

บทที่ 3

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

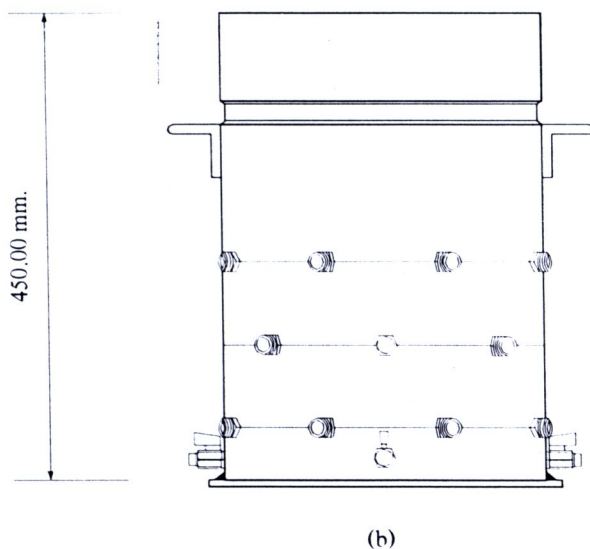
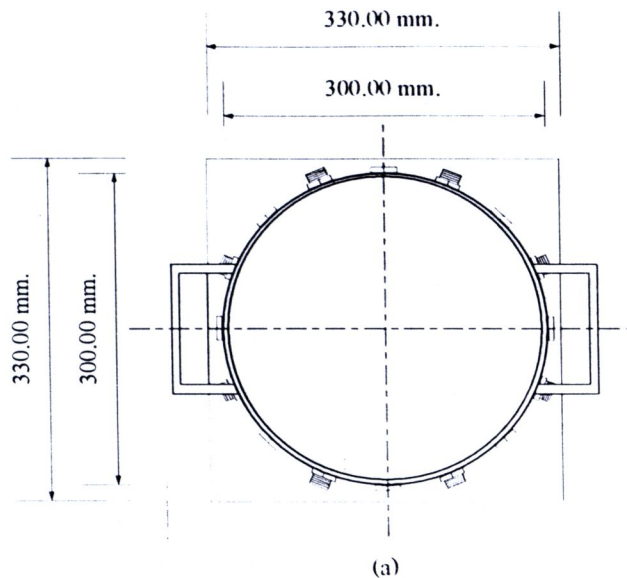
3.1 ดินตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

3.1.1 ดินตัวอย่าง

ดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) จากบริเวณสำนักงานไฟฟ้านครหลวงชิดลม จังหวัดกรุงเทพมหานคร ที่ความลึกประมาณ 2-3 เมตร จากผิวดิน ดินตัวอย่างถูกเก็บใส่ถังพลาสติกมิดชิด หลังจากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อแยกเม็ดดินขนาดใหญ่ แล้วนำมาขึ้นรูปปั้นใหม่ในห้องทดสอบ ความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.70 ชีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 81 และ 34 ตามลำดับ ดินมีส่วนประกอบของดินเหนียวร้อยละ 71.7 ดินตะกอนร้อยละ 17.1 และทรายร้อยละ 11.2 และจัดเป็นดินเหนียวมีสภาพเป็นพลาสติกสูง (CH) ตามการจำแนกระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ดัชนีการอัดตัว (C_c) ดัชนีการขยายตัว (C_e) และความเค้นคราก (σ'_c) มีค่าเท่ากับ 0.498, 0.186 และ 20 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ดินตัวอย่างมีค่ามุม ϕ เท่ากับ 21 องศา และกำลังอัดแกนเดียวหลังสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ ($\sigma'_v = 20$ กิโลปาสคาล) เท่ากับ 25 กิโลปาสคาล

