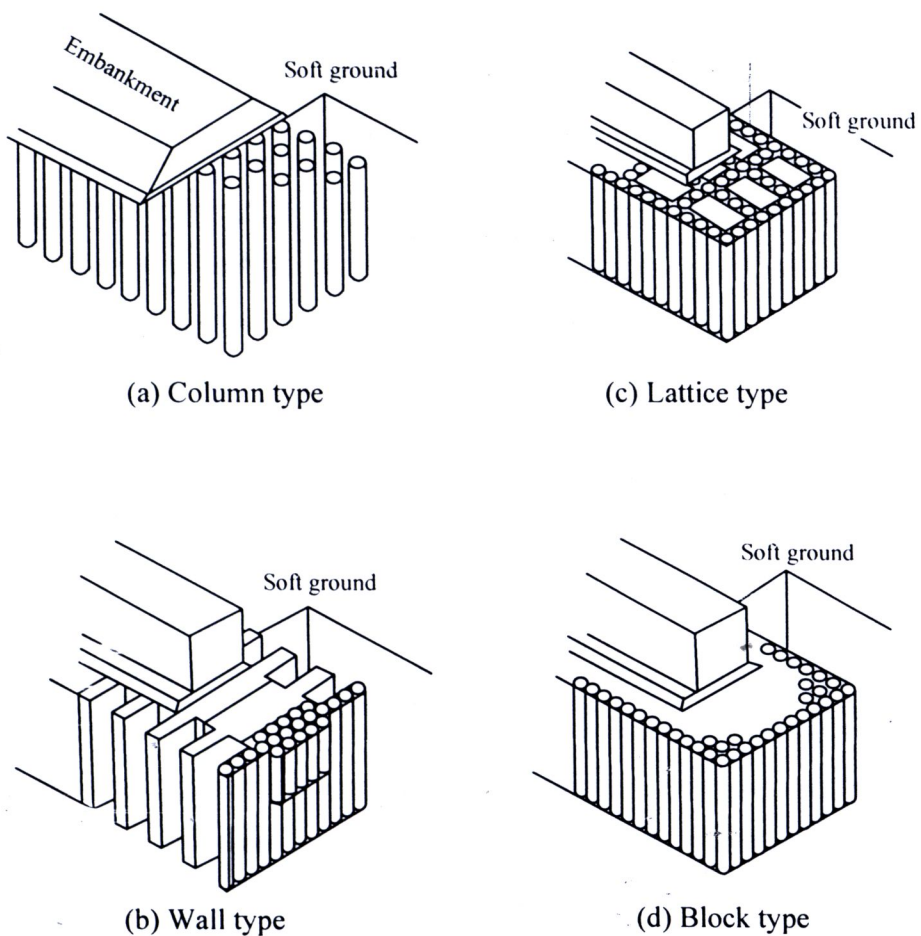


บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1รูปแบบการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคการผสมลึก

รูปแบบของการจัดวางกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อสร้างชั้นดินที่ประกอบด้วยเสาเข็ม (Composite ground) สามารถแบ่งออกได้เป็นสี่รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบเสาเข็ม (column type pattern) รูปแบบบล็อก (block type pattern) รูปแบบกำแพง (wall type pattern) และรูปแบบโครงถัก (lattice type pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคผสมลึก (DJM group 2000)

2.1.1 รูปแบบเสาเข็ม

รูปแบบนี้ติดตั้งได้อย่างง่ายดาย อีกทั้งเครื่องมือติดตั้งยังมีความง่ายไม่ซับซ้อน รูปแบบนี้นิยมใช้ในการปรับปรุงฐานรากดินเหนียวอ่อนในงานโครงสร้างเบาหรือโครงสร้างชั่วคราว (Broms and Boman, 1979 และ Terashi and Tanaka, 1983) การปรับปรุงดินด้วยวิธีนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของดินในงานทางด่วนหรืองานดินชุดชั่วคราว เพื่อป้องกันการรูดบวมในงานดินชุด และบางครั้งเพื่อลดการทรุดตัวของโครงสร้างขนาดเล็กบนชั้นดินเหนียวอ่อน รูปแบบการปรับปรุงนี้เหมาะสำหรับการต้านรับแรงกระทำในแนวตั้ง ซึ่งไม่สามารถต้านทานแรงในแนวนอนขนาดใหญ่ อันอาจเกิดจากแผ่นดินไหว คลื่น และความดันดิน เป็นต้น ดังนั้น รูปแบบนี้จึงไม่สามารถใช้ในงานโครงสร้างท่าเรือขนาดใหญ่ (Kitazume, 1994; and Terashi and Tanaka, 1983)

2.1.2 รูปแบบบล็อก

รูปแบบนี้มีความง่ายในการปฏิบัติงานและออกแบบ รูปแบบนี้เป็นการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนใต้โครงสร้างเกือบทั้งหมด เช่นเดียวกับในกรณีของการแทนที่ด้วยวัสดุเหมาะสม (replacement method) รูปแบบนี้เคยใช้งานปรับปรุงฐานรากของท่าเรือในเมือง Yokohama ซึ่งยาว 12 เมตร การปรับปรุงดินกระทำจนกระทั่งถึงระดับความลึก 24 เมตร เพื่อให้ปลายของบล็อกตั้งอยู่บนชั้นทราย ความกว้างของบล็อกนี้ประมาณ 26 เมตร (Nakamura, 1977) แต่อย่างไรก็ตาม ในบางสถานการณ์ การปรับดินด้วยวิธีนี้อาจไม่เหมาะสม เนื่องจากการปรับปรุงดินในปริมาณที่มากและมีค่าใช้จ่ายที่สูง

2.1.3 รูปแบบกำแพงและรูปแบบโครงถัก

รูปแบบกำแพงและโครงถักถูกใช้เพื่อแก้ปัญหาความไม่เหมาะสมของรูปแบบบล็อก การออกแบบรูปแบบนี้มีความยุ่งยากเนื่องจากปัญหาทางด้านมิติในการจัดวางกำแพงหรือโครงถัก นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของการก่อสร้างยังมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของชั้นดินที่ประกอบด้วยเสาเข็ม (composite ground) เพราะความยาวในช่วงที่ทับซ้อนกัน (overlap) ของรูปแบบทั้งสองนี้สั้นกว่ารูปแบบบล็อก ดังนั้น การควบคุมงานก่อสร้างอย่างรอบคอบจึงเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง รูปแบบกำแพงประกอบด้วยกำแพงยาวและกำแพงสั้น กำแพงสั้นทำหน้าที่ส่งผ่านความเค้นจากโครงสร้างสู่กำแพงยาว ดังนั้น กำแพงยาวจึงเป็นตัวควบคุมทั้งเสถียรภาพและการทรุดตัวของโครงสร้าง

2.2 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว

การวิบัติของเสาเข็มเดี่ยวจะเกิดขึ้นได้ในสองกรณีคือการวิบัติในดิน (soil failure) และการวิบัติในตัวเสาเข็มดินซีเมนต์ (material failure) การวิบัติในดินจะแปรผันตามความเสียดทานระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวรอบเสาเข็ม และกำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม ในขณะที่ การวิบัติในตัวเสาเข็มจะแปรผันตามกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสภาวะไม่ระบายน้ำในกรณีที่เกิดการวิบัติในดิน ($Q_{ult, soil}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{ult, soil} = (\pi d_{col} H_{col} + 2.25 \pi d_{col}^2) S_u \quad (2.1)$$

