บทที่ 3

การทดลองการวิจัย

การออกแบบและการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนมากนั้น สิ่งที่เผชิญกันอยู่เสมอ ๆ คือปัญหาทางด้านเสถียรภาพ และการทรุดตัวที่มากเกินไป ฉะนั้นเพื่อความเข้าใจในปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาในรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. หาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน (Undrained Shear Strength) ที่เหมาะสม เพื่อการวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัยทางด้านเสถียรภาพของคันทาง

2. การวิจัยนี้จะทำการทดลองหาค่าการทรุดตัวของคันทาง ที่ก่อสร้างปรับปรุงใหม่ โดยการจำลองระบบของหน่วยแรงให้คล้ายกับที่เกิดขึ้นจริงในสนามด้วยวิธี stress-path โดยใช้การทดลองไตรแอกเซียล

3. ทำการทดลองหาสมบัติทางด้านวิศวกรรม เพื่อการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันทาง โดยวิธีปฐพีกลศาสตร์พื้นฐาน (Conventional Method), (D'Appolonia et al, 1971; Skempton & Bjerrum, 1957)

4. เลือกสมบัติของดินที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการคาดคะเนการทรุดตัวของคันทาง โดยวิธีไฟไนท์เอลลิเมนต์

5. วิเคราะห์การทรุดตัวของคันทาง จากข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้ในสนาม โดยวิธีการของ Asaoka

6. วิเคราะห์การทรุดตัวของคันทาง จากข้อมูลความดันน้ำโพรงเพิ่ม (Excess Pore Water Pressure, ΔU) ที่วัดได้จริงในสนาม โดยวิธีของ Skempton และ Bjerrum

7. คาดคะเนปริมาณความดันน้ำโพรงเพิ่ม (Excess Pore Water Pressure) ที่เกิดจากน้ำหนักของคันทาง เพื่อใช้ในการคาดคะเนการทรุดตัวของชั้นดิน

8. คาดคะเนอัตราการทรุดตัวของคันทาง

3.1 สถานที่ และวิธีการเก็บตัวอย่าง

3.1.1 สถานที่ทำการเก็บตัวอย่าง

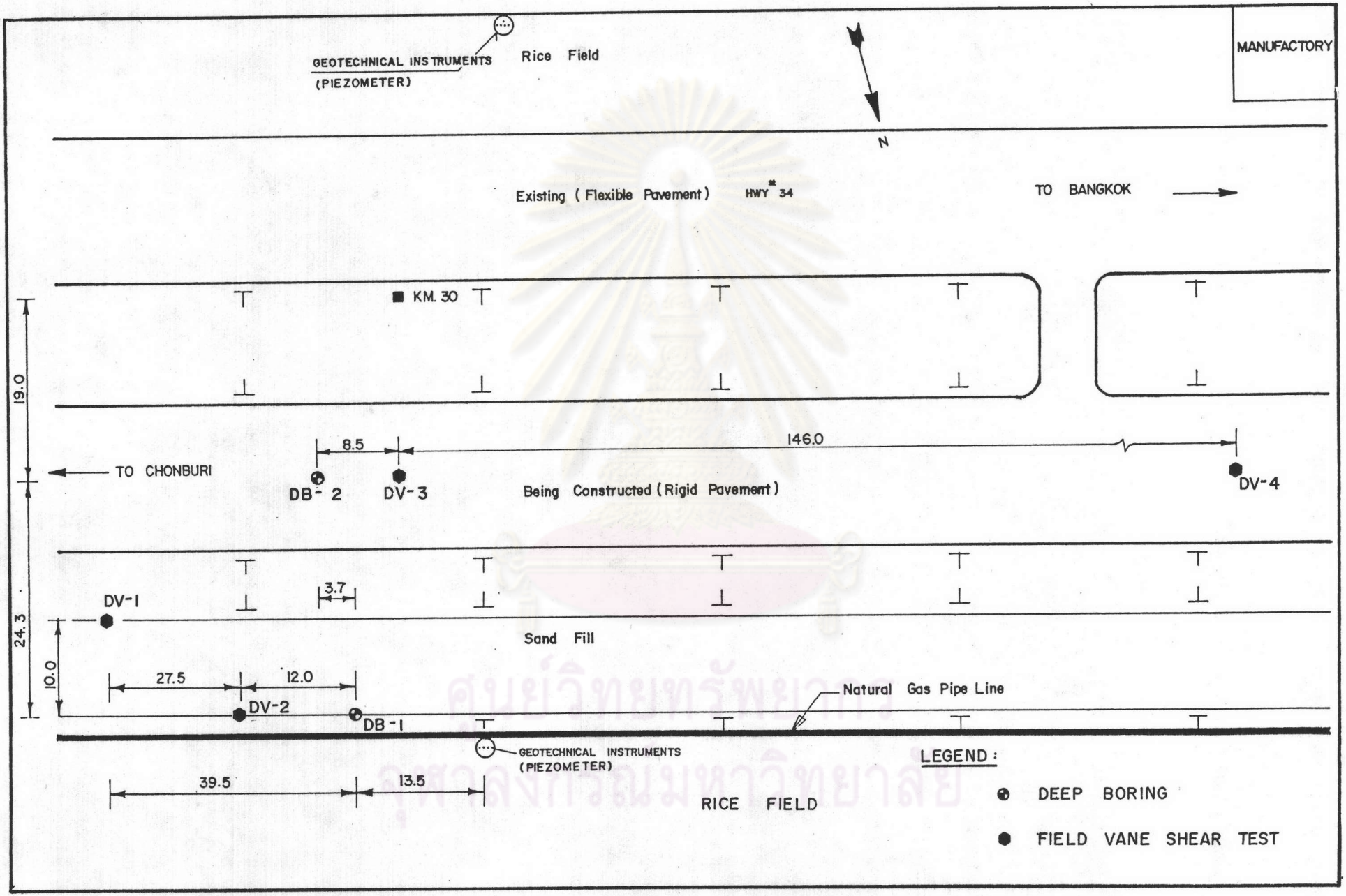
บริเวณที่ทำการศึกษา คือ ที่ กม.30 ถนนสายบางนา-บางปะกง (ทางหลวงสาย-34 ดูรูปที่ 1.1 ประกอบ) สาเหตุที่เลือกบริเวณนี้ เพื่อทำการศึกษา ก็เพราะว่าจากข้อมูลการทรุดตัว ของถนนสายนี้พบว่าในช่วงปี 1969-1979 บริเวณ กม.30 มีการทรุดตัวมากที่สุด คือ ประมาณ 2.50 ม. สาเหตุของการทรุดตัวมาก ก็เนื่องมาจากว่าดินบริเวณนี้เป็นดินเหนียวอ่อนมาก มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ค่าการยุบอัดตัวสูง ความหนาของชั้นดินอ่อนหนามาก ประมาณ 20 ม. และเนื่องจากที่ กม. 30 เป็นที่ต่ำระดับดินเดิมอยู่ประมาณ 0.6 ม. จากระดับน้ำทะเลปาน-กลาง เพื่อหลีกเลี่ยงน้ำท่วมในฤดูฝน กรมทางหลวงจึงยกระดับของถนนให้สูง ในการก่อสร้างครั้งแรก หน่วยแรงกระทำที่ผิวดินจึงมีค่าสูง ซึ่งทำให้เสถียรภาพของคันทางค่อนข้างต่ำ และทำให้เกิดการทรุดตัวที่มาก แต่กำลังรับแรงเฉือนของดินอ่อนสูงขึ้น

ตำแหน่งที่ทำการเจาะ เก็บตัวอย่างดิน แบบไม่รบกวน (Undisturbed Sample) คือ DB-1 และ DB-2 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 การที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่าง 2 หลุม คือ ที่ขอบของ berm ด้านติดทุ่งนา (DB-1) และกลางถนน (DB-2) อีกหลุมหนึ่ง ก็เพื่อจะดูการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินทางด้านกำลังรับน้ำหนัก และประวัติของหน่วยแรง (Stress History) ของดินอ่อนเนื่องจากการก่อสร้างถนนครั้งแรก

ตัวอย่างดินจากหลุม DB-1 เปรียบเสมือนเป็นดินอ่อนที่อยู่ในสภาพธรรมชาติที่ยังไม่เคยถูกหน่วยแรงภายนอกกระทำมาก่อน จึงถูกนำมาทดสอบ stress path จำลองหน่วย-แรงรวมที่เกิดขึ้นในสนาม เพื่อหาค่าการทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่

ตัวอย่างดินจากหลุม DB-2 เป็นดินที่ถูกหน่วยแรงภายนอกกระทำมาก่อนแล้ว (น้ำหนักจากถนนที่ก่อสร้างในปี 1969) ทำให้หน่วยแรงสูงสุดในอดีต (Maximum Past Pressure, $\bar{\sigma}_{vm}$) และหน่วยแรงเฉือนเริ่มแรก (Initial Shear Stress) เปลี่ยนแปลงไป ฉะนั้นตัวอย่างดิน จากหลุมนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปทดสอบ stress path แต่เหมาะสำหรับการทดสอบหาสมบัติพื้นฐาน และสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อการวิเคราะห์การทรุดตัวของถนนต่อเติมใหม่ (1983) โดยวิธีปฐพีกลศาสตร์พื้นฐาน (D' Appolonia et al., 1971; Skempton & Bjerrum, 1957) และตรวจสอบเสถียรภาพของคันดินหลังจากการต่อเติม

3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งของหลุมเจาะ การทดลอบ field vane และการติดตั้ง piezometer

