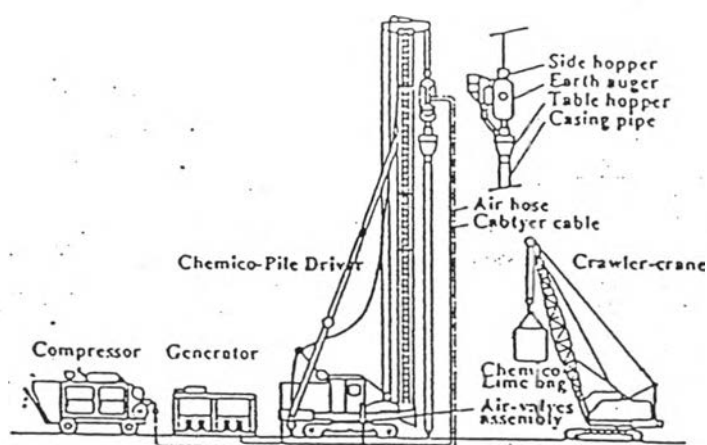
การศึกษาและวิจัยครั้งนี้จะติดตั้งเข็มปูนขาวด้วยวิธี Placing Lime Column ด้วยวิธีมาตรฐานโดยใช้ปลอกเหล็กปลายปิดดันลงไปจนถึงความลึกที่กำหนด แล้วจึงอัดปูนขาวลงไปด้วยแรงดัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินตลอดความลึกของเข็มปูนขาว ซึ่งรายละเอียดในการก่อสร้างแปลงทดสอบจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3

## 2.3 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงด้วยเข็มปูนขาวสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งสองทาง คือ อาจจะเป็นไปในทางที่ทำให้คุณสมบัติของดินดีขึ้น หรืออาจจะเป็นไปในทางตรงกันข้ามโดยทำให้คุณสมบัติของดินลดลง ดังนั้นการพิจารณาจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งสองทาง

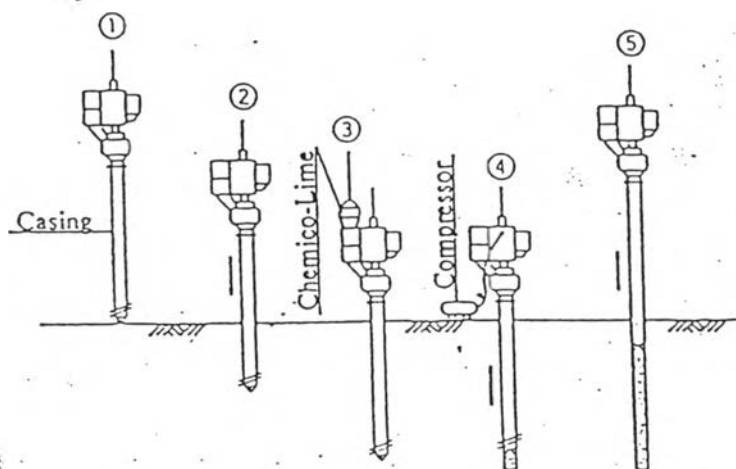
### 2.3.1 ผลของปฏิกิริยาทางเคมีของปูนขาว

ผลจากปฏิกิริยาของเข็มปูนขาวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน โดยรอบเสาเข็ม แยกตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



Schematic Arrangement of Chemico Lime Pile Plant and Equipment

- ① Position vertically the guide leader of the casing.
- ② Screw down to the required depth.
- ③ Discharge chemico-lime aggregates into the top of the casing through the side hopper.
- ④ Apply compressed air within the casing.
- ⑤ Reverse the direction of rotation and withdraw the casing slowly. Open the shoe of the casing and discharge chemico lime aggregate thus to form the pile.



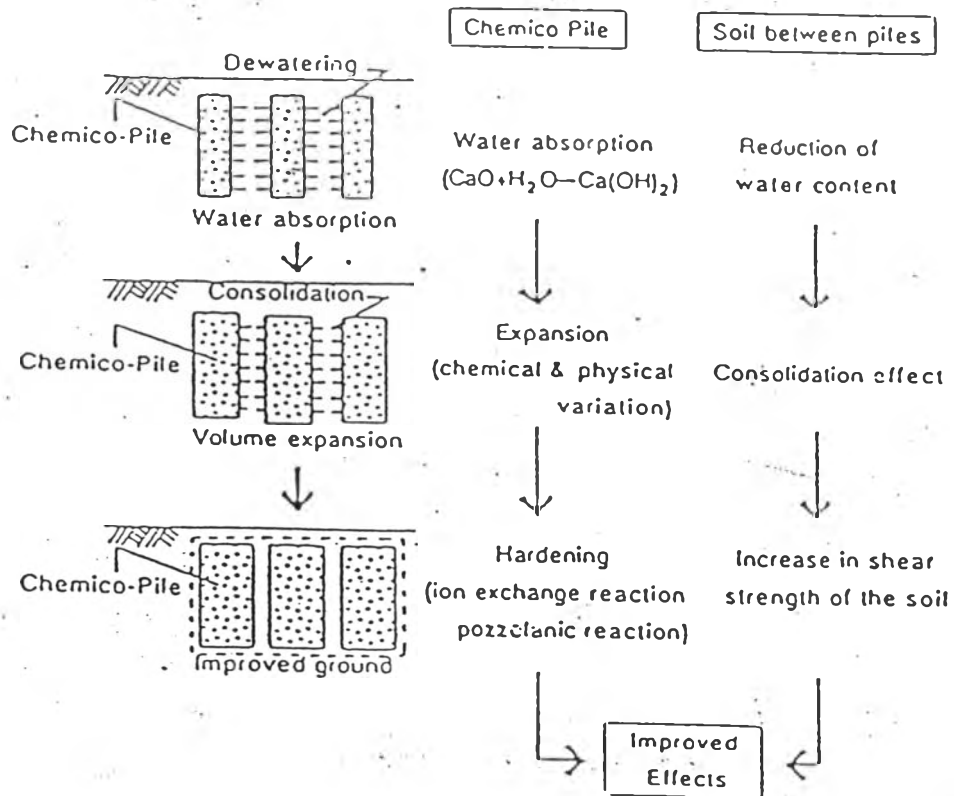
รูปที่ 2.3 เครื่องมือและวิธีการติดตั้งเสาเข็มปูนขาวโดยวิธี Placing

1) ผลจากปฏิกิริยา Hydration จะมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของดินสองทางคือ ลดปริมาณน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเนื่องจากถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยากับปูนขาวและเกิดความดันน้ำเพิ่มขึ้นและเกิดการอัดตัวคายน้ำในเวลาต่อมา (Consolidation Effect) ในมวลดินอันเนื่องมาจากการขยายตัวประมาณ 2 เท่าโดยปริมาตรของ Slake Lime การดูดน้ำของ slake lime ทำให้ปริมาณความชื้นลดลง (Natural Water Content) ในมวลดินระหว่างเข็มปูนขาวลดลงและ Compressibility ลดลงด้วย

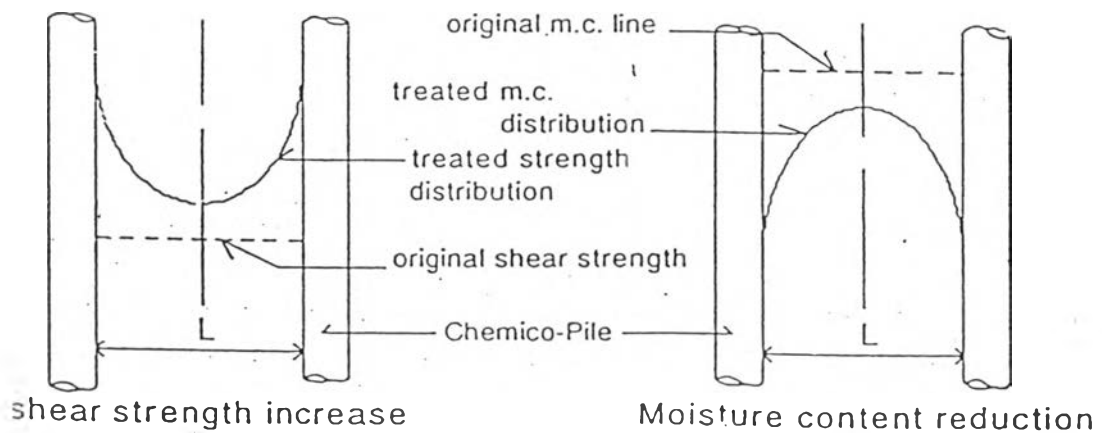
2) ผลจากปฏิกิริยา Flocculation ทำให้โครงสร้างของดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะจัดเรียงตัวแบบระเกะระกะมากขึ้น ทำให้คุณสมบัติของดินเหนียวทางด้าน Plasticity Shrinkage และ Workability เปลี่ยนแปลงไป