เมื่อ d_{col} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ H_{col} คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ และ S_u คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวรอบเสาเข็ม สมการนี้มีสมมติฐานว่าความเสียดทานระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวรอบเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวรอบเสาเข็ม (สัมประสิทธิ์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับ 1.0) และกำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าเท่ากับ $9S_u$ ค่าของ S_u ในสมการที่ (2.1) จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะมีค่าลดลงทันทีหลังการติดตั้งเสาเข็มเนื่องจากการรบกวนดิน

Shen (1998) และ Miura et al. (1998) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวรอบเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนาม และพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวจะมีค่าลดลงอย่างมากทันทีหลังการผสม แต่อย่างไรก็ตาม กำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากปรากฏการณ์ Thixotropy การอัดตัวคายน้ำ และกระบวนการทางเคมี การอัดตัวคายน้ำและกระบวนการทางเคมีเป็นการระบายความดันน้ำส่วนเกินและน้ำปูนไปยังดินรอบข้างตามรอยแยกในดินเหนียวที่เกิดจากการพ่นน้ำปูนด้วยความดันสูง (Shen and Miura, 1999) กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวรอบเสาเข็มหลังจากอายุบ่ม 28 วัน มีค่าประมาณร้อยละ 70 ถึง 120 ของกำลังต้านทานแรงเฉือนเริ่มต้น และอาจพิจารณาได้ว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่อายุบ่มเกินกว่า 28 วัน มีค่าเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนเริ่มต้น

สำหรับกรณีการวิบัติในตัวเสาเข็มดินซีเมนต์ Horpibulsuk et al. (2004b) ได้แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ไม่แปรผันตามความเค้นประสิทธิผลในสนาม เมื่อความเค้นประสิทธิผลมีค่าต่ำกว่าความเค้นครากมาก ในทางปฏิบัติ กำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์มักมีค่าประมาณ 400 กิโลปาสกาล ส่งผลให้ความเค้นครากมีค่าสูงประมาณ 500 ถึง 800 กิโลปาสกาล (σ'_c มีค่าระหว่าง 1.3 ถึง 2.2 เท่าของกำลังอัดแกนเดียว (Horpibulsuk et al., 2004a)) และเสาเข็มดินซีเมนต์มีความยาวประมาณ 10 ถึง 20 เมตร ที่ระดับความลึกดังกล่าว ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งจะมีค่าประมาณ 100 ถึง 200 กิโลปาสกาล ซึ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ

ความเค้นคราก ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่วิบัติในตั้วเสาเข็ม ($Q_{ult,col}$) สามารถประมาณได้จากค่ากำลังอัดแกนเดียวดังนี้

$$Q_{ult,col} = A_{col}(q_{uf}) \quad (2.2)$$

เมื่อ q_{uf} คือกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งมีค่าแปรผันตามสภาวะการผสม ที่สภาวะทำงานได้ (workable state) กำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 0.33 เท่าของกำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณต่ำและสูง ตามลำดับ (Horpibulsuk et al., 2004c และ Horpibulsuk et al., 2011) Bergado et al. (1996) กล่าวว่ากำลังอัดเสาเข็มดินซีเมนต์ในสภาวะใช้งานนานๆ อาจมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดในสภาวะไม่ระบายน้ำประมาณร้อยละ 65 ถึง 85 เนื่องจากความคืบ (creep)

2.3 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของกลุ่มเสาเข็ม

น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของกลุ่มเสาเข็มขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็ม ดินซีเมนต์ และกำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ การวิบัติมีด้วยกันสองลักษณะคือการ วิบัติแบบบล็อกเสาเข็ม (block failure) (รูปที่ 2.2a) หรือการวิบัติเฉพาะที่ (local shear failure) (รูปที่ 2.2b) น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเนื่องจากการวิบัติแบบบล็อกสามารถประมาณได้ดังนี้

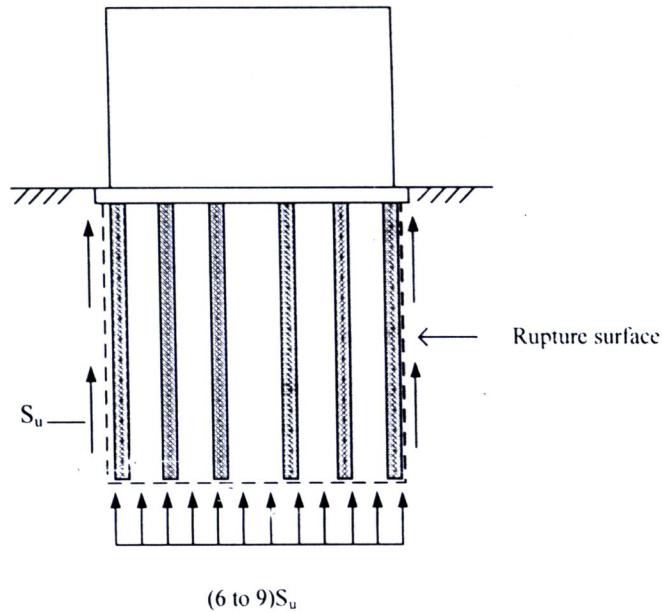
$$Q_{ult,group} = 2S_u H (B_g + L_g) + (6-9) S_u B_g L_g \quad (2.3)$$

เมื่อ B_g , L_g และ H คือความกว้าง ความยาว และความสูงของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์ ตามลำดับ แฟคเตอร์ 6 ใช้สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีความยาวมากกว่าความกว้างมาก และแฟคเตอร์ 9 ใช้สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในการออกแบบ ผู้ออกแบบต้องใช้อัตราส่วนปลอดภัยที่สูง (ไม่น้อยกว่า 2.5) ในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกยอมให้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทรุดตัวที่มากเกินไป การทรุดตัวที่กำลังรับแรงแบกทานประลัยจะมีค่าประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 ของความกว้างฐานราก

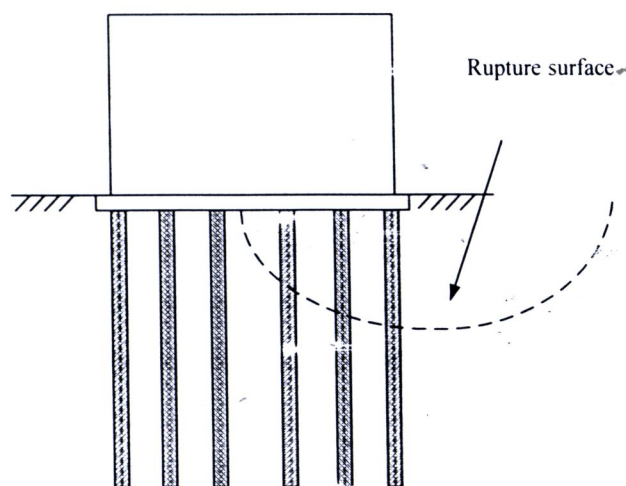
บางครั้ง การวิบัติอาจเกิดที่ขอบของฐานราก ซึ่งเป็นการวิบัติเฉพาะที่ กำลังรับแรงแบกทานเนื่องจากการวิบัติแบบนี้ขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยของดินตามระนาบวิบัติ ซึ่งเป็นส่วนโค้งของวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.2b กำลังรับแรงแบกทานในกรณีเช่นนี้สามารถประมาณได้จากสมการ

$$q_{ult} = 5.5S_{av} \left(1 + 0.2 \frac{b_f}{l_f} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ b_f และ l_f คือความกว้างและความยาวของพื้นที่รับน้ำหนัก (Loaded area) ตามลำดับ S_{av} คือกำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยตามระนาบวิบัติ ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงเฉือนและพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ อัตราส่วนปลอดภัยสำหรับการคำนวณกำลังรับแรงแบกทานยอมให้ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.5



a) Block failure



b) Local shear failure

รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ (Broms and Boman, 1975)