3.1.2 วิธีการทดสอบ

รูปที่ 3.1 (a) และ (b) แสดงรูปแบบและขนาดของถังทดสอบ ถังแบบทดสอบจำลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 300 มิลลิเมตร และความสูง 450 มิลลิเมตร มีหูหิ้วสำหรับยก มีช่องระบายน้ำที่กั้นถึง 4 รู และมีช่องสำหรับสอดสายอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นละ 8 รู ทั้งหมดแบ่งเป็น 3 ชั้น การจำลองชั้นดินในถังทดสอบเริ่มต้นด้วยการเททรายรองพื้นหนา 30 มิลลิเมตร และใส่ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และสูง 400 มิลลิเมตร ตรงจุดศูนย์กลางของถังทดสอบ ต่อจากนั้นเทดินเหนียวกรุงเทพ ที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดินตัวอย่างจะถูกใส่ลงในถังทดสอบ และวางทับด้วยแผ่น Acrylic หนา 8 มิลลิเมตร ที่มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร เพื่อขึ้นรูปด้วยน้ำหนักดทับเท่ากับ 20 กิโลปาสคาล เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ (ดินตัวอย่างมีความสูงประมาณ 200 มิลลิเมตร และปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 60) ทำการถอดแผ่น Acrylic และท่อพลาสติกออกเพื่อใส่เสาเข็มดินซีเมนต์ ชั้นบนสุดรองพื้นด้วยทรายหนา 30 มิลลิเมตร และวางแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร ระหว่างชั้นทรายและดินเหนียวปูด้วยวัสดุสังเคราะห์

