บทที่ 2

แนวเหตุผลทฤษฎีและสมมุติฐานที่สำคัญ

2.1 อิทธิพลของ Weathering ที่มีต่อดินเหนียว (Infuence of Weathering process in Clay

อิทธิพลที่สำคัญ ได้แก่ chemical weathering ซึ่ง KENNEY (1975) ได้ให้คำจำกัดความว่า Weathering เป็นกรรมวิธีที่ Geological materials เกิดการ disintegration และ decomposition ภายใต้สภาวะของ hydrosphere และ atmosphere การเกิด disintegration เป็นการ break down ของโครงสร้างของมวลสารทางฟิสิกส์ decomposition เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพวก Constituent materials และ matrix materials ผลจากการเกิด Weathering ต่อมวลดิน พิจารณาได้ 2 กรณี คือ

1) การเกิด decomposition ของแร่ธาตุ (mineral)

2) การเกิด ion exchange

สำหรับอิทธิพลสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่ออัตราการเกิด Weathering ประกอบด้วย สภาพความเป็นกรด (pH value) ค่า redox potential (Eh) และอุณหภูมิ

ส่วนประกอบเริ่มแรกของ ion ใน pore water ของพวก marine clay จะประกอบไปด้วย Na^{+}, K^{+}, Mg^{2+} และ Ca^{2+} ปริมาณความเข้มข้นของ ions จะยังคงรักษาระดับอยู่หลังจากจากปริมาณเกลือได้ถูกชะล้าง (leaching) ไปโดยน้ำฝน ถ้าน้ำฝนที่ซึมลงสู่ดินประกอบไปด้วย CO_2 จะทำให้ค่า pH ใน pore water ลดลง ผลจะทำให้แร่ธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในอนุภาคดินเหนียว (clay particle) เกิด disintegrate ปล่อย ions สู่ pore water (BJERRIUM, 1967) คือ

$$\text{Chlorite} \xrightarrow{\text{release}} Mg^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}$$

$$\text{Feldspar \& Mica (Illite)} \xrightarrow{\text{release}} K^{+}$$

$$\text{Carbonates} \xrightarrow{\text{release}} Ca^{2+}$$

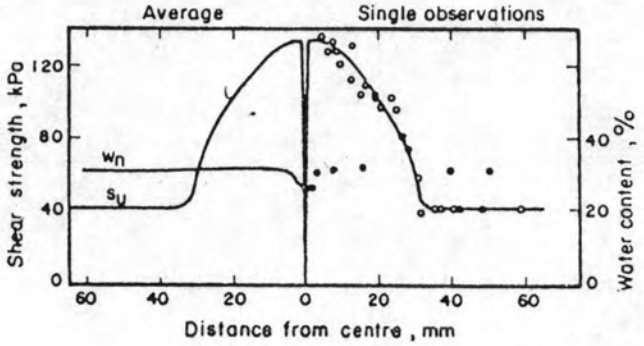
$$\text{Chlorite \& Feldspar} \xrightarrow{\text{release}} Al^{3+}$$

ดังนั้น พวก ions ที่อยู่ใน pore water สามารถ exchange ions ใน diffuse double layer ของ clay particle ซึ่ง Na^+ จะถูกแทนที่โดย K^+ ถ้า K^+ มีความเข้ม-ข้นสูงขึ้น เนื่องจาก decomposition ของ feldspar และ Mica (Illite) ทำนองเดียวกันพวก Polyvalent ions (Ca^{2+}, Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{3+}) จะเข้าไปแทนที่ monovalent ions เป็นผลให้ electronegativeใน diffuse double layer ลดลงและ ions ของเหล็ก (Fe^{2+}, Fe^{3+}) กับ ions ของอลูมิเนียม (Al^{3+}) จะจับตัว-กับพวก hydroxides กลายเป็นพวก Cementing agent พวก hydroxides, $Fe(OH)^+$ นี้จะเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคดินเหนียว(Clay particle) สำหรับ Fe^{2+} ที่อยู่ในส่วนชั้นบนผิวดิน (พวก Weathered crust) จะถูก oxidized เป็น Fe^{3+} และกลายเป็นพวก harder bond

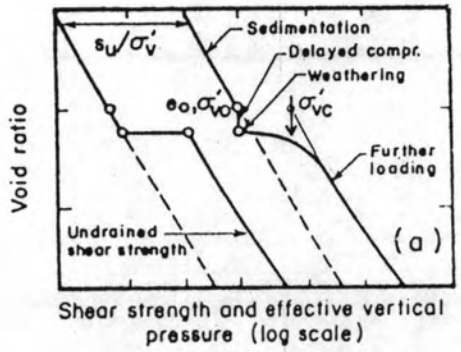
Chemical weathering process มีผลกระทบต่อค่า Plasticity, strength และ compressibility ของดินเหนียวอ่อน (soft clay) ที่สำคัญ คือ ค่า Remold shear strength อันเป็นตัวกำหนด Sensitivity ของดินเหนียว MOUM et al (1971) กล่าวว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่าง ions ของโปตัสเซียมกับ ions ของโซเดียม (K^+/Na^+) เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่าของแรงเฉือนสภาพอันเดรน (undrained shear strength) และพวก Hydroxides ของเหล็กและอลูมิเนียมจะเป็น Cementing agent ที่สำคัญที่เป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ของดินสูงขึ้น

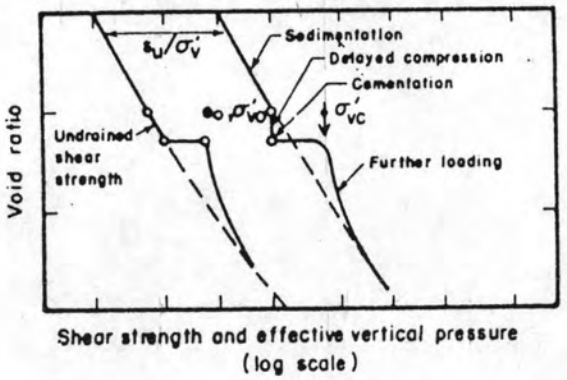
MOUM & ROSENQVIST (1957) ได้แสดงการกระจายของปริมาณน้ำ (water content) และกำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ของดินเหนียวบริเวณรอบ รูของรากพืช (Root holes) ของดินพวก Weathered Clay ใน OSLO พบว่า ค่าของกำลังแรงเฉือนจะสูงมากเมื่อเข้าใกล้บริเวณรู แต่ปริมาณน้ำ (water content) ลดลงบริเวณใกล้กับรูของรากพืช ดังแสดงในรูปที่ 2.1

BJERRUM (1967) ได้สรุปผลของ Weathering ต่อกำลังรับแรงเฉือน (shear strength) และการยุบตัว (compressibility) ของดินเหนียวกล่าวคือ จะให้ค่าแรงเฉือนสภาพอันเดรนสูงขึ้น และจะเพิ่มแรงต้านทานต่อการเคลื่อนตัวของดิน (deformation) โดย



รูปที่ 2.1 แสดงผลของรูของรากพืช (Root hole) ต่อค่ากำลังรับแรงเฉือน และค่าปริมาณน้ำ (Water Content) (Moum & Rosenqvist, 1957)





รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Void ratio และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง บนลอการิทึมสเกล เมื่อมีผลกระทบจาก Weathering และ Cementation (จาก Bjerrum, 1967)

พิจารณาเห็นได้จากค่า apparent precompression ที่มีค่ามากขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

BJERRUM & WU (1969) กล่าวว่า ผลจากการเกิด Weathering ต่อดินจะทำให้ดินนั้นกลายเป็นพวก Slightly over consolidated