2.4 การทรุดตัวทั้งหมด

การทรุดตัวทั้งหมดของโครงสร้างที่วางตัวอยู่บนเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถคำนวณได้โดยการพิจารณารูปที่ 2.3 การทรุดตัวทั้งหมดเท่ากับผลรวมของการทรุดตัวในชั้นดินปรับปรุง (Δh_1) และการทรุดตัวในชั้นดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใต้ชั้นดินปรับปรุง (Δh_2) ในการคำนวณ ผู้ออกแบบต้องตรวจสอบการทรุดตัวในสองกรณี คือกรณี ก) น้ำหนักบรรทุกไม่ก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์ และกรณี ข) น้ำหนักบรรทุกก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์

กรณี ก) น้ำหนักบรรทุกไม่ก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์

ในกรณีนี้ โมดูลัสการอัดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นตัวควบคุมลักษณะการกระจายน้ำหนักระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินรอบเสาเข็ม โมดูลัสการอัดตัวเฉลี่ยของชั้นดินที่เสริมเสาเข็ม (M_{av}) สามารถประมาณได้ดังนี้

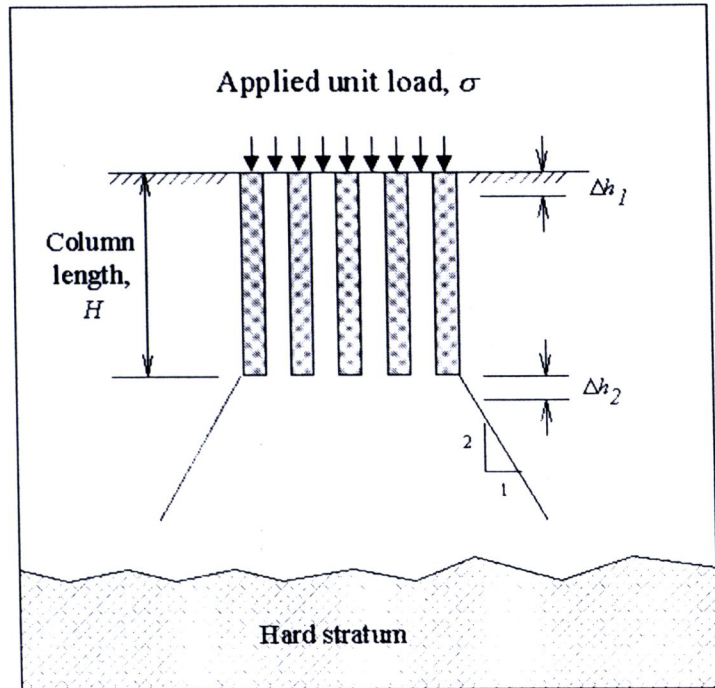
$$M_{av} = (1 - a)M_{soil} + aM_{col} \quad (2.5)$$

การทรุดตัว Δh_1 (รูปที่ 2.3) สามารถประมาณได้ดังนี้

$$\Delta h_1 = \frac{\sigma \times H}{aM_{col} + (1 - a)M_{soil}} \quad (2.6)$$

เมื่อ $a = \frac{N_{col} \times A_{col}}{BL}$ (A_{col} และ N_{col} คือพื้นที่หน้าตัดและจำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์ ตามลำดับ)
 M_{soil} คือโมดูลัสการอัดตัวของดินเหนียวที่ไม่ได้รับการปรับปรุง
 M_{col} คือโมดูลัสการอัดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์
 σ คือความเค้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสมมติให้มีค่าคงที่ตลอดความยาวของเสาเข็ม

โมดูลัสการอัดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์และของดินเหนียวธรรมชาติสามารถหาได้โดยตรงจากกราฟ $e - \log \sigma'$ นอกจากนี้ ค่าของ M_{col} อาจประมาณได้จากกำลังอัดแกนเดียว ดังนี้ $M_{col} = (25 - 100)q_u$ การทรุดตัว Δh_2 ได้บล็อกปรับปรุงสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับการคำนวณการทรุดตัวของดินใต้ฐานรากลึก ซึ่งความเค้นในแนวตั้งที่ปลายเสาเข็มมีค่าเท่ากับความเค้นที่ผิวดินและความเค้นในดินที่ระดับความลึกต่างๆ ได้เสาเข็มสามารถประมาณโดยวิธีประมาณ 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การคำนวณการทรุดตัวทั้งหมด (Broms and Boman, 1979)

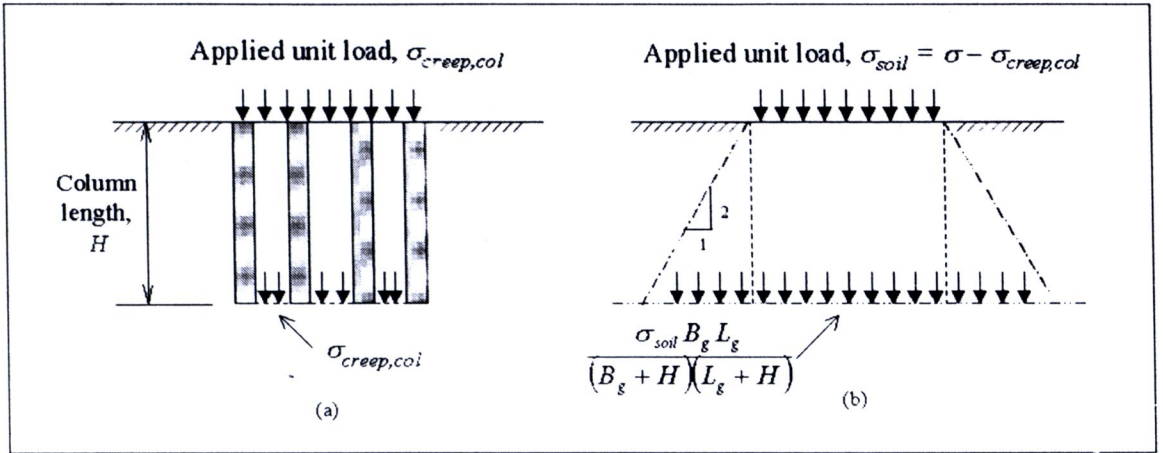
กรณี ๑) น้ำหนักบรรทุกก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์