3) ผลจากปฏิกิริยา Pozzolanic จะได้สารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานซึ่งถือว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้กำลังของดินเหนียวพัฒนาเพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาของ Y Kado et.al (1986) ในการปรับปรุงดินด้วยเข็มปูนขาวในงานโครงการก่อสร้าง Bugis Station และ งานขุดเจาะอุโมงค์ Lavender Tunnel Backshunts ที่เชื่อมต่อระหว่าง Lavender Station กับ Bugis Station ในประเทศสิงคโปร์ พบว่า ผลจากปฏิกิริยาของปูนขาวจะทำให้คุณสมบัติของดินโดยรอบเข็มปูนขาวเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.4 นั่นคือ ปริมาณความชื้นในมวลดินหลังปรับปรุงลดลงเนื่องจากน้ำจะถูกดูดไปใช้ในปฏิกิริยาของปูนขาว และเกิด consolidation effect จากการขยายตัวของเข็มปูนขาว และกำลังรับแรงเฉือนของดินหลังปรับปรุงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นไม่เท่ากันที่ระยะต่างๆ โดยที่ระยะที่ห่างจากเข็มปูนขาวออกไปจะได้รับผลจากปฏิกิริยาน้อยกว่าทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า ดังรูปที่ 2.5 โดยจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงเฉือนและปริมาณความชื้นของดินระหว่างเข็มปูนขาว พบว่า การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นมาที่ระยะห่างจากเข็มปูนขาวประมาณ 0.2-0.4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มปูนขาว



รูปที่ 2.4 ผลของปฏิกิริยาของปูนขาวและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน (Y Kado et al,1986)



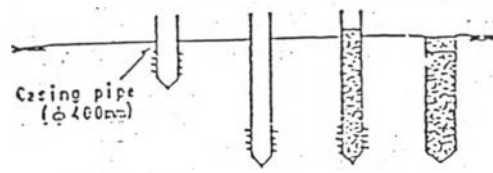
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินที่ระยะต่างๆจากเข็มปูนขาว (Y Kado et al,1986)

### 2.3.2 องค์ประกอบที่มีผลให้ดินถูกรบกวน

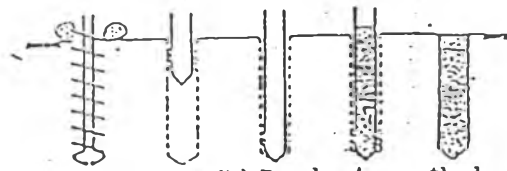
#### ก) ผลกระทบจากการติดตั้งเสาเข็มปูนขาว

การติดตั้งเสาเข็มในดินอ่อนมักจะทำให้เกิดการรบกวนดินโดยรอบทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงในทางที่เลวลงหลายประการ โดยเฉพาะในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีความไวตัวสูง (Sensitive Clay) การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นได้ง่ายจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมเพียงเล็กน้อย และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในดินชนิดเดียวกันจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการรบกวน โดยเสาเข็มที่ติดตั้งด้วยวิธีตอก (Driven Piles) จะรบกวนดินโดยรอบมากกว่าเสาเข็มที่ติดตั้งด้วยวิธีการอื่น เช่น Bore Piles , Screw Piles (Poulos and Davis, 1980) จากการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ หลังตอกเข็มพบว่าดินที่บริเวณใกล้เสาเข็ม Pore Pressure จะเพิ่มขึ้นและกำลังรับแรงเฉือนจะลดลง มากกว่าดินที่อยู่ห่างออกไป โดยดินที่อยู่ห่างออกไปมากกว่า 1.5-2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม Pore Pressure จะเพิ่มขึ้นน้อยมาก และหลังการติดตั้งเสาเข็มกำลังรับแรงเฉือนของดินที่สูญเสียไปจะเริ่มกลับคืนมาจาก Thixotropy hardening process ของดินและ pore pressure dissipation โดยในชั้นดินที่มีค่า permeability สูงกว่าการพัฒนากำลังก็จะเกิดขึ้นมากและเร็วกว่า เพราะ excess pore pressure จะกระจายไปยังบริเวณอื่นได้ง่ายกว่านั่นเอง (ชัย มุกตะพันธ์, 2518)

นอกจากการติดตั้งเข็มจะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงแล้ว ยังทำให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral Movement) อีกด้วย โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบผลจากการติดตั้งเข็มปูนขาวโดยวิธีแทนที่ โดยไม่นำดินออกจากหลุมเจาะ (Standard Method) และนำดินออกจากหลุมเจาะก่อน (Pre-boring Method) ดังรูปที่ 2.6 พบว่าการติดตั้งโดยไม่นำดินออกก่อนจะเกิดการเคลื่อนตัวของดินมากกว่าถึง 2 เท่า (Sato et al, 1993) ดังรูปที่ 2.7

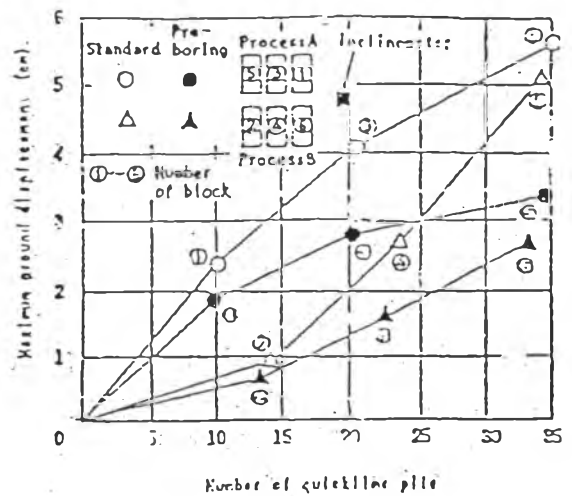
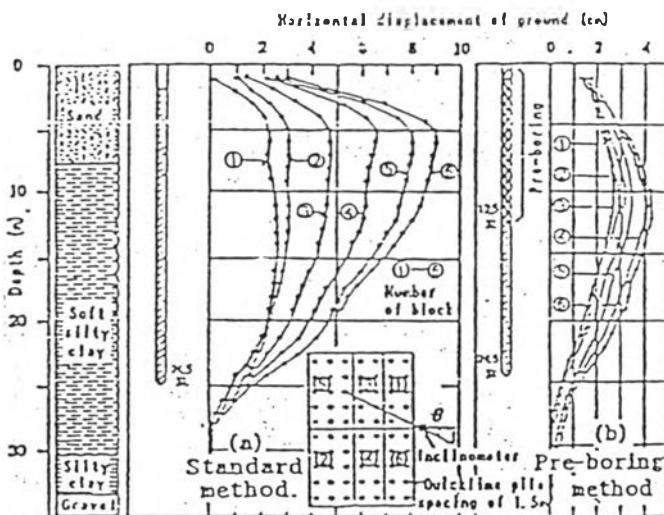


(a) Standard method



(b) Pre-boring method

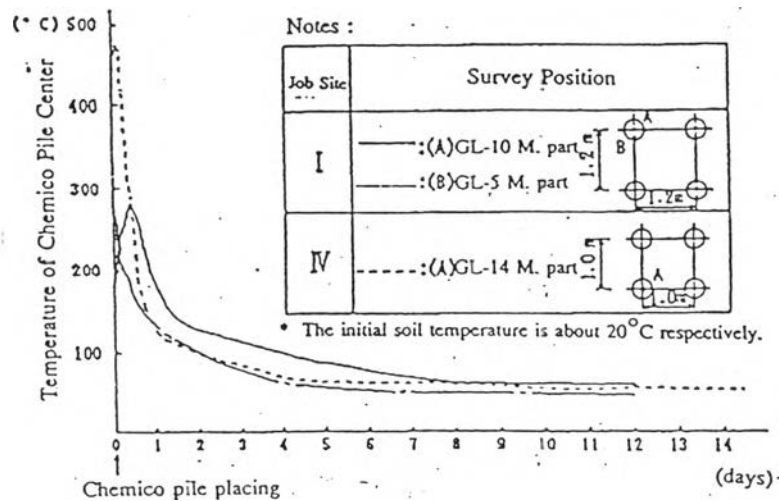
รูปที่ 2.6 วิธีการติดตั้งเข็มปูนขาวแบบแทนที่ (Placing Lime)



รูปที่ 2.7 ค่าการเคลื่อนตัวจากการติดตั้งเข็มปูนขาว

## (ข) ผลของอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาของปูนขาว

เมื่อปูนขาวทำปฏิกิริยากับน้ำในดินหรือความชื้นในอากาศ จะเปลี่ยนเป็นผง และให้ความร้อนสูง โดยจะมีอุณหภูมิสูงถึง  $500^{\circ}\text{C}$  ในช่วงระยะเวลา 2-3 วันหลังทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิจะลดลงจนต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ที่ 10-15 วันหลังทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อุณหภูมิของปูนขาวหลังทำปฏิกิริยาที่ช่วงระยะเวลาต่างๆ

จากการศึกษาของ Robert E. Paaswell (1969) พบว่าการกระจายของอุณหภูมิไปยังตำแหน่งต่างๆ ของดินนั้นขึ้นอยู่กับ ระยะทาง ปริมาณความชื้น และความหนาแน่นของดิน จากการทดสอบ Transient Temperature Tests พบว่าถ้าเป็นดินที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน การกระจายของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับระยะทางเท่านั้น แต่ถ้าเป็นดินที่มีคุณสมบัติต่างกัน ดินที่มีปริมาณความชื้นสูงการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นมากกว่าดินที่มีปริมาณความชื้นต่ำ และดินที่มีความหนาแน่นน้อยจะส่งผ่านความร้อนได้มากกว่าดินที่มีความหนาแน่นมากกว่า อย่างไรก็ตามความแตกต่างของปริมาณความชื้นจะส่งผลกระทบต่อกระจายของอุณหภูมิมากกว่าความแตกต่างของความหนาแน่น