2.2 Weathered Bangkok Clay

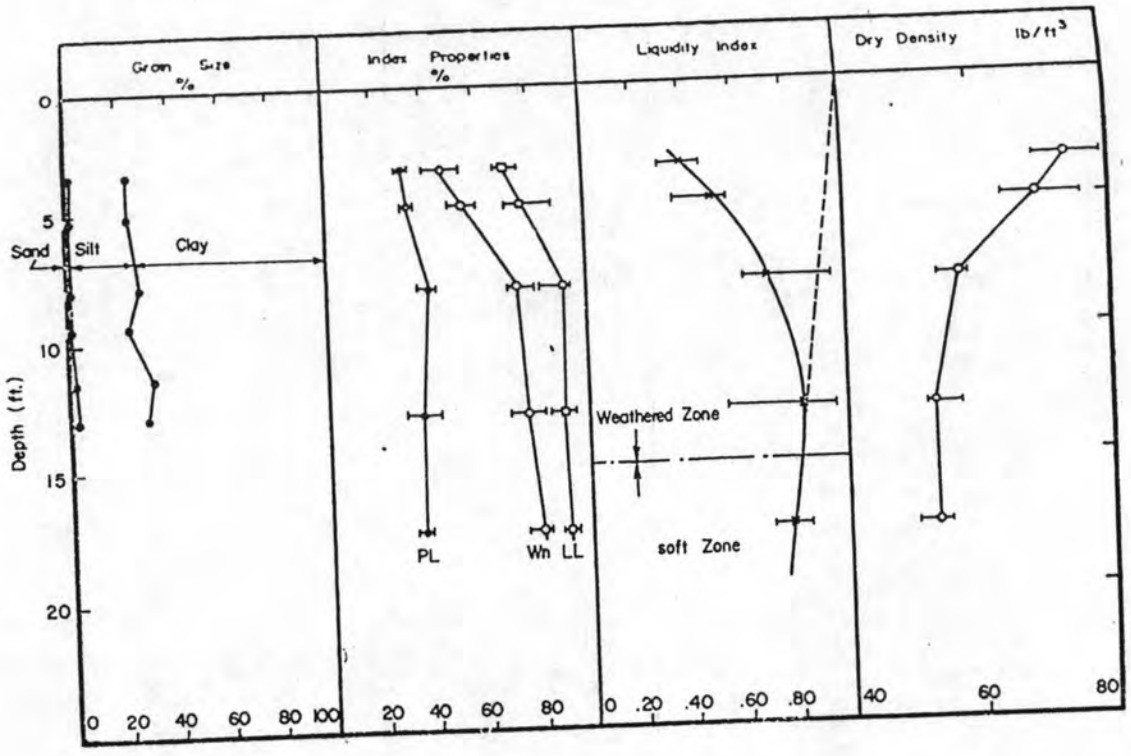
ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ส่วนบนเกิดจาก Terrestrial deposit มีความหนาประมาณ 4-5 เมตร (วสท. 2520) ดินส่วนบนนี้จะถูกแปรสภาพโดยธรรมชาติ จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเป็นส่วนใหญ่ทำให้คุณสมบัติของดินในส่วนบนนี้ เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและดินในชั้นนี้ มีปริมาณเกลือแร่ปนอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว ในช่องว่างของดิน ประมาณ 0-10 กรัม/ลิตร

คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงเกิดจาก Chemical Weathering เช่น Oxidation, ions exchange จะเป็นผลให้ค่า Plastic Index ลดลง ค่า sensitivity สูงขึ้นและค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น คุณสมบัติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปของดินเหนียวกรุงเทพฯ ในส่วนของ Weathered Clay แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4 เป็นคุณสมบัติของดินเหนียวบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) และบริเวณหนองงูเห่า จะพบว่าในส่วนของ Weathered Zone ค่าของ Liquidity Index จะเพิ่มขึ้นตามความลึก และค่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงตามความลึก และในรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณเกลือแร่ในส่วนของ Weathered Zone มีค่าต่ำมาก จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น

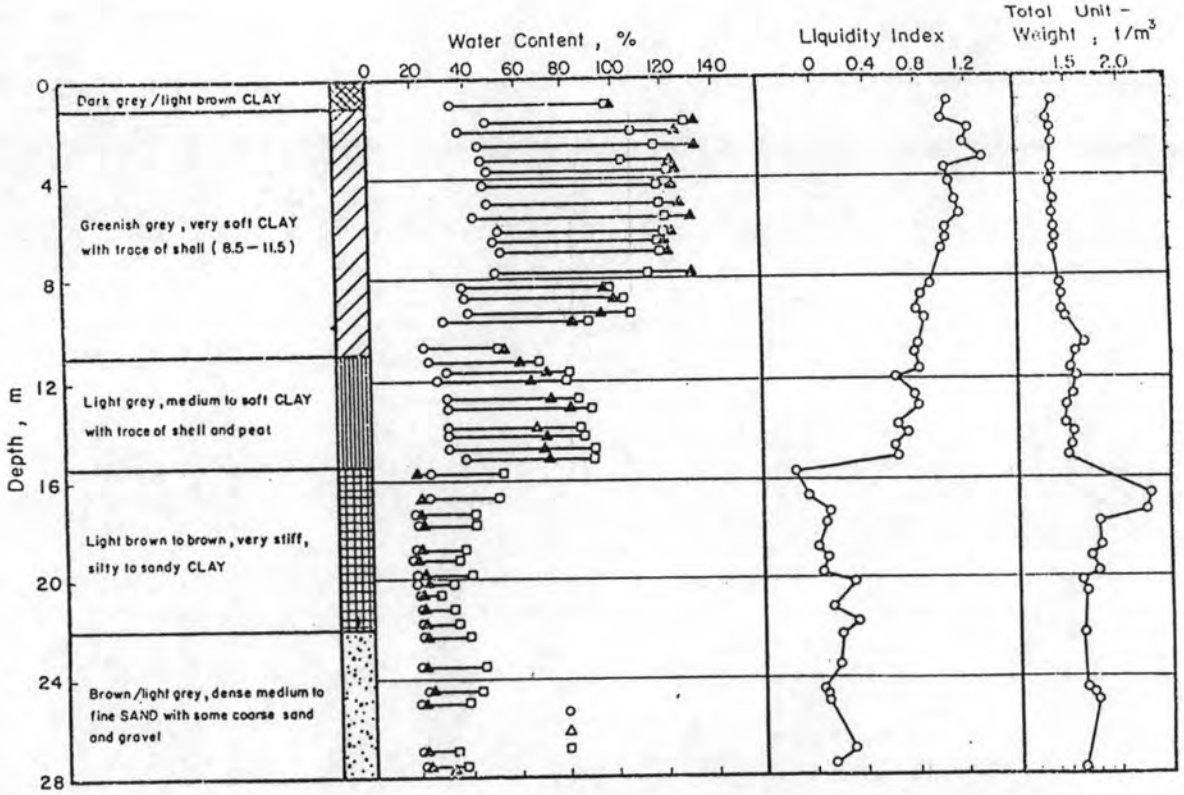
BRAND & KANJANOPHAS (1971) สรุปว่าค่าการยุบตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าสูงขึ้นตามความลึกในชั้น Weathered Zone

2.3 การยุบตัวของดิน (Soil compressibility)