ในกรณีนี้ น้ำหนักที่กระทำมีค่าสูงมาก จนทำให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์ การทรุดตัวทั้งหมดสามารถคำนวณโดยพิจารณารูปที่ 2.4 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ $\sigma_{creep, col}$ ซึ่งรับโดยเสาเข็มดินซีเมนต์ และ σ_{soil} ซึ่งรับโดยดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์ การคำนวณหา Δh_1 ทำได้เช่นเดียวกับในกรณี ก) โดยการแทนค่า $\sigma_{creep, col}$ ลงในสมการที่ (2.6) ซึ่ง $\sigma_{creep, col}$ คำนวณได้จากน้ำหนักความคืบ (Creep load) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ดังนี้

$$\sigma_{creep, col} = \frac{N_{col} Q_{creep, col}}{BL} \quad (2.7)$$

เมื่อ N_{col} คือจำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์

น้ำหนักบรรทุกทุกส่วนเกินที่เหลือจาก $\sigma_{creep, col}$ จะรับโดยดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์และดินใต้บล็อกปรับปรุง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sigma_{soil} = \sigma_{soil} - \sigma_{creep, col}$ การทรุดตัวเนื่องจาก σ_{soil} ทั้งในบล็อกปรับปรุงและใต้บล็อกปรับปรุงคำนวณได้โดยการแบ่งชั้นดินออกเป็นหลายชั้น โดยการสมมติว่าความเค้นในแนวดิ่งมีค่าลดลงแบบ 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.4b และใช้พารามิเตอร์การอัดตัวของดินเดิม การทรุดตัวทั้งหมดในโซนปรับปรุง (Δh_1) และใต้บล็อกปรับปรุง (Δh_2) เป็นผลรวมของการทรุดตัวเนื่องจาก $\sigma_{creep, col}$ (รูปที่ 2.4a) และ σ_{soil} (รูปที่ 2.4b)



รูปที่ 2.4 การคำนวณการทรุดตัวทั้งหมดเมื่อน้ำหนักบรรทุกทุกก่อให้เกิดความคืบในเสาเข็มดินซีเมนต์ (Broms and Boman, 1979)

2.5 อัตราการทรุดตัว

อัตราการทรุดตัว U ของแต่ละชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการต่อไปนี้ (Carillo, 1942)

$$U = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (2.8)$$

เมื่อ U_v คือระดับการอัดคายตัวคายน้ำในแนวตั้ง และ U_h คือระดับการอัดคายน้ำในแนวนอน

ระดับการอัดตัวคายน้ำในแนวนอน U_h สามารถประมาณได้จากสมการของ Honsbo (1979) เช่นเดียวกับการระบายน้ำของแผ่ระบายน้ำแนวดิ่ง ดังนี้

$$U_h = -\exp\left[\frac{-8T_h}{F}\right] \quad (2.9)$$

$$F = F_n + F_s + F_r \quad (2.10)$$

$$F_n = \ln\left(\frac{D_c}{d_{col}}\right) - 0.75 \quad (2.11)$$

$$F_s = 0 \quad (2.12)$$

$$F_r = \pi Z(2H_{col} - Z_d)\left(\frac{k_h}{q_w}\right) \quad (2.13)$$

เมื่อ Z_d คือระยะจากจุดที่สนใจถึงขอบเขตการระบายน้ำ

H_{col} คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์

k_h คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์

q_w คือความสามารถในการระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งเท่ากับ $k_{col} \frac{\pi d^2}{4}$ เมื่อ k_{col} คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังนั้น แฟคเตอร์ความต้านทานการระบายน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_r = \frac{4Z(2H_{col} - Z_d)}{\pi d_{col}^2} \left[\frac{k_h}{k_{col}} \right] \quad (2.14)$$

Bergado et al. (1999) ได้ใช้ค่า (k_{col} / k_h) เท่ากับ 20 สำหรับการคำนวณการทรุดตัวของชั้นดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ใต้ดินถมของโครงการทางหลวงบางนา-บางปะกง กรุงเทพมหานคร การทรุดตัวของชั้นดินปรับปรุงที่เวลาใดๆ (δ) สามารถประมาณได้จาก

$$\delta = U \times \Delta h_1 \quad (2.15)$$

นอกจากวิธีดังกล่าวข้างต้นแล้ว Lorenzo and Bergado (2003) ได้เสนอวิธีการประมาณการทรุดตัวของ composite ground โดยวิธี analytical method ซึ่งเป็นทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ สมการที่ (2.16) เป็นสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินเฉลี่ยของดินรอบเสาเข็มและค่าความดันน้ำส่วนเกินเฉลี่ยของเสาเข็มที่มีความลึก z และเวลา t

$$\left[\left(\frac{\partial \bar{u}_{up}}{\partial t} \right) + (n^2 - 1) \left(\frac{m_{v,c}}{m_{v,p}} \right) \left(\frac{C_c}{C_c} \right)_p \left(\frac{\partial \bar{u}_c}{\partial t} \right) \right] = c_{v,p} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_{up}}{\partial z^2} \right) \quad (2.16)$$

เมื่อ C_c / C_s = อัตราส่วนของดัชนีการอัดตัวและดัชนีการบวมตัวของเสาเข็มที่ระดับความเครียดที่สอดคล้องกับสภาพน้ำหนักระทำการ

$$m_{v,p} = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวของปริมาตรของเสาเข็มซึ่งเท่ากับ } \frac{k_{h,c}}{c_{h,c} \gamma_w} \frac{k_{h,c}}{c_{h,c} \gamma_w}$$

$$c_{v,p} = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของเสาเข็ม}$$

$$m_{v,c} = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวของปริมาตรของดินรอบเสาเข็ม ซึ่งเท่ากับ } \frac{k_{h,c}}{c_{h,c} \gamma_w}$$

สมการที่ (2.16)สามารถจัดรูปใหม่ภายใต้สองเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

1. สำหรับ Equal stress condition ($\bar{\sigma}'_{v,p} = \bar{\sigma}'_{v,c}$) ซึ่ง $\bar{\sigma}'_{v,p}$ และ $\bar{\sigma}'_{v,c}$ เป็นค่าเฉลี่ยความเค้นประสิทธิผลของเสาเข็มและดินล้อมรอบ ตามลำดับ ดังนั้น

$$\frac{\partial \bar{u}_{up}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}_c}{\partial t} \quad (2.17)$$

จะได้

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_{up}}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \bar{u}_c}{\partial z^2} \quad (2.18)$$

ดังนั้น สมการที่ (2.16)ภายใต้ equal stress condition จะกลายเป็น

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} = \left[\frac{\begin{pmatrix} m_{v,p} \\ m_{v,c} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} m_{v,p} \\ m_{v,c} \end{pmatrix} + (n^2 - 1) \begin{pmatrix} C_v \\ C_v \end{pmatrix}} \right] \left(c_{v,p} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} \right) \right) \quad (2.19)$$

ซึ่ง

$$\left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right) = \left(\frac{k_{v,p}}{k_{v,c}} \right) \left(\frac{c_{h,c}}{c_{v,p}} \right) \approx \left(\frac{k_{v,p}}{k_{v,c}} \right) \left(\frac{c_{h,c}}{c_{v,p}} \right) \quad (2.20)$$