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากที่ กม.30 นี้เป็นบริเวณที่ดินอ่อนมาก มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำปริมาณความชื้นในธรรมชาติสูง (110-150%) และ sensitivity สูง (ประมาณ 6) การจะเก็บตัวอย่างด้วยการใช้กระบอกบางธรรมดา (Shelby Tube) อาจจะเก็บตัวอย่างไม่ได้ ฉะนั้นจึงเลือกใช้การเก็บตัวอย่าง แบบ fixed piston sample ใช้กระบอกบางเก็บตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว และยาวประมาณ 1.0 ม. โดยเก็บตัวอย่างที่ทุก ๆ 1.5 ม. จนถึงชั้นดินแข็ง (Stiff Clay) ลิ้นตาล หรือชั้นทราย ซึ่งจะใช้เวลาในการทำงานประมาณ 3-4 วัน ต่อ 1 หลุม (กรณีที่ไม่มีปัญหาทางด้านเครื่องเจาะเสีย)

ขั้นตอนของการเก็บตัวอย่าง มีดังนี้ ดูรูปที่ 3.2 ประกอบ

1. การเจาะดินโดยใช้การฉีดล้าง (Wash Boring) จนถึงระดับก่อนเก็บตัวอย่าง ประมาณ 50 ซม. (รูปที่ 3.2 ก)

2. ใช้กระบอกบางทำด้วย strainless steel เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาว 1.0 ม. ที่ประกอบ piston เรียบร้อยแล้ว ดันไล่ดินอ่อนลงไปอีก 50 ซม. โดยใช้ hydraulic jack (รูปที่ 3.2 ข)

3. เริ่มทำการเก็บตัวอย่างดิน โดยการตึง piston ให้นิ่งอยู่กับที่ พร้อมกันนั้น ก็ใช้ hydraulic jack ของเครื่องเจาะดิน ดันกระบอกบางโดยส่งถ่ายแรงทางก้านเจาะลงไปในดินอ่อนประมาณ 80 ซม. (รูปที่ 3.2 ค.)

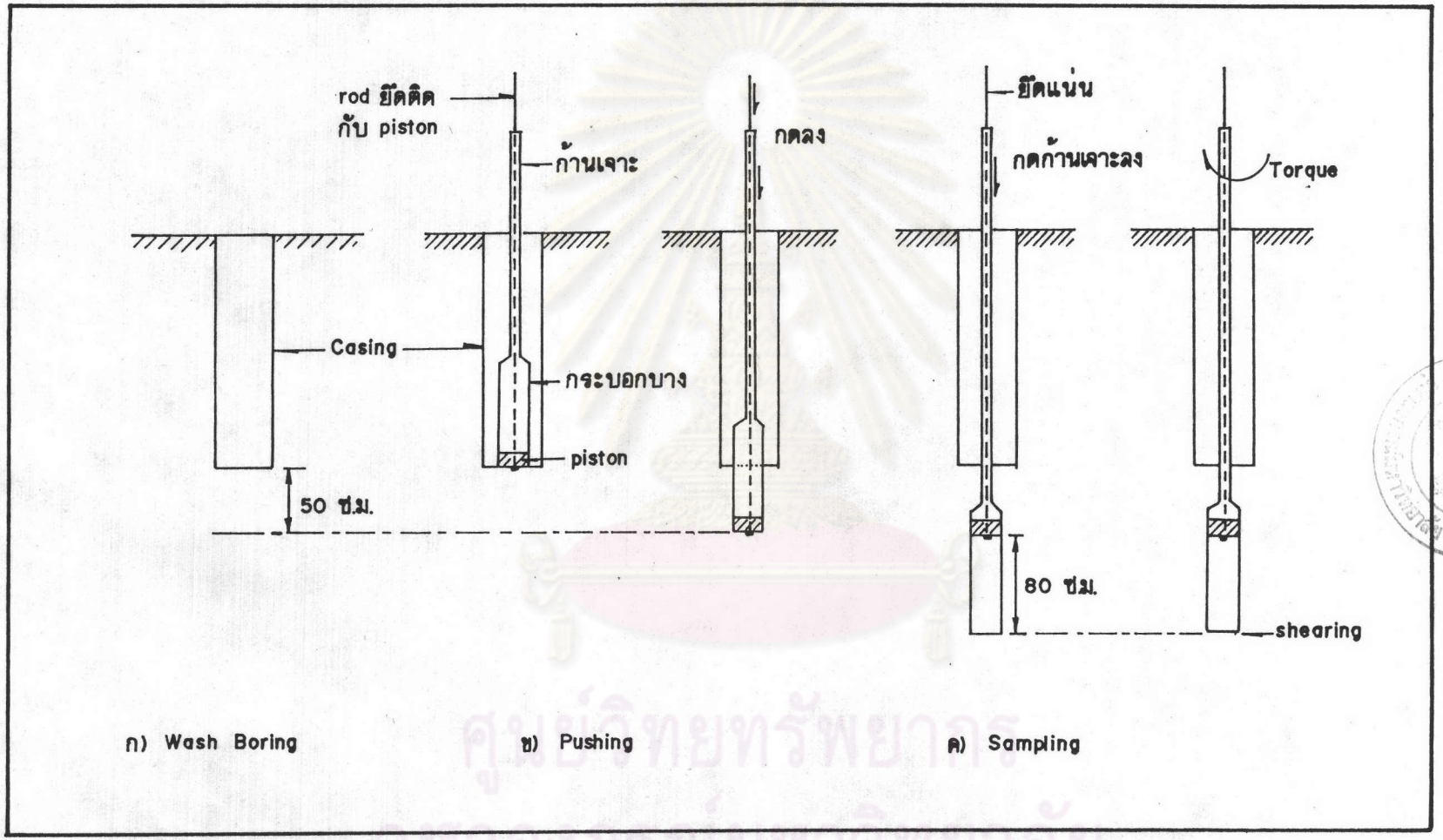
4. หมุนก้านเจาะเพื่อเฉือนดินที่ปลายกระบอกบางให้ขาดออกจากกัน จากนั้นนำกระบอกบางขึ้นมา เคลือบพาราฟินที่หัว และท้ายกระบอกบาง พร้อมทั้งเขียนคำอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดของตัวอย่างที่เก็บ และปิดไว้กับตัวกระบอกบาง

เนื่องจากเป็นดินอ่อนมากมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ฉะนั้นจึง stabilize หลุมด้วย casing ตลอดช่วงที่เป็นดินอ่อน และเติมน้ำให้เต็มหลุมตลอดเวลา หลังจากเก็บตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างทั้งหมด ถูกส่งมาที่ห้องควบคุมความชื้นเพื่อรอการทดลองต่อไป

3.2 การทดสอบ และการเก็บข้อมูลในสนาม

3.2.1 การทดสอบ field vane shear

การทดสอบ vane shear เป็นการทดสอบเพื่อวัดกำลังรับแรงเฉือน แบบอันเดรนของดินอ่อนในสนาม ซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทาง



รูปที่ 3.2 แสดงการเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนมาก แบบ fixed piston

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตำแหน่งที่ทำการทดลอบ ได้แก่ ที่ขอบ berm ด้านนอก ติดทุ่งนา (DV-2) ขอบ berm ด้านในติดถนน (DV-1) และตรงกลางถนนอีก 2 แห่ง (DV-3, DV-4) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

การทดลอบได้ใช้เครื่องมือที่คล้าย Geonor vane borer ขนาดของใบ vane 55 x 110 มม. และบางกว่า เหมาะกับดินเหนียวอ่อนที่มีกำลังรับแรงเฉือนในช่วง 0-10 ตันต่อ $ม^2$.

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอบ

- vane borer
- vane boring instruments

ขั้นตอนการทำการทดลอบ

1. กด vane borer ด้วย hydraulic jack ลงไปในดิน ก่อนถึงระดับทดลอบ 50 ซม.

2. กด steel rod ที่ต่อกับใบ vane ที่ซ่อนอยู่ใน protection shoe ลงไป 50 ซม.

3. ติดตั้งเครื่องมือส่งถ่ายโมเมนต์บิด (Torque) โดยต่อกับ steel rod ในข้อ 2 บันทึกค่าโมเมนต์บิดสูงสุดที่อ่านได้เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือน

4. หลังจากวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนเสร็จแล้วให้ดึงใบ vane กลับเข้าไปอยู่ใน protection shoe แล้วดำเนินการทดลองใหม่ จากข้อ 1 ถึง ข้อ 4

การทดลอบ field vane shear จะกระทำทุก ๆ 50 ซม. จากผิวดินลงไป โดยการทดลองแบบไม่รบกวนกำลังรับแรงเฉือน (Undisturbed Shear Strength)และการทดลอบแบบรบกวนกำลังรับแรงเฉือน (Remolded Shear Strength) โดยการหมุนใบ vane 25 รอบ ก่อนทำการทดลอบหากำลังรับแรงเฉือน จากค่ากำลังรับแรงเฉือนทั้งสอง ทำให้เราสามารถหาค่า sensitivity ของดินเหนียวอ่อนได้ การทดลองจะหยุดเมื่อถึงชั้นดินแข็ง (Stiff Clay) หรือที่ระดับความลึกที่กำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนมีค่าประมาณ 6-7 ตันต่อ $ม^2$. โดยทั่วไปจะอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ -20.0 ม. จากระดับน้ำทะเลปานกลาง เวลาที่ใช้ในการทดลอบ 2 วันต่อ 1 หลุม