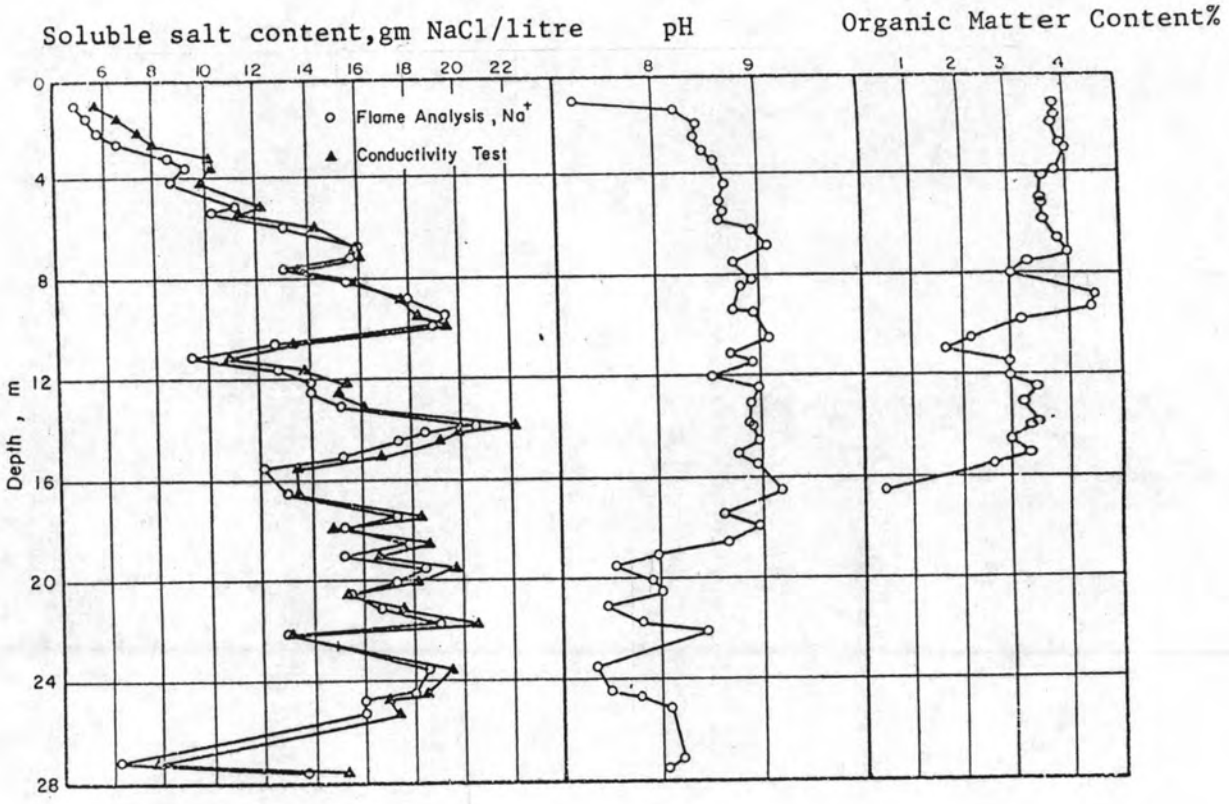
ดินในสภาพโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย ส่วนประกอบของเม็ดดิน เรียกว่า Solid Grains และช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เรียกว่า Void ภายใน Void จะประกอบด้วยน้ำหรืออากาศ หรือทั้งน้ำและอากาศ ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำต่อมวลดิน (soil mass) แรงนั้นจะพยายามกระทำให้เมล็ดดิน (soil particle) จัดเรียงตัวกันให้แน่นขึ้น เป็นผลให้ปริมาตรของมวลดินลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการยุบตัวของเมล็ดดิน หรือเกิดจากการยุบตัวของน้ำและอากาศ



รูปที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)



รูปที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ บริเวณหนองงูเห่า



รูปที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียวกรุงเทพฯ บริเวณหนองงูเห่า

ไหลออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

การเคลื่อนตัวของดินเกิดได้จากหลาย mechanism และขนาดของการยุบตัวของมวลดินจะขึ้นอยู่กับความมั่นคงของโครงสร้างของดิน ดินที่มีโครงสร้างแบบ Flat grain จะมีการยุบตัวมากกว่าดินที่มีโครงสร้างแบบ Spherical grain และดินที่อยู่ในสภาพ Remold state จะมีการยุบตัวมากกว่าดินที่อยู่ใน Natural state (TAYLOR, 1948) กรณี เมื่อแรงที่มากระทำต่อมวลดินที่มีค่า permeability ต่ำเป็นเวลานาน มวลดินจะเกิดการทรุดตัว (settlement) อันเป็นผลจากการที่น้ำถูกขับออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นกับเวลา มีผลให้ปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง เราเรียกการเคลื่อนตัวของดินชนิดนี้ว่า การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (consolidation settlement) แต่กรณีที่แรงมากระทำเป็นแรงกระแทกหรือกด (Tamping or Rolling) เป็นครั้งคราวและมวลดินที่ไม่ Saturated นั้น เกิดการทรุดตัว อันเป็นผลจากอากาศถูกขับออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้ปริมาตรของมวลดินลดลง เราเรียก Compressive Deformation นั้นว่า มาจากผลของการบดอัด (Compaction)

ขนาดการยุบตัวของมวลดิน (Amount of Consolidation Settlement) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Void ratio (e) หรือความเครียดในแนวดิ่ง (εv) กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลการอัดตัวคายน้ำ ($\bar{\sigma}_{vc}$) พิจารณาในเทอมต่าง ๆ ดังนี้

เมื่อใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio (e) กับค่า log $\bar{\sigma}_{vc}$ ค่าอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลง void ratio (Δe) ต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผลการอัดตัวคายน้ำบนลอการิทึมสเกล ($\Delta \log \bar{\sigma}_{vc}$) จะแสดงในเทอมของ Cc, Cr และ Cs คือ

Cc = virgin Compression Index

คือ ค่าความลาดของ Compression Curve ใน virgin region

Cr = recompression Index

คือ ค่าเฉลี่ยความลาดของกราฟ Unloading/Reloading Cycle

Cs = Swell Index

คือ ค่าความลาดของ Rebound Curve

กรณีใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวดิ่ง (εv) กับ log $\bar{\sigma}_{vc}$ ค่าอัตราส่วน

ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวดิ่งต่อ การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผลการอัดตัวคายน้ำบนลอการิทึมสเกล (log $\bar{\sigma}_{vc}$) จะแสดงในเทอมของ CR, RR และ SR คือ

CR = Cc/(1 + eo) คือ ค่า virgin compression ratio

RR = Cr/(1 + eo) คือ ค่า recompression ratio

SR = Cs/(1 + eo) คือ ค่า swell ratio

การแสดงผลของ Load/Compression curve ในเทอมของ $\varepsilon v - \log \bar{\sigma}_{vc}$ มีผลดีดังนี้

1. ค่าความเครียด (εv) คำนวณง่ายกว่าค่า void ratio (e) ซึ่งจะต้องรู้ค่าของความถ่วงจำเพาะ (Gs) และน้ำหนักของเม็ดดิน (Ws)
2. จะให้ผลของกราฟเหมือนกันเปรียบเทียบกันได้ แต่ถ้าเป็นในเทอม e-log $\bar{\sigma}_{vc}$ กราฟที่ได้จะแตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละตัวอย่างของดินทดลองมีค่า initial void ratio (eo) ไม่เท่ากัน
3. การคำนวณหาค่าการทรุดตัว (settlement) จะสะดวก เพราะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด (strain) แต่ถ้าใช้ $\Delta e - \log \bar{\sigma}_{vc}$ การคำนวณหาค่าการทรุดตัวจะต้องทราบค่าของ (1 + eo) เสียก่อน

2.4 แนวเหตุผลทฤษฎีของ Effective Stress

ช่องว่าง (void) ในดินทั่ว ๆ ไป จะประกอบด้วยอากาศและน้ำ สำหรับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil) เมื่อดินได้รับหน่วยแรงภายนอกกระทำเพิ่มขึ้น เรียกว่า หน่วยแรงรวม (total stress) การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร และการเคลื่อนตัวในดินไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงรวม (total stress) ที่เพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผล ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างหน่วยแรงรวม (total stress) กับแรงดันโพรง (pore pressure) ดังสมการที่ (2.1)

$$\bar{\sigma} = \sigma - u \qquad \text{.....(2.1)}$$

ซึ่ง σ คือ หน่วยแรงรวม

u คือ แรงดันโพรง

$\bar{\sigma}$ คือ หน่วยแรงประสิทธิผล

นอกจากค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) จะควบคุมการเคลื่อนตัวของดินแล้วยังเป็นตัวสำคัญในการกำหนดค่าหน่วยแรงเฉือน (shearing strength) ของดินด้วย ดังสมการที่ (2.2)

$$\tau_{ff} = \bar{c} + \bar{\sigma}_{ff} \tan\bar{\phi} \qquad \text{.....(2.2)}$$

ซึ่ง τ_{ff} คือ กำลังรับแรงเฉือน

$\bar{c}$ คือ apparent cohesion

$\bar{\sigma}_{ff}$ คือ หน่วยแรงประสิทธิผล

$\bar{\phi}$ คือ angle of shearing resistance

สำหรับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำบางส่วน (Partially Saturated Soil) อากาศกับน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน จะมีค่าแรงดันที่ไม่เท่ากัน แรงดันของสถานะที่เป็นน้ำจะน้อยกว่าสถานะที่เป็นก๊าซหรืออากาศ ดังนั้น สมการ ที่ (2.1) จึงมีอิทธิพลของแรงตึงผิว (surface tension) มาเกี่ยวข้อง (Lamb & Withman, 1969)

$$\bar{\sigma} = \sigma - |Ua + x\,(Uw - Ua)| \qquad \text{.....(2.3)}$$

ซึ่ง x คือ Parameter ขึ้นอยู่กับ degree of saturation

Ua คือ แรงดันอากาศในโพรง (Pore air pressure)