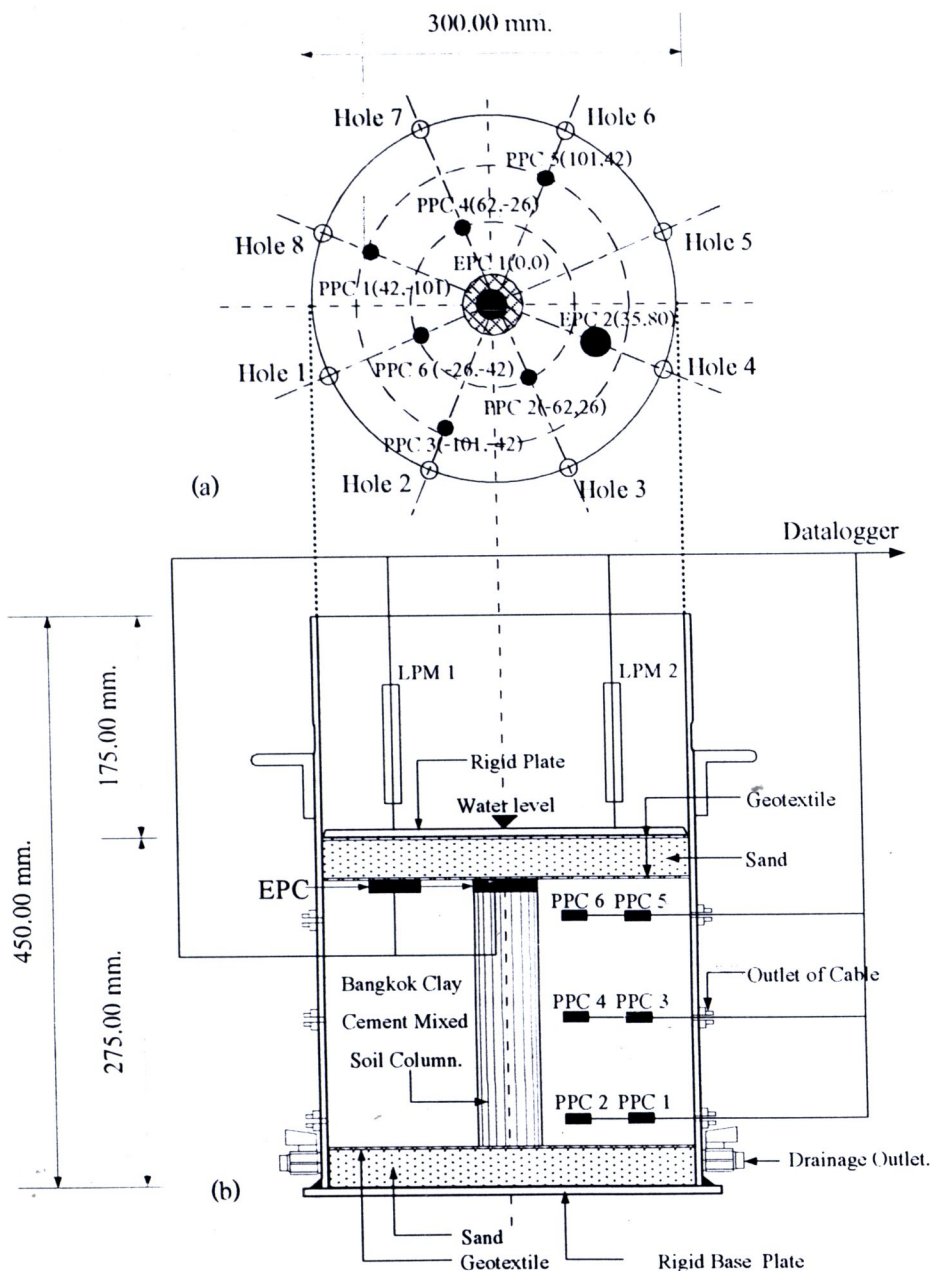


รูปที่ 3.1 แบบถังทดสอบ (a) แพลนถังทดสอบ (b) รูปด้านถังทดสอบ

เสาเข็มดินซีเมนต์จำลองสร้างขึ้นจากดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ในแบบหล่อ ดินเหนียวที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว ถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 40 และ 60 ของน้ำหนักดินแห้ง ด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 10 นาที ดินซีเมนต์จะถูกเทลงในแบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น และไล่ฟองอากาศออกแต่ละชั้นของการเท กำลังอัดของดินซีเมนต์ (q_u) ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 60 มีค่าเท่ากับ 500 และ 1,200 กิโลปาสคาล ค่า E_u เท่ากับ 129,230 และ 138,462 กิโลปาสคาล ดินซีเมนต์มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 13 และ 14 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 60 ตามลำดับ ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 90 และ 84 สำหรับปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 60 ตามลำดับ พารามิเตอร์กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์มี

ค่าดังนี้ c' เท่ากับ 200 กิโลปาสกาล และ ϕ' เท่ากับ 25 องศา สำหรับปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ c' เท่ากับ 500 กิโลปาสกาล และ ϕ' เท่ากับ 27 องศา สำหรับปูนซีเมนต์ร้อยละ 60

รูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความดันน้ำ (pore pressure cell, PPC) ความเค้นรวมในดิน (earth pressure cell, EPC) และเครื่องมือวัดการทรุดตัว (linear potentiometer) ชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์จำลองจะถูกเพิ่มความเค้นกดทับทีละ 20 กิโลปาสกาล จนกระทั่งเสาเข็มตัวอย่างวิบัติ ระหว่างการทดสอบทำการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำ ความเค้นกดทับในแนวดิ่ง และการทรุดตัวที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.2 ภาพแผนผังตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ (a) รูปตัดตามขวาง (b) รูปตัดตามแนวดิ่ง

การทดสอบในห้องปฏิบัติการกระทำภายใต้เงื่อนไข 3 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เพื่อให้ได้ค่า α (1/3 และ 1/6) และ q_u (500 และ 1200 กิโลปาสกาล) ต่างกัน

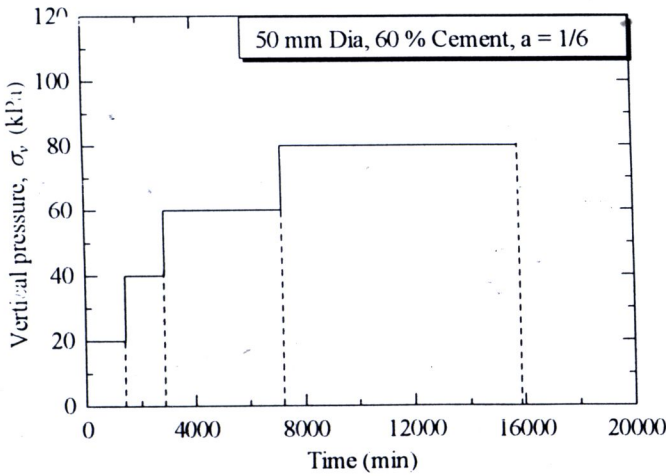
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบ

