หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี และทบทวนงานในอดีต

การพองตัวของดิน นับได้ว่าเป็นปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งของงานด้านวิศวกรรมโยธา จึงมีผู้ศึกษาปัญหานี้กันมาก และได้เสนอทฤษฎีเพื่อใช้อธิบายขบวนการนี้ ตลอดจนวิธีการแก้ไขต่าง ๆ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงงานในอดีต และทฤษฎีที่เกี่ยวกับการงานวิจัย โดยแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้

2.1 ความคิดพื้นฐาน (Basic Concept)

2.2 ทฤษฎีการบดอัด (Compaction Theory)

2.3 การพองตัว (Swelling)

2.4 ความสามารถในการอัดตัวของดินเหนียวที่บดอัดแล้ว (Compressibility of Compacted Clay)

2.1 ความคิดพื้นฐาน (Basic Concept)

2.1.1 แร่ดินเหนียว (Clay Minerals)

คำว่า "ดินเหนียว (Clay)" หมายถึง ดินซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. และแร่ดินเหนียวเป็นผลมาจาก Chemical weathering ของหิน โดยทั่วไปแร่ดินเหนียวประกอบด้วย Silica tetrahedral sheets และ octahedral sheets ของ Al, Mg, Si ฯลฯ

แร่ดินเหนียว มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ที่พบมากในที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง โดยเฉพาะแถบกรุงเทพมหานคร และบริเวณใกล้เคียงมี 3 ชนิด คือ คาโอลิไนท์ (Kaolinite) อิลไลท์ (Illite) และมอนท์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite) ซึ่งมอนท์โมริลโลไนท์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีคุณสมบัติในการพองตัวมากเมื่อดูดน้ำ

2.1.2 Double Layer

Clay particles จะมีประจุไฟฟ้าลบอยู่บนผิว ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมของแร่ดินเหนียวที่มีวาเลนซี่สูง เช่น Si^{4+} ถูกแทนที่โดยอะตอมที่มีวาเลนซี่ต่ำ เช่น Al^{3+} จึงยังคงมีประจุลบเหลืออยู่ การแทนที่กันแบบนี้เรียกว่า isomorphous substitution นอกจากนี้ก็ยังมีสาเหตุอีกประการหนึ่งก็คือ ตามปกติ ideal crystal จะมีประจุบวกและประจุลบเท่ากัน แต่ที่ขอบของ particles โครงสร้างของแร่ดินเหนียวจะขาดออกจากกันเป็นผลให้ประจุเกิดไม่สมดุลย์ และแรงยึดเกาะที่ขาดนี้มักจะทำให้เกิดประจุลบที่ผิวของ Clay particles

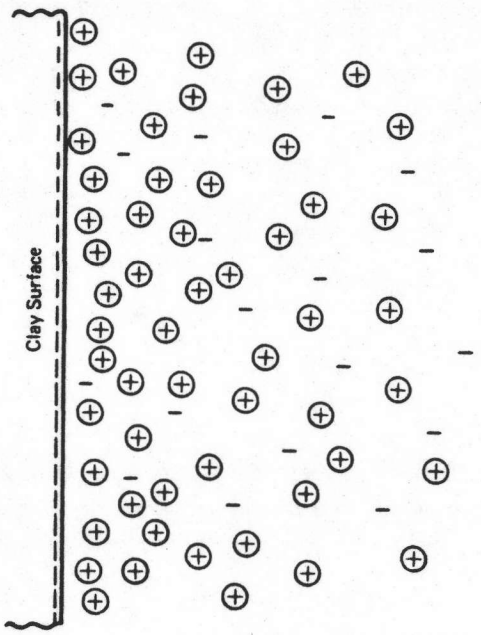
ประจุลบที่ผิวของ Clay particles นี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าลบรอบตัวมันและอาจถูกทำให้สมดุลย์โดยประจุบวก เช่น Na^{+} และ Ca^{2+} ถ้ามีน้ำอยู่รอบ ๆ Clay particles จะเห็นว่าประจุบวกสามารถเคลื่อนที่ห่างออกจากผิวของดินได้บ้างแต่จะยังอยู่ภายในอำนาจของสนามไฟฟ้าลบ ประจุลบที่อยู่บนชิ้นดินและประจุบวกที่กระจายอยู่ในน้ำเรียกว่า diffuse double layer หรือเรียกง่าย ๆ ว่า double layer ดังรูป 2.1 ซึ่ง double layer นี้ มีผลต่อการพองตัวของดินมาก คือ ถ้า double layer กว้าง จะทำให้มีแรงผลักกันระหว่าง particles มาก ทำให้การพองตัวของดินสูง

2.1.3 แรงระหว่าง Particles

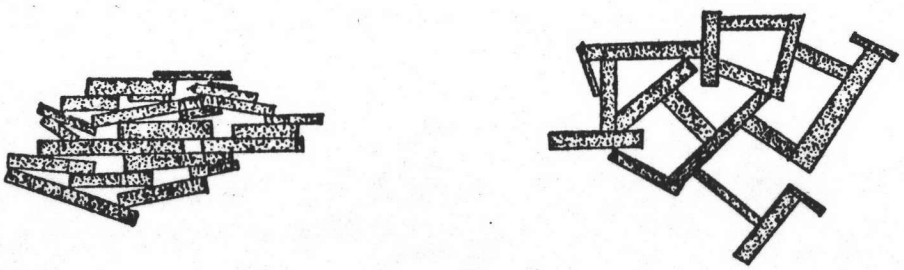
แรงซึ่ง particles กระทำต่อกันมีทั้งแรงผลัก (repulsion) และแรงดึงดูด (attraction) มีสาเหตุที่แตกต่างกันดังนี้

(1) แรงผลัก (Repulsive Force)

แรงผลักเกิดขึ้นจากเหตุหลายประการ เช่น particles ที่อยู่ใกล้กันมี double layer กว้างมากขึ้นจนมาเกี่ยวกัน เนื่องจากประจุใน double layer เหมือนกันมันจะผลักกันจึงเกิดแรงผลักขึ้น



รูปที่ 2.1 Double layer (MITCHELL, 1976)



(ก) โครงสร้างเป็นระเบียบ (Dispersed Structure)

(ข) โครงสร้างระเกะระกะ (Flocculated Structure)

รูปที่ 2.2 โครงสร้างดิน (LAMBE, 1958)

นอกจากนี้แรงผลักยังเกิดขึ้นจาก osmotic pressure ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของไอออนที่กึ่งกลางระหว่าง particles มากกว่าสารละลายภายนอก น้ำจึงไหลจากภายนอกซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนน้อยกว่าเข้าสู่ double layer ทำให้เกิดความดันขึ้นที่เรียกว่า osmotic pressure ซึ่งจะผลัก particles ให้แยกจากกัน รายละเอียดจะกล่าวไว้ในเรื่องการพองตัวต่อไป

(2) <u>แรงดึงดูด</u> (Attractive Force)

แรงดึงดูดเกิดขึ้นจากการดูดกันระหว่างโมเลกุลและอะตอมซึ่งเรียกว่า Van der Waals forces เช่น อะตอมของไฮโดรเจนซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเกาะกับประจุลบได้ 2 อะตอม โดยจะเกาะกับอะตอมออกซิเจนของโมเลกุลน้ำและออกซิเจนบนผิวของ Clay particles แรงเกาะกันนี้เรียกว่า hydrogen bond

ตามปกติที่ผิวของ particles จะเกิดเป็นประจุลบ ในบางกรณีก็เกิดเป็นประจุบวกได้ เช่น คาโอลิไนท์ ที่มี pH น้อยกว่า 5 ประจุบวกและประจุลบบน particles ของดินจะดูดกัน เกิดแรงดึงดูด ซึ่งเรียกว่า Coulomb forces