Uw คือ แรงดันน้ำในโพรง (pore water pressure)

ค่าของ x จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างสมบูรณ์ (completely Saturated) ค่าของx จะลดลง เมื่อ degree of Saturation ลดลง สำหรับดินแห้งอย่างสมบูรณ์ (Completely dry) ค่า x = 0

ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินนี้มีความสำคัญ เป็นตัวการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร การเคลื่อนตัว และการวิบัติด้วยแรงเฉือน ส่วนแรงดันน้ำในโพรง (pore water pressure, Uw) นั้น เนื่องจากน้ำเป็น incompressible fluid จึงไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดิน อันเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่บีบตัวลง และน้ำ

ในโพรงดินไม่สามารถจะต้านทานแรงเฉือนได้ ดังนั้น การต้านทานแรงเฉือน ในมวลดินใดๆ จึงขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) แต่เพียงอย่างเดียว

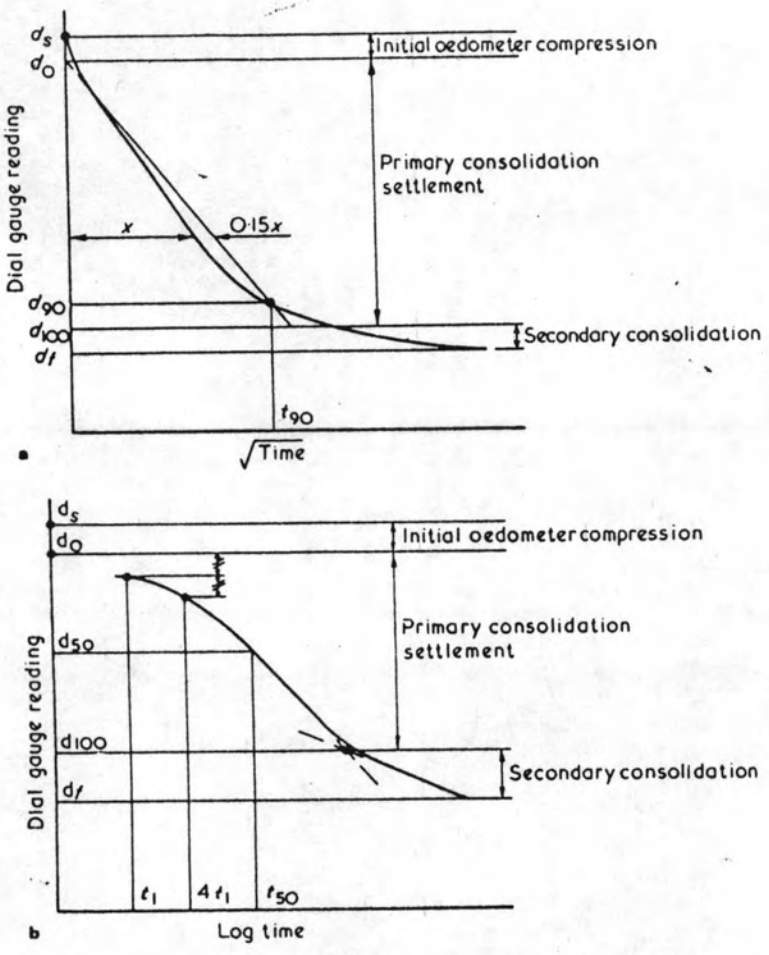
2.5 การยุบตัวของดินในช่วง Primary Consolidation

Primary Consolidation เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน เนื่องจากน้ำไหลออกจากโพรงดิน และหน่วยแรงประสิทธิผลในดินจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากการ dissipated ของแรงดันน้ำในโพรง (pore water pressure) การเกิด Primary Consolidation เป็นกรรมวิธีแบบต่อเนื่อง (continuous process) จึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่ชัดว่า primary consolidation จะสิ้นสุดเมื่อใด TERZAGHI (1943) กล่าวเฉพาะ mechanisms ของ Primary Consolidation ต่อมา TAYLOR (1948) เชื่อว่า primary consolidation สิ้นสุดเมื่อค่า excess pore water pressure มีค่าเป็นศูนย์ และแรงที่กระทำต่อมวลดินจะถูกรับไว้โดย Soil Skeleton ทั้งหมด

TAYLOR (1948) ได้แสดงการหาจุดสิ้นสุดของ Primary Consolidation (d_{100}) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับรากที่สองของเวลา ($\sqrt{t}$) ดังแสดงในรูปที่ (2.6)

CASAGRANDE & FADUM (1940) ได้แสดงการหาจุดสิ้นสุดของPrimary Consolidation (d_{100}) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับลอการิทึมของเวลา (log t) ดังแสดงในรูปที่ (2.6)

จากการคาดคะเนการสิ้นสุดการยุบตัวในช่วง primary consolidation สามารถจะกำหนดได้จากการวัดค่าแรงดันน้ำในโพรงดินในระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ สัมพันธ์กับเวลาเมื่อค่า excess pore pressure มีค่าเป็นศูนย์ (ที่ t_{100}) จะถือว่าสิ้นสุดการยุบตัวในช่วง primary consolidation CRAWFORD (1964) ได้เสนอวิธีการหาจุดสิ้นสุดของการยุบตัวในช่วง Primary Consolidation จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ pore pressure กับ applied pressure และค่าการทรุดตัว (deflection) โดยคิดว่าเส้นตรงที่ต่อมาตัดกับแกนของค่าการทรุดตัว (แกน x) เป็นจุดสิ้นสุดการยุบตัวแบบ primary consolidation ดังแสดงในรูปที่ (2.7)

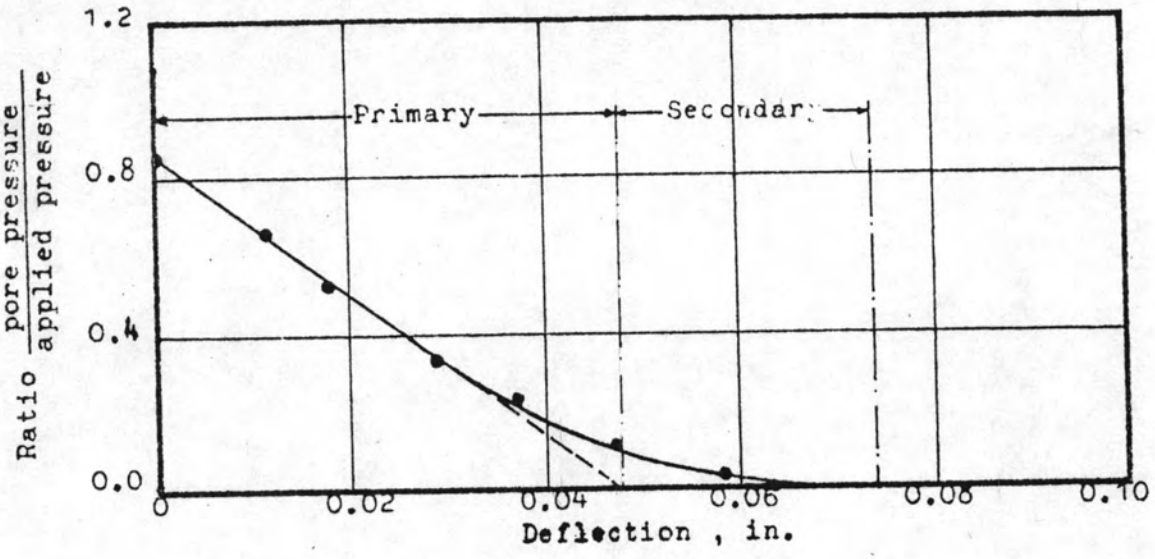


รูปที่ 2.6 แสดงการหาจุดสิ้นสุดการทรุดตัวในช่วง primary consolidation

a) จากวิธีของ TAYLOR (1948)

และ b) จากวิธีของ CASAGRANDE & FADUM (1940)

009363



รูปที่ 2.7 แสดงการหาการสิ้นสุดการยุบตัวในช่วง Primary Consolidation

(จาก Crawford, 1964)

2.5.1 การเกิด Pore Pressure Response ในสภาพอันเดรน

Lambe (1962) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้น ($\Delta\sigma_1$) กับค่าแรงดันน้ำในโพรงที่เพิ่มขึ้น (Δu) กรณีที่พิจารณาการอัดตัวคายน้ำ ที่ยอมให้การเคลื่อนตัวของดินใน 1 มิติ ดังแสดงในสมการที่

$$C = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_1} = \frac{1}{1+n(\frac{cw}{Cc_1})} \qquad \text{.....(2.4)}$$