ตัวแปร x ที่ห้อยท้ายสามารถเปลี่ยนไปเป็น "up" หรือ "c" ได้ตามต้องการ ขึ้นอยู่ว่าเป็นกรณีของการอัดตัวคายนํ้าของเสาเข็มหรือเป็นการอัดตัวคายนํ้าของดินรอบข้าง

2. สำหรับ Equal strain condition

$$\frac{\delta s_p}{dz} = \frac{\delta s_c}{dz} \quad (2.21)$$

เมื่อความเครียดของเสาเข็มและดินรอบเสาเข็มเท่ากัน จะกลายเป็น

$$m_{v,p} \left(\frac{\partial \bar{u}_{up}}{\partial t} \right) = m_{v,c} \left(\frac{\partial \bar{u}_{uc}}{\partial t} \right) \quad (2.22)$$

ดังนั้น

$$m_{v,p} \frac{\partial^2 \bar{u}_{up}}{\partial z^2} = m_{v,c} \frac{\partial^2 \bar{u}_{uc}}{\partial z^2} \quad (2.23)$$



ดังนั้น สมการที่ (2.16) ภายใต้ equal strain condition จะกลายเป็น

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} = \left[\frac{c_{v,p}}{1 + (n^2 - 1) \left(\frac{C_c}{C_s} \right)} \right] \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} \right) \quad (2.24)$$

ตัวแปร x ที่ห้อยท้าย ในสมการที่ (2.19) และสมการ (2.20) ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

$$z = 0, \text{ สำหรับ } t > 0: \bar{u}_{up}(0, t) = 0, \text{ และ } \bar{u}_c(0, t) = 0$$

$$z = H, \text{ สำหรับ } t > 0: \left(\frac{\partial \bar{u}_{up}}{\partial t} \right) = 0, \text{ และ } \left(\frac{\partial \bar{u}_c}{\partial t} \right) = 0$$

จากสมการความเค้น (2.19) เมื่อ $\bar{u}_{up}(z, t) = \bar{u}_c(z, t)$ เมื่อ $\bar{u}_c$ เป็นค่าเฉลี่ยที่ใช้กับความเค้นใน composite ground ทั้งหมด เงื่อนไขเบื้องต้นจะสมบูรณ์ เมื่อกรณีที่สภาพความเครียดเท่ากับสมการ (2.20) สำหรับดินรอบเสาเข็มและเสาเข็มตามลำดับ ดังนั้น

ที่ $t = 0$, สำหรับดินเหนียว

$$\bar{u}_{0,c} = \left[\frac{\left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right) n^2}{1 + \left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right) (n^2 - 1)} \right] \bar{u}_0 \quad (2.25)$$

ที่ $t = 0$, สำหรับเสาเข็ม

$$\bar{u}_{0,p} = \left[\frac{n^2}{1 + \left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right) (n^2 - 1)} \right] \bar{u}_0 \quad (2.26)$$

สมการ (2.19) และ (2.24) จะให้คำตอบคล้ายกับการแก้ปัญหสมการการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของ Terzaghi (1925)

เงื่อนไขสมการความเค้น (Equal Stress Condition)

เพื่อหาค่าเฉลี่ยการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ ภายใต้ equal stress condition ของสมการ (2.17) แพลคเตอร์เวลาที่ได้จะนำไปปรับแก้แทนในสมการการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของ Terzaghi ได้ดังนี้

$$T_{v,\sigma} = \left[\frac{\left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right)}{\left(\frac{m_{v,p}}{m_{v,c}} \right) (n^2 - 1) \left(\frac{C_c}{C_s} \right)_p} \right] \left(\frac{c_{v,p} t}{H_p^2} \right) \quad (2.27)$$

ระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยของดินรอบเสาเข็มที่เกิดจากการระบายน้ำแบบทุกทิศทาง ภายใต้ equal stress condition สามารถคำนวณหาได้ ดังนี้

$$\bar{U}_{v,\sigma} = \bar{U}_v(T_{v,\sigma}) \quad (2.28)$$

ระดับการอัดตัวคายนํ้าเฉลี่ยสำหรับเสาเข็ม เท่ากับ

$$\bar{U}_{v,\sigma} = \bar{U}_v(T_{v,\sigma}) \quad (2.29)$$

เมื่อ H_p = เส้นทางระบายน้ำประสิทธิภาพของการอัดตัวคายนํ้าของเสาเข็มดินซีเมนต์

t = เวลาเฉพาะของตักการอัดตัวคายนํ้าที่เวลานั้น ๆ

$T_{v,\sigma}$ = แฟคเตอร์เวลาสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้ equal stress condition ในองค์ประกอบทั้งสอง

$\bar{U}_{v,\sigma}$ = ค่าเฉลี่ยตักการอัดตัวคายนํ้าของดินล้อมรอบภายใต้ equal stress condition (สมการที่ 2.24, 2.28 และ 2.29) เนื่องจากรัศมีการระบายน้ำต่อการอัดตัวคายนํ้าของเสาเข็ม

$\bar{U}_{v,\sigma p}$ = ค่าเฉลี่ยตักการอัดตัวคายนํ้าของเสาเข็มภายใต้ equal stress condition (สมการที่ 2.19, 2.23 และ 2.25)

$\bar{U}_v$ = เป็นฟังก์ชันค่าเฉลี่ยตักการอัดตัวคายนํ้าของ Terzaghi's (1925)

เงื่อนไขสมการความเครียด (Equal Strain Condition)

เพื่อหาค่าระดับการอัดตัวคายนํ้าเฉลี่ยของเสาเข็มดินซีเมนต์ ภายใต้ equal strain condition ของสมการ (2.24) แฟคเตอร์เวลาที่ได้จะนำไปปรับแก้แทนในสมการการอัดตัวคายนํ้าหนึ่งมิติของ Terzaghi แสดงดังนี้

$$T_{v,\varepsilon} = \left[\frac{1}{1 + (n^2 - 1) \left(\frac{C_c}{C_s} \right)_p} \right] \left(\frac{c_{v,p} t}{H_p^2} \right) \quad (2.30)$$

ระดับการอัดตัวคายนํ้าเฉลี่ยของดินรอบเสาเข็มที่เกิดจากการระบายน้ำแบบทุกทิศทาง ภายใต้ equal strain condition สามารถคำนวณหาได้ ดังนี้

$$\bar{U}_{v,\varepsilon} = \bar{U}_v(T_{v,\varepsilon}) \quad (2.31)$$

ค่าระดับการอัดตัวคายนํ้าเฉลี่ยสำหรับเสาเข็ม เท่ากับ

$$\bar{U}_{v,\sigma} = \bar{U}_v(T_{v,\sigma}) \quad (2.32)$$

เมื่อ $T_{v,\sigma}$ = แฟคเตอร์เวลาสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้ equal strain condition ในองค์ประกอบทั้งสอง

$\bar{U}_{v,\sigma}$ = ค่าเฉลี่ยตึกการอัดตัวคายนํ้าของดินล้อมรอบภายใต้ equal strain condition (สมการที่ 2.22, 2.31, และ 2.32) เนื่องจากรัศมีการระบายน้ำต่อการอัดตัวคายนํ้าของเสาเข็ม