3.2.2 การวัดความดันน้ำในโพรงดิน

กรมทางหลวงได้ทำการติดตั้ง piezometer พร้อม dummy piezometer เพื่อวัดความดันน้ำในโพรงดิน ที่อยู่ใต้กึ่งกลางถนน ในระหว่างการก่อสร้าง (เมษายน 2526 ถึง พฤษภาคม 2527) ซึ่งใช้ในการควบคุมอัตราการถมถนน ระดับความลึกที่ติดตั้ง ได้แก่ -3.30, -5.50, -9.05, -13.05, -16.55 และ -20.00 ม. ข้อมูลที่ได้ถูกแสดงในรูปของค่าความดันน้ำโพรงเพิ่ม ในรูปที่ 3.3

ต่อมาคณะวิจัยโครงการ "ศึกษาผลกระทบอันจะมีต่อแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก" ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทำการติดตั้ง piezometer เพิ่มอีก ที่ขอบ berm ด้านติดทุ่งนา ข้าง ๆ ท่อส่งก๊าซ และ dummy piezometer ที่ขอบ berm ฝั่งตรงข้าม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของแนวท่อส่งก๊าซ ระดับที่ติดตั้งอยู่ที่ -4.245, -10.245, -18.245 และ -20.934 ม. ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงรูปหน้าตัดของถนนที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ และการทรุดตัว สำหรับข้อมูลความดันน้ำโพรงเพิ่มได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.5

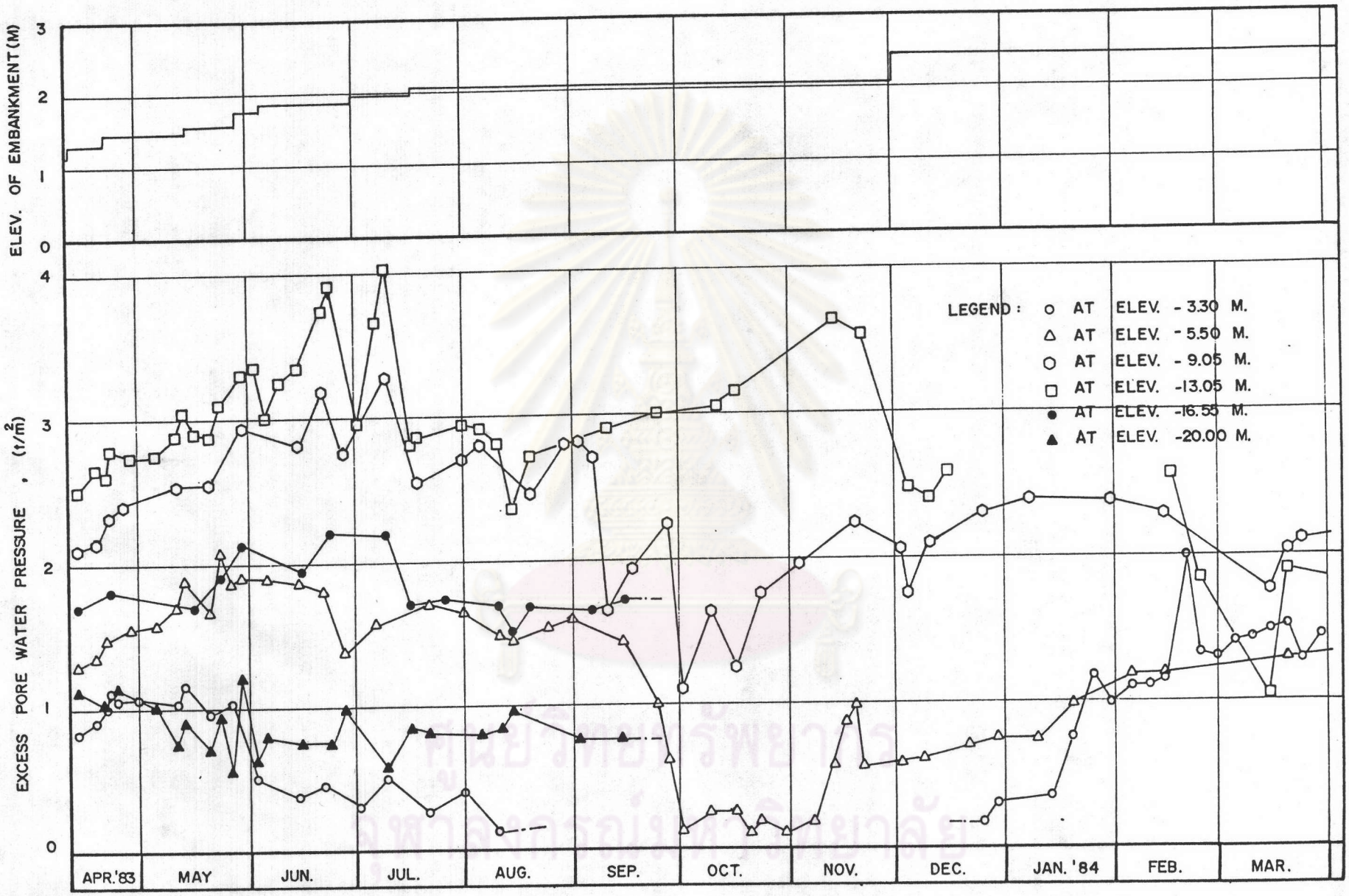
3.2.3 การวัดการทรุดตัวของถนนในระหว่างการก่อสร้าง

ในระหว่างการก่อสร้างถนนสายนี้ ปี 1969 ได้มีการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับการทรุดตัวของถนนมาโดยตลอดจนถึงปี 1979 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าถนนอยู่ในระดับที่ต่ำมาก และน้ำเริ่มจะท่วมถนนบ้างแล้วในฤดูฝน ฉะนั้นจึงมีการปรับปรุงถนนใหม่โดยการยกระดับถนนให้สูงขึ้นจากเดิมประมาณ 2.0 ม. พร้อมทั้งสร้าง berm ข้าง ๆ ถนนเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของถนน ระหว่างก่อสร้าง (เมษายน 2526 ถึง พฤษภาคม 2527) ได้มีการเก็บข้อมูลการทรุดตัวของถนนโดยการวัดการทรุดตัวจาก settlement plateที่กึ่งกลางถนน รูปที่ 3.7 ข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่จะถูกนำไปวิเคราะห์หาอัตราการทรุดตัวและปริมาณการทรุดตัวโดยวิธีการของ Asaoka

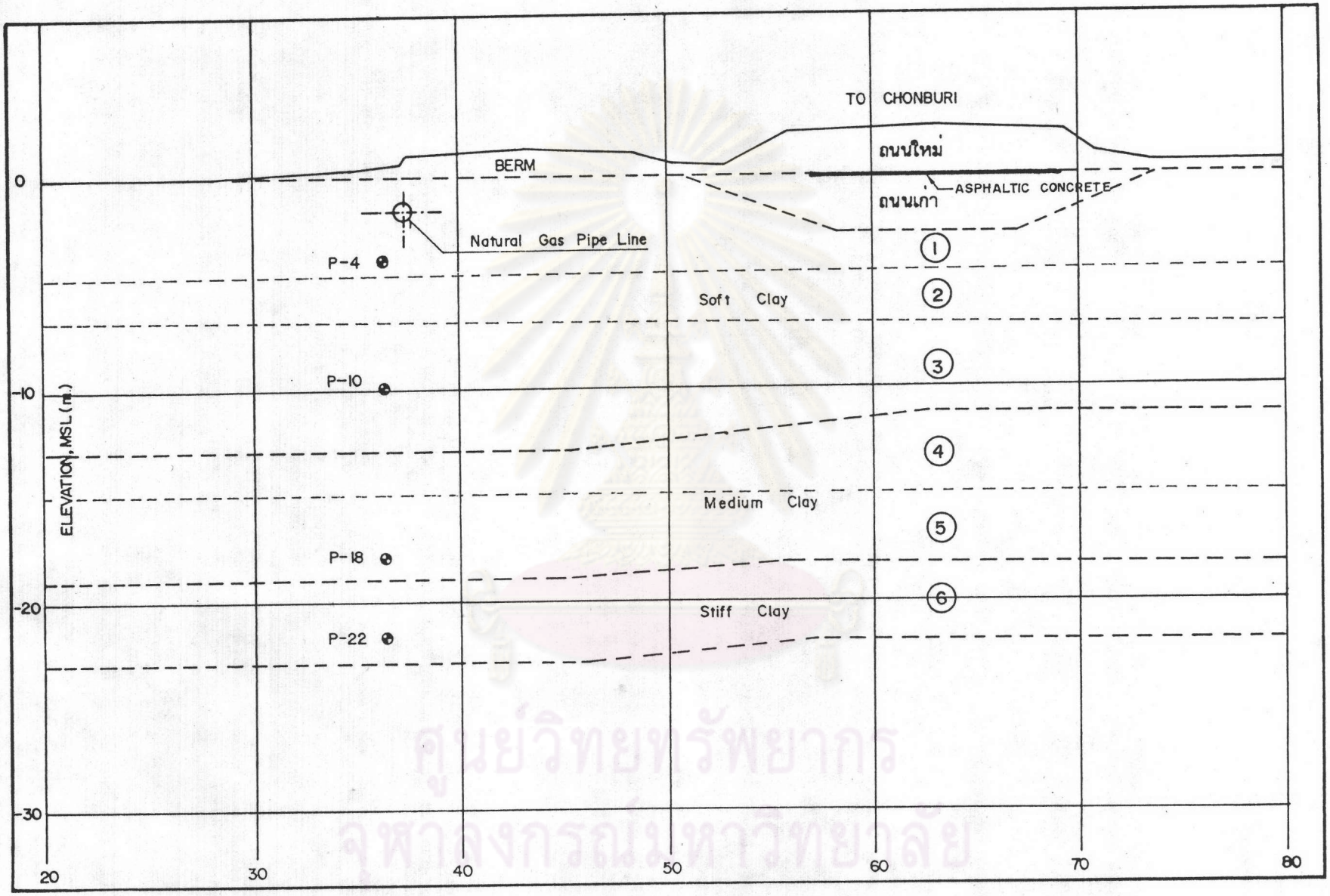
3.3 การทดลองหาสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินที่เก็บมา