C คือ pore pressure parameter

Δu คือ แรงดันน้ำในโพรงที่เพิ่มขึ้น

$\Delta\sigma_1$ คือ แรงดันในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น

Cw คือ Compressibility ของน้ำ

Cc_1 คือ compressibility ของ Soil Skeleton

n คือ ความพรุน (porousity)

LAMBE & WHITMAN (1969) วัดค่า Cw และ Cc_1 จากห้องทดลอง และคำนวณหาค่าของ C พบว่า สภาพของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ค่า C จะมีหนึ่งหน่วยเสมอ (Unity) เพราะฉะนั้น เมื่อเราเพิ่มแรงดันในแนวดิ่ง ($\Delta\sigma_1$) บนดินที่สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ และในสภาพอันเดรน (Undrained) แรงดันที่เพิ่มขึ้นจะถูกรับไว้ด้วยน้ำในโพรงดินทั้งหมด

2.5.2 อัตราการกระจายของความดันน้ำ และทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ (The rate of pore water dissipation and Consolidation Theory)

TERZAGHI (1943) ได้ให้ความสัมพันธ์ในเทอมของ Differential Equation สำหรับดินเหนียวที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ดังนี้ คือ

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Cv \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad \text{.....(2.5)}$$

Cv คือ Coefficient of primary Consolidation

สมมุติฐานของ TERZAGHI (1943) ประกอบด้วย

1. ดินมีพฤติกรรมแบบเอกพันธ์ (Homogeneous soil)

2. อิ่มตัวด้วยน้ำอย่างสมบูรณ์ (complete saturation)

3. ไม่พิจารณาการยุบตัวของเมล็ดดินและน้ำ

4. การอัดตัวในสภาพ 1 มิติ (one-dimensional compression)

5. การไหลเกิดในสภาพ 1 มิติ (One-dimension flow)

6. กฎของ Darcy เป็นจริง

7. ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับ Void ratio เป็นแบบอุดมคติ (Idealized)

กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของ void ratio (Δe) ต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผล $\Delta\bar{\sigma}_{vc}$ คงที่ เมื่อพิจารณาการกระจายของแรงดันเท่ากันตลอดความลึกของดิน และมีการไหลของน้ำในโพรงดินสองทิศทาง คือ ทางด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทั้งคู่อยู่ในแนวดิ่ง ซึ่งจะได้ boundary condition

ขณะที่ $z = 0$, $u = 0$

$z = 2H$, $u = 0$

$t = 0$, $u = Ui$

สมการที่ (2.5) ได้ผลลัพท์ คือ

$$U = \sum_{n=1}^{n=\alpha} \left|\frac{1}{H}\int_{o}^{2H} Ui \sin\frac{n\pi z}{2H}.dz\right| \left|\sin\frac{n\pi z}{2H}\right| .\exp.(-\tfrac{1}{4}.n^2\pi^2 Tv) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.6)$$

ซึ่ง Tv = ค่า Time Factor = $\dfrac{Cv.t}{H^2}$

2H คือ ความหนาทั้งหมดของชั้นดิน

Ui คือ excess pore water pressure ที่เวลาเท่ากับศูนย์

U คือ excess pore water pressure ที่เวลาผ่านไปเท่ากับ t

z คือ ความลึกที่พิจารณา

n คือ เลขจำนวนเต็ม ตั้งแต่ 1 ถึง α

ในกรณีที่ Ui คือ ค่าคงที่ Uo จะได้

$$U = \sum_{m=1}^{m=\alpha} \frac{2Uo}{M}.\left(\sin\frac{Mz}{H}\right).\exp.(-M^2 Tv) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.7)$$

ซึ่ง $n = 2m + 1$ และ $M = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$

m คือ เลขจำนวนเต็ม

ค่าของ Consolidation Ratio, U_z

$$U_z = \frac{Uo - u}{Uo} = 1 - \frac{U}{Uo}$$

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{m=\alpha} \frac{2}{M} \left(\sin \frac{Mz}{H}\right) . \exp.(-M^2 Tv) \quad \text{.....(2.8)}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง U_z , Tv, z/H แสดงไว้ในรูปที่ (2.8)

ค่าของ Average degree of Consolidation, $\bar{U}$

$$\bar{U} = \frac{U_z \, d_z}{2H}$$

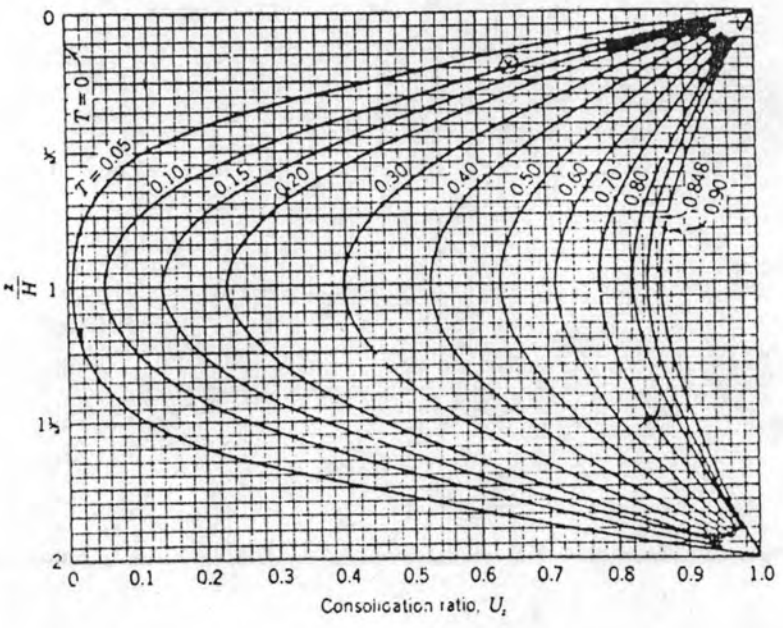
$$\bar{U} = 1 - \sum_{m=0}^{m=\alpha} \frac{\int_o^{2H} Ui.\text{Sin } Mz/H.dz}{M\int_o^{2H} Ui \, dz} \quad \text{.....(2.9)}$$

กรณีค่า Ui คือ ค่าคงที่ Uo จะได้

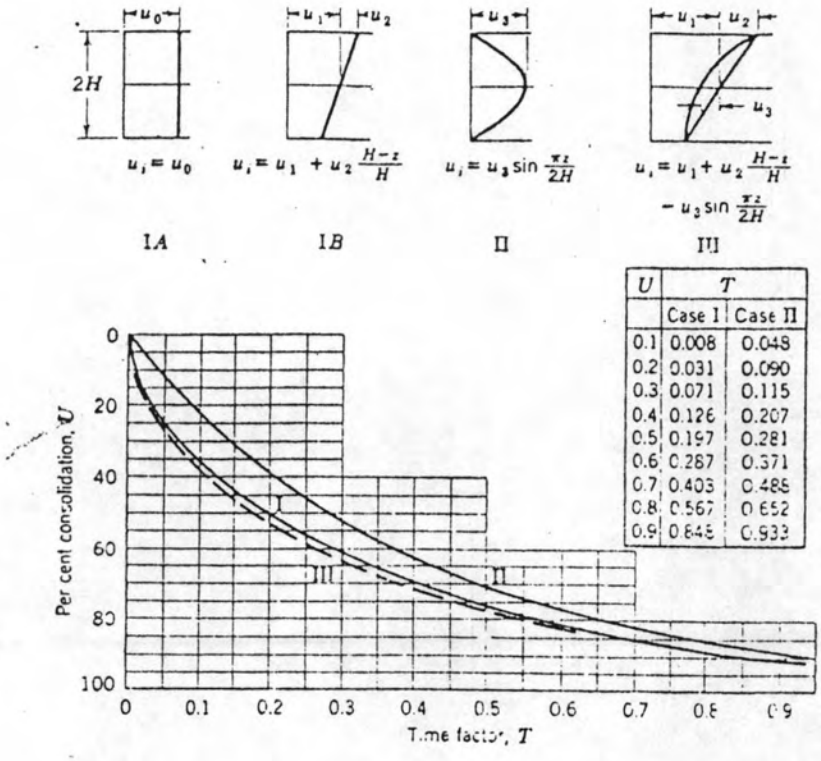
$$\bar{U} = 1 - \sum_{m=0}^{m=\alpha} \frac{2}{M^2} . \exp.(-M^2 Tv) \quad \text{.....(2.10)}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{U}$, Tv ที่ค่า Ui ต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในรูปที่ (2.9)