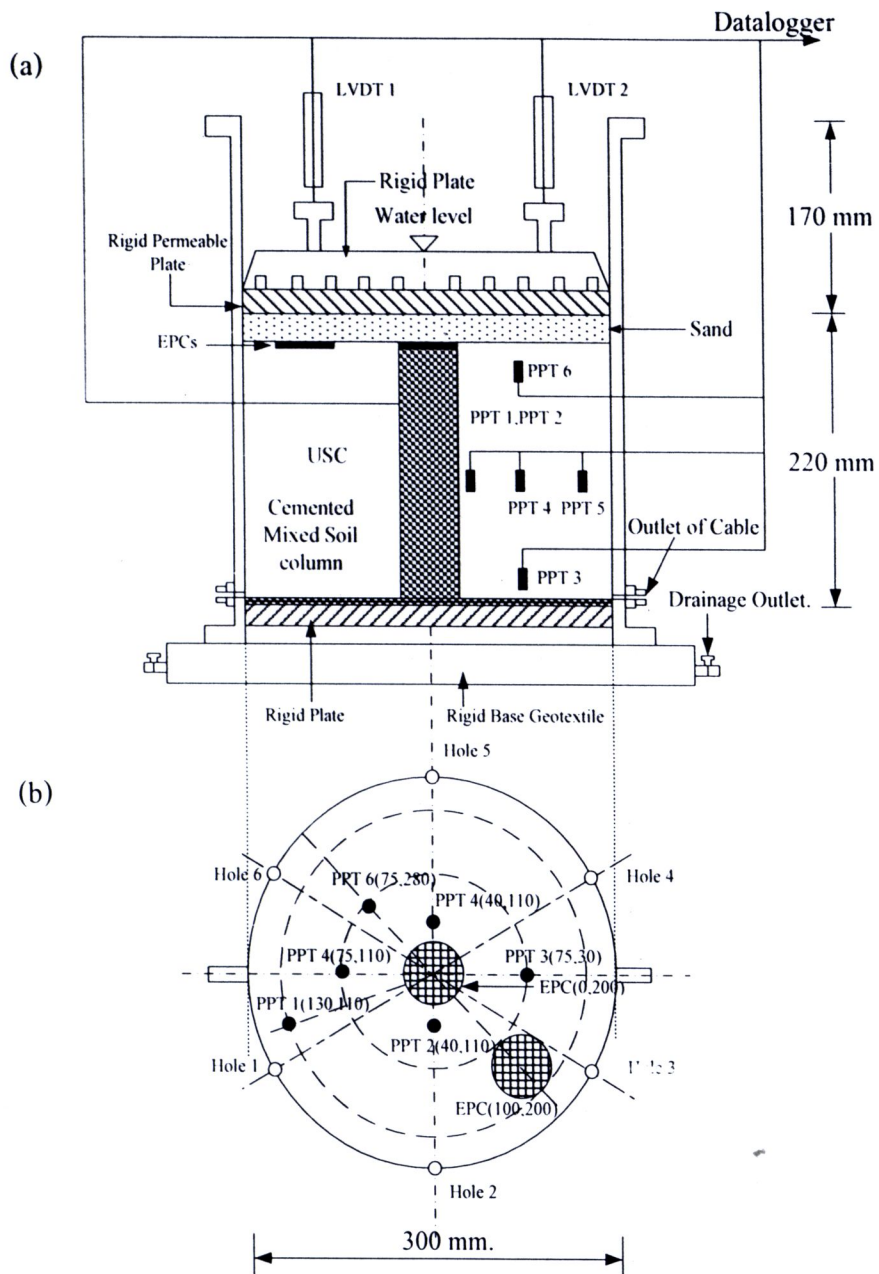
$\bar{U}_{v,\sigma}$ = ค่าเฉลี่ยตึกการอัดตัวคายนํ้าของเสาเข็มภายใต้ equal strain condition เท่ากับ (สมการที่ 2.22, 2.31 และ 2.32)

2.6 พฤติกรรมของ Composite Ground ในแบบจำลองกายภาพ

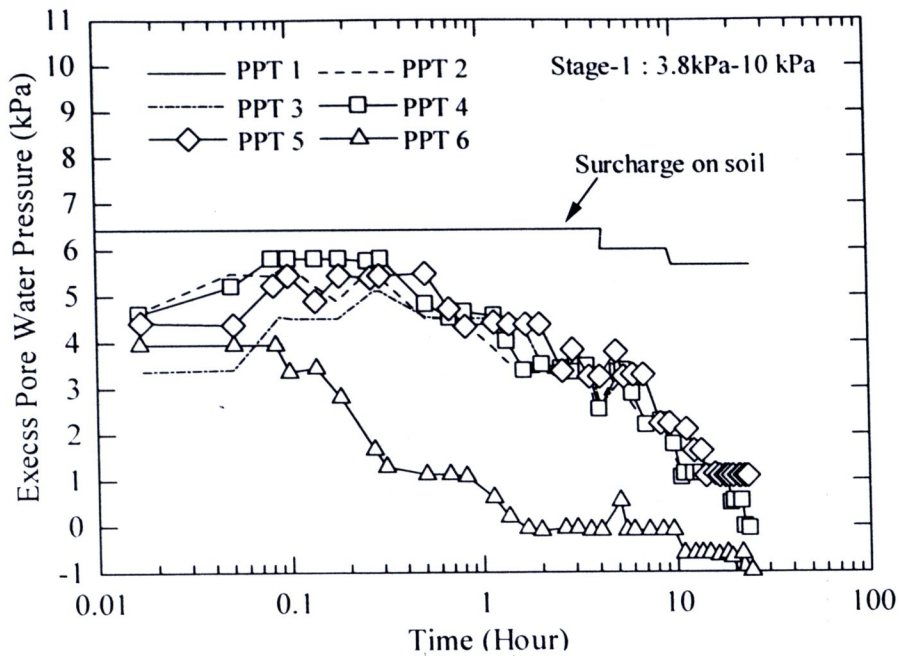
Yin and Fang (2006 and 2007) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวอ่อนที่มีการเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ (รูปที่ 2.5) พบว่าความดันน้ำจะสามารถระบายได้เร็วเมื่ออยู่ใกล้กับขอบเขตที่น้ำระบายออกได้ เมื่อเทียบกับจุดที่ติดตั้งอยู่ตรงกึ่งกลางความสูงของแบบจำลอง

รูปที่ 2.6 ถึง 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินและเวลา การเพิ่มขึ้นของความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำและจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ สาเหตุเกิดจากการถ่ายส่งแรงของ composite ground สู่ดินเหนียวที่บริเวณรอบข้างและการเสียรูปด้านข้างเนื่องจากการวิบัติของเสาเข็ม