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในมวลดินจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของดินหลายประการ ซึ่งได้มีผู้สนใจศึกษาคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิไว้หลายท่าน แต่ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้ มีดังนี้

1) แรงดันในช่องว่างระหว่างมวลดินสูงขึ้น เนื่องจากแรงดันน้ำและแรงดันไอที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของน้ำในช่องว่าง ความสัมพันธ์ของแรงดันที่เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิมีผู้ศึกษาไว้ดังนี้

	$\Delta u/\Delta T$
SEED et al, 1960 (saturated soil),	$0.145 \text{ kg/cm}^2 \times ^\circ\text{C}$
LAMBE, 1961 (compacted soil),	$0.011 \text{ kg/cm}^2 \times ^\circ\text{C}$
GARDENER, 1968 (partially saturated soil),	$0.009 \text{ kg/cm}^2 \times ^\circ\text{C}$

2) โครงสร้างของดินบริเวณผิวของเสาเข็มปูนขาวถูกทำลาย และน้ำที่อยู่รอบผิวของอนุภาคดิน (absorb water) จะถูกขับออกมาภายนอกที่อุณหภูมิมากกว่า  $300^\circ\text{C}$

3) เกิดการเปลี่ยนแปลงด้าน Consolidation Characteristics โดย  $\sigma'_{vm}$  เพิ่มขึ้น (สุรฉัตร, 2529)  $e_0$  และ  $C_v$  ลดลง (Plum and Esrig, 1969) จากอุณหภูมิที่สูงขึ้น

4) กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำลดลงจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น (Sherrif and Burrton, 1968)

5) Plasticity Index ลดลงจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น (Joakim G. Laguros, 1966)

6) Dielectric Constant ใน Double Layer ลดลง ทำให้ Concentration ในโครงสร้างดินเพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิที่สูงขึ้น

จากข้อมูลในข้างต้น ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติของดินด้านต่างๆสรุปไว้ดังตารางที่ 2.3



ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติของดิน  
(Lagulos,1966)

Temperature	Diffuse Ion-Layer Thickness (net effect)	Soil Structure	Volume	Void Ratio	Pore Pressure	Water	Shear Strength
High	Increase	Dispersion	Compression	Low	Increase	Drain out	Low
Low	Decrease	Flocculation	Swelling	High	Decrease	Absorbed	High

### 2.3.3 กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรับปรุงด้วยเข็มปูนขาว

กำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงด้วยเข็มปูนขาวนั้น ได้มีการศึกษาการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นโดยวิธี Empirical method (Y Kado et al,1986) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของดินด้านปริมาณความชื้นในมวลดิน และ void ratio ที่ลดลง และ preconsolidation pressure ที่เพิ่มขึ้นของดินถูกปรับปรุง ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณ 5 ขั้นตอน ดังนี้

#### 1) คำนวณหาค่า Area Ratio

$$Ar = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{P} \right)^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

Ar = area ratio

$$= Ac / (As + Ac)$$

As = area of surrounding soil

Ac = area of pile

D = diameter of lime pile

P = pitch of lime pile centers to centers

2) Reduction of Natural Water Content of Treated Soil

$$\Delta W = \frac{(100 + W_o)}{\gamma_t} \cdot A_s \cdot [h \cdot \gamma_c + n' \cdot (1 + \epsilon v) \cdot \frac{S_r}{1} \cdot \gamma_w] \quad (2.3)$$

- W<sub>o</sub> = original water content(%)
- A<sub>s</sub> = area ratio
- γ<sub>t</sub> = unit weight of untreated soil(t/cu.m.)
- γ<sub>c</sub> = unit weight of lime pile(1.2 t/cu.m.)
- γ<sub>w</sub> = unit weight of water(1.0 t/cu.m.)
- h = absorption value of water by lime pile during chemical reaction(0.3)
- n' = porosity of lime piles after chemical reaction(0.55)
- εv = expansion ratio of the volume of lime pile (0.75)
- S<sub>r</sub> = degree of saturation of lime pile after treated(80 %)

3) Equivalent Change in Void Ratio

$$e' = e_o - \Delta e \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

- Δe = reduction of void ratio
- = G<sub>s</sub> · ΔW / S<sub>r</sub>
- G<sub>s</sub> = specific gravity of original soil
- ΔW = reduction of water content
- S<sub>r</sub> = degree of saturation of original soil(%)

## 4) Increase in Preconsolidation Pressure

$$\Delta P = P_c (10^{\Delta e/C_c} - 1) \dots\dots\dots (2.5)$$

$P_c$  = preconsolidation pressure

$C_c$  = compression index

## 5) Shear strength of treated soil

$$C' = C_o + \frac{C_u}{P'} \cdot \Delta P \dots\dots\dots (2.6)$$

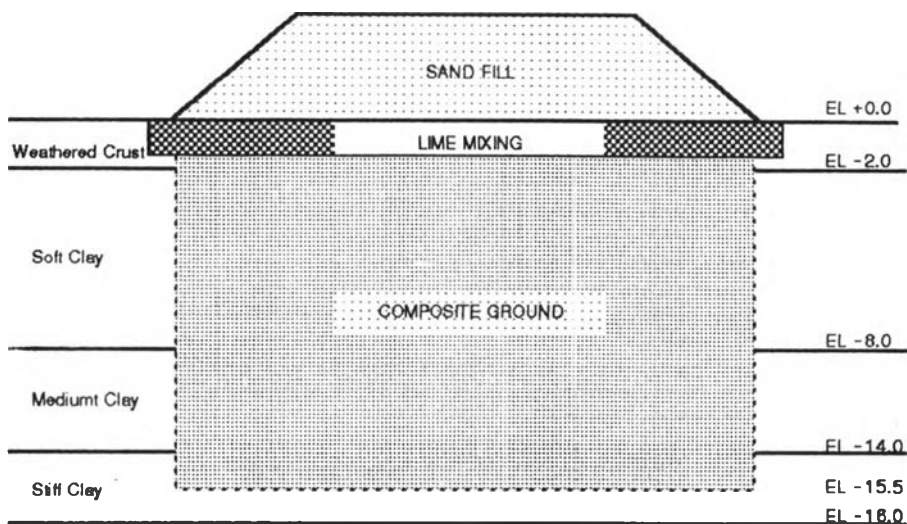
$C'$  = treated soil strength

$C_o$  = shear strength of untreated soil

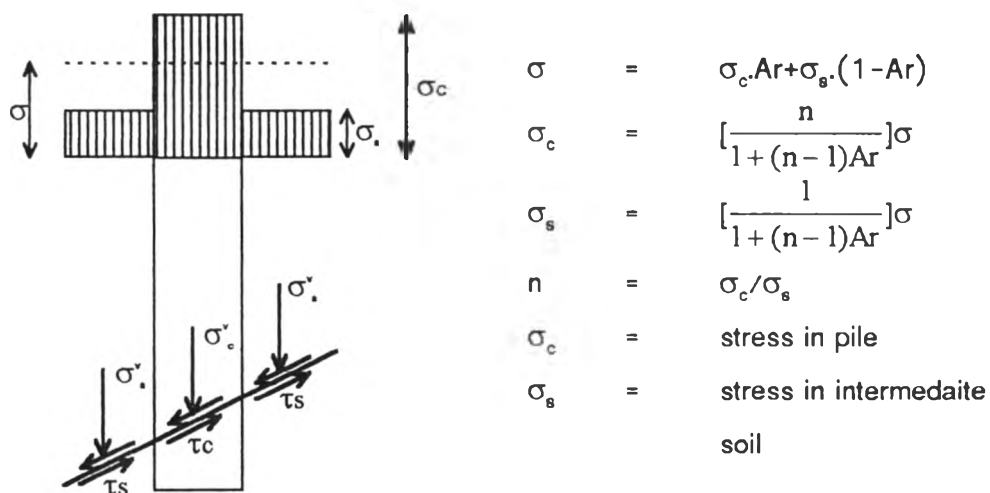
$\frac{C_u}{P'}$  = ratio of undried shear strength

increment with preconsolidation pressure

การพิจารณา slope stability ของการปรับปรุงดินด้วยเข็มปูนขาวที่มีลักษณะเป็น composite ground ดังรูปที่ 2.9 โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยระหว่างเข็มปูนขาวกับดินโดยรอบเข็ม เพราะเมื่อมีแรงมากจะทำให้เกิดหน่วยแรงในเข็มมากกว่าดินโดยรอบดังรูปที่ 2.10 เนื่องจากเข็มมีความแข็งแรงมากกว่า ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนจะได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ที่รับแรงตามสมการที่ 2.7 และค่าหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยได้จากสมการที่ 2.8 โดยหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น จะแปรผันกับหน่วยแรงในแนวตั้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักที่มากกระทำจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงที่เกิดในเข็มกับดินโดยรอบ (Stress Ratio ,  $\sigma_c/\sigma_s$ ) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.4-6.0 โดยเข็มปูนขาว (Lime Mixing Column) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.4-2.0 , เข็มซีเมนต์ (Cement Column) มีค่าประมาณ 3.0 และเข็มหิน (Stone Column) มีค่าระหว่าง 2.0-5.0 (Bergado et al,1988)