การทดลองเหล่านี้เพื่อการจำแนกชนิดของดินให้ชัดเจนขึ้น ง่ายต่อการอ้างอิง และการวิเคราะห์ ประกอบด้วยการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. ปริมาณความชื้นในธรรมชาติ (Natural Moisture Content)
2. Atterberg Limit

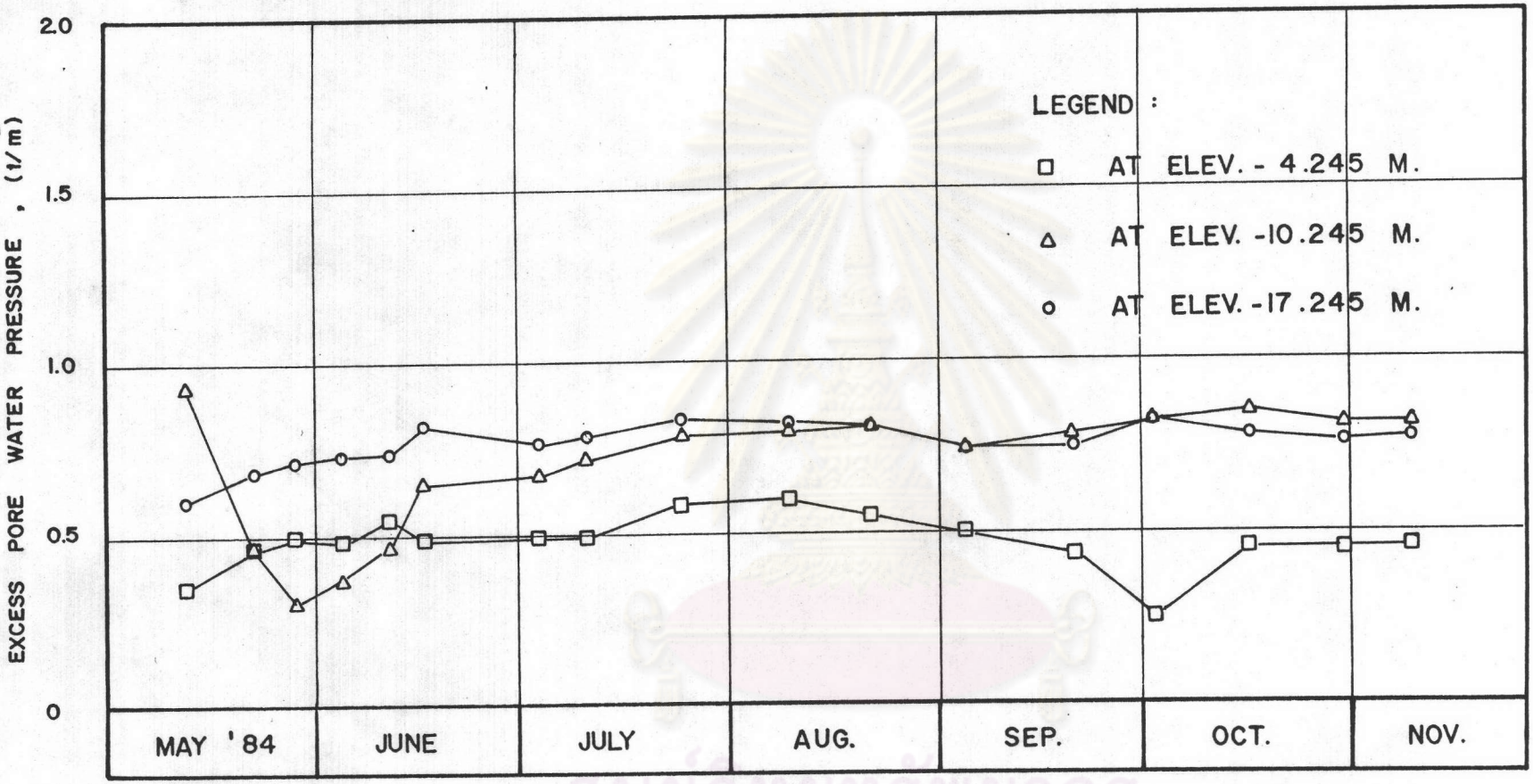


รูปที่ 3.3 แสดงอัตราการถมถนน และค่าความดันน้ำโพรงเพิ่ม ที่ใต้กึ่งกลางถนนต่อเติมใหม่



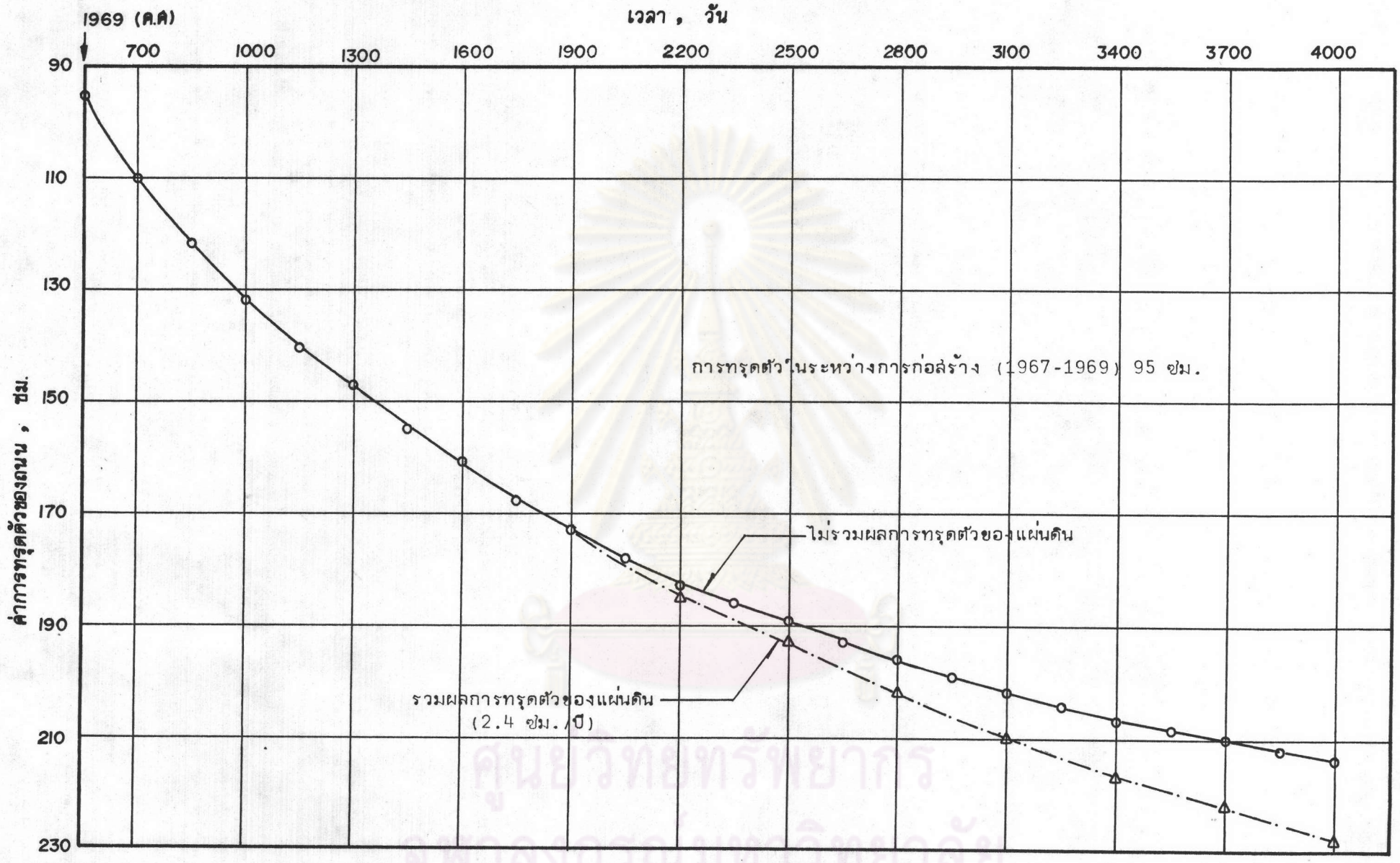
รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้ง piezometer ที่ขอบ berm รูปแบบหน้าตัดของถนนและการแบ่งชั้นดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