DAVIS & RAYMOND (1965) ได้พัฒนาทฤษฎีของ Non-Linear Consolidation ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio กับหน่วยแรงประสิทธิผล กล่าวคือ อัตราส่วนระหว่าง การเปลี่ยนแปลง void ratio (Δe) ต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผล ($\Delta\bar{\sigma}$) ไม่สัมพันธ์เชิงเส้น (คือ ค่า Coefficient of Compressibility ไม่คงที่) DAVIS & RAYMOND (1965) มีสมมุติฐานข้ออื่น ๆ เหมือนกับของ TERZAGHI (1943) และได้ความสัมพันธ์ ดังนี้



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z/H, consolidation ratio (U_z) และ Time factor (Tv) (จาก Taylor 1947)



U	T	
	Case I	Case II
0.1	0.008	0.048
0.2	0.031	0.090
0.3	0.071	0.115
0.4	0.126	0.207
0.5	0.197	0.281
0.6	0.287	0.371
0.7	0.403	0.488
0.8	0.567	0.652
0.9	0.848	0.933

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง average degree of consolidation ($\bar{U}$) และค่า Time factor (Tv) ที่ค่าของ initial pore pressure distribution, (Ui) ต่าง ๆ กัน (จาก Taylor, 1947)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$C \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t}$$

ซึ่งค่า $C = \frac{k}{\gamma_w}(1 + e)$

และสมมุติว่า $e - eo = -Cc \log \bar{\sigma}/\bar{\sigma}_o$ ซึ่งจะตรงกับสมมุติฐานที่ดินเป็น Normally Consolidated และได้สมการการกระจายของน้ำในโพรงดิน (dissipation of pore water) ดังนี้

$$\frac{U}{\bar{\sigma}_f - \bar{\sigma}_o} = \frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_f - \bar{\sigma}_o} \cdot 1 - \frac{\bar{\sigma}_o}{\bar{\sigma}_f}^B \qquad \text{.....(2.11)}$$

$$B = \sum_{m=0}^{m=\alpha} \frac{2}{M} (\sin \frac{MZ}{H}).\exp (-M^2 Tv)$$

$\bar{\sigma}_o$ คือ หน่วยแรงประสิทธิผลเริ่มแรก

$\bar{\sigma}_f$ คือ หน่วยแรงประสิทธิผลสุดท้าย

u คือ Excess pore pressure ที่เวลา t ใด ๆ

จากสมการที่ (2.11) จะพบว่า อัตราการกระจายของน้ำในโพรงดิน จะสัมพันธ์กับอัตราส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผล ($\bar{\sigma}_o/\bar{\sigma}_f$) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำในโพรง (u) กับ Average degree of consolidation ($\bar{U}$) จากทฤษฎีของ TERZAGHI (1943) และ DAVIS & RAYMOND (1965) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

2.5.3 <u>อัตราของการอัดตัวคายน้ำ (Rate of Consolidation)</u>

อัตราการเกิดการอัดตัวคายน้ำในช่วง primary consolidation หาได้จากหลักการของ Hydrodynamics ซึ่ง TERZAGHI (1943) ได้แสดงในเทอมของ Coefficient of Consolidation, Cv ดังนี้ คือ

$$Cv = \frac{k(1 + e)}{av.\ \gamma w}$$

$$Cv = \frac{k}{mv.\ \gamma w} \qquad \text{.....(2.12)}$$

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของแรงดันน้ำในโพรง ที่กึ่งกลางของชั้นดินตามทฤษฎีของ Terzaghi,(1943) David & Raymond (1965)

T	$\bar{U}$,%	Pore Water Pressure, Per Cent				
		Davis and Raymond				Terzaghi
$\Delta\sigma/\sigma$(LIR)		0.25	0.50	1.0	2.0	
$\bar{\sigma}f/\bar{\sigma}o$		1.25	1.50	2.0	3.0	
0.02	16.00	100	100	100	100	100
0.04	22.57	99.93	99.93	99.94	99.96	99.92
0.06	27.64	99.30	99.37	99.46	99.57	99.22
0.08	31.92	97.78	97.98	98.26	98.62	97.52
0.10	35.68	95.45	95.85	96.42	97.14	94.93
0.20	50.41	79.15	80.66	80.90	85.79	77.23
0.30	61.32	63.32	65.43	68.67	72.99	60.68
0.40	69.79	50.23	52.50	56.06	60.94	47.45
0.50	76.40	39.70	41.87	45.33	50.19	37.08
0.60	81.56	31.30	33.25	36.39	40.89	28.97
0.70	85.59	24.63	26.31	29.04	33.03	22.64
0.80	88.74	19.35	20.76	23.08	26.49	17.60
0.90	91.20	15.18	16.35	18.27	21.13	13.82
1.0	93.13	11.90	12.85	14.42	16.78	10.80
2.0	99.42	1.02	1.11	1.27	1.50	0.92
3.0	99.95	0.09	0.09	0.11	0.13	0.08

ซึ่ง k คือ สัมประสิทธิของการซึม (Coefficient of permeability)

a_v คือ สัมประสิทธิของการยุบตัว (Coefficient of Compressibility)

m_v คือ สัมประสิทธิของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume change)

การคำนวณหาค่า Cv ในห้องทดลอง สามารถหาได้จากวิธีต่าง ๆ ดังนี้

1) วิธี Log time (log t) ของ CASAGRANDE & FADUM (1940) พิจารณาที่ Average degree of consolidation ($\bar{U}$) 50% (t_{50})

$$Cv = \frac{0.197\ H^2}{t_{50}}$$

2) วิธี square root time ($\sqrt{t}$) ของ TAYLOR (1948) พิจารณาที่ average degree of consolidation ($\bar{U}$) 90% (t_{90})

$$Cv = \frac{0.848\ H^2}{t_{90}}$$

3) วิธี pore pressure (Δu) ซึ่ง LEONARD & GIRAULT (1961) พิจารณาที่ average degree of consolidation ($\bar{U}$) 50% (t_{50}) หรือ 90% (t_{90}) ซึ่งที่ t_{50} ตรงกับการกระจายของน้ำในโพรง($1-\Delta u/\Delta\sigma v$) ที่ 50%

t_{90} ตรงกับการกระจายของน้ำในโพรง ($1-\Delta u/\Delta\sigma v$) ที่ 84.5%

$$Cv = \frac{0.197\ H^2}{t_{50}} \qquad \text{หรือ}$$

$$Cv = \frac{0.848\ H^2}{t_{90}}$$

ถ้าดินมีพฤติกรรมตามสมมุติฐานทางทฤษฎีของ TERZAGHI (1943) อย่างถูกต้อง (Exactly) ค่า Cv ที่คำนวณได้จากทั้งสามวิธี ควรจะให้ค่าประมาณเท่ากัน

2.5.4 ผลกระทบของแฟคเตอร์ต่าง ๆ ต่อลักษณะการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Characteristics)

ก. ผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินทดลอง (Sample disturbance)

การรบกวนต่อตัวอย่างดินทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนไป ถ้าเป็นดินพวก High sensitive จะทำให้โครงสร้างของดินจาก flocculate สู่สภาพของ disperse structure ซึ่งผลจากการรบกวนตัวอย่างดินสรุปได้ดังนี้

1. ยากต่อการประมาณหาค่าหน่วยแรงสูงสุดในอดีต ($\bar{\sigma}_{vm}$)
2. ให้ค่า Recompression Ratio (RR) สูงขึ้น
3. ให้ค่าของ Compression Ratio (CR) ลดลง
4. ให้ค่าของ Coefficient of Consolidation (Cv) ลดลง

ข. ผลของอุณหภูมิ (Temperature Effect)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้ค่าต่าง ๆ เปลี่ยนไปดังนี้ (LADD, 1971)

1. ค่าหน่วยแรงสูงสุดในอดีต ($\bar{\sigma}_{vm}$) ลดลง
2. ค่าของ Coefficient of Consolidation (Cv) เพิ่มขึ้น