รูปที่ 2.9 ลักษณะชั้นดินบริเวณแปลงทดสอบ



รูปที่ 2.10 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินและเสาเข็ม

(Bergado et al,1988)

$$\begin{aligned} \tau_{avg} &= (A_c \cdot \tau_c + A_s \cdot \tau_s) / (A_c + A_s) \\ &= A_r \cdot \tau_c + (1 - A_r) \cdot \tau_s \dots\dots\dots(2.7) \\ \tau_{avg} &= \text{average shear strength} \\ \tau_c &= \text{shear strength of lime pile} (\cong 32 \text{ t/sq.m.}) \\ \tau_s &= \text{shear strength of treated soil} \\ A_r &= \text{area ratio} \\ &= A_c / (A_c + A_s) \\ A_c &= \text{area of lime pile} \\ A_s &= \text{area of intermedaite soil} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{avg} &= (\gamma_c \cdot A_c + \gamma_s \cdot A_s) / (A_c + A_s) \\ &= A_r \cdot \gamma_c + (1 - A_r) \cdot \gamma_s \dots\dots\dots(2.8) \\ \gamma_c &= \text{unit weight of lime pile} \\ \gamma_s &= \text{unit weight of treated soil} \end{aligned}$$

## 2.4 การปรับปรุงดินโดยใช้ PVD

แปลงทดสอบการปรับปรุงดินโดยใช้ PVD โดย AIT ซึ่งได้ทำการศึกษาไว้ตั้งแต่ปี 1994 ซึ่งอยู่ห่างออกไปทางทิศเหนือของแปลงทดสอบในงานศึกษาวิจัยนี้ประมาณ 500 ม. ประกอบด้วยแปลงทดสอบซึ่งติดตั้ง PVD ชนิด Mebra , Castle Board และ Flodrain แบบ square pattern ด้วย Spacing 1.0 , 1.2 และ 1.5 ม. ในแปลงทดสอบ TS3 , TS2 และ TS1 ตามลำดับ (นั่นคือ เปลี่ยนทั้ง spacing และชนิดของ PVD) ผลการทดสอบต่างๆ แสดงอยู่ในรายงาน Final Report ที่เสนอต่อการทำอากาศยานแห่งประเทศไทย ในปี 1996 ซึ่งผู้วิจัยจะนำมาพิจารณาเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้อง คือ การเคลื่อนตัวด้านข้าง , แรงดันน้ำในมวลดิน และการทรุดตัวจากการทำคันดินสูง 4.2 ม.

#### 2.4.1 การก่อสร้างแปลงทดสอบ PVD

คันดินทดสอบประกอบด้วยแปลงทดสอบขนาด 40.0x40.0 ม. จำนวนสามแปลงคือ TS1, TS2 และ TS3 ซึ่งทำการติดตั้ง PVD ด้วยระยะห่าง(spacing) 1.5, 1.2 และ 1.0 ม. ตามลำดับ การก่อสร้างคันดินทดสอบได้ทำการปรับพื้นที่และขุดลอกหน้าดินจนถึงระดับ -0.30 ม. (ต่ำกว่าระดับดินเดิม 0.60 ม.) แล้วจึงก่อสร้าง subdrained และ sand blanket โดยใช้ทรายให้มีความหนาประมาณ 1.00 ม. และทำการติดตั้ง PVD จนแล้วเสร็จจึงเพิ่มความหนาของ sand blanket เป็น 1.50 ม. หลังจากนั้นจึงถมทรายเพื่อเพิ่มหน่วยแรงที่กระทำต่อแปลงทดสอบที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งในช่วงที่ทำการเพิ่มหน่วยแรงจาก 54 kPa เป็น 75 kPa ของแปลงทดสอบ TS2 และ TS3 จะก่อสร้าง berm ยาว 5.0 ม. สูง 1.5 ม. เพื่อไม่ให้เกิดการพังทลายได้ ส่วนแปลงทดสอบ TS1 จะก่อสร้าง berm ยาว 5.0 ม. สูง 1.5 ม. เมื่อหน่วยแรงที่กระทำต่อแปลงทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 45 kPa เป็น 54 kPa และเพิ่มความยาวของ berm เป็น 7.00 ม. เมื่อหน่วยแรงเพิ่มขึ้นเป็น 75 kPa

#### 2.4.2 การติดตั้งเครื่องมือในการวัดข้อมูล

เครื่องมือที่ทำการติดตั้งในแต่ละแปลงทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วย เครื่องมือวัดค่าการทรุดตัวที่ผิวดินและที่ชั้นดินที่อยู่ลึกลงไป (Surface and Subsurface Settlement) เครื่องมือวัดค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral Movement) เครื่องมือวัดแรงดันน้ำในดิน (Pore Pressure)

#### 2.4.3 ข้อมูลและผลการวิเคราะห์ของ AIT

ข้อมูลจากการวัดค่าจากเครื่องมือทางธรณีเทคนิคที่ทำการติดตั้งในสนาม ซึ่งประกอบด้วย Surface and Subsurface Settlement Gages, Piezometers และ Slope Indicator Casings แสดงดังรูปที่ 2.11 ถึงรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของแปลงทดสอบซึ่งสัมพันธ์กับหน่วยแรงและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น สามารถสรุปได้ดังนี้

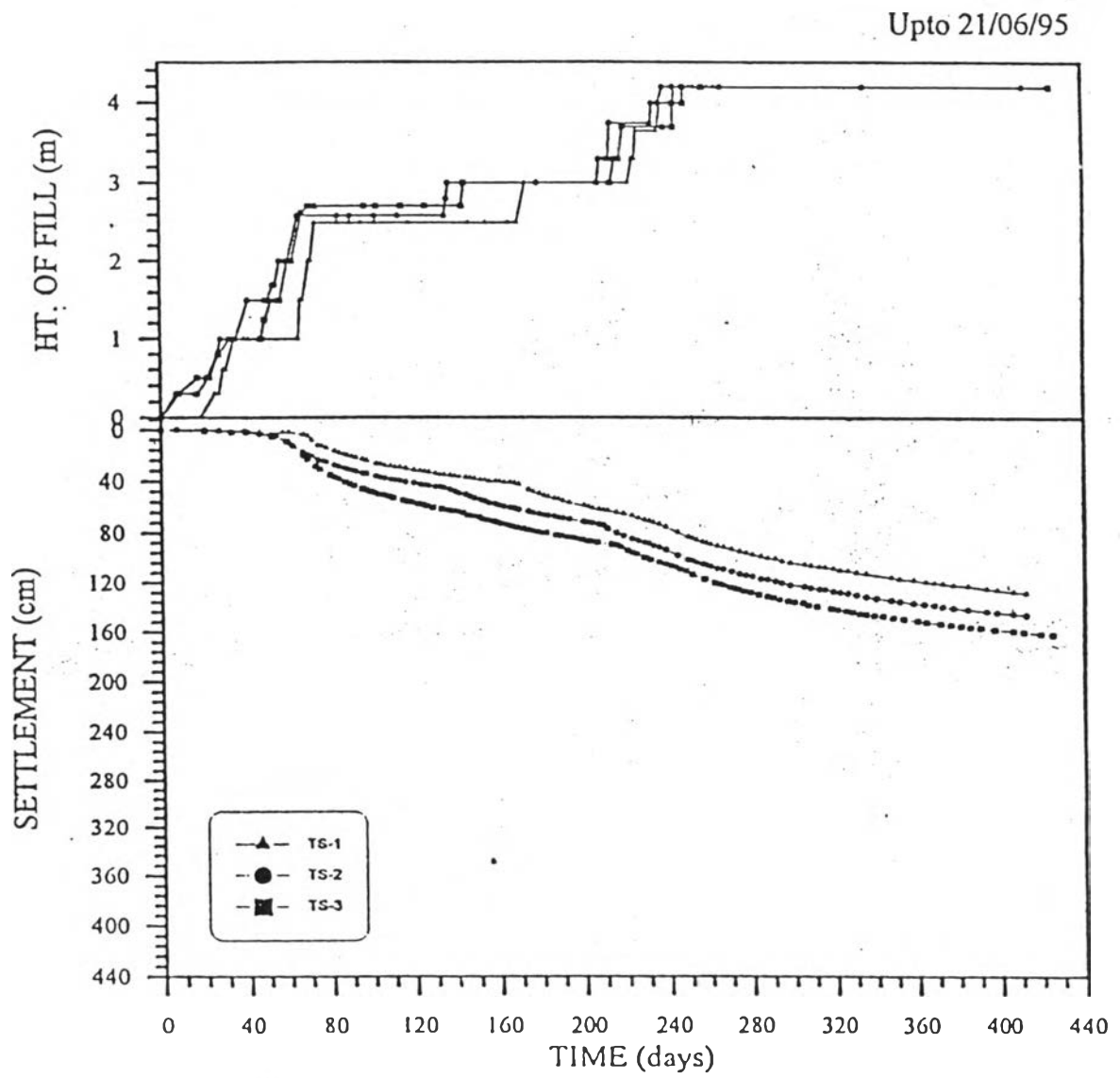
ตารางที่ 2.4 เครื่องมือที่ติดตั้งในสนาม

No.of Instruments	Types of Instruments	Measured Properties
21	Pneumatic Piezometer	Pore Pressure
21	Piezometer	Pore Pressure
28	Standpipe Piezometer	Pore Pressure
32	Surface Settlement Gages	Surface Settlement
30	Subsurface Settlement Gages	Subsurface Settlement
6	Inclinometer Casing in 6 Locations(200 m.)	Lateral Movement
1	Observation Well	Groundwater Level
2	Bench Marks	Elevation Reference

1) อัตราการทรุดตัวของแปลงทดสอบเกิดขึ้นมากที่สุดในแปลงทดสอบ TS3, TS2 และ TS1 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสอดคล้องกับผลของระยะห่างในการติดตั้ง PVD คือ TS3(1.0 ม.) , TS2(1.2 ม.) และ TS1(1.5 ม.)