นอกจากนี้ยังมีสาเหตุอื่น ๆ เช่น แรงดึงผิวของน้ำบน clay particles จะดึงให้ particles เข้าหากันได้ และ Chemical bond พวกเหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ฯลฯ ซึ่งรวมอยู่กับดินก็สามารถทำให้เกิดแรงดึงระหว่าง particles ของดินได้เช่นกัน

ถ้าผลรวมของแรงผลักและแรงดึงดูดเป็นแรงผลัก particles ของดิน ก็จะผลักแยกออกจากกัน ยังผลให้เกิดการพองตัวขึ้น

2.1.4 <u>โครงสร้างดิน</u> (Soil Structure)

ได้มีผู้แบ่งโครงสร้างดินออกเป็นหลายแบบต่าง ๆ กันตามลักษณะการจัดเรียงตัวของ particles ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแบ่งเป็นแบบใหญ่ ๆ 2 แบบ คือ

(1) โครงสร้างเป็นระเบียบ (Dispersed Structure)

ถ้าผลลัพธ์ของแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่าง clay particles เป็นแรงผลัก มันก็จะผลักตัวเองให้เคลื่อนที่แยกจากกัน และมีการจัดเรียง particles ให้ขนานกัน ซึ่งจะได้โครงสร้างที่เป็นระเบียบ (dispersed structure) ดินที่บดอัดทางด้านเปียกของความชื้น optimum มักจะมีโครงสร้างแบบนี้ (รูปที่ 2.2 (ก))

(2) โครงสร้างระเกะระกะ (Flocculated Structure)

ถ้าผลลัพธ์ของแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่าง clay particles เป็นแรงดึงดูด particles มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่เข้าหากัน และเกาะกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ได้โครงสร้างที่ระเกะระกะ (flocculated structure) ดินที่บดอัดทางด้านแห้งของความชื้น optimum มักจะมีโครงสร้างแบบนี้ (รูปที่ 2.2 (ข))

2.2 ทฤษฎีการบดอัด (Compaction Theories)

มีทฤษฎีที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัดอยู่หลายทฤษฎีด้วยกัน คือ

2.2.1 ทฤษฎี Capillarity และการหล่อลื่น (Lubrication)

PROCTOR (1933) สรุปว่า ปริมาณความชื้นมีผลต่อดิน ผลประการแรกคือ capillarity :

> "ปริมาณความชื้นซึ่งมีอยู่ในดินที่แห้งมาก ๆ จะอยู่รอบ particles เหมือนกับฟิลม์บาง ๆ ซึ่งเกาะอยู่ได้เพราะแรงดึงผิว (surface tension) เมื่อฟิลม์มาสัมผัสกัน แรง capillary ซึ่งเกิดโดยแรงดึงผิวของรอยต่อระหว่างฟิลม์จะดึง particles ไว้ด้วยกัน เกิดเป็นความต้านทานต่อแรงเสียดทานระหว่าง particles นั้น"

ผลนี้ ใช้พิจารณาสำหรับดินเมื่อบดอัดที่ความชื้นต่ำ ๆ จะได้ความหนาแน่นแห้งต่ำ ผลประการที่สอง คือ การหล่อลื่น (lubrication) เขาเสนอแนะว่า น้ำจะเป็นตัวหล่อลื่น particles ลดแรงเสียดทานระหว่างกัน และลดความต้านทานต่อการเฉือน (Shearing resistance) การลดความต้านทานต่อการเฉือนระหว่างการบดอัดจะทำให้ particles สามารถเคลื่อนที่ไปอยู่ในสภาพที่แน่นขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนทางด้านเปียกของปริมาณความชื้น optimum น้ำส่วนที่เกินสำหรับการหล่อลื่น particles จะเข้าไปแทนที่เนื้อดิน จึงมีผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลง

2.2.2 <u>ทฤษฎี เคมี-ฟิสกส์</u> (Physico-Chemical Theory)

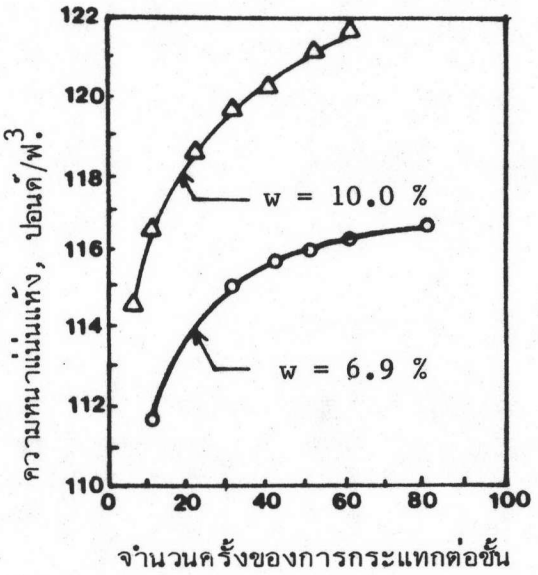
LAMBE (1958) ได้อธิบายด้วยคุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของ particles ของดิน โดยที่ความชื้นต่ำ ๆ จะมีความเข้มข้นของ electrolyte ในน้ำซึ่งอยู่ในช่องว่างสูง ทำให้แรงดึงดูดระหว่าง particles สูง และแรงผลักจะต่ำเมื่อบดอัด particles จะไม่เรียงตัวมากนัก โครงสร้างจะอยู่กันอย่างระเกะระกะ เพราะแรงดึงดูดระหว่าง particles ยังสูง ทำให้ดินมีช่องว่างมาก ได้ความหนาแน่นแห้งต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้น double layers จะเริ่มขยายตัวทำให้แรงดึงดูดระหว่าง particles ลดลง โครงสร้างของดินจะมีการจัดเรียงตัวกันมากขึ้น เป็นผลให้ดินแน่นขึ้น ความหนาแน่นของดินจะมากขึ้น เมื่อเพิ่มความชื้นขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงปริมาณความชื้น optimum ซึ่งดินจะจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากขึ้นและอยู่ในสภาพที่แน่น เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นต่อไปน้ำที่เพิ่มนี้จะไปแทนที่ส่วนที่เป็นของแข็ง ความหนาแน่นแห้งจะลดลงถึงแม้ว่า particles จะจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากขึ้นก็ตาม

SEED และ CHAN (1959) ได้ศึกษาและแถลงเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมมุติฐานของโครงสร้างดินระหว่างการบดอัด ที่ความชื้นต่ำ ๆ ความเข้มข้นของ electrolyte ที่สูงจะป้องกันมิให้เกิด double layer เต็มที่ เป็นผลให้แรงผลักระหว่าง particles ต่ำ และ particles จะอยู่กันอย่างระเกะระกะ เมื่อเพิ่มความชื้นจะทำให้ความเข้มข้นของ electrolyte ลดลง เกิดการขยายตัวของ double layer แรงผลักระหว่าง particles

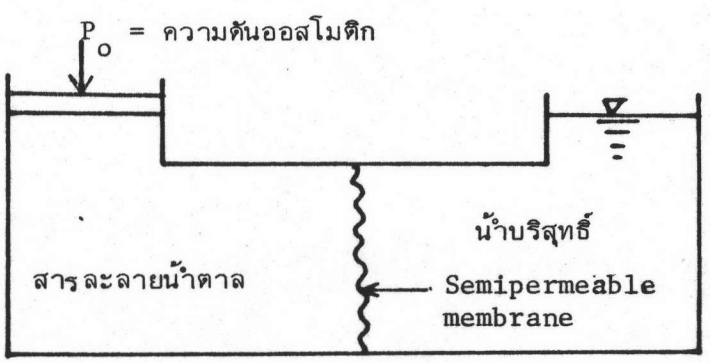
และความดันในช่องว่าง (pore pressure) จะเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานต่อการเฉือนลดลงในระหว่างการบดอัดจึงเกิดการยุบตัวมาก เมื่อปล่อยตุ้มลงไป particles ของดินจะจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากขึ้น และผลของ shear strain จะมีมากเมื่อความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้น optimum