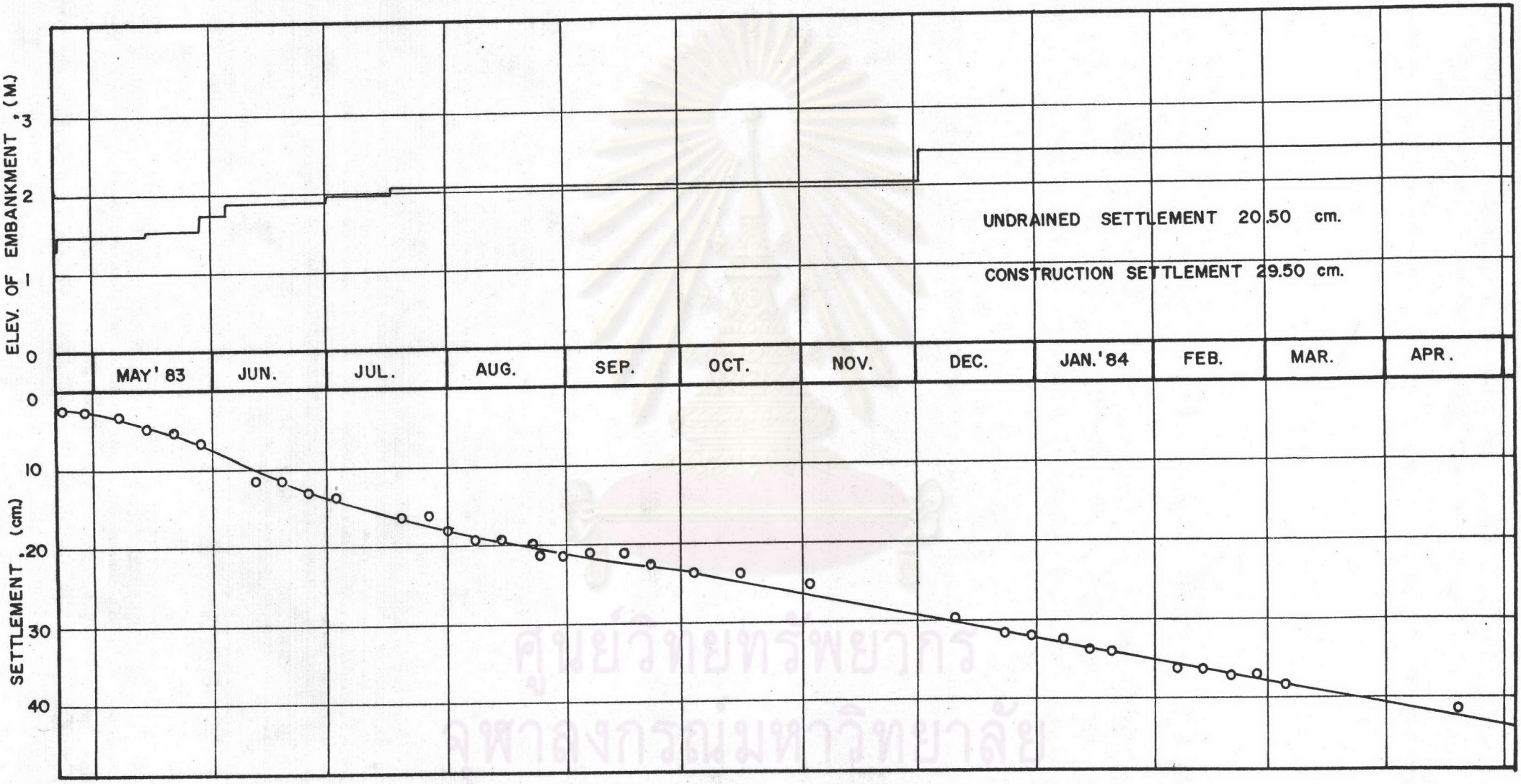


รูปที่ 3.5 ค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มที่ใต้ขอบ berm กม.30 บางนา-บางปะกง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการทรุดตัวของถนนเก่า (1969) ที่กม.30 บางนา-บางปะกง



รูปที่ 3.7 แสดงอัตราการถมถนนและค่าการทรุดตัวที่วัดได้ในส่วนของถนนต่อเติมใหม่ (1983) ที่ กม.30 บางนา-บางปะกง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ความหนาแน่นเปียก (Wet Density)

หลังจากที่รู้ค่าความหนาแน่น และความดันน้ำในโพรงดินจากหัวข้อ 3.2.2 ก็จะทำให้รู้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ตามธรรมชาติของดินได้ ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการหาประวัติของหน่วยแรง (Stress History) เมื่อรู้ค่าหน่วยแรงสูงสุดในอดีต ($\bar{\sigma}_{vm}$) จากหัวข้อ 3.4 และผลการทดลองเหล่านี้จะเป็นพื้นฐาน นำไปสู่การทดลอง stress path ในหัวข้อ 3.5

3.4 การทดลองการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ (One-Dimension Consolidation Tests)

3.4.1 การทดลองการอัดตัวคายน้ำ โดยการเพิ่มน้ำหนักที่เวลาที่จุดสิ้นสุด การยุบตัวครั้งแรก (Load Increment Duration = t_{100}) ซึ่งค่า t_{100} จะหาโดยวิธี Taylor

การทดลองอันนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการหาหน่วยแรงสูงสุดในอดีต สัมปัติการยุบตัว และสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ การทดลองจะทำตามมาตรฐาน ASTM D 2435 - 65 T (ยกเว้นเวลาที่ใช้ในการเพิ่มน้ำหนัก) โดยใช้เครื่องมือแบบ Lever arm (Lever Arm Type Consolidometer) container ที่ใส่ตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เป็นแบบยึดแน่น (Fixed-ring Container) การเพิ่มน้ำหนัก จะกระทำเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ (t_{100}) โดยวิธีการของ Taylor

3.4.2 การทดลองการอัดตัวคายน้ำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2435-65 T

การทดลองนี้เป็นการหาทั้งพารามิเตอร์ ตามที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.1 และสัมปัติการยุบอัดตัวครั้งที่สอง การเพิ่มน้ำหนัก จะเพิ่มขึ้นทีละเท่า (Load Increment Ratio = 1) โดยใช้ช่วงเวลาการเพิ่มน้ำหนักเท่ากับ 24 ชม. (Load Increment Duration = 24 ชม.)

3.5 การทดลองไตรแอกเซียล (Triaxial) จำลองระบบของหน่วยแรงในสนาม

การทดลองนี้เป็นการหาความเครียดในแนวแกน (Axial Strain) โดยการจำลองระบบของหน่วยแรงในสนามอันเนื่องมาจากน้ำหนักของดินอ่อน และคันทาง (ค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรง เนื่องจากแรงกระทำที่ผิวดินหาได้จาก influence charts ของ Poulos, 1967b กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.6) ความเครียดในแนวดิ่งที่ทดลองได้จะนำไปคำนวณหาค่าการทรุดตัวของถนน ประกอบด้วยความเครียดในสภาพอันเดรน และเดรน หรือการอัดตัวคายน้ำ (Con-

solidation)

ระบบของหน่วยแรง แบ่งการคำสองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. หน่วยแรงในสภาพธรรมชาติ (In-situ Condition) รูปที่ 3.8 ก.

$$\bar{\sigma}_{vo} = \sum_{i=1}^{i=n} \gamma_i H_i - U_o$$

$\bar{\sigma}_{ho}$ = Ko $\bar{\sigma}_{vo}$, Ko หาได้โดยใช้สมการที่ 2.21 และ 2.22

γ_i = ความหนาแน่นเปียกของดินชั้นที่ i

H_i = ความหนาของชั้นดินชั้นที่ i

U_o = ความดันน้ำในโพรงดินที่จุดที่พิจารณา

2. หน่วยแรงจากถนนเก่าที่ก่อสร้างในปี 1969 รูปที่ 3.8 ข.

หน่วยแรงกระทำที่ผิวดินมีค่าเท่ากับผลคูณ ของหน่วยความหนาแน่นของดินถมถนน กับความหนาของถนนเก่าลบด้วยค่าความดันน้ำในโพรงดิน ที่ระดับที่ถนนสัมผัสผิวดิน