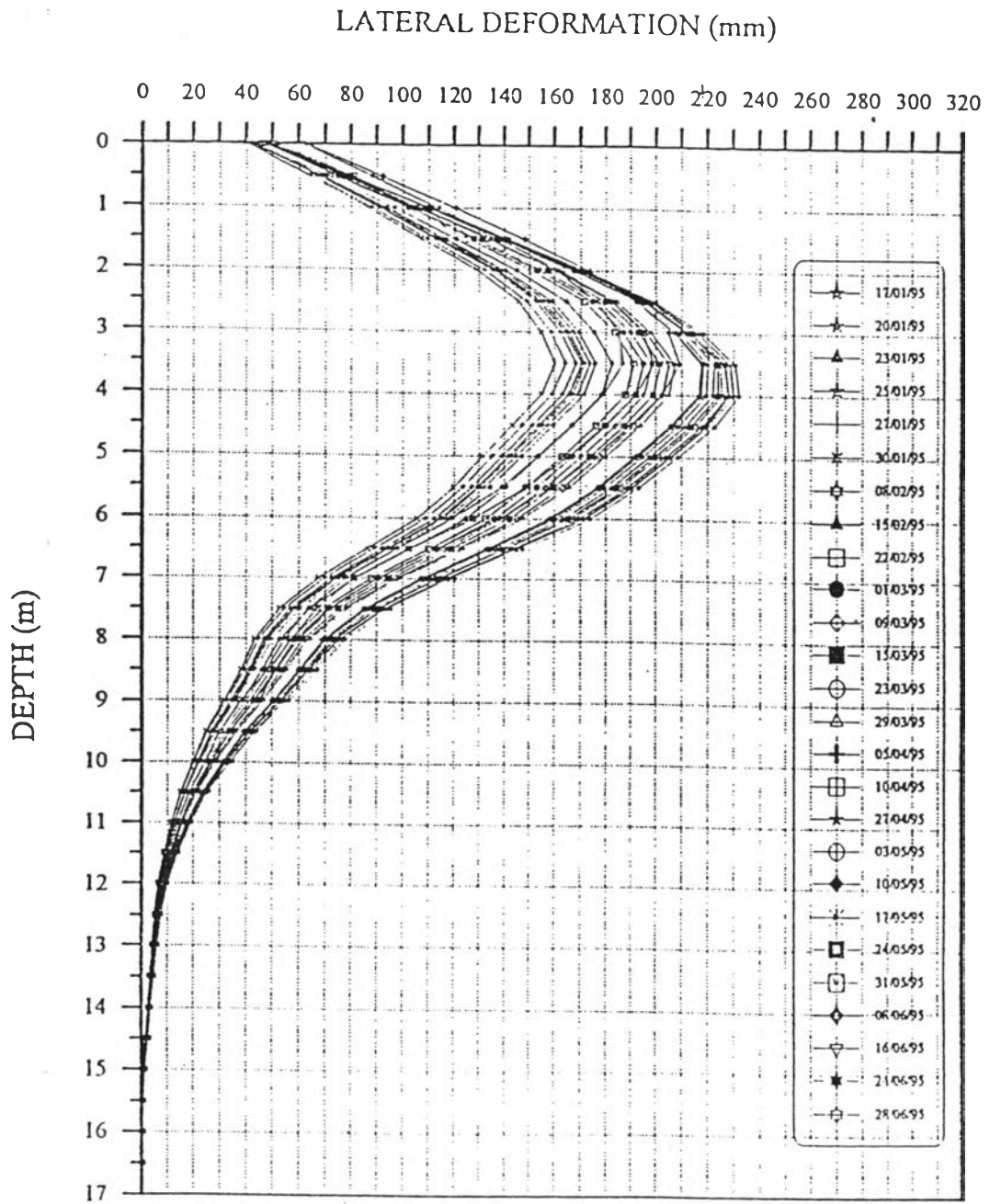
2) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทั้งสามแปลงทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12-2.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นมากที่สุดในชั้นดินเหนียวอ่อน ที่ระดับความลึกประมาณ 4 ม. โดยมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดประมาณ 25 เซนติเมตร

3) การเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันน้ำในมวลดินสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงที่กระทำต่อแปลงทดสอบและเป็นไปในรูปแบบเดียวกันใน Piezometer ทั้งสามชนิด คือ Standpipe , Pneumatic และ Hydraulic Piezometer การ interpret ข้อมูลได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลจาก piezometer เมื่อตัว piezometer ทรุดตัวลงไปด้วย รูปที่ 2.15-2.17 แสดงค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแบบ standpipe piezometer ที่เวลาต่างๆ ส่วนค่าแรงดันน้ำจาก hydraulic piezometer และ pneumatic piezometer แสดงอยู่ในภาคผนวก ข-1

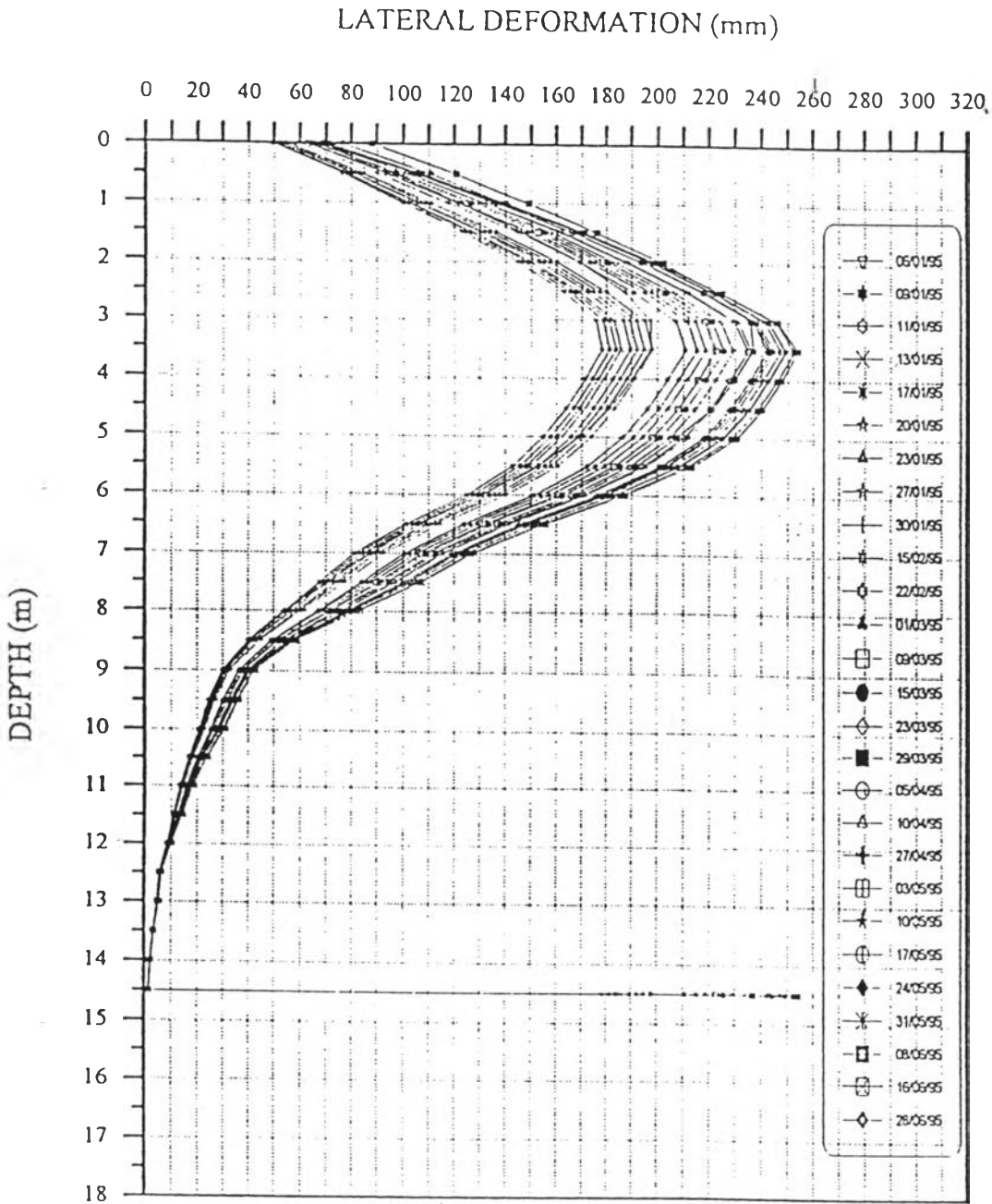


រូបភាព 2.11 Comparison of Surface Settlements in PVD Test(TS1,TS2,and TS3)