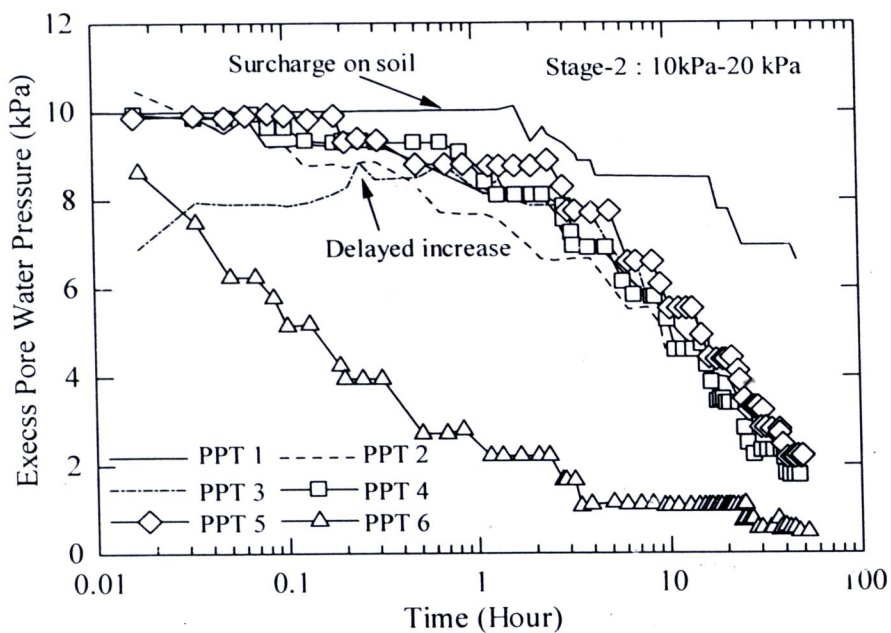
รูปที่ 2.10 ถึง 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอัดตัวคายนํ้า และ stress concentration ratio, n เมื่อ (n คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นที่ถ่ายลงเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อความเค้นที่ถ่ายลงดินเหนียวอ่อน) การอัดตัวคายนํ้าของชั้นดินเสริมเสาเข็มจะเกิดเร็วกว่าชั้นดินเหนียวที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ อัตราการอัดตัวคายนํ้าขึ้นอยู่กับสตีเฟนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเสาเข็มดินซีเมนต์ เมื่อมีการให้น้ำหนักบรรทุก stress concentration ratio, n จะมีการเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเสาเข็มเกิดการวิบัติ (failure) และค่าของ stress concentration ratio, n จะลดลง เนื่องจากความเค้นในแนวตั้งจะถูกส่งถ่ายมายังดินเหนียวรอบเสาเข็ม



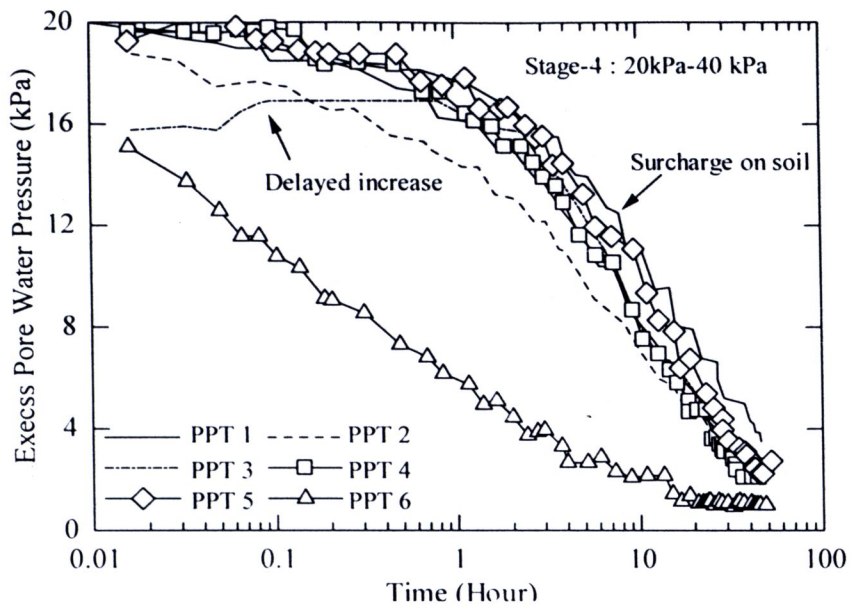
รูปที่ 2.5 แบบถังทดสอบ (a) รูปตัดถังทดสอบ (b) แพลนถังทดสอบ (Yin and Fang, 2006)



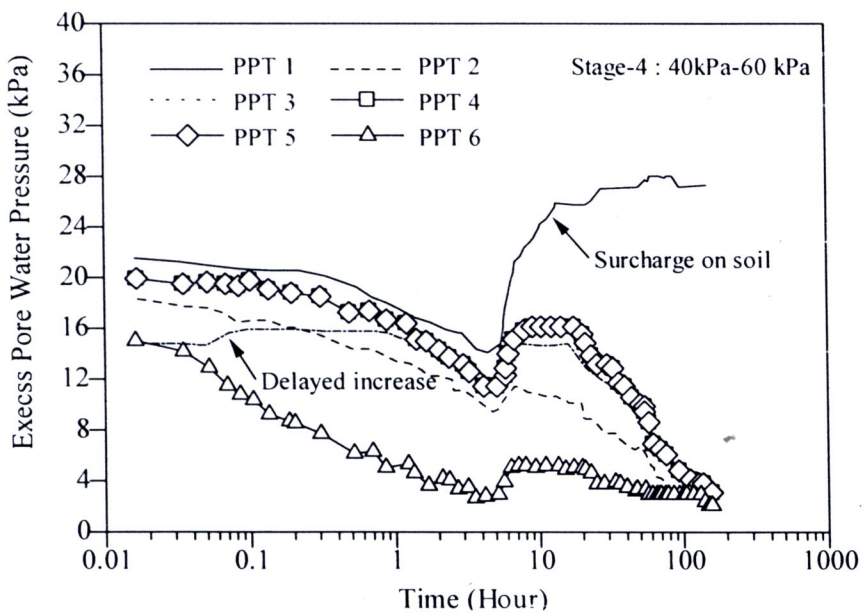
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา
ภายใต้น้ำหนักกดทับ 10 กิโลปาสคาล (Yin and Fang, 2001)



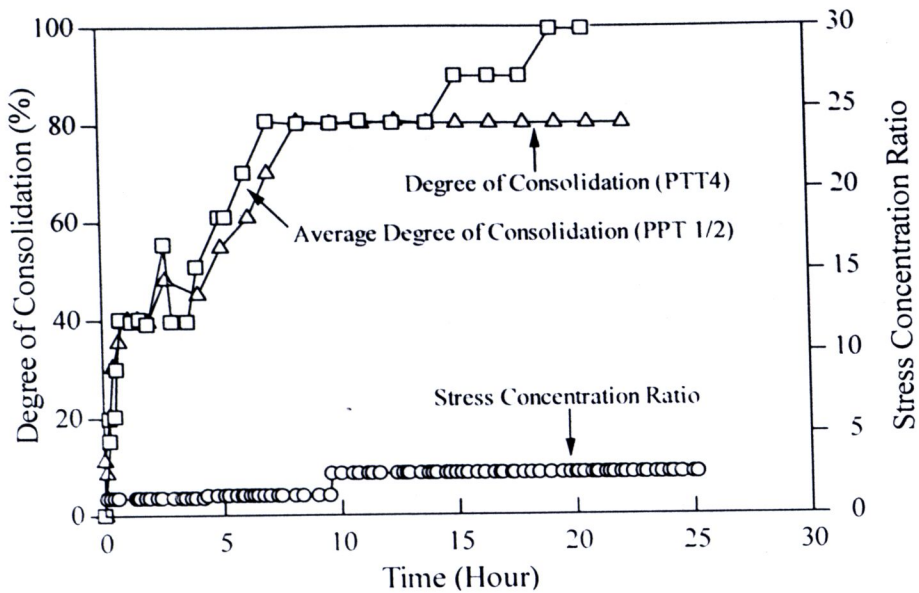
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา
ภายใต้น้ำหนักกดทับ 20 กิโลปาสคาล (Yin and Fang, 2001)