$$p = \gamma . t_E - \gamma_w . h_w = 3.5 \text{ ตัน/ตร.เมตร}$$

γ = หน่วยความหนาแน่นของดินถมถนน

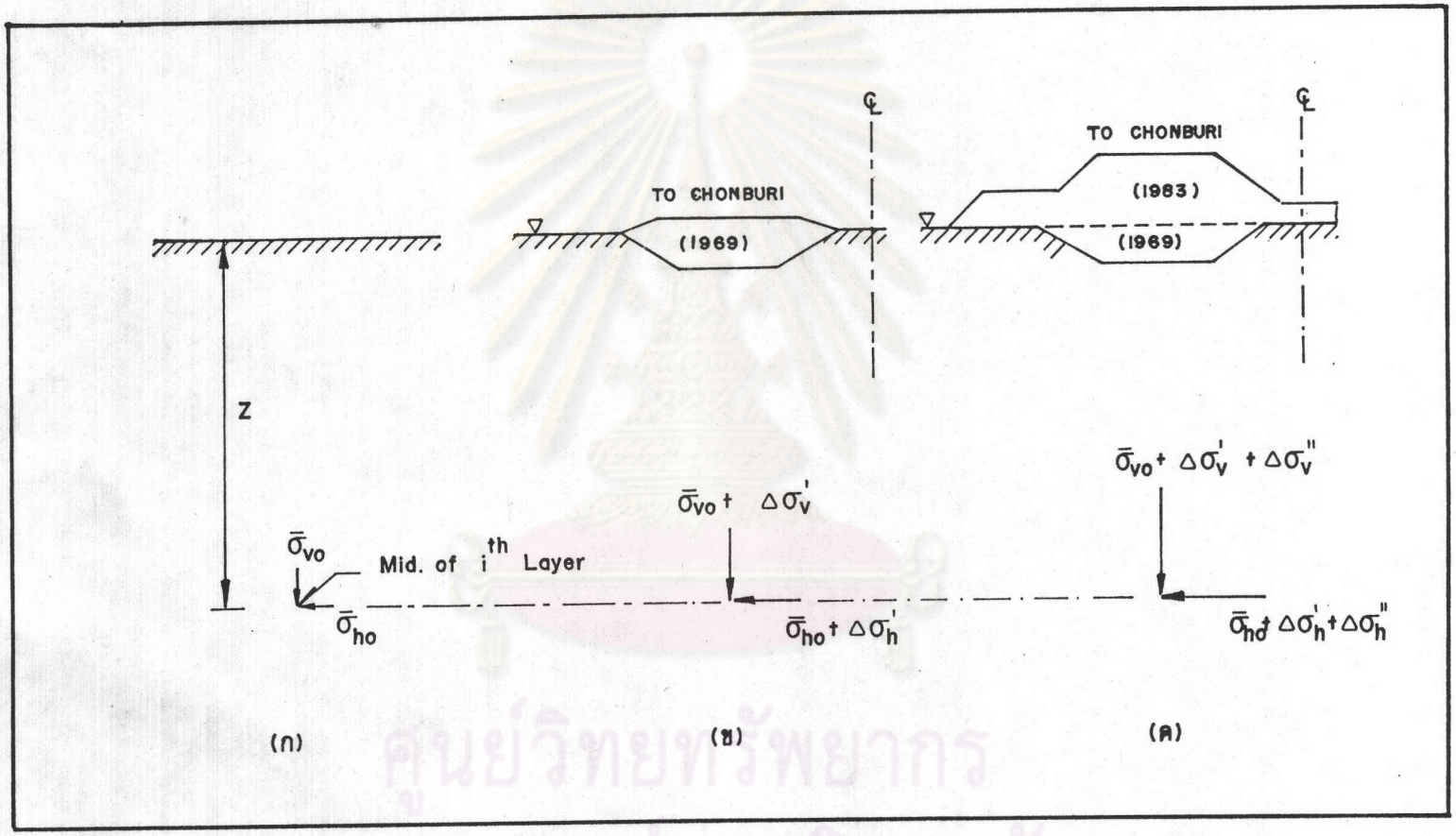
t_E = ความหนาของคันทาง

γ_w = ความหนาแน่นของน้ำ

จากค่าหน่วยแรงกระทำที่ผิวดิน และรูปร่างของหน่วยแรง ทำให้เราสามารถที่จะหา $\Delta\sigma_v'$ และ $\Delta\sigma_h'$ ได้จากสมการที่ 2.23, 2.24 และใช้ influence chart ของ Poulos (1967 b)

3. หน่วยแรงจากการปรับปรุงถนน ปี (1983) รูปที่ 3.8 ค.

$\Delta\sigma_v''$ และ $\Delta\sigma_h''$ หาได้โดยวิธีเดียวกับที่กล่าวในหัวข้อ 2 ข้างบน แต่หน่วยแรงกระทำที่ผิวดินได้แบ่งคิดเป็น 2 ส่วน กล่าวคือ ส่วนหนึ่งเป็นหน่วยแรงจากถนนปรับปรุงใหม่ (p = 5.04 ตัน/ตร.เมตร) และอีกส่วนเป็นหน่วยแรงจาก berm (p = 2.44 ตัน/ตร.เมตร) ฉะนั้น $\Delta\sigma_v''$ และ $\Delta\sigma_h''$ ที่ใต้กึ่งกลางถนนจึงเป็นผลรวมของหน่วยแรงที่เกิดจากหน่วยแรงกระทำที่ผิวดินทั้งสอง



รูปที่ 3.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงระบบของหน่วยแรงเนื่องจากการก่อสร้างถนนเก่า (1969) และการปรับปรุงถนนใหม่ (1983)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการวิเคราะห์หาหน่วยแรง ผู้วิจัยได้ทำการดัดแปลงรูปร่างหน้าตัดของถนนให้เป็นรูปแบบง่าย ๆ ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวข้างบน

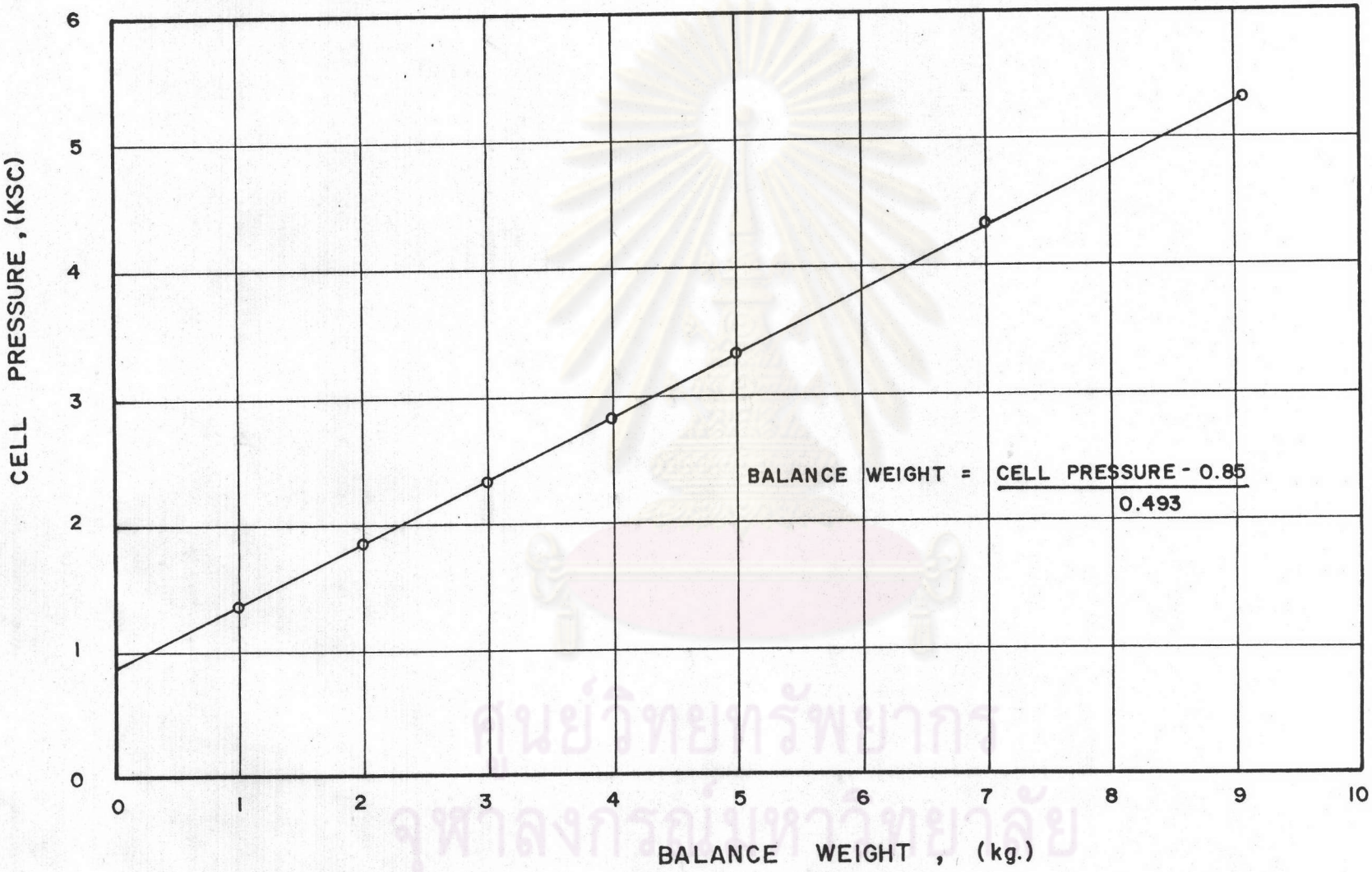
รายละเอียดการทดลองไตรแอกเซียล จำลองระบบหน่วยแรงในสนาม

1. การหาค่าน้ำหนักที่สมดุลย์ กับแรงดันเซลล์ (Require Weight to Balance Cell Pressure)

การจำลองหน่วยแรงในสนาม ซึ่งเป็นแบบแอนไอโซทรอบปิก (Anisotropic) คือ หน่วยแรงในแนวดิ่ง และแนวราบไม่เท่ากัน เพื่อรักษาๆ แอนไอโซทรอบปิกประจำตัว (Inherent Anisotropy) หรือหน่วยแรงที่เกิดจากแรงกระทำที่ผิวดินทำให้เกิดแอนไอโซ-ทรอบปิก (Stress Induce Anisotropy) การจำลองระบบของหน่วยแรง โดยใช้ความดันเซลล์ (Cell Pressure) เพียงอย่างเดียวไม่อาจจะทำได้ จำต้องมีการใส่หน่วยแรงในแนวดิ่งเพิ่มขึ้น แต่ก่อนจะใส่หน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น จะต้องรู้ก่อนว่า จะต้องใช้น้ำหนักเท่าไร ในการสมดุลย์กับแรงดันเซลล์ ที่จะทำให้ piston ใน cell ลอยตัวขึ้น ซึ่งจะทำได้โดยการเตรียมเครื่องมือการทดสอบไตรแอกเซียล ให้เหมือนกับการทดลองจริง แต่ไม่ใส่ตัวอย่างดิน ใส่น้ำหนักแขวนไว้บน loading piston ติดตั้ง dial gauge ไว้ที่ loading piston เพิ่มความดันน้ำในเซลล์ โดยปั๊มมือ (Hand pump) จนกระทั่ง dial gauge เริ่มขยับ จดค่าความดันน้ำในเซลล์ และน้ำหนักที่แขวนขณะนั้นไว้ และเพิ่มน้ำหนักแขวนขึ้นไปอีก ทำการทดลองซ้ำตามที่ได้กล่าวมาแล้ว เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักแขวน และความดันน้ำในเซลล์ รูปที่ 3.9 ซึ่งเราจะนำไปใช้ในการทดลองไตรแอกเซียลจำลองระบบหน่วยแรงในสนามต่อไป