2.2.3 <u>ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล</u> (Effective Stress Theory)

OLSON (1963) ให้ความเห็นว่า ความต้านทานของดินต่อการบดอัดจะเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงเฉือน (shearing stress) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่าง particles ที่จุดสัมผัส เขาสมมติว่า ดินจะอยู่ในสภาพหลวมก่อนการบดอัด หน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) ในดินที่หลวมจะมีค่าน้อยเพราะมีความดันโดยรอบ (confining pressure) ต่ำ เมื่อปล่อยตุ้มลงไปทีแรก จะเกิดการยุบตัว (deformation) ขึ้น และจะยุบตัวต่อเนื่องจนกระทั่งการเพิ่มของหน่วยแรงประสิทธิผลสามารถต้านกับความดันที่ปลายตุ้ม (foot pressure) ได้ การเพิ่มของหน่วยแรงประสิทธิผลเนื่องจากการเพิ่มของหน่วยแรงด้านข้างจะป้องกันมิให้ดินแยกออกไปหมด เมื่อเอาตุ้มขึ้นหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งจะกลับเป็นศูนย์ และดินจะขยายตัวเล็กน้อยในแนวดิ่งซึ่งจะถูกต้านโดยการเกิดความดันในช่องว่างที่เป็นลบ (negative pore pressure) และหน่วยแรงด้านข้างที่เหลืออยู่ (residual latteral stress) ซึ่งจะทำให้เกิดหน่วยแรงกดเพียงพอที่จะทำให้ดินอยู่ในสภาพแน่นต่อไป เมื่อปล่อยตุ้มลงไปครั้งที่สองดินซึ่งอยู่ในสภาพแน่นกว่าเดิม ความดันที่ปลายตุ้มยังคงมีผลในการทำให้ particles แตกตัว ไล่อากาศออกจากช่องว่างและเพิ่มความหนาแน่นแห้ง แต่เนื่องจากมีแรงด้านข้างมาก การยุบตัวของตุ้มในครั้งที่สองจะน้อยกว่าครั้งแรก และการเพิ่มของความหนาแน่นจะลดลง ความต้านทานต่อการเฉือนของดินที่ความชื้นค่าหนึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งของการกระแทกเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มจนกระทั่งขบวนการของการบดอัดสิ้นสุดลงหรือจนกว่าดินจะแน่นและแข็งมากจน particles ไม่เคลื่อนที่เมื่อถูกกระแทก เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดความดันในช่องว่างเป็นบวกมากขึ้น ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลลดลง ดังนั้นจะสามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงขึ้นเรื่อย ๆ ผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ความหนาแน่น



รูปที่ 2.3 ผลของจำนวนครั้งของการกระแทกที่มีต่อความหนาแน่นแห้งในการบดอัด Silty Clay



รูปที่ 2.4 ความดันออสโมติกของสารละลาย

แห้งจะสูงขึ้นจนกระทั่งถึงปริมาณความชื้น optimum ความหนาแน่นแห้งจะไม่สามารถสูงกว่านี้ได้อีกแล้ว เมื่อความชื้นของดินเกินปริมาณความชื้น optimum ความหนาแน่นแห้งจะลดลง เวลาปล่อยตุ้มลงกระแทกจะไม่ค่อยมีผลในการเพิ่มความหนาแน่น แต่จะทำให้มีการยุบตัวของดินมาก ซึ่งก่อให้เกิดผลสองประการ คือ ประการแรกการยุบตัวที่มากขึ้นนี้จะทำให้เกิดความดันในช่องว่างเป็นลบ หน่วยแรงประสิทธิผลจะสูงขึ้นและทำให้ดินสามารถต้านกับความดันที่ปลายตุ้มได้ ประการที่สอง เมื่อเกิดการยุบตัวมาก ปลายตุ้มจะมีลักษณะเหมือนฐานรากตื้น (Shallow foundation) ดังนั้นดินก็จะสามารถต้านกับความดันที่ปลายตุ้มได้ ถึงแม้ความต้านทานต่อการเฉือนของดินจะลดลงก็ตาม

ทฤษฎีการบดอัดทั้ง 3 ทฤษฎีนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวกด้วยกัน คือ พวกหนึ่งมีความคิดทางด้านฟิสิกส์ (PROCTOR, 1933 และ OLSON, 1963) อีกพวกหนึ่งมีความคิดด้านเคมี-ฟิสิกส์ (LAMBE, 1958) ซึ่งทั้งสองพวกนี้ก็มีความคิดที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาดูแล้วทฤษฎีของ LAMBE และ OLSON มีความน่าเชื่อถือสามารถใช้อธิบายการบดอัดดินได้พอสมควร

2.3 การพองตัว (Swelling)

เมื่อดินที่บดอัดได้รับน้ำ น้ำจะซึมเข้าสู่เนื้อดินและเกิดการพองตัวขึ้น ความดันที่ใช้กดดินไว้ให้ปริมาตรคงที่ตลอดเวลา เรียกว่า ความดันพองตัว (swelling pressure) ในเรื่องการพองตัวนี้จะขอกล่าวเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นสาเหตุ และส่วนหลังเป็นการทบทวนงานในอดีต

2.3.1 สาเหตุของการพองตัว

ดินจะพองตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสาเหตุหลายประการ แต่สามารถแบ่งเป็นสาเหตุใหญ่ ๆ 2 ประเภท คือ ผลจากด้านเคมี-ฟิสิกส์ และผลจากด้านกลศาสตร์

2.3.1.1 ผลจากด้านเคมี-ฟิสิกส์ (Physico-Chemical Effects)

(1) แร่ดินเหนียว (Clay Minerals)

แร่ดินเหนียวมีผลต่อการพองตัวเป็นอย่างมาก แร่ดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ

(specific surface area) มากจะเกิดการพองตัวมาก ทั้งนี้เพราะพื้นที่ผิวมากจะสามารถรับน้ำได้มาก เมื่อเกิด double layer กว้างขึ้นจนมาเกี่ยวกันกับของ particles ใกล้เคียง เนื่องจากประจุใน double layer เหมือนกันจะผลักกัน จึงเกิดแรงผลักให้ particles แยกออกจากกันได้มาก

พื้นที่ผิวจะขึ้นกับความหนาของ particles เช่น มอนท์โมริลโลไนท์ มีความหนาเพียง 20 อังสตรอม (Ångstrom) จะมีพื้นที่ผิวถึง 800 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเกิดการพองตัวสูง ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดและการพองตัวของแร่ดินเหนียว (YONG and WARKENTIN,1975)

แร่ดินเหนียว	ความหนาโดยประมาณ, Å(10^{-10}ม.)	พื้นที่ผิวมากที่สุด, $ม.^2/ก$	การเปลี่ยนแปลงปริมาตร
มอนท์โมริลโลไนท์	20	800	มาก
อิลไลท์	200	80	ปานกลาง
คาโอลิไนท์	1,000	15	น้อย

(2) ความดันออสโมติก (Osmotic Pressure)

หลักการของความดันออสโมติก คือ เมื่อมีสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นต่างกันโดยมี semi-permeable membrane กั้นไว้ น้ำจะไหลจากสารละลายที่เจือจางไปสู่สารละลายที่เข้มข้นกว่า ขบวนการนี้เรียกว่า ออสโมซิส (Osmosis)