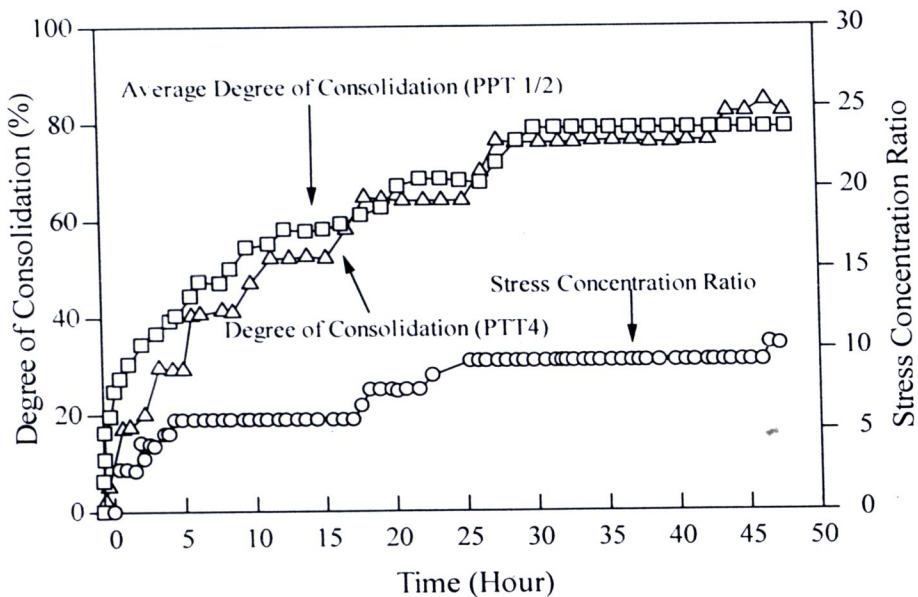
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา
ภายใต้น้ำหนักกดทับ 60 กิโลปาสกาล (Yin and Fang, 2001)



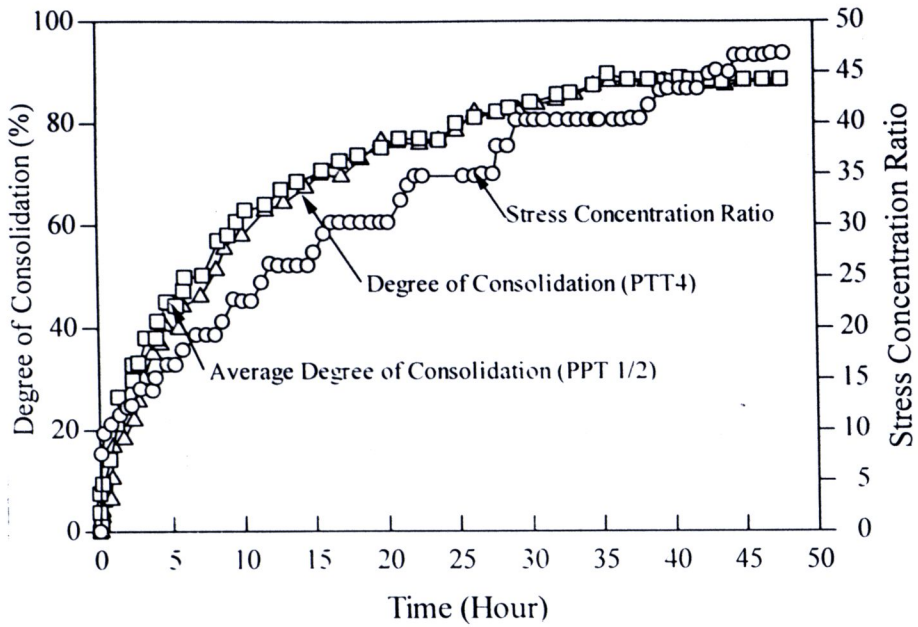
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา
ภายใต้น้ำหนักกดทับ 80 กิโลปาสกาล (Yin and Fang, 2001)



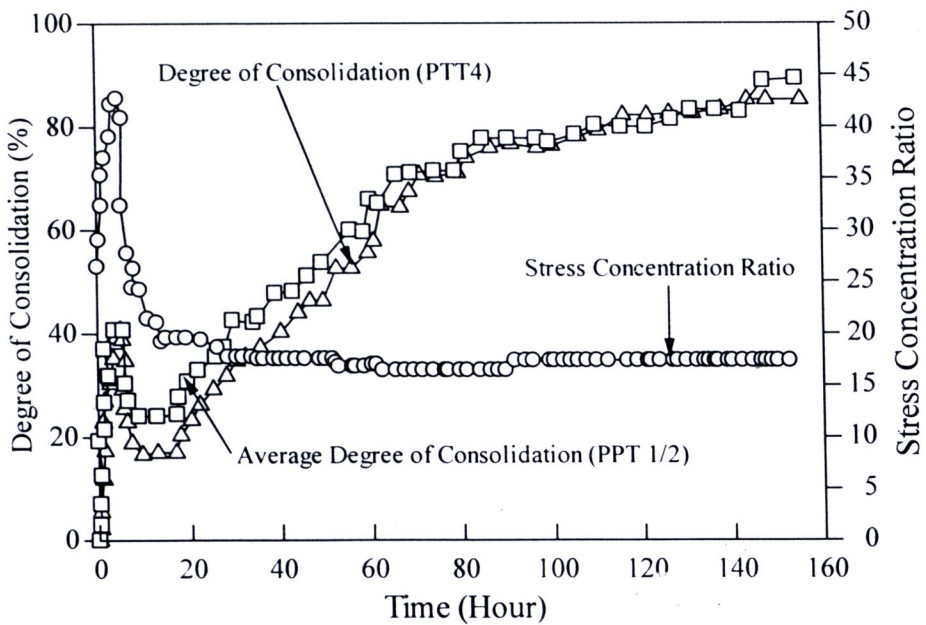
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับการอัดตัวคายน้ำกับเวลา
ภายใต้น้ำหนักกดทับ 10 กิโลปาสกาล (Yin and Fang, 2006)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับการอัดตัวคายน้ำกับเวลา
ภายใต้น้ำหนักกดทับ 20 กิโลปาสกาล (Yin and Fang, 2006)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับการอัดตัวคายน้ำกับเวลา
ภายใต้น้ำหนักกดทับ 40 กิโลปาสกาล (Yin and Fang, 2006)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและระดับการอัดตัวคายน้ำกับเวลา
ภายใต้น้ำหนักกดทับ 60 กิโลปาสกาล (เสาเข็มเกิดการวิบัติ) (Yin and Fang, 2006)