ค. ผลของอัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (Load Increment Ratio, LIR)

1. การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (LIR) ต่อกราฟของ Load/Compression LEONARD & GIRAULT (1961) สรุปว่า เมื่อเพิ่ม LIR จะเป็นผลให้ค่าการยุบตัวสูงขึ้น ที่หน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากัน และผลจากการทดสอบดินเหนียวกรุงเทพฯ BRAND & KIM (1971) และ BRAND & KANJANOPHAS (1971) ได้สรุปตรงกัน คือ เมื่อเพิ่ม LIR ทำให้ได้ค่าการยุบตัว (εv) สูงขึ้นที่หน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากัน

2. การเปลี่ยนแปลงของ LIR ต่อการกระจายของน้ำในโพรง (pore water dissipation) ผลที่ได้จากการทดสอบดินเหนียวกรุงเทพฯ BRAND & KIM (1971) ทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สรุปว่า การกระจายของน้ำในโพรงแปรผันตามค่าของ LIR และถ้าใช้ LIR มีค่าสูง จะให้ผลของการกระจายของน้ำในโพรงใกล้เคียงกับการคาดคะเนโดยทฤษฎีของ TERZAGHI, THUMAPRUDTI (1974) ทดสอบ Weathered Clay บริเวณหนองงูเห่าสรุปว่า อัตราการกระจายของน้ำในโพรง (rate of pore water dissipation) จะรวดเร็วมากที่ LIR มีค่าต่ำ ๆ

3. การเปลี่ยนแปลงของ LIR ต่อกราฟของ Compression/Log time LEONARD & GIRAULT (1961) สรุปว่าที่ LIR มีค่าสูงจะให้ผลสัมพันธ์ของกราฟชนิดเดียวกับการคาดคะเน โดยทฤษฎี TERZAGHI (1943) และให้กราฟเป็น TYPE I ดังแสดงในรูปที่ 2.10 กราฟของ Compression/Log time จะเปลี่ยนจาก TYPE I เป็น TYPE II และ TYPE III เมื่อค่า LIR มีค่าลดลง TEVES & MOH (1968) ทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สรุปว่าที่ LIR มีค่าต่ำ (LIR = 0.25) จะให้ผลสัมพันธ์ของกราฟแบบ TYPE III BRAND & KANJANOPHAS (1971) ทดสอบ Weathered Clay บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) สรุปว่า ที่ LIR เท่ากับ 0.25 และ 0.5 ให้ผลสัมพันธ์ของกราฟแบบ TYPE III และ TYPE II ตามลำดับ

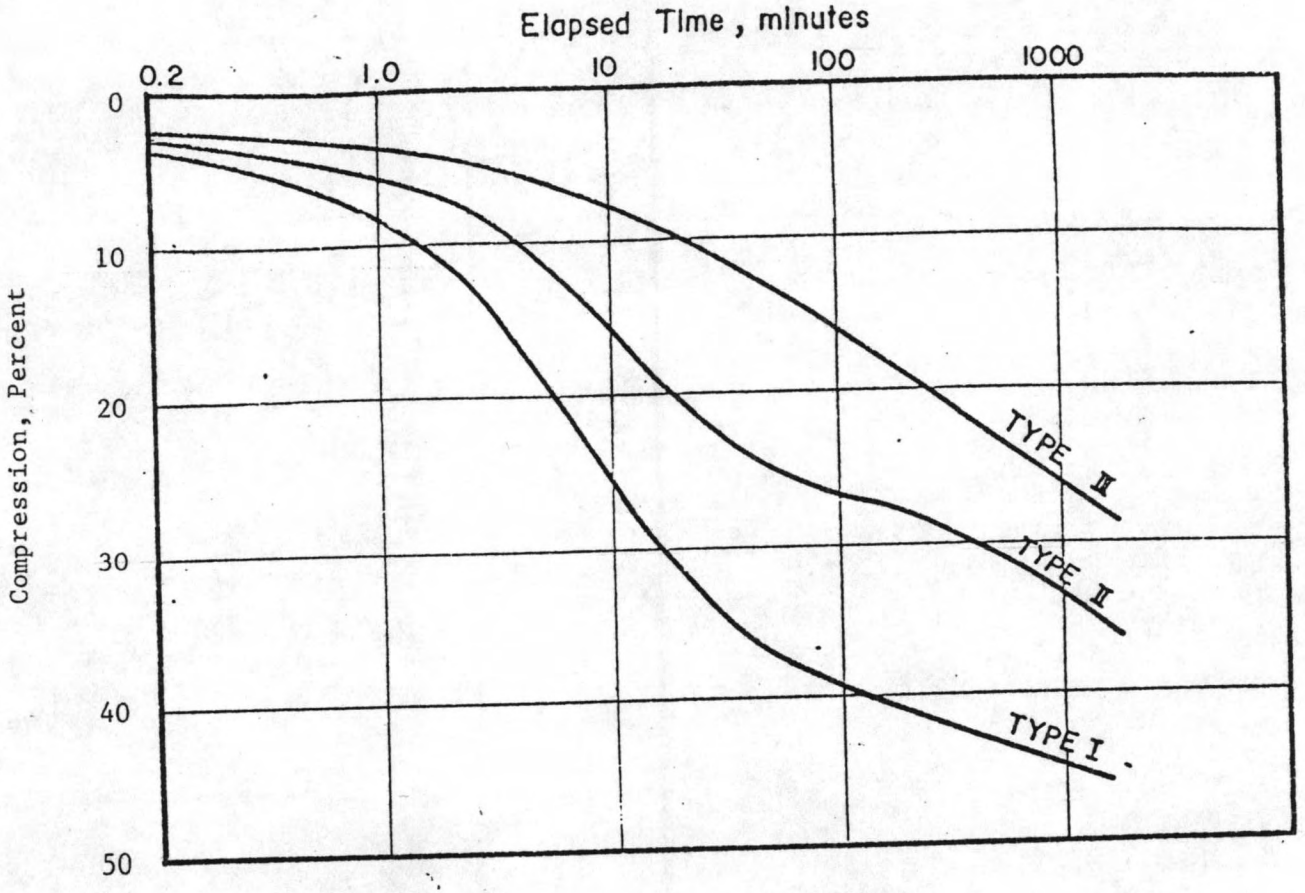
4. การเปลี่ยนแปลงของ LIR ต่อค่าของ Cv BRAND & KIM (1971) ทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สรุปว่า ที่ค่า LIR มีค่าต่ำ เมื่อเพิ่มเวลาการเพิ่มน้ำหนัก (LID) จะให้ค่าของ Cv ลดลง BRAND & KANJANOPHAS (1971) ทดสอบ Weathered Clay บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย สรุปว่า ค่าของ Cv เป็นฟังก์ชั่นของ LIR ที่ค่า LID มีค่าต่ำที่หน่วยแรงประสิทธิผลต่ำ และไม่มีผลกระทบที่หน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าสูง

ง. <u>ผลของระยะเวลาการเพิ่มน้ำหนัก (Load Increment Duration,LID)</u>

มีผู้ศึกษา ดินเหนียวกรุงเทพฯ หลายท่าน คือ TEVES & MOH (1968) BRAND & KIM (1971) และ BRAND & KANJANOPHAS (1971) สรุปผลการเปลี่ยนแปลง LID ต่อกราฟของ Load/compression ว่าเมื่อเพิ่มค่า LID มากขึ้น จะเป็นผลให้ค่าการยุบตัว (εv) ลดลง ที่หน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากัน และการเปลี่ยนแปลง LID มีผลกระทบโดยตรงต่อค่า Cv (coefficient of consolidation) คือที่ LIR มีค่าต่ำ ($LIR \leq 0.5$) เมื่อเพิ่มค่า LID จะทำให้ค่าของ Cv ลดลง สำหรับที่ LIR มีค่าสูง ($LIR \geq 1$) การเปลี่ยนแปลง LID ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ Cv

จ. <u>ผลของการใช้เครื่องมือการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ Bishop และแบบ Lever-arm (Standard Equipment)</u>

ผลที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่องมือแบบ Bishop จะดีกว่าแบบ Lever-arm ดังนี้ คือ



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression (%) กับเวลาบนลอการิทึมสเกล เมื่อมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (LIR) (จาก Leonard & Girault, 1961)