รูปที่ 2.4 ใช้อธิบายหลักการดังกล่าว คือ เมื่อมีน้ำและสารละลายน้ำตาลอยู่คนละซีกของ semi-permeable membrane น้ำจะไหลจากส่วนที่เป็นน้ำไปสู่สารละลายน้ำตาล ความดันที่ใช้กดเพื่อป้องกันมิให้น้ำไหลผ่าน semi-permeable membrane มาสู่สารละลายน้ำตาล เรียกว่า ความดันออสโมติก (Osmotic pressure)

ในกรณีของดินเหนียวและน้ำ เนื่องจากความเข้มข้นของ exchangeable cations ใน double layer มีมากกว่าใน free water และ cations เกาะติดกับ

clay particles โดยอำนาจสนามไฟฟ้าลบของ particles สนามไฟฟ้านี้จะทำหน้าที่เหมือน semi-permeable membrane คือ ยอมให้น้ำไหลเข้าสู่ doubles layer แต่ไม่ยอมให้ cations ออกไปจาก double layer ได้

เมื่อไม่คิดถึงสาเหตุอย่างอื่น ความดันพองตัวจะเท่ากับความดันออสโมติก โดยใช้สมการของ Vant'Hoff จาก Ideal gas laws สมมติว่า particles จัดเรียงตัวขนานกันและมี double layer มาเกี่ยวกันเป็นผลให้ความเข้มข้นของไอออนสูงกว่าภายนอก จะคำนวณหาค่าความดันพองตัวได้ดังนี้

$$P_o = RT(C_c - NC_o)$$

เมื่อ P_o = ความดันออสโมติก

R = ค่าคงที่ของก๊าซ

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

C_c = ความเข้มข้นของ cations ที่กึ่งกลางระหว่าง particles, moles/litre

C_o = ความเข้มข้นของเกลือในน้ำที่อยู่ในช่องว่าง, moles/litre

N = จำนวนของ cations และ anions ต่อโมเลกุลของสารละลาย

หรือจะหาความดันออสโมติกจากสูตรที่ละเอียดกว่าดังนี้

$$P_o = RTC_o\left(\frac{C_c}{C_o} + \frac{C_o}{C_c} - 2\right)$$

ได้มีผู้เสนอวิธีหาค่า C_c กันหลายคน ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นวิธีที่ยุ่งยากมาก YONG และ WARKENTIN ได้แสดงวิธีคำนวณหาค่า C_c อย่างง่าย โดยใช้คำตอบของสมการ differential ที่หาได้โดย Langmuir ดังนี้

$$C_c = \frac{¶^2}{z^2B(d + x_o)^2 10^{-16}}$$

เมื่อ C_c = ความเข้มข้นของ cations ที่กึ่งกลางระหว่าง clay particles, moles/litre

z = วาเลนซี่ของ exchangeable cations

B = 10^{15} cm/millimole (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ dielectric constant)

d = ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่าง clay plate, Å

x_o = correction factor

$\simeq \frac{1}{z}$ Å สำหรับอิลไลท์

$\simeq \frac{2}{z}$ Å สำหรับคาโอลิไนท์

$\simeq \frac{4}{z}$ Å สำหรับมอนท์โมริลโลไนท์

การหาความดันพองตัวจากความดันออสโมติกนี้ นับได้ว่าช่วยในการคาดคะเนความดันพองตัวได้ดีพอสมควร

(3) โครงสร้างดิน (Soil Structure)

การจัดเรียงตัวของ particles มีผลต่อการพองตัวเช่นกัน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าดินที่มีโครงสร้างแบบระเกะระกะจะเกิดการพองตัวมากกว่าดินที่มีโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ ทั้งนี้เนื่องจากแรง capillary ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่น้ำถูกดูดเข้าไปในช่องว่างของดิน มักเกิดขึ้นกับดินที่มีพื้นที่ผิวไม่มากนัก ยกเว้นกรณีดินที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น โซเดียม มอนท์โมริลโลไนท์ การพองตัวจะมีผลจากแรงผลักซึ่งเกิดขึ้นจากความดันออสโมติกเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการจัดเรียงตัวของ particles ที่ขนานกันจะได้การพองตัวมากที่สุด (YONG and WARKENTIN, 1975)

2.3.1.2 ผลทางกลศาสตร์ (Mechanical Effects)

การพองตัวของดินมีผลจากทางกลศาสตร์หลายอย่างดังนี้

(1) แรงดึงผิวและแรง capillary

น้ำจะซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของดินได้โดยแรงดึงผิวและแรง capillary ซึ่งจะไปทำให้เกิดการพองตัวของดินขึ้น การดูดซึมน้ำจะเกิดแรงขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่าง ถ้าช่องว่างเล็กจะเกิดแรง capillary มาก และที่ความชื้นต่ำ ๆ จะเกิดแรงดึงผิวมากเช่นกัน

(2) ผลจากความดันอากาศ (Air Pressure Effects)

เมื่อดินดูดน้ำเข้าไปจนพองตัวเต็มที่แล้ว พบว่า degree of saturation ส่วนใหญ่ไม่ถึง 100 เปอร์เซนต์ แสดงว่ายังจะต้องมีอากาศในช่องว่างของดินอยู่ อากาศส่วนนี้เมื่อถูกอัดโดยแรง cappillary จะเกิดความดันขึ้นจนสามารถผลักให้ particles ของดินแยกออกจากกัน เป็นผลให้เกิดการพองตัวขึ้น

(3) Elastic Rebound

004744

เมื่อเอาน้ำหนักบรรทุกออกจะเกิดการพองตัวของดิน เนื่องจาก elastic rebound ซึ่งพอจะพิจารณาได้ 2 กรณี ดังนี้

(ก) Elastic compression ของโครงดิน (Soil skeleton) จุดสัมผัสของ particles ที่ยุบลงไปเมื่อถูกแรงกด จะพยายามกลับสู่สภาพเดิมเมื่อเอาน้ำหนักออก (รูปที่ 2.5 ก.) แต่ดินไม่ได้มีลักษณะอีลาสติกอย่างแท้จริง เมื่อเอาน้ำหนักบรรทุกออกมันจะไม่สามารถคืนกลับมาถึงตำแหน่งเดิมได้ เพียงแต่จะกลับคืนตัวมาบ้างทำให้เกิดการพองตัวขึ้น

(ข) การโก่งของ particles ที่เป็นแผ่น เมื่อถูกแรงกระทำ particles ของดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นจะโก่ง เมื่อปล่อยแรงมันจะพยายามกลับคืนไปอยู่ในลักษณะเดิม ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัว (รูปที่ 2.5 ข.) ผลแบบนี้มักเกิดขึ้นกับ particles ที่เป็นแผ่นใหญ่ ๆ เช่น mica

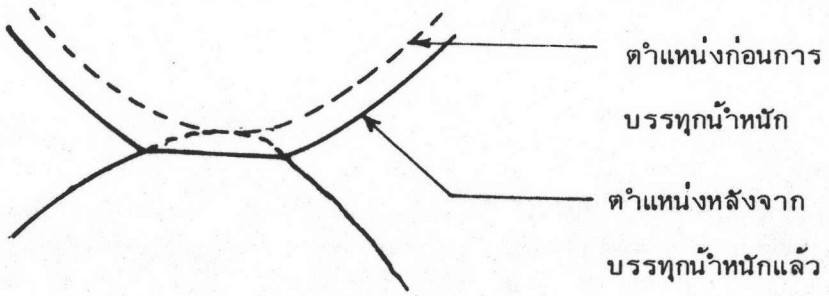
(4) พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

การใช้พลังงานที่แตกต่างกันในการบดอัด จะทำให้คุณสมบัติของดินแตกต่างกันโดยเฉพาะการพองตัว จะขอกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 4 ซึ่งเป็นผลการทดลองและวิจารณ์