Case	Diameter (mm)	Height (mm)	Cement (%)	α	q_u (kPa)
1	50	200	60	1/6	1200
2	100	200	60	1/3	1200
3	100	200	40	1/3	500

เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงกลไกการอัดตัวของชั้นดินเหนียวเสาะเชื่อมดินซีเมนต์ก่อนการวิบัติมากยิ่งขึ้น รวมถึงเข้าใจถึงอิทธิพลของ α , q_u ความเค้นกดทับในสนาม (Overburden stress) อิทธิพลของขนาด (Size effect) และขอบเขตการระบายน้ำ ต่อการเปลี่ยนแปลงความเค้นในเสาะเชื่อมและในดิน และความดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินเหนียว ผู้วิจัยจะทำการจำลองพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเสริมเสาะเชื่อมดินซีเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis

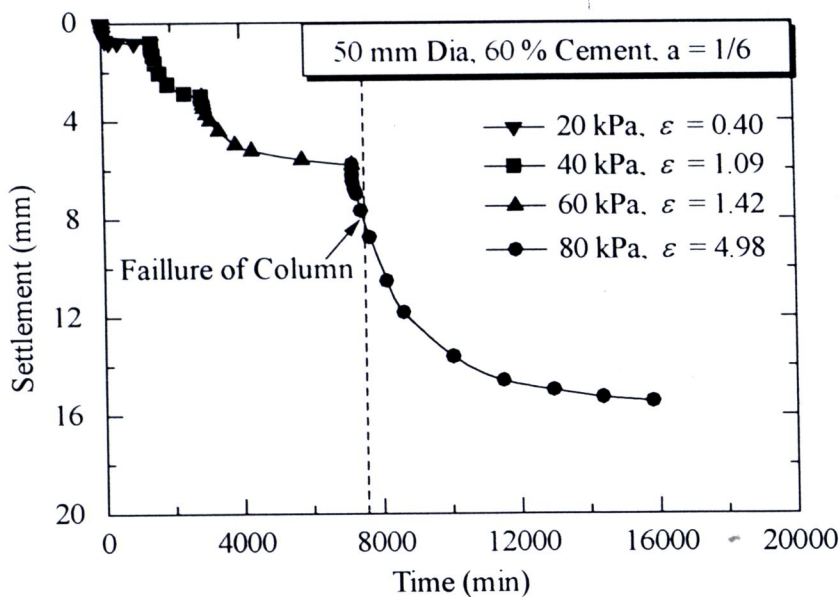
3.2 พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาะเชื่อมดินซีเมนต์

รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกกับเวลาของเสาะเชื่อมดินซีเมนต์ที่มีค่า $\alpha = 1/6$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสกาล การเพิ่มน้ำหนักรรทุกเป็นแบบขั้นบันได โดยจะกระทำหลังจากสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำในแต่ละลำดับ การเพิ่มน้ำหนักรรทุกแบ่งเป็น 4 ลำดับ คือ 20 40 60 และ 80 กิโลปาสกาล