2. การทำให้ดินอิ่มน้ำ (Saturation)

หลังจากการเตรียมตัวอย่าง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 ซม. สูง 7.0 ซม. ลงในเครื่องไตรแอกเซียล เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การทำให้ดินอิ่มน้ำ ซึ่งจะกระทำได้โดยการอัด back pressure เท่ากับ 2.0 กก.ต่อ ซม^2 ซึ่งเพียงพอสำหรับการละลายฟองอากาศ ระหว่างตัวอย่างดินกับเยื่อยาง (Rubber Membrane) และเพื่อป้องกันการพิบัติของตัวอย่าง เราจำเป็นต้องอัดความดันเซลล์ให้สูงกว่า back pressure เล็กน้อยประมาณ 0.1 กก.ต่อ ซม^2 การทำให้ดินอ่อนอิ่มน้ำ จะกระทำโดยทิ้งไว้ให้อยู่ในสภาพ ดังได้กล่าวข้างต้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันเซลล์ และน้ำหนักแขวน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

เนื่องจากตัวอย่างดินที่จะทดลองเป็นดินอ่อนมาก มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องอัดตัวคายน้ำ แบบไอโซทรอบปิก (Isotropic Consolidation) ก่อน แล้วจึงอัดตัวคายน้ำ แบบ Ko ในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนการจำลองหน่วยแรงประสิทธิผลในสภาพธรรมชาติ (In-situ Effective Stress Condition) โดยให้

$\bar{\sigma}_{ho}$ = cell pressure-back pressure (Isotropic Consolidation)

$\bar{\sigma}_{vo} = \bar{\sigma}_{ho} + \Delta\sigma_{vo}$ (Ko-Consolidation)

$\Delta\sigma_{vo}$ = คือ ผลต่างของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง กับแนวราบตามธรรมชาติ

$$= \{(\bar{\sigma}_{vo}-\bar{\sigma}_{ho}) + \frac{\text{น้ำหนักที่ลมดุลย์แรงดันเซลล์รูปที่ 3.9}}{A}\}$$

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินที่ปรับแก้แล้ว

$\bar{\sigma}_{vo}$ = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ

$\bar{\sigma}_{ho}$ = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบตามธรรมชาติ

(สมการที่ 2.18, 2.21, และ 2.22)

4. การทดสอบตัวอย่างโดยเพิ่มแรงอัด (Compression Test)

ขั้นตอนนี้จะกระทำหลังจากแน่ใจแล้วว่าตัวอย่างดินถูกอัดตัวคายน้ำ 100% แล้ว ซึ่งอาจจะตรวจสอบได้จากการวัดค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มในมวลดิน โดยการปิดวาล์ว back pressure หลังจากปิดวาล์วแล้วค่าความดันน้ำในโพรงดินควรจะคงที่ (2.0 กก.ต่อ ซม^2) ซึ่งอ่านค่าได้จากจอของ Digital Transducer Meter โดยจะแปลงสัญญาณความดันจาก transducer มาเป็นตัวเลขบนจอของ digital

การทดสอบขั้นตอนนี้จะกระทำโดยการใส่หน่วยแรงในแนวราบ ($\Delta\sigma_h$) และแนวดิ่ง ($\Delta\sigma_v$) ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเค้นกระทำที่ผิวดิน ซึ่งคำนวณได้โดยใช้ influence chart ของ Poulos, 1967 b ให้กระทำต่อตัวอย่าง โดยการปิดวาล์ว back pressure วัดค่าการเคลื่อนตัวของดินในแนวดิ่ง และความดันน้ำในโพรงดิน เพื่อตรวจสอบหน่วยแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้น การใส่หน่วยแรงให้แก่ดินตัวอย่างจะค่อย ๆ เพิ่มทีละน้อย จนกระทั่งถึงหน่วยแรงสุดท้าย ที่คำนวณได้เป็นอันสิ้นสุด ขั้นตอนของอันเดรน โดยจะบันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง

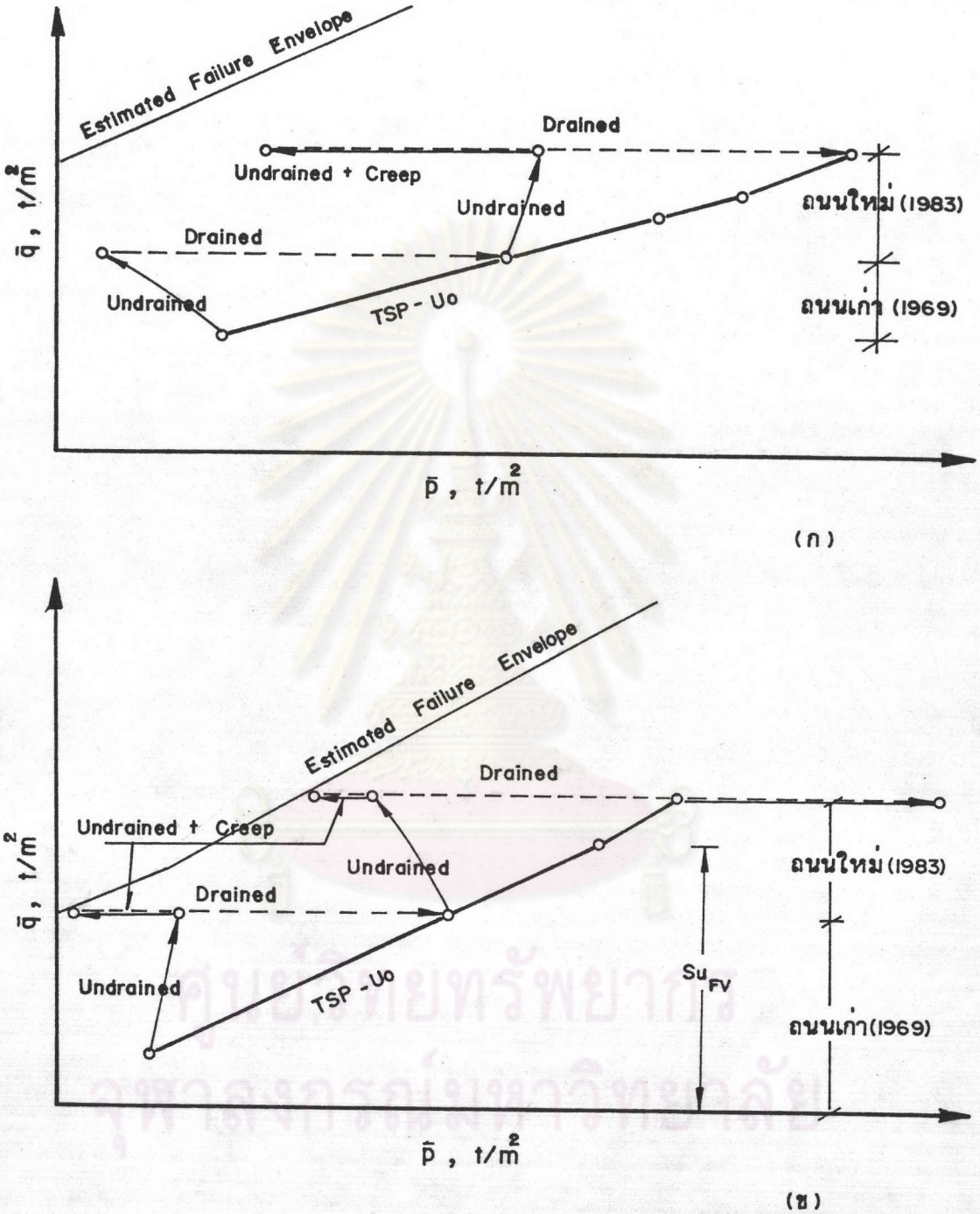
และค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มในโพรงดิน ต่อไปอีกจนกระทั่ง อัตราการเพิ่มน้อยมาก หรือถือว่าไม่เพิ่มอีกเลย จึงเริ่มเปิดสาย back pressure เพื่อให้น้ำไหลออกจากตัวอย่างดินเป็นการเริ่มขบวนการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งเราจะวัด การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน จากขั้นตอนทั้งสอง คือ ในสภาพอันเดรน และเดรน หรือการอัดตัวคายน้ำ เราจะได้ค่าความเครียดในแนวดิ่ง 2 ค่า คือ ε_{iu} และ ε_{ic} ผลรวมของความเครียดทั้งสอง คือ ค่าความเครียดรวม ε_1 ซึ่งเราจะนำไปวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวรูปที่ 3.10 ก. แสดง stress path ในกรณีที่ตัวอย่างดินไม่เกิดการพิบัติ และรูปที่ 3.10 ข. ในกรณีที่ดินเกิดการพิบัติ ซึ่งในระหว่างที่ใส่หน่วยแรงให้กระทำกับตัวอย่างดิน ถ้ายังไม่ถึงหน่วยแรงสุดท้าย แต่ตัวอย่างดินเกิดการพิบัติก่อน เราจะใส่หน่วยแรงในแนวดิ่ง และแนวราบที่เหลืออยู่ โดยการเพิ่มความดันเซลล์เพียงอย่างเดียว โดยให้ความดันเซลล์ที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เหลืออยู่ เป็นการจำลองหน่วยแรง ซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ว่าเมื่อดินเกิดการพิบัติ (หน่วยแรงเฉือนมีค่าเท่ากับกำลังรับแรงเฉือน) หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแนวราบจะเท่ากับหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น (D' Appolonia et al., 1971) ค่าหน่วยแรงเฉือน จะมีค่าคงที่ (TSP-Uo จะเคลื่อนไปทางขวาโดยหน่วยแรงเฉือนมีค่าคงที่) ระหว่างที่เพิ่มความดันเซลล์จะต้องใส่น้ำหนัก ที่ loading piston ให้สมดุลย์กับความดันเซลล์ที่เพิ่มขึ้นด้วย และจะเริ่มขบวนการอัดตัวคายน้ำ โดยการเปิดวาล์วของ back pressure ที่เชื่อมต่อกับระบบวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และระบบชดเชยความดัน (Self Compensating Mercury Column System) เมื่อการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของดิน มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจนอาจเกิดระนาบของการพิบัติ (Failure Plane) ได้