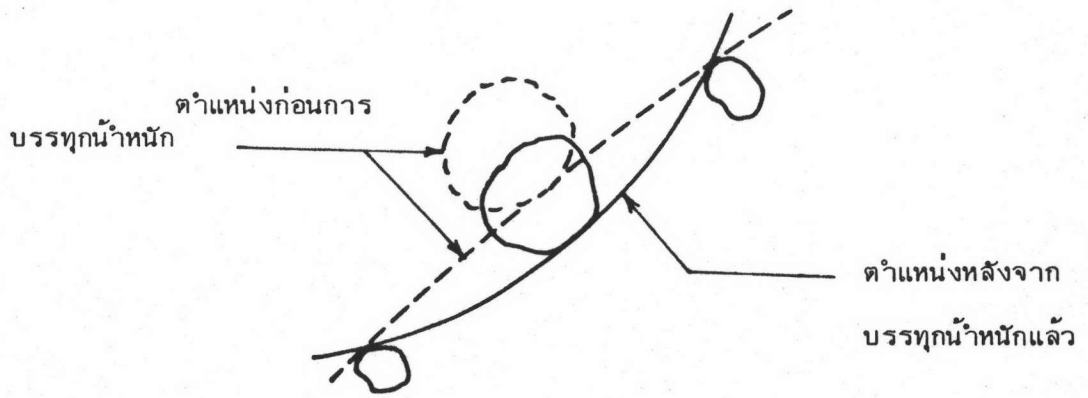
2.3.2 ทบทวนงานในอดีตเกี่ยวกับการพองตัว

การศึกษาการพองตัวในอดีต ได้มีการศึกษาทั้งการพองตัวของดินที่ยุบอัดตัว (consolidated clay) ในธรรมชาติหรือโดยการตกตะกอนเทียม และการพองตัวของดินที่บดอัด (compacted clay)

i 17361758



ก. Elastic compression ของดินที่จุดสัมผัส



ข. การโก่งของ particle ที่เป็นแผ่น

รูปที่ 2.5 สาเหตุของ Elastic Rebound

(1) การพองตัวของดินที่ยุบอัดตัว (Consolidated Clay Swelling)

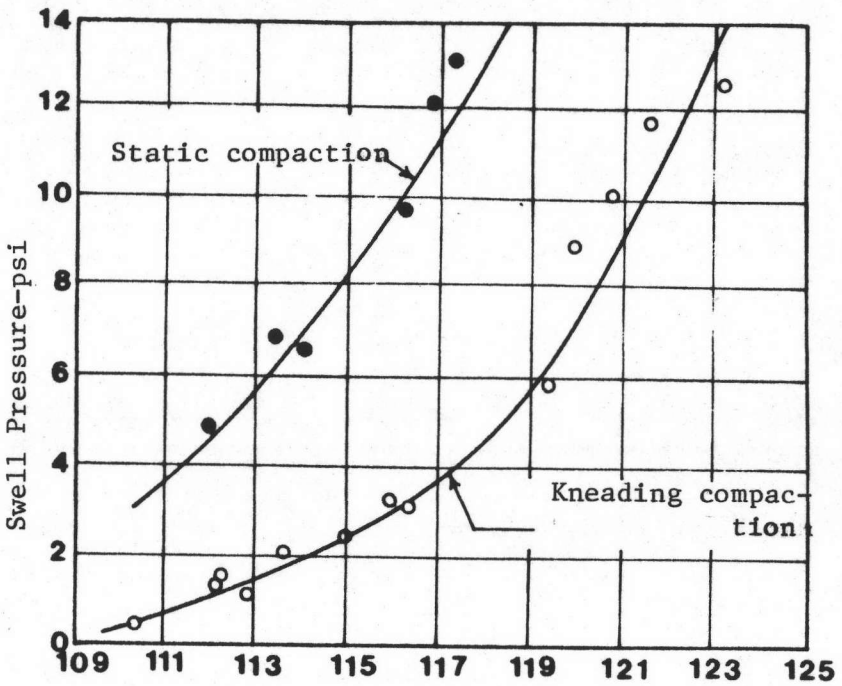
HOLTZ และ GIBBS (1956) ได้ศึกษาการพองตัวทั้งของดินในธรรมชาติและดินที่บดอัด เขาได้ทดลองหา colloid content, plasticity index และ shrinkage limit ตลอดจนทดลองหาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความดันพองตัว เขาพบว่าปริมาณมอนท์โมริลไนท์ในดินมีผลต่อการพองตัวมาก

KOMONIK และ DAVIS (1969) ใช้ผลการทดลองของดินที่ไม่ถูกรบกวน (undisturbed) และดินที่ถูกรบกวน (disturbed) มากกว่า 200 ตัวอย่างในประเทศอิสราเอล มาวิเคราะห์โดยใช้สถิติเข้าช่วย เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันพองตัวและคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ซึ่งสรุปได้ว่าความดันพองตัวจะเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาแน่นแห้งและ liquid limit เพิ่มขึ้น

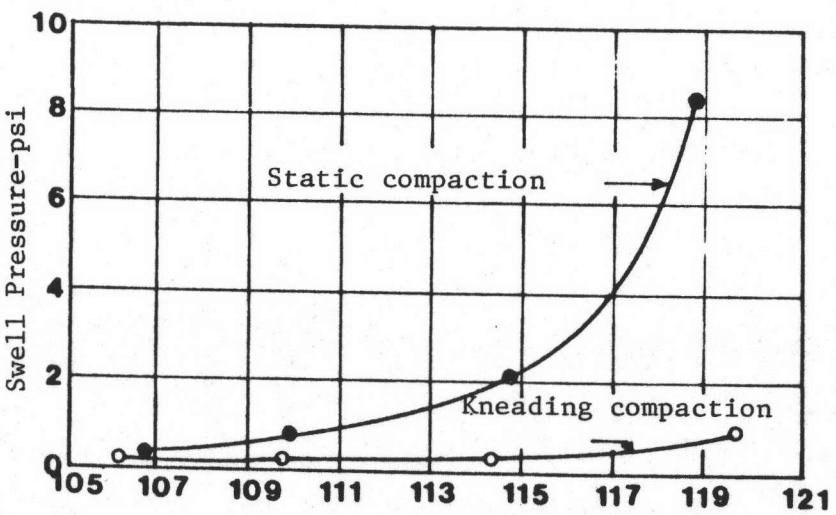
SUDDIPRAKARN (1974) ศึกษาผลของโครงสร้างดินที่มีต่อการพองตัวของดินเหนียว โดยใช้ดินที่ได้จากการตกตะกอนเทียมของดินรังสิตในสารละลาย NaCl ซึ่งมีความเข้มข้นต่างกัน แล้วนำมาทดลองหาค่าความดันพองตัว ทำ Consolidation และ Rebound Test โดยแช่ดินในน้ำและสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกัน เขาสรุปว่าการพองตัวของดินที่ถูกน้ำหนักบรรทุกไว้แล้วลดน้ำหนักจะมีผลมาจากความดันออสโมติก และ elastic rebound เป็นส่วนใหญ่และการพองตัวของดินเมื่อแช่ในน้ำจะมีมากกว่าในสารละลาย

(2) การพองตัวของดินที่บดอัด (Compacted Clay Swelling)

SEED,MITCHELL และ CHAN (1962) ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการพองตัวและความดันพองตัวของดินที่บดอัด โดยใช้ดินประเภท sandy clay และ silty clay มาเตรียมตัวอย่างโดยบดอัดด้วยวิธี kneading และ static เมื่อบดอัดดินทางด้านแห้งของความชื้น optimum จะได้ผลไม่แตกต่างกันมากนักสำหรับการเตรียมตัวอย่างทั้ง 2 วิธี แต่เมื่อบดอัดดินทางด้านเปียกแล้วจะได้ผลกว่าการบดอัดโดยวิธี static ได้ค่าความดันพองตัวสูงกว่าวิธี kneading ดังรูป 2.6 และ 2.7 ทั้งนี้เพราะการบดอัดโดยวิธี static จะได้โครงสร้างระเกะระกะ (flocculated) มากกว่า นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้