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกกับเวลา

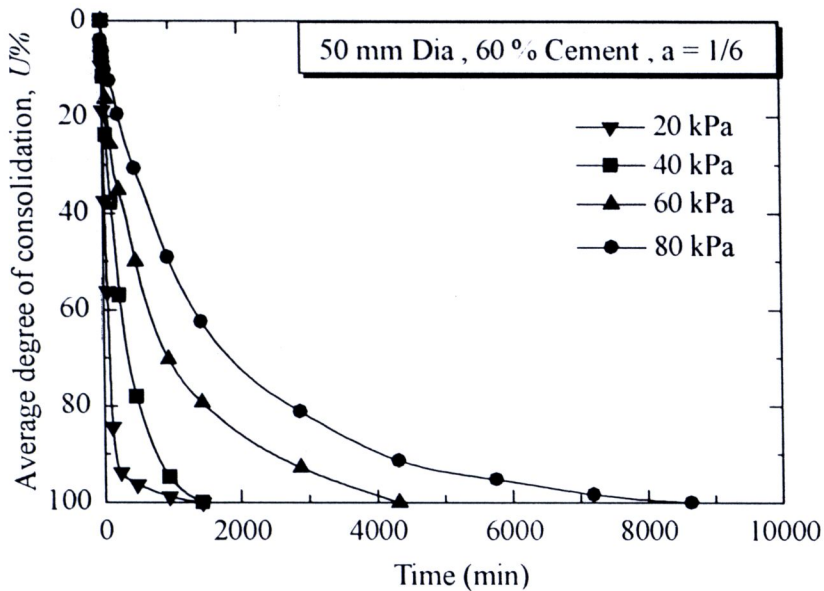
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา การทรุดตัวสุดท้ายของแต่ละน้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ จนกระทั่งเสาเข็มเกิดการวิบัติ (Failure) ซึ่งค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดประมาณเท่ากับ 15 มิลลิเมตร และค่าความเครียด (ε) ที่เกิดขึ้นในแต่ละน้ำหนักบรรทุกมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.49 1.09 1.42 และ 4.98 สำหรับความเค้นกดทับ 20 40 60 และ 80 กิโลปาสกาล ตามลำดับ รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคายน้ำกับเวลา พบว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกส่งผลให้ค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคายน้ำเพิ่มขึ้นตาม และเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเกิดการวิบัติของเสาเข็ม จากผลทดสอบอาจกล่าวได้ว่าความเค้นกดทับในแนวดิ่งเท่ากับ 80 กิโลปาสกาล เป็นความเค้นกดทับวิบัติ (ความเค้นกดทับคราก) ของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ อัตราการระบายความดันน้ำส่วนเกินของชั้นดินเสริมเสาเข็มมีพฤติกรรมคล้ายกับการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวตามธรรมชาติ กล่าวคือเมื่อความเค้นกดทับมีค่าต่ำกว่าความเค้นคราก ความเครียดจะมีค่าต่ำและการระบายน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ เมื่อความเค้นกดทับมีค่าใกล้เคียงความเค้นคราก ความเครียดจะมีค่าสูงและการระบายน้ำจะเกิดขึ้นช้าลง



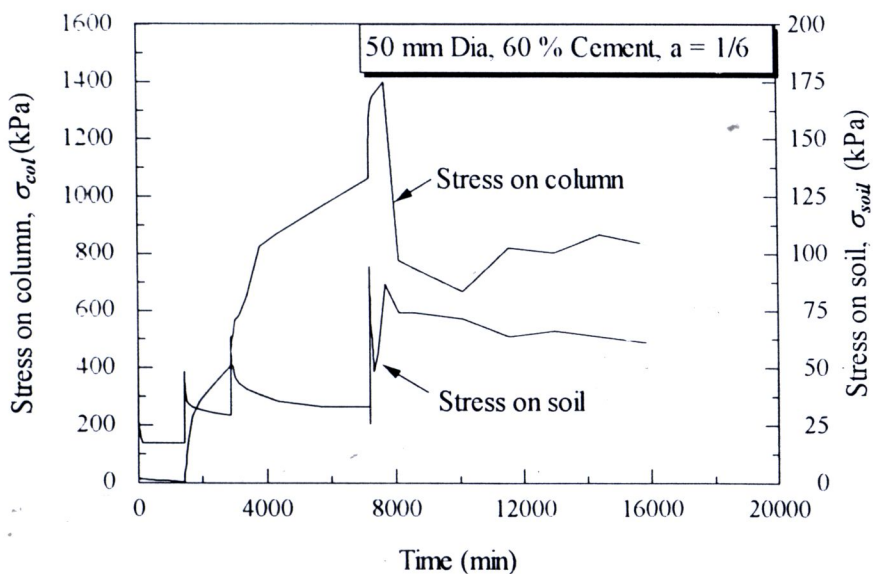
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา

รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในเสาเข็มและความเค้นในดินของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีค่า $a = 1/6$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสกาล และรูปที่ 3.7 แสดง stress concentration ratio, n กับเวลา จะเห็นได้ว่าทันทีที่มีการให้น้ำหนักบรรทุก ทั้งความเค้นในเสาเข็ม (σ_{col}) และความเค้นในมวลดิน (σ_{soil}) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ σ_{soil} จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ σ_{col} เนื่องจากดินมีค่าสติเฟนส์ที่ต่ำกว่าเสาเข็มมาก หลังจากนั้น σ_{col} จะเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่ σ_{soil} จะลดลง จึงทำให้ค่า stress concentration ratio, n เพิ่มขึ้นตามเวลา เมื่อให้ความเค้นกด

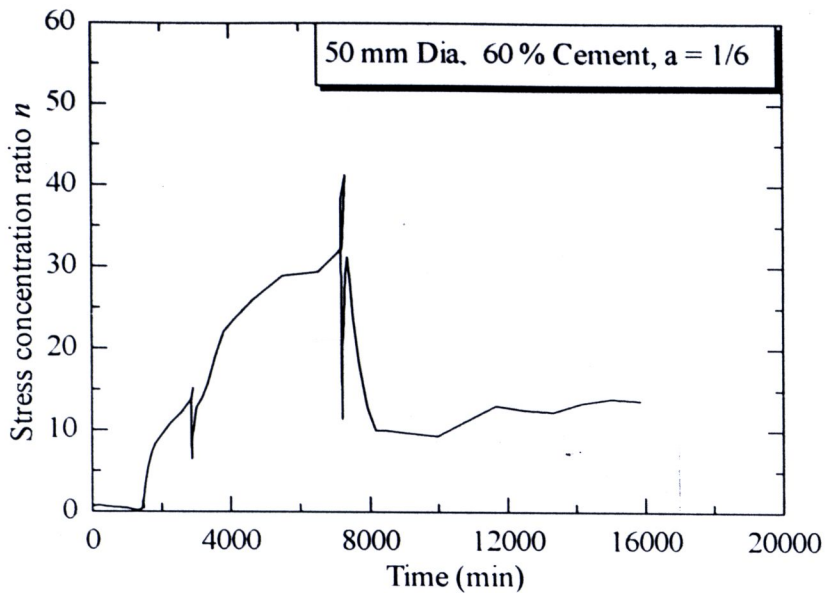
หับเท่ากับ 80 กิโลปาสกาล σ_{col} จะเพิ่มขึ้นจนถึงเวลา 240 นาที (เสาเข็มเกิดการวิบัติ) หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง และแรงเกือบทั้งหมดจากน้ำหนักบรรทุกทุกจะส่งผ่านไปยังดินรอบข้าง ความเค้นในเสาเข็มดินซีเมนต์ที่จุดวิบัติมีค่าประมาณ 1400 กิโลปาสกาล ซึ่งมีค่าสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียว (1200 กิโลปาสกาล) เล็กน้อย การลดลงของความเค้นเป็นพฤติกรรม strain softening ที่เกิดเนื่องจากการแตกของพันธะเชื่อมประสาน (Crushing of soil-cementation structure) (Miura et al., 2001; Horpibulsuk et al., 2004b และ; Suebsuk et al., 2010 และ 2011)