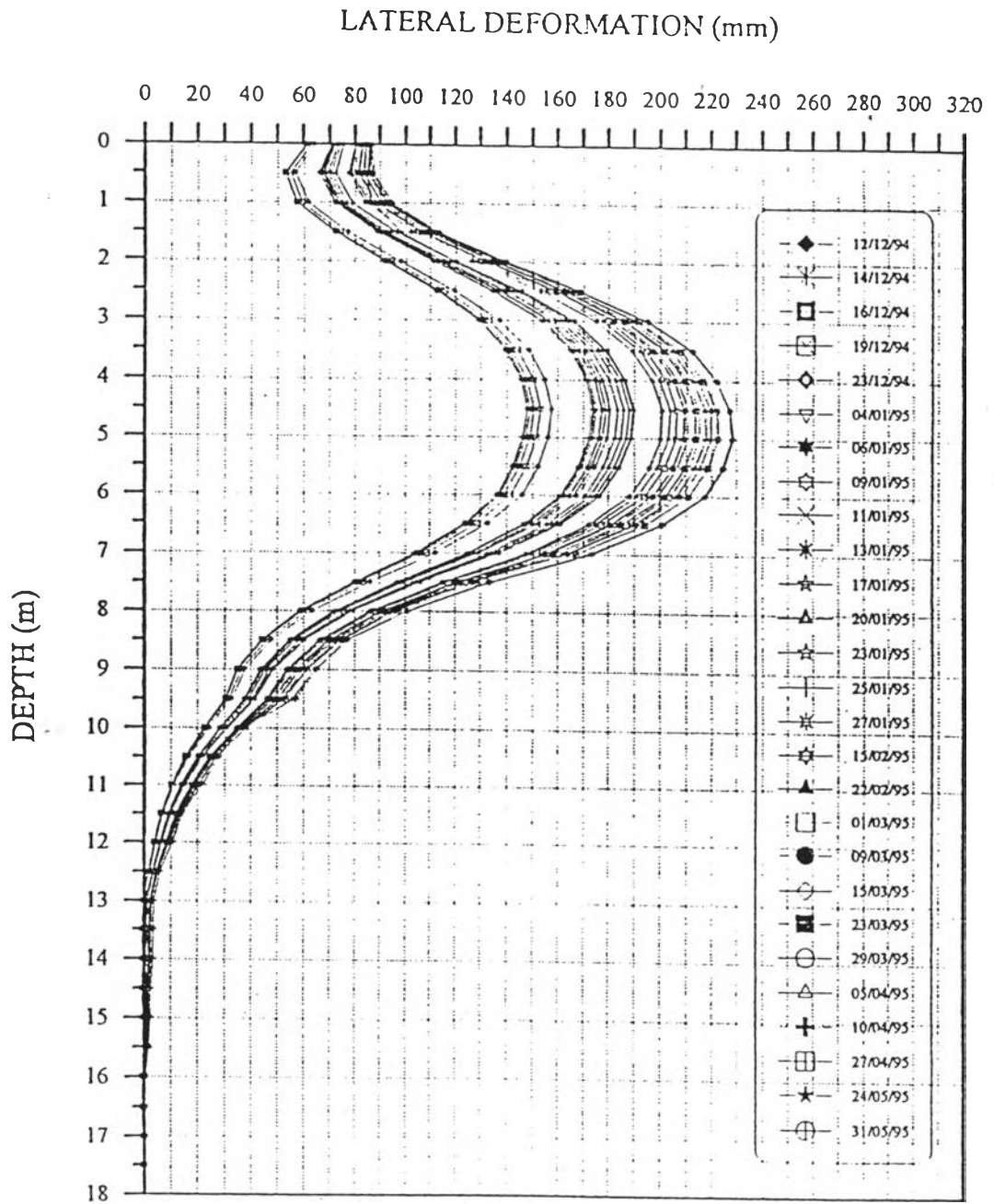




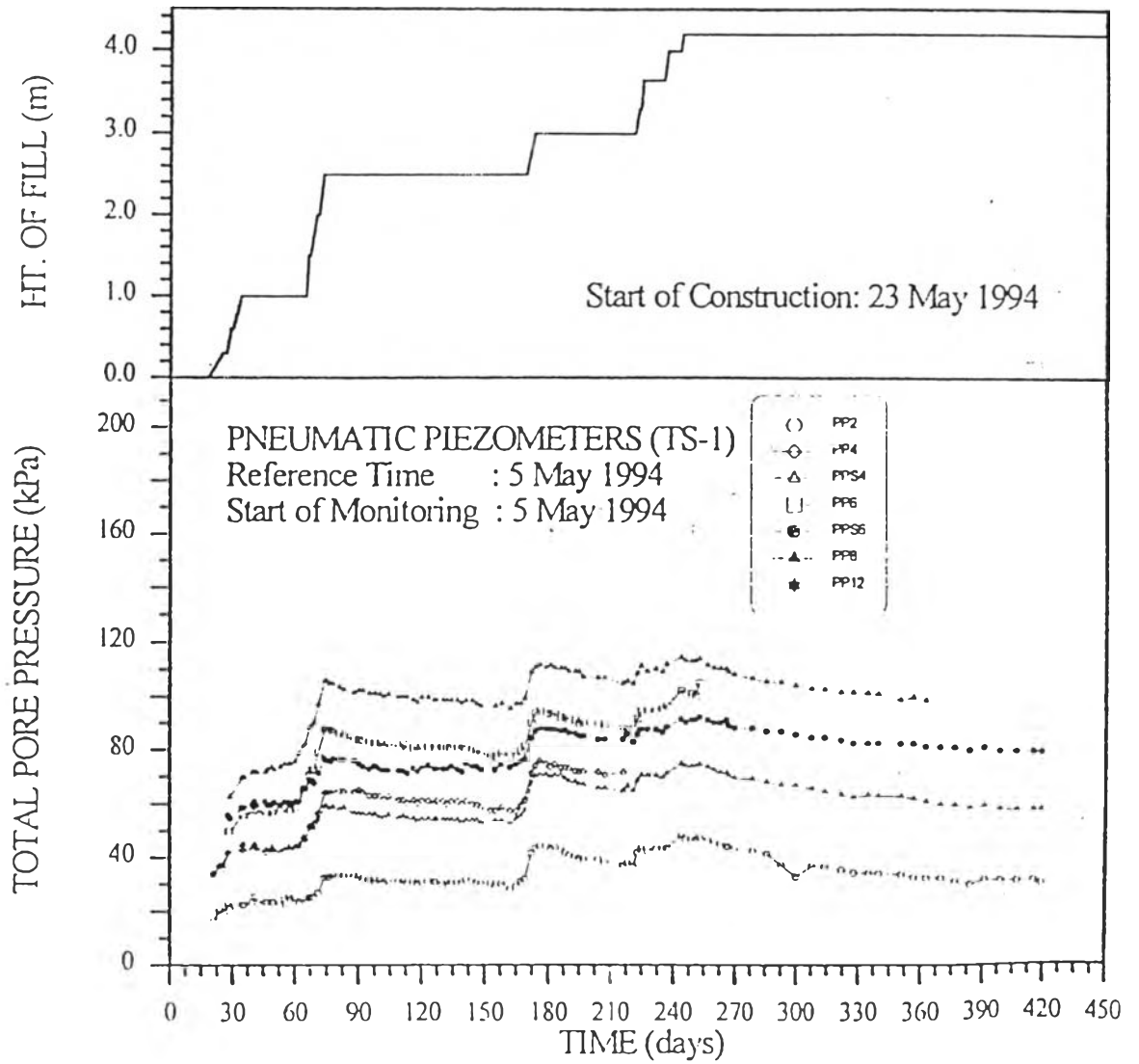
รูปที่ 2.12 Lateral Deformations with Depth of PVD Test(TS1)