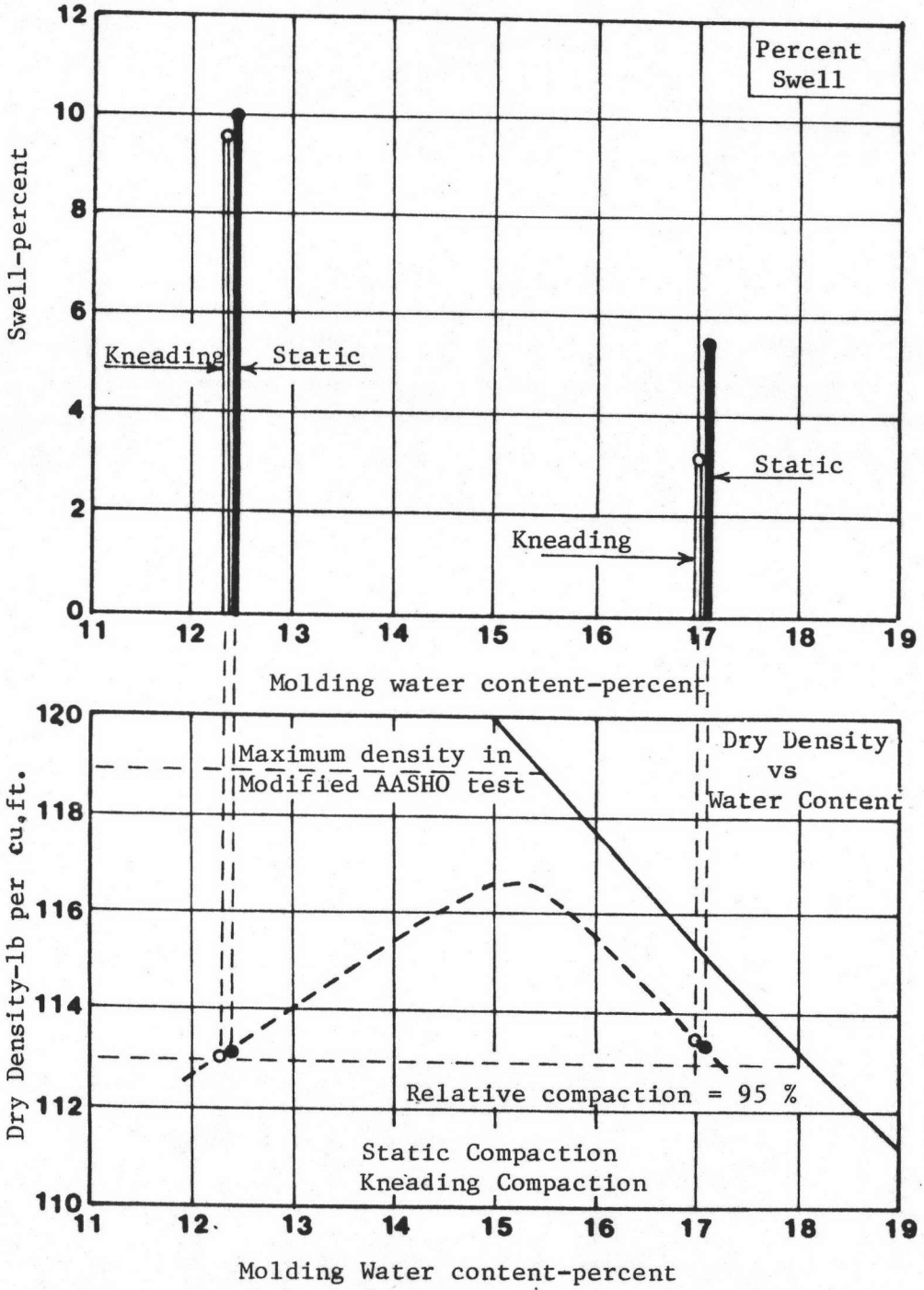
(a) Pittsburg Sandy Clay



(b) Vicksburg Silty Clay

รูปที่ 2.6 ผลของวิธีการบดอัดที่มีต่อความดันพองตัวสำหรับตัวอย่างดิน บดอัดที่ degree of saturation สูง ๆ

(SEED, MITCHELL and CHAN, 1962)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการพองตัวของตัวอย่างดินเหนียวปนทรายบดอัดโดยวิธี kneading และ static

(SEED, MITCHELL and CHAN, 1962)

แข่ดินเพิ่มขึ้น การพองตัวจะลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเท่ากัน ถ้าความหนาแน่นของดินเพิ่มขึ้น การพองตัวและความดันพองตัวจะเพิ่มขึ้น และการพองตัวจะลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น

BUNNAG (1964) ศึกษาลักษณะการพองตัวของ Plastic Soil โดยใช้ดินกรุงเทพบดอัดแล้วหาความดันพองตัวและการพองตัวทั้งเมื่อยังไม่ผสมปูนขาวและเมื่อผสมปูนขาว 2 ถึง 5 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งได้ผล ว่าเมื่อใช้ปูนขาวเพิ่มขึ้นการพองตัวของดินจะลดลง

CHALERNNIT (1965) ศึกษาการพองตัวของ Plastic Soil โดยใช้ดินเหนียวในกรุงเทพ ฯ มาบดอัด มีทั้งใช้ทรายเป็นตัว stabilizer และไม่ใช้โดยผสมทรายตั้งแต่ 10 ถึง 50 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก ผลปรากฏว่าเมื่อเพิ่มปริมาณทรายมากขึ้น การพองตัวจะลดลง และเมื่อเขาเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นการพองตัวก็จะลดลงเช่นกัน

NALEZNY และ LI (1967) ศึกษาผลของโครงสร้างดินและ thixotropic hardening ที่มีต่อลักษณะการพองตัวของดินที่บดอัดโดยใช้ Vicksburg Buckshot Clay บดอัดโดยวิธีกระแทก (impact) และ kneading ผลปรากฏว่าเมื่อเก็บตัวอย่างดินที่บดอัดแล้วไว้หลาย ๆวัน โดยให้ความชื้นคงที่ ความดันพองตัวจะลดลง เพราะว่ากำลังในการต้านแรงเฉือนของดินจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก thixotropic hardening เขาเชื่อว่าความดันพองตัวที่บดอัดน่าจะมีผลมาจากแรงระหว่าง particles และโครงสร้างดินเป็นสำคัญ

2.4 <u>ความสามารถในการอัดตัวของดินเหนียวที่บดอัด</u> (Compressibility of Compacted Clay)

2.4.1 <u>การยุบอัดตัวของดิน</u> (Consolidation of Soils)

เมื่อดินได้รับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งปริมาตรที่ลดลงนี้มีสาเหตุมาจาก

(ก) การอัดตัว (Compression) ของส่วนที่เป็นของแข็ง

(ข) การอัดตัวของส่วนที่เป็นน้ำหรืออากาศภายในช่องว่าง

(ค) การไล่น้ำและอากาศออกจากช่องว่าง

ส่วนที่เป็นของแข็งและน้ำในช่องว่างถือว่าไม่สามารถจะอัดตัวได้ และไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ดังนั้นปริมาตรที่ลดลงจึงเนื่องมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งของส่วนที่เป็นของแข็งโดยการกลิ้ง (rolling) หรือการไถล (sliding) และการไล่อากาศหรือน้ำออกจากช่องว่าง ความสามารถในการอัดตัวของดินขึ้นกับความแข็งเกร็ง (rigidity) ของโครงสร้างดิน ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างและแรงที่ยึดเกาะระหว่างกัน