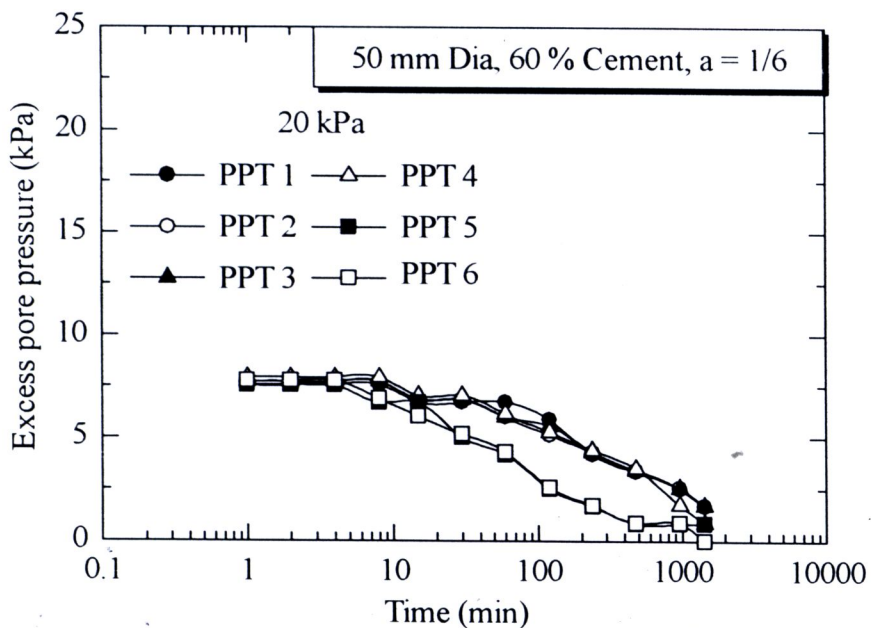
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยระดับการอัดตัวคาน้ำกับเวลา



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในเสาเข็มและความเค้นในดินกับเวลา



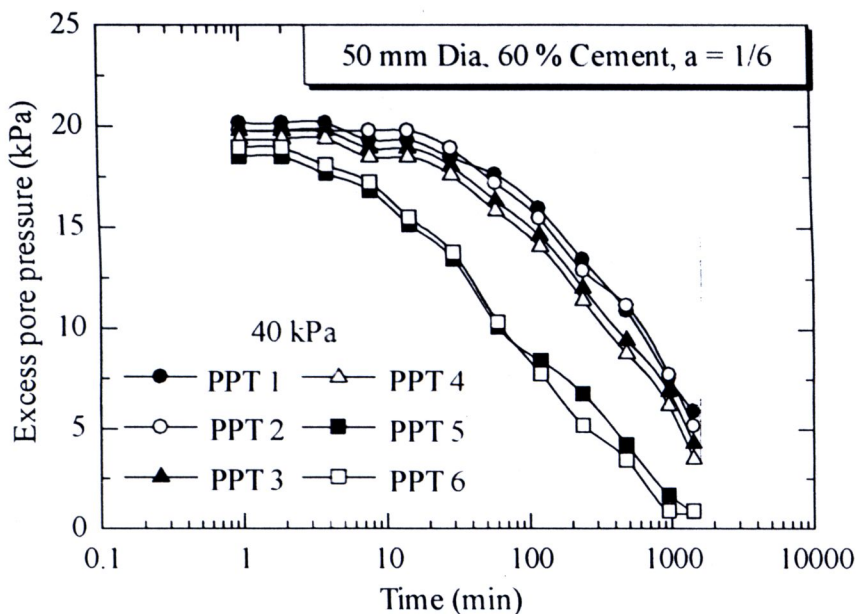
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio n กับเวลา