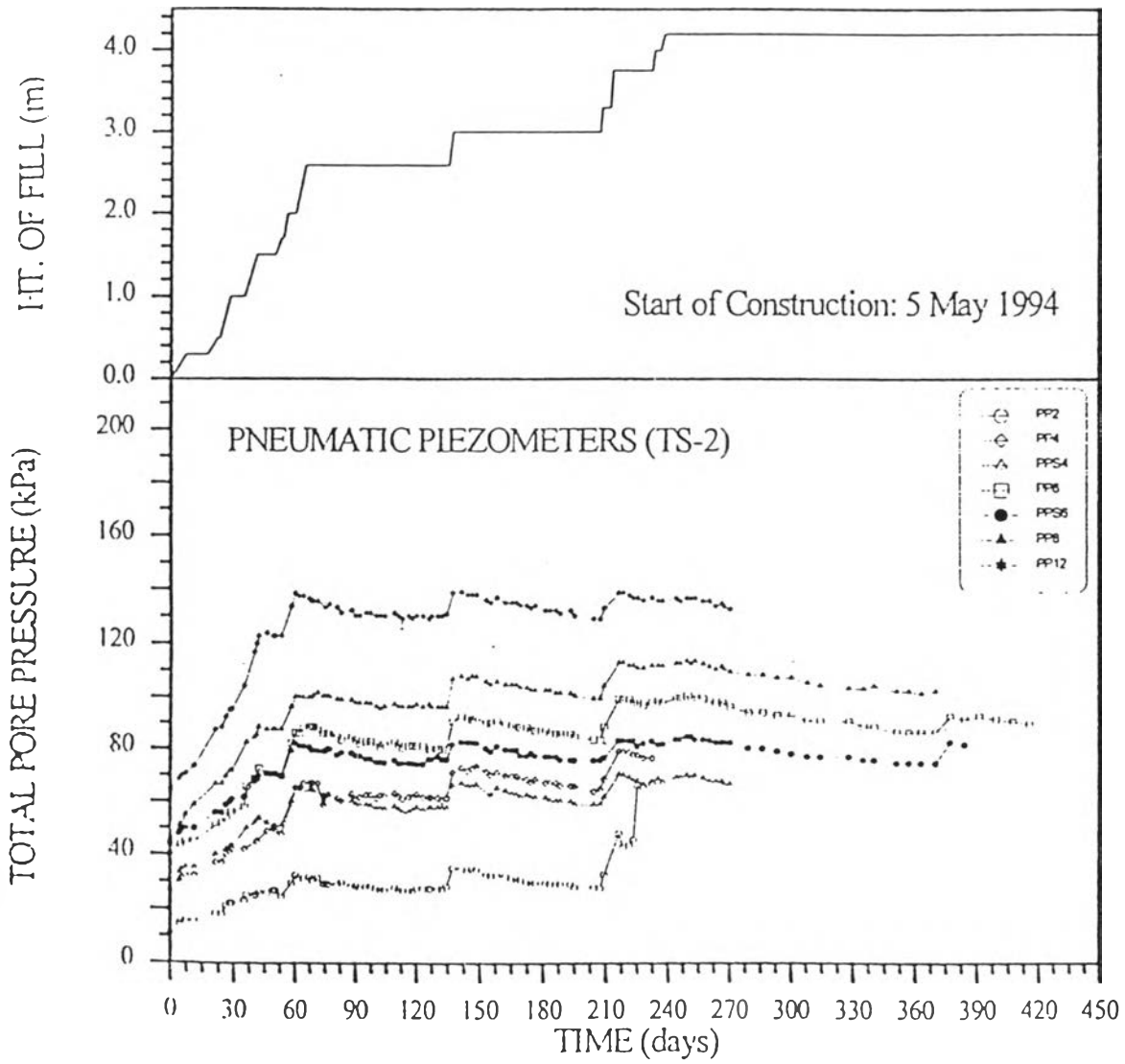
រូប 2.13 Lateral Deformations with Depth of PVD Test(TS2)



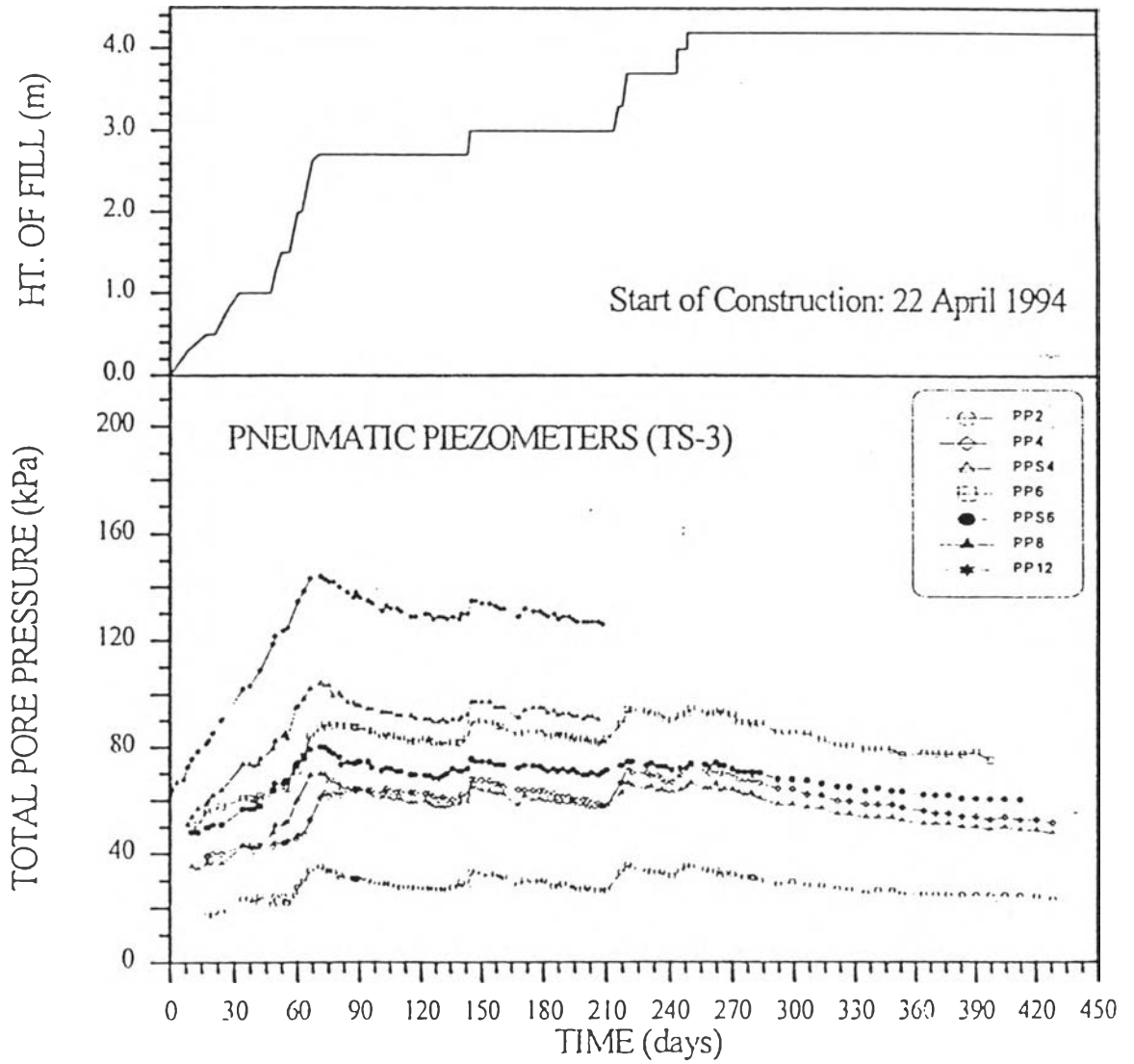
2.14 Lateral Deformations with Depth of PVD Test(TS3)



รูปที่ 2.15 Pore Pressure from Stanpipe Piezometer Corrected for Settlements of PVD Test (TS1)(AIT)



รูปที่ 2.16 Pore Pressure from Stanpipe Piezometer Corrected for Settlements of PVD Test (TS2)(AIT)



รูปที่ 2.17 Pore Pressure from Stanpipe Piezometer Corrected for Settlements(TS3) of PVD Test (TS3)(AIT)

นอกจากข้อมูลในการวัดค่าการทรุดตัวในสนามของแปลงทดสอบ PVD แล้ว AIT ได้ประมาณค่าการทรุดตัวสุดท้ายไว้หลายวิธี ประกอบด้วยวิธี 1-D ของ Terzaghi , วิธีของ Asaoka , และ Hansbo ซึ่งค่าการทรุดตัวและ Average Degree of Consolidation จากการวัดค่าแรงดันน้ำและจากการวัดค่าการทรุดตัวในสนามแสดงอยู่ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าการทรุดตัวสุดท้ายของแปลงทดสอบ PVD โดย AIT

Total Settlement		Average Degree of Consolidation(%)		
Method of Calculation	$\rho$ (m)	Test Section	From Measured Pore Pressure*	From Measured Settlement**
1-D(Terzaghi)	1.74	TS1	75	72
Asaoka's method	1.70	TS2	76	82
Hansbo's $\lambda$ -theory	1.72	TS3	84	90