เมื่อดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำได้รับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น เริ่มแรกน้ำจะเป็นตัวรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด เพราะถือว่าน้ำไม่สามารถอัดตัวได้ (incompressible) เมื่อเทียบกับโครงสร้างดิน ถ้าปล่อยให้น้ำไหลออกได้ปริมาตรจะลดลง น้ำหนักจะค่อย ๆ ถ่ายให้โครงสร้างดินเป็นตัวรับ จนในที่สุดโครงสร้างดินจะรับน้ำหนักที่เพิ่มนี้ทั้งหมด ขบวนการนี้เรียกว่า "การยุบอัดตัว" (consolidation)

การยุบอัดตัวแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) <u>การยุบอัดตัวขั้นต้น</u> (Primary Consolidation) เกิดขึ้นตั้งแต่เมื่อดินได้รับน้ำหนักบรรทุก แล้วน้ำจะเป็นตัวรับน้ำหนักโดยเกิดเป็นความดันน้ำในช่องว่างที่เกิน (excess pore water pressure) เมื่อปล่อยให้น้ำไหลออกได้ ความดันนี้จะลดลง โครงสร้างดินจะเป็นตัวรับความดันเพิ่มขึ้น ขบวนการนี้จะสิ้นสุดเมื่อความดันน้ำในช่องว่างที่เกินลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์

2) <u>การยุบอัดตัวขั้นที่สอง</u> (Secondary Consolidation) เกิดขึ้นหลังจากความดันน้ำในช่องว่างที่เกินลดลงหมดแล้ว แต่การยุบตัวยังคงมีต่อไป ซึ่งยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่นอน แต่อาจเกิดขึ้นจากการยุบตัวของโครงสร้างดินก็ได้

2.4.2 <u>ทฤษฎีการยุบอัดตัวของ Terzaghi</u>

TERZAGHI ได้ให้ข้อสมมติสำหรับการใช้ทฤษฎีการยุบอัดตัว ดังนี้

1. ดินต้องอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated) และเป็นเนื้อเดียวกัน

2. การไหลของน้ำและการยุบตัว (deformation) ของดินจะเกิดขึ้นในทิศทางเดียว

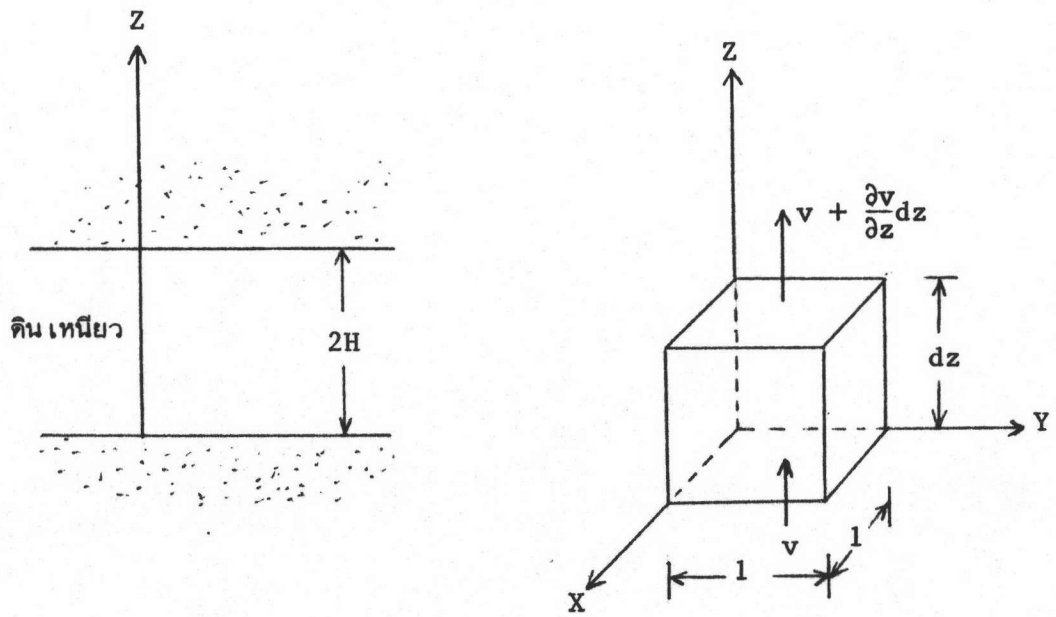
3. การไหลของน้ำในดินต้องเป็นไปตามกฎของ Darcy ($v = ki$)

4. น้ำและของแข็งไม่สามารถจะอัดตัวได้ (incompressible) เมื่อเทียบกับโครงสร้างดิน

5. สัมประสิทธิ์ของการไหลซึม (permeability) มีค่าคงที่

6. การยุบตัวถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความสูงเริ่มแรก

7. การเพิ่มความดันกระทำอย่างทันทีทันใด



(ก) (ข)

รูปที่ 2.8 การยุบอัดตัวของดิน

รูปที่ 2.8 (ก) แสดงชั้นของดินซึ่งมีการยุบตัวในทิศทางเดียว

รูปที่ 2.8 (ข) แสดงชิ้น (element) ของดินที่ตัดออกมาจากชั้นดิน

ถ้าเพิ่มความดัน $\Delta\sigma$ เกิด hydraulic gradient เป็น $-\frac{\partial h}{\partial z}$ ความเร็วของการไหลของน้ำจะเป็น

$$v = ki = -k\frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z} \qquad (1)$$

เมื่อ u เป็นความดันน้ำในช่องว่าง และ k เป็นสัมประสิทธิ์ของการไหลซึม ความแตกต่างของน้ำที่ไหลออกและเข้าในชิ้นของดินจะเป็น

$$-\frac{k}{\gamma_w}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}dz - \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}dz$$

ซึ่งเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตร $\frac{dv}{dt}$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\,dz \qquad (2)$$

แต่ $m_v = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\bar{\sigma}} = \frac{\Delta V}{V\Delta\bar{\sigma}}$

$$\Delta V = m_v\Delta\bar{\sigma}V = m_v\Delta\bar{\sigma}dz$$

$$\frac{dV}{dt} = m_v\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial t}dz = -m_v\frac{\partial u}{\partial t}dz \qquad (3)$$

จากสมการ (2) และ (3)

$$-m_v\frac{\partial u}{\partial t}dz = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}dz$$

หรือ

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = C_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (4)$$

$$\left(C_v = \frac{k}{m_v\gamma_w}\right)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

เมื่อ $t = 0$, $u = u_i = \Delta\sigma$ (5.a)

ถ้าน้ำสามารถไหลออกได้สะดวกทั้งข้างบนและข้างล่างของชั้นดิน ความดันน้ำส่วนที่เกินจะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งข้างบนและข้างล่าง

เมื่อ $z = 0, u = 0$ (5.b)

$z = 2H, u = 0$ (5.c)

ให้ $u = F(z)G(t)$ (6)

แทนค่าสมการ (6) ลงในสมการ (4) แล้วแก้สมการ differential โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต จะได้

$$u = \Sigma_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{H}\int_0^{2H} u_i \sin\frac{n\pi z}{2H}\,dz\right)\left(\sin\frac{n\pi z}{2H}\right)e^{-n^2\pi^2C_vt/4H^2} \quad (7)$$

พิจารณากรณี u_i = ค่าคงที่

$$u = \Sigma_{n=1}^{\infty} \frac{2u_i}{n\pi}(1-\cos n\pi)\left(\sin\frac{n\pi z}{2H}\right)e^{-n^2\pi^2C_vt/4H^2} \quad (8)$$