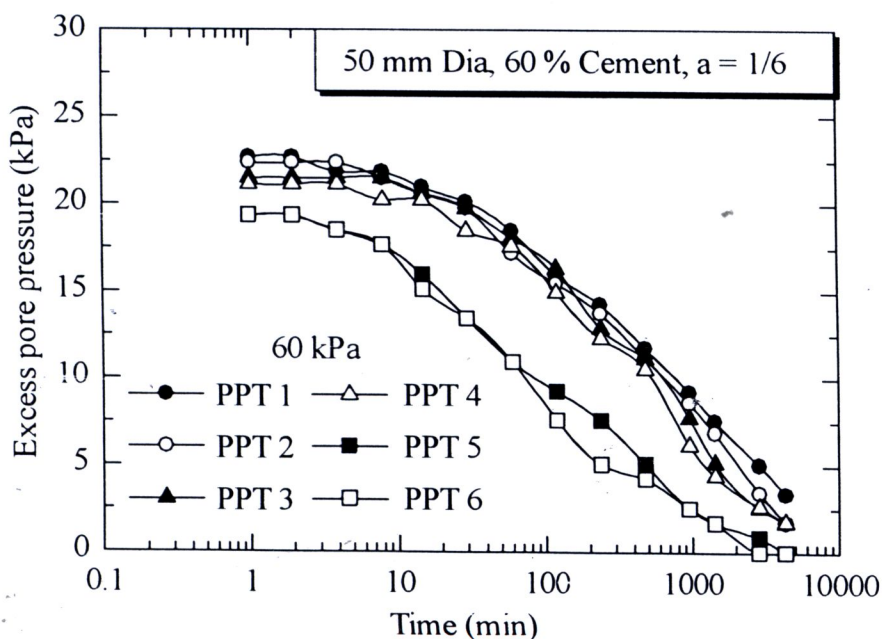
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่ความเค้นกดทับ 20 กิโลปาสกาล

รูปที่ 3.8 ถึงรูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในดินเหนียวกับเวลา ความดันน้ำส่วนเกินในมวลดินตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับขอบเขตระบายน้ำ (PPT5 และ PPT6) จะระบายได้เร็ว ความดันน้ำส่วนเกินที่ด้านล่างถึงทดสอบ (PPT1 และ PPT2) จะระบายได้ช้าที่สุด ความดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงตามเวลาเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ แต่เมื่อให้น้ำหนักกดทับจน

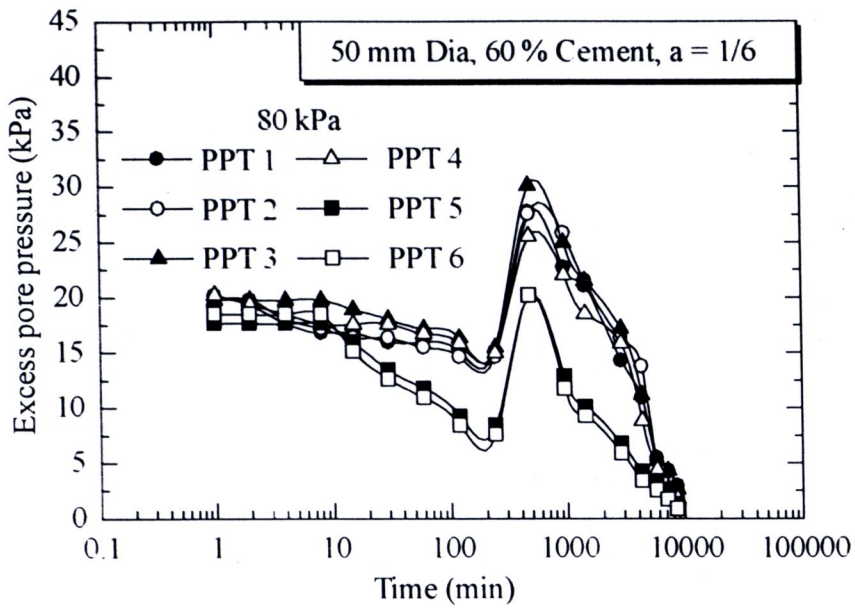
เสาเข็มเกิดการวิบัติ ความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 3.11) เนื่องจาก σ_{soil} ที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน รวมทั้งอาจเกิดจากการเสียรูปด้านข้างของเสาเข็มเนื่องจากการวิบัติ ส่งผลให้เกิดแรงผลักทางด้านข้าง แต่เมื่อเวลาผ่านไปความดันน้ำจะลดลงเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำเข้าสู่เสาเข็มตามรอยแตกของเสาเข็ม



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่ความเค้นกดทับ 40 กิโลปาสกาล