1. ไม่มีปัญหาคลาดเคลื่อนเนื่องจากค่าของ Initial Oedometer Compression (จากรูป 2.6)
2. ลดปัญหาจากแรงเสียดทานด้านข้าง (side friction) คือ แรงที่ตัวอย่างการทดลองได้รับจะเท่ากับแรงที่เพิ่มขึ้น
3. ไม่มีปัญหาคลาดเคลื่อนเนื่องจากฟองอากาศในตัวอย่างดิน เพราะว่ามีการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้ back pressure
4. มีการควบคุมการระบายน้ำจากตัวอย่างดิน ขณะเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อตัวอย่างดิน สามารถปิดวาวล์ระบายน้ำ และรอให้ตัวอย่างดินเกิด maximum pore pressure response (Δu_{max}) จะทำให้ค่าแรงดันน้ำในโพรงส่วนเกินเริ่มแรก (initial excess pore pressure) จะสม่ำเสมอ (Uniform)

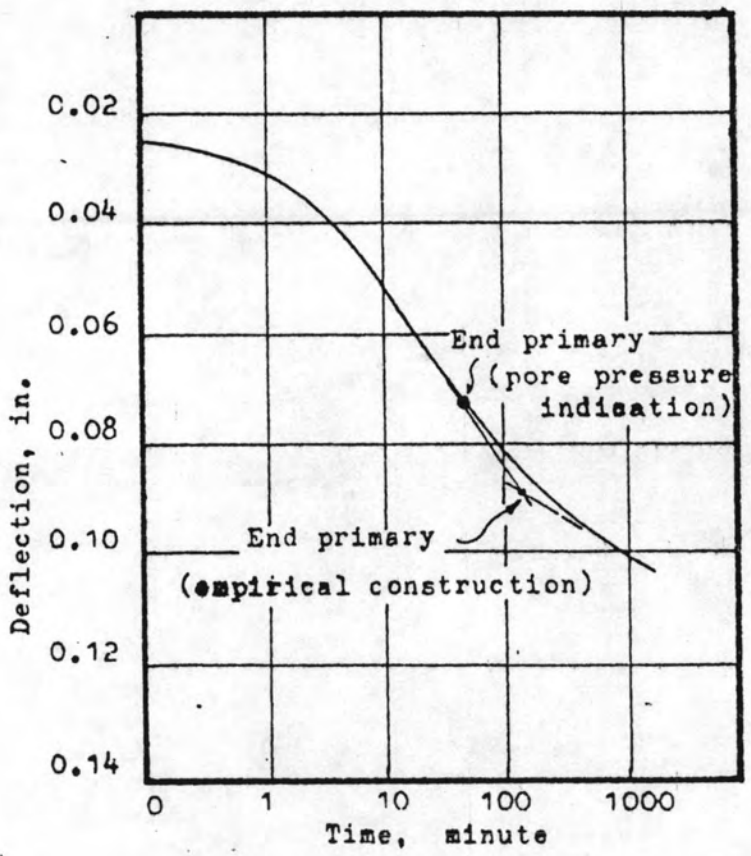
2.5.5 <u>การคาดคะเนเวลาสิ้นสุด primary consolidation (t_{100}) กับความเหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง</u>

การคาดคะเนเวลาสิ้นสุด primary consolidation (t_{100}) ในทางปฏิบัติทั่วไปใช้วิธี Empirical ของ Casagrande & Fadum (1940) และ Taylor (1948) พิจารณาจากรูปที่ 2.6 การคาดคะเน t_{100} จากวิธีของ Casagrande หรือเรียกว่า "Logarithm of time method" (วิธี log t) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง compression กับเวลาบนลอการิทึมสเกล เส้นตรงจากจุดที่ d_{100} ตัดกับส่วนของเส้นตรง secondary compression ลงมาตัดแกนของเวลา (แกน x) จะเป็นเวลาของการสิ้นสุด primary consolidation (t_{100}) สำหรับการคาดคะเน t_{100} จากวิธีของ Taylor หรือเรียกว่า "Square Root of time method" (วิธี $\sqrt{t}$) เส้นตรงจากจุดที่ d_{100} ตัดกับเส้นกราฟลงมาตัดแกนของเวลา (แกน x) ค่าเวลาที่อ่านได้ยกกำลังสองจะได้เป็นเวลาของการสิ้นสุด primary consolidation (t_{100})

จากในห้องทดลองเราทราบค่าเวลาสิ้นสุด primary consolidation ได้จากการวัดแรงดันน้ำในโพรง เวลาที่ค่าแรงดันน้ำในโพรงส่วนเกินมีค่าเป็นศูนย์จะเป็นเวลาของการสิ้นสุด primary consolidation (t_{100})

LEONARD (1962) กล่าวว่า ค่า d_{100} (t_{100}) จากวิธีของ log t จะได้ผลใกล้เคียงกว่า จากวิธีของ $\sqrt{t}$

CRAWFORD (1964) สรุปว่า ค่า t_{100} ได้จากการวัดแรงดันน้ำในโพรง (Δu) จะให้ค่าน้อยกว่าจากวิธีของ Log t ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง deflection กับเวลาบนลอการิทึมสเกล (จาก Crawford, 1964)

2.6 การยุบตัวของดินในช่วง Secondary Compression

LADD & PRESTON (1965) ได้สรุปว่า การยุบตัวในช่วง Secondary Compression เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดิน ภายใต้สภาพที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าคงที่ (การกระจายของน้ำในโพรงดินสิ้นสุดลง) อัตราการยุบตัวในช่วง Secondary Compression แสดงในเทอมของ Rs และ Cα

$$\text{ซึ่ง} \qquad Rs = \frac{\Delta e}{\Delta \log t}$$

Rs คือ การเปลี่ยนแปลงของ Void ratio ต่อ log cycle ของเวลา

$$\text{และ} \qquad C\alpha = \frac{\Delta \varepsilon v}{\Delta \log t}$$

Cα คือ การเปลี่ยนแปลงของความเครียดในแนวดิ่งต่อ log Cycle ของเวลา

$$\text{ซึ่งค่า} \quad C\alpha = \frac{Rs}{1+eo}, \qquad \Delta \varepsilon v = \frac{\Delta e}{1+eo}$$

อิทธิพลที่มีผลต่อค่าของ Cα (LADD & PRESTON, 1965)

1. หน่วยแรงในอดีต และชนิดของดิน เช่น ค่า OCR
2. อัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (LIR)
3. ความหนาของตัวอย่างดินทดลอง
4. แรงเสียดทานด้านข้าง (side friction)
5. เวลาหลังจากการสิ้นสุดการยุบตัวในช่วง primary consolidation
6. อุณหภูมิและความเข้มข้นของเกลือแร่ของของเหลวในโพรง

สำหรับ mechanisms ของการเกิดการยุบตัวในช่วง Secondary Compression มีผู้คันคว้าจำนวนมากได้ให้คำจำกัดความไว้ แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป

ASTM (1969) ได้สรุปความเห็นส่อดคล้องจากหลายฝ่ายว่าเป็นการจัดตัวของโครงสร้างภายในมวลดิน หลังจากเม็ดดินได้รับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้น

LADD (1971) สรุปว่า อนุภาคที่ติดกันของมวลดินนั้นอยู่ในสภาพ Unstable หลังจากสิ้นสุด Primary Consolidation ดังนั้น อนุภาคของดิน (soil particle) จึงพยายามที่จะมีการเคลื่อนไหวต่อไปอีก เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งที่ stable อีกครั้งหนึ่ง

LADD (1971) ได้สรุปอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Cα ไว้ว่า การรบกวนต่อตัวอย่างดินทำให้ค่าของ Cα ลดลง เพราะว่าค่าของ Cα สัมพันธ์โดยตรงกับค่า CR และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Cα เพียงเล็กน้อย

LEONARD & GIRAULT (1961) และ WAHLS (1962) สรุปผลว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (LIR) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Cα

BRAND & KANJANOPHAS (1971) ทดลอบ Weathered Clay บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) สรุปว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (LIR) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Cα ที่ระยะเวลาการเพิ่มน้ำหนักน้อย (short load duration)

THUMAPRUDTI (1974) ทดลอบ Weathered Clay บริเวณหนองงูเห่า สรุปว่าการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการเพิ่มน้ำหนัก (LID) มีผลทำให้ค่า Cα ลดลง