$u = 0$ เมื่อ $n = 2,4,6,\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$

$$u = \Sigma_{n=1}^{\infty} \frac{4u_i}{n\pi}\left(\sin\frac{n\pi z}{2H}\right)e^{-n^2\pi^2C_vt/4H^2} \qquad n = 1,3,5,\ldots\ldots$$

$$u = \Sigma_{m=0}^{\infty} \frac{4u_i}{(2m+1)\pi}\left(\sin\frac{(2m+1)\pi z}{2H}\right)e^{-(2m+1)^2\pi^2C_vt/4H^2}$$

$$u = \Sigma_{m=0}^{\infty} \frac{2u_i}{M}\left(\sin\frac{Mz}{H}\right)e^{-M^2T_v} \quad (9)$$

เมื่อ $M_v = \frac{1}{2}\pi(2m+1)$

$T_v = \frac{C_vt}{H^2}$ ซึ่งเรียกว่า Time factor

จะหา degree of consolidation U_z ได้จาก

$$U_z = \frac{u_i - u}{u_i}$$

$$U_z = 1 - \frac{u}{u_i} \quad (10)$$

$$U_z = 1 - \Sigma_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M}\sin\frac{Mz}{H}\,e^{-M^2T_v} \quad (11)$$

ซึ่ง U_z จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่า z ดังนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยของ degree of consolidation ได้จาก

$$U = 1 - \frac{\frac{1}{2H}\int_0^{2H} u\,dz}{u_i} = 1 - \Sigma_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2}\,e^{-M^2T_v} \quad (12)$$

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง U และ T_v ได้จาก Chart (TAYLOR, 1948) และจะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการยุบอัดตัว C_v ได้ 2 วิธี คือ

(1) <u>วิธีของ Taylor</u> หรือวิธีรากที่สองของเวลา

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

ซึ่ง t_{90} เป็นเวลาที่ดินเกิดการยุบอัดตัวแล้ว 90 เปอร์เซนต์

(2) <u>วิธีของ Casagrande</u> หรือวิธี logarithm ของเวลา

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

ซึ่ง t_{50} เป็นเวลาที่ดินเกิดการยุบอัดตัวแล้ว 50 เปอร์เซนต์

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง e กับ log σ จะได้ดรรชนีของการอัดตัว C_c (Compression index)

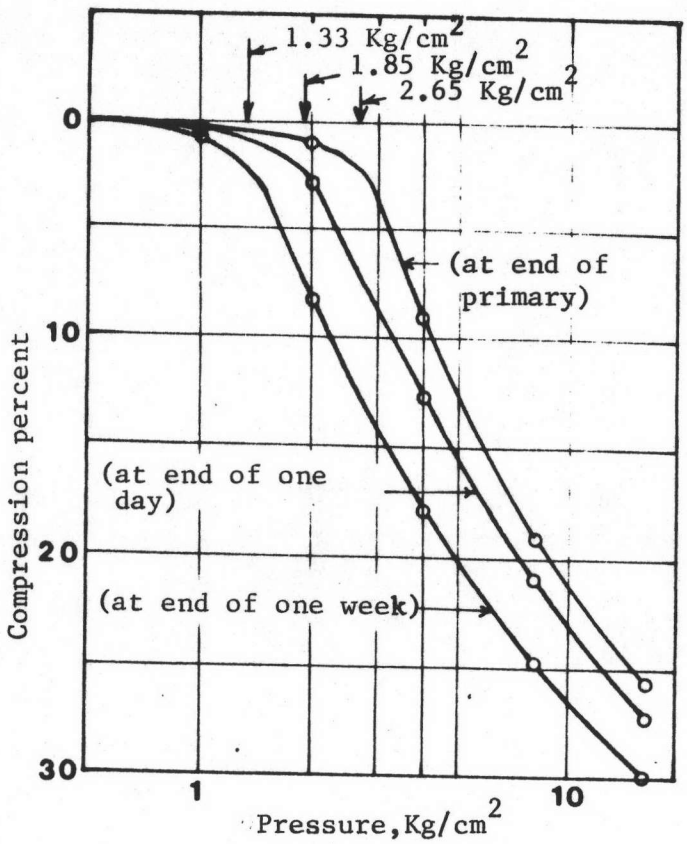
$$C_c = -\frac{de}{d(\log\sigma)} = \frac{\Delta e}{\log \sigma_1/\sigma_2}$$

และเมื่อเอาน้ำหนักบรรทุกออก ดินจะพองตัวขึ้น สามารถหาค่าดรรชนีของการพองตัว C_s (swell index) ได้ด้วยวิธีเดียวกัน

CRAWFORD (1964) ศึกษาการยุบอัดตัวของดินโดยให้ช่วงเวลาการเพิ่มน้ำหนักที่แตกต่างกัน คือ เมื่อสิ้นสุดการยุบอัดตัวขั้นต้น (primary consolidation) เมื่อช่วงเวลาห่างกัน 1 วัน และ 7 วันตามลำดับ ผลปรากฏว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ compression-log pressure curves ของช่วงเวลาทั้ง 3 แบบแทบจะไม่แตกต่างกันเลย เมื่อน้ำหนักบรรทุกมาก ๆ ถึงแม้การอัดตัว (compression) ที่ความดันเดียวกัน ของทั้ง 3 แบบ และค่า preconsolidation pressure จะแตกต่างกัน แต่ค่า C_c จะใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 2.9

2.4.3 <u>ทบทวนงานในอดีตเกี่ยวกับความสามารถในการอัดตัวของดินเหนียวที่บดอัด</u>

LAMBE (1958) ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการอัดตัวของดินเหนียวที่บดอัดแล้ว เมื่อทำให้ดินอยู่ในสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยมีอัตราช่องว่าง (Void ratio) เท่ากัน เขาพบว่า



รูปที่ 2.9 Compression-log pressure curves แสดงถึงผลจากช่วงระยะเวลาการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกัน (Crawford, 1964)

เมื่อน้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ การอัดตัวของดินที่บดอัดทางด้านเปียกของความชื้น optimum จะมีค่ามากกว่าทางด้านแห้ง เขาให้เหตุผลว่า เมื่อดินบดอัดทางด้านแห้งของความชื้น optimum จะมีโครงสร้างแบบระเกะระกะ น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ เพียงจะพยายามกดให้ particles จัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบขึ้นบ้างเท่านั้น ส่วนดินที่บดอัดทางด้านเปียกซึ่ง particles จัดเรียงตัวขนานกันเป็นระเบียบอยู่แล้ว น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ นี้ก็สามารถทำให้ particles เข้าไปชิดกันได้มากขึ้น ทำให้การอัดตัวมากกว่าทางด้านแห้งของความชื้น optimum

เมื่อน้ำหนักบรรทุกมาก ๆ สำหรับดินที่บดอัดทางด้านแห้งของความชื้น optimum ซึ่งมีโครงสร้างแบบระเกะระกะ แรงจะกดให้ particles จัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบในทิศทางตั้งฉากกับแรงนั้น และจะทำให้ particles เข้าไปอยู่จนชิดกันมาก ส่วนดินที่บดอัดทางด้านเปียกซึ่ง particles จัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบแล้ว แรงนี้ก็เพียงสามารถกดให้ particles เข้าไปชิดกันได้บ้าง แต่การอัดตัวจะน้อยกว่าดินที่บดอัดทางด้านแห้งของความชื้น optimum

SUTABUTRA (1967) ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการอัดตัวของดินกรุงเทพฯ โดยบดอัดด้วยวิธี dynamic, static และ kneading ผลปรากฏว่าการบดอัดโดยวิธี static ซึ่งได้โครงสร้างแบบระเกะระกะ จะได้ความสามารถในการอัดตัวน้อยกว่าวิธี dynamic และ kneading