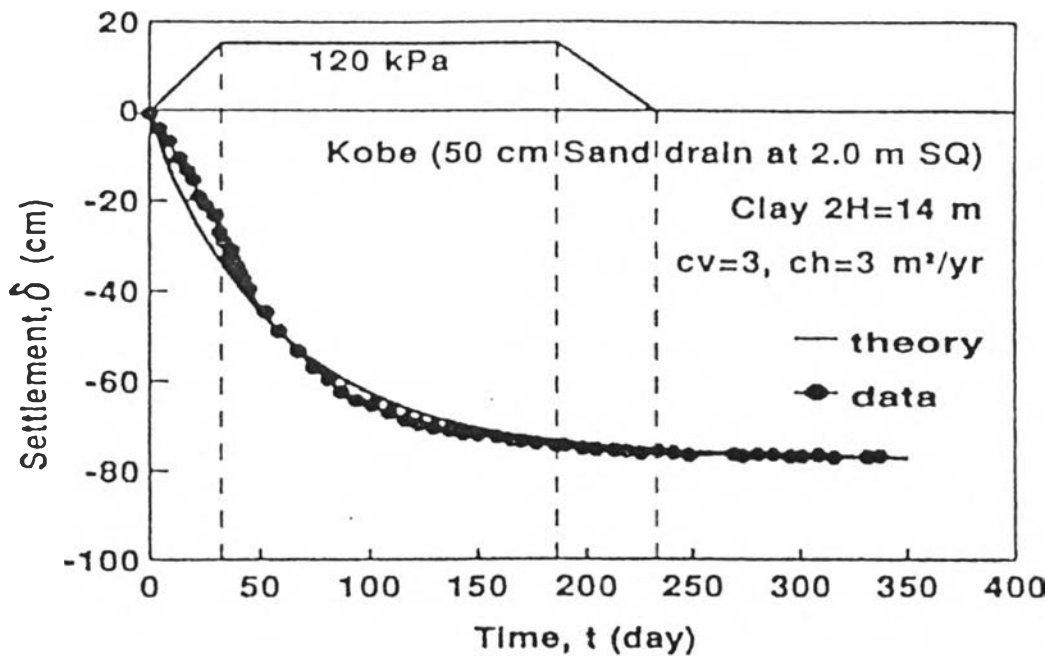
\* Pore pressure at 365 days

\*\*Settlement at 365 days with Total Settlement by Asaoka's method

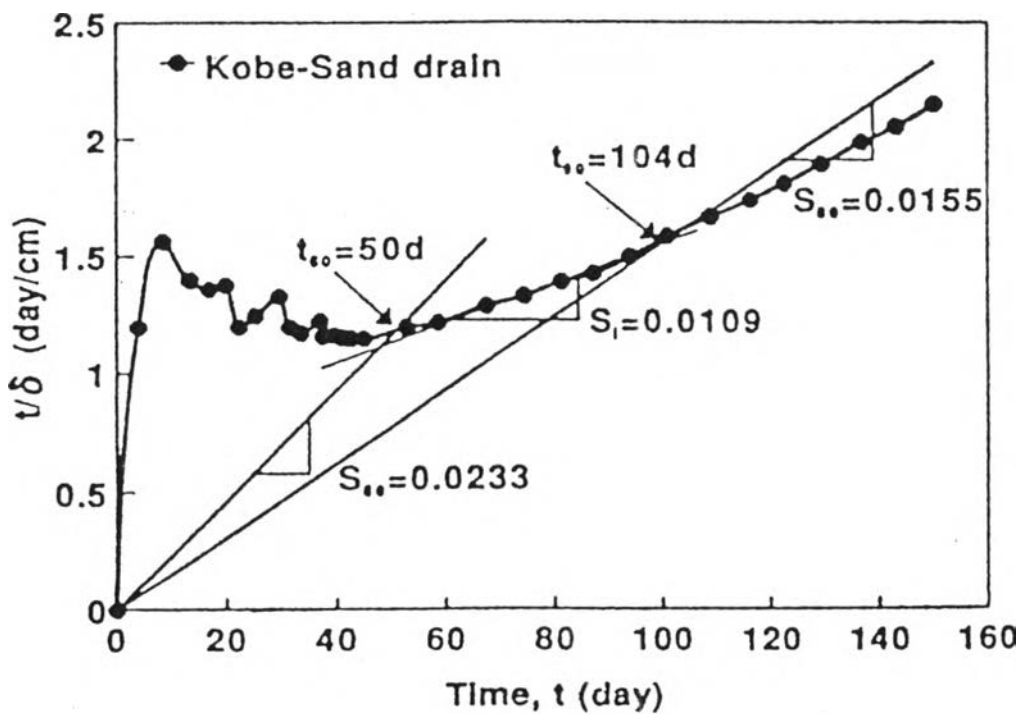
จากข้อมูลการวัดค่าการทรุดตัวในสนามของแปลงทดสอบ PVD สามารถประมาณค่า consolidation settlement ได้โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้สนามลบด้วยการทรุดตัวแบบ undrained (Time dependent undrained settlement) ซึ่งคาดคะเนโดยใช้ข้อมูลจาก lateral movement ที่วัดได้ในสนาม และในงานศึกษาและวิจัยครั้งนี้นำเอาทฤษฎีของ Barron สำหรับ three dimensional drainage (TAN et al ,1996) มาใช้ในการวิเคราะห์คำนวณการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำทั้งหมด ซึ่งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้

1) จากความสัมพันธ์ของการทรุดตัวกับเวลาที่วัดค่าจากในสนาม ดังรูปที่ 2.18 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลานับตั้งแต่เริ่มทำคันดิน( $t$ ) กับอัตราส่วนของเวลากับค่าการทรุดตัวจากการวัดค่าในสนาม( $t/\rho$ ) โดยให้  $t$  อยู่ในแกน x และ  $t/\rho$  อยู่ในแกน y ดังรูปที่ 2.19

2) จากกราฟในข้อ 1) จุดที่กราฟเริ่มเป็นเส้นตรงคือจุด  $t_{60}$  และ  $t_{60}/\rho_{60}$  และความชันของเส้นตรงนี้เท่ากับ  $S_i$  จากความสัมพันธ์นี้สามารถหาจุด  $t_{90}$  และ  $t_{90}/\rho_{90}$



รูปที่ 2.18 Kobe-Japan field settlement



รูปที่ 2.19 Kobe-Japan hyperbolic plots



3)จากรูปที่ 2.20 สามารถหา  $\alpha_i$  ได้เมื่อทราบค่าตัวแปร  $n, H/D, Ch/Cv$

4)จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในข้อ1)และ2)(  $t_{60} \cdot t_{60}/P_{60}$  ,  $t_{90} \cdot t_{90}/P_{90}$  , และ  $S_i$ )เราสามารถหาค่าการทรุดตัวสุดท้ายได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังสมการ

$$\rho_i = \alpha_i/S_i = \rho_{60}/0.6 = \rho_{90}/0.9 \dots\dots\dots(2.9)$$

สำหรับการประมาณค่าการทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจาก consolidation ก่อนการปรับปรุง จะพิจารณาโดยใช้สมมติฐานการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติตามทฤษฎีของ Terzaghi ข้อมูลนี้และวิธีการของ TAN(1996) จะนำมาใช้ในการหา degree of consolidation เมื่อการวัดสิ้นสุดลงของแปลงที่ใช้ PVD

กรณี  $\sigma'_{v0} < \sigma'_{vf} \leq \sigma'_{vm}$

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n (RR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}}) i \dots\dots\dots (2.10)$$

RR = recompression ratio

$\sigma'_{vf}$  = final vertical effective stress

$\sigma'_{vm}$  = maximum effective past pressure

กรณี  $\sigma'_{v0} < \sigma'_{vm} < \sigma'_{vf}$

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n (RR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} + CR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vm}}) i \dots\dots\dots (2.11)$$

CR = compression ratio

กรณี  $\sigma'_{vm} \leq \sigma'_{v0} < \sigma'_{vf}$

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n (CR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}}) i \dots\dots\dots (2.12)$$

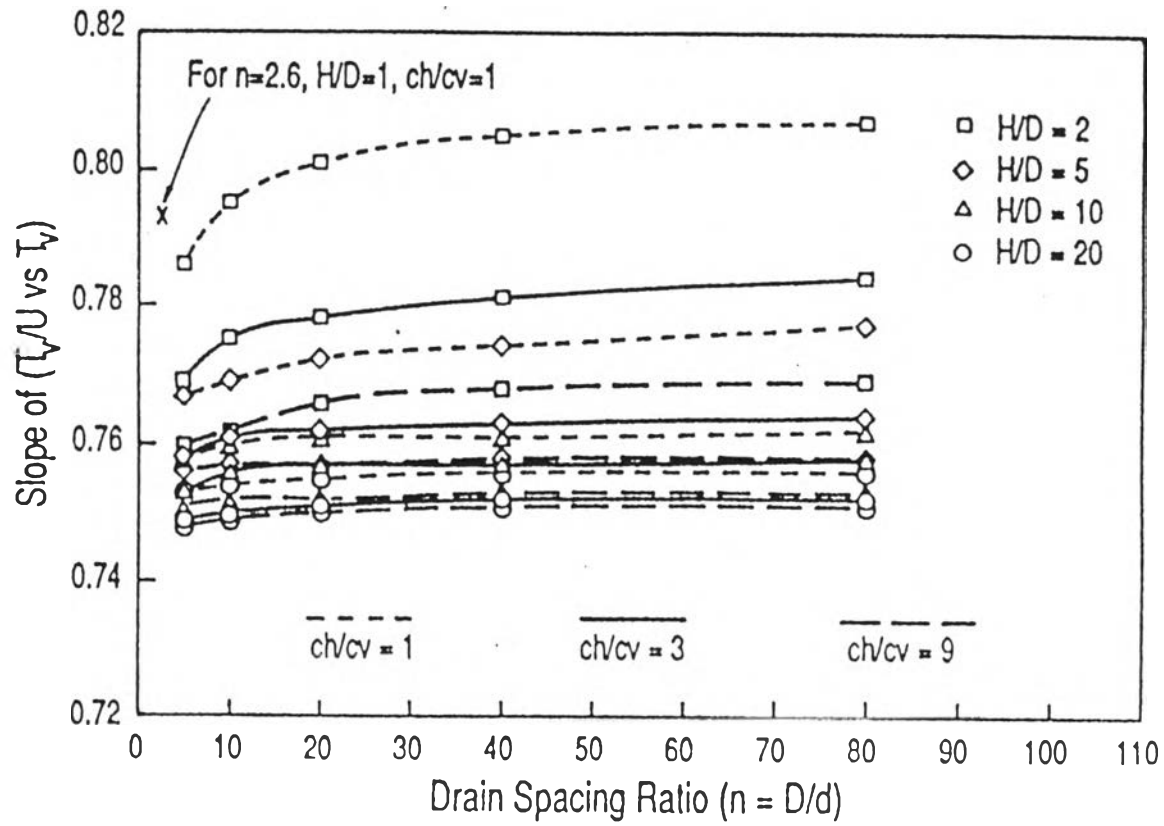


Figure 2.20 Plot of  $a_i$  as a function of  $n=D/d, H/D$  and  $Ch/Cv$  for vertical drains