ค่าที่จดบันทึกจากการทดลอง จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของดิน คือ ค่าโมดูลัส์ แห่งความยืดหยุ่น แบบอันเดรน (Eu) ค่าพารามิเตอร์ A และ μ ค่าโมดูลัส์แห่งความยืดหยุ่นแบบเดรน ($\bar{E}$) อัตราส่วนปัวซอง (ν) และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (C_v)

<u>ในสภาพไม่ระบายน้ำ</u>

$$Eu = \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}{\varepsilon_{1u}} \qquad .....(3.1)$$

$$A = \frac{\Delta u - \Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3} \qquad .....(3.2)$$



รูปที่ 3.10 แสดง stress pathของดินที่ไม่เกิดการพิบัติ และเกิดการพิบัติ

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} \qquad .....(3.3)$$

ในสภาพระบายน้ำ

$$\bar{E} = \frac{(\Delta\bar{\sigma}_1 - \Delta\bar{\sigma}_3)(\Delta\bar{\sigma}_1 + 2\Delta\bar{\sigma}_3)}{\varepsilon_1(\Delta\bar{\sigma}_1 + \Delta\bar{\sigma}_3) - 2\varepsilon_3\,\Delta\bar{\sigma}_3} \qquad .....(3.4)$$

$$\nu' = \frac{\varepsilon_1\,\Delta\bar{\sigma}_3 - \varepsilon_3\,\Delta\bar{\sigma}_1}{\varepsilon_1(\Delta\bar{\sigma}_1 + \Delta\bar{\sigma}_3) - 2\varepsilon_3\,\Delta\bar{\sigma}_3} \qquad .....(3.5)$$

$$C_v = \frac{T_v R^2}{t} \qquad .....(3.6)$$

$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$ = การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงรวมตามแนวแกนและแนวรัศมี

ε_{1u} = ความเครียดในแนวแกนในสภาพไม่ระบายน้ำ

$\Delta\bar{\sigma}_1, \Delta\bar{\sigma}_3$ = การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวแกน และแนวรัศมี

ε_v = ความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric Strain)

$\varepsilon_1, \varepsilon_3$ = ความเครียดตามแนวแกนและแนวรัศมี, $\varepsilon_3 = \frac{1}{2}(\varepsilon_v - \varepsilon_1)$

T_v = ตัวประกอบของเวลาเท่ากับ 0.0479 และ 0.259 เมื่อเปอร์เซนต์ของการอัดตัวคายน้ำเป็น 50% และ 90% ตามลำดับ

R = รัศมีของตัวอย่างดินที่ใช้ทดลอง

รายละเอียดและเทคนิคของการเตรียมตัวอย่าง และการทดลองปลีกย่อยได้ถูกกล่าวไว้ในวิทยานิพนธ์ของดำรงค์ (2526), ฐิติ (2527) และไพบูลย์ (2527) การเพิ่มแรงอัด (Compression Test) จะกระทำ 2 ครั้ง ครั้งแรกเป็นการจำลองระบบของหน่วยแรงเนื่องจากถนนเก่า (1969) ซึ่งจำลองระบบของหน่วยแรงในสภาพที่เกิดการอัดตัวคายน้ำสมบูรณ์แล้ว ฉะนั้นหน่วยแรงกระทำที่ผิวดินจึงมีค่าต่ำ ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดลองจึงไม่ถูกต้องตามความเป็นจริงนัก ครั้งที่สองเป็นการจำลองระบบของหน่วยแรงเนื่องจากถนนต่อเติมใหม่ (1983) ซึ่งระบบของหน่วยแรงที่จำลองถือว่าใกล้เคียงกับสภาพจริงที่สุด ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดลองขั้นตอนนี้ ถือเป็นหัวใจของการวิจัยในครั้งนี้

3.6 การทดลองหากำลังรับแรงกดของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำ แบบ Ko ด้วยเครื่องไตรแอกเซียลในสภาพไม่ระบายน้ำ พร้อมทั้งวัดค่าความดันน้ำในโพรงดิน (Ko-Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement, $\overline{CKoU}$-TC Test)

การทดลองอันนี้เป็นการหา normalized effective stress failure envelope ของดินอ่อน ใช้ในการควบคุมการใส่หน่วยแรงให้กับตัวอย่างดินในการทดสอบ stress-path

การทดสอบจะเริ่มจากการอัดตัวคายน้ำ แบบ Ko ที่ OCR ที่ต้องการ (ในการทดลองนี้จะกระทำที่ OCR = 1,2,3 และ 4) แบบ recompression จากนั้น ทำการเพิ่มหน่วยแรงในแนวดิ่ง ด้วยอัตราความเครียด 1% ต่อชั่วโมง (Ladd & Foott, 1974) ในสภาพอันเดรน โดยการปิดวาล้ว back pressure จนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการพิบัติ (ใช้ตัวอย่างดินจากหลุม DB-1) บันทึกค่าหน่วยแรงในแนวดิ่ง และความดันน้ำโพรงเพิ่มตลอดการทดลอง

3.7 การทดลองหากำลังรับแรงกดของดิน ที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำ ด้วยเครื่องไตรแอกเซียลในสภาพไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test, UU Test)

การทดลองแบบ UU กระทำกับตัวอย่างดินที่ได้จากหลุม DB-2 (ที่ $\mathbb{C}$ ของถนน) โดยใช้ความดันเซลล์ เท่ากับหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (Total Overburden Pressure, σ_{vo}) ใช้อัตราความเครียดในการทดสอบที่ทำให้ดินอ่อนเกิดการพิบัติเท่ากับ 15% ต่อชั่วโมง ผลที่ได้จากการทดลอง จะนำไปใช้ในการตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน ที่ได้จากการทดสอบ field vane shear และการคาดคะเนการทรุดตัวแบบอันเดรน โดยวิธีปฐพีกลศาสตร์พื้นฐาน (D' Appolonia et al., 1971)

ตารางที่ 3.1 ได้สรุปจำนวนการเจาะสำรวจ และการทดสอบดินทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณการเจาะสำรวจและการทดลอบดิน

ปริมาณการเจาะสำรวจดิน

เจาะสำรวจดิน 2 หลุม - ขอบ BERM ติดทุ่งนา 1 หลุม (DB-1)

- กลางถนน 1 หลุม (DB-2)

ปริมาณการทดลอบ และการเก็บข้อมูลในสนาม

1. การทดลอบ Field Vane Shear - กลางถนน 2 หลุม (DV-3, DV-4)

- ขอบ BERM ด้านติดถนน 1 หลุม (DV-1)
- ขอบ BERM ด้านติดทุ่งนา 1 หลุม (DV-2)

2. ติดตั้ง Piezometer ที่ระดับความลึก -4.245, -10.245, -18.245, -20.934 ม. และทำการวัดและบันทึกข้อมูลทุก ๆ สัปดาห์ (พ.ค.- พ.ย. 1984)

ปริมาณการทดลอบดินในห้องปฏิบัติการ

ชนิดของการทดลอบ	ความลึกของตัวอย่างดิน ที่ทดลอบ , ม.	จำนวนที่ทำการทดลอบ
1. Stress Path Test	(DB-1): -1.40, -2.80, -7.20, -10.00, -16.25, -19.25	6
2. Consolidation Test		
2.1 LID = t_{100}	(DB-1): -1.00, -2.50, -4.00, -7.00, -8.50, -10.00 -11.50, -13.00, -16.00, -19.00, -22.00	11
	(DB-2): -3.50, -4.60, -6.00, -9.00, -15.00, -19.50	6
2.2 LID = 24 hrs.	(DB-2): -3.50, -6.35, -9.30, -12.10, -19.50	5
3. $\overline{CK_0U}$ - TC Test	(DB-1): -4.10, -5.80, -5.90, -13.50	4
4. UU Test	(DB-2): -3.75, -4.80, -6.25, -9.20, -12.20, -15.60 -19.70, -21.20	8
5. Atterberg Limit	-1.00, -2.50, -4.00, -7.00, -8.50, -10.00, -13.00, -16.00, -19.00, -22.00 (DB-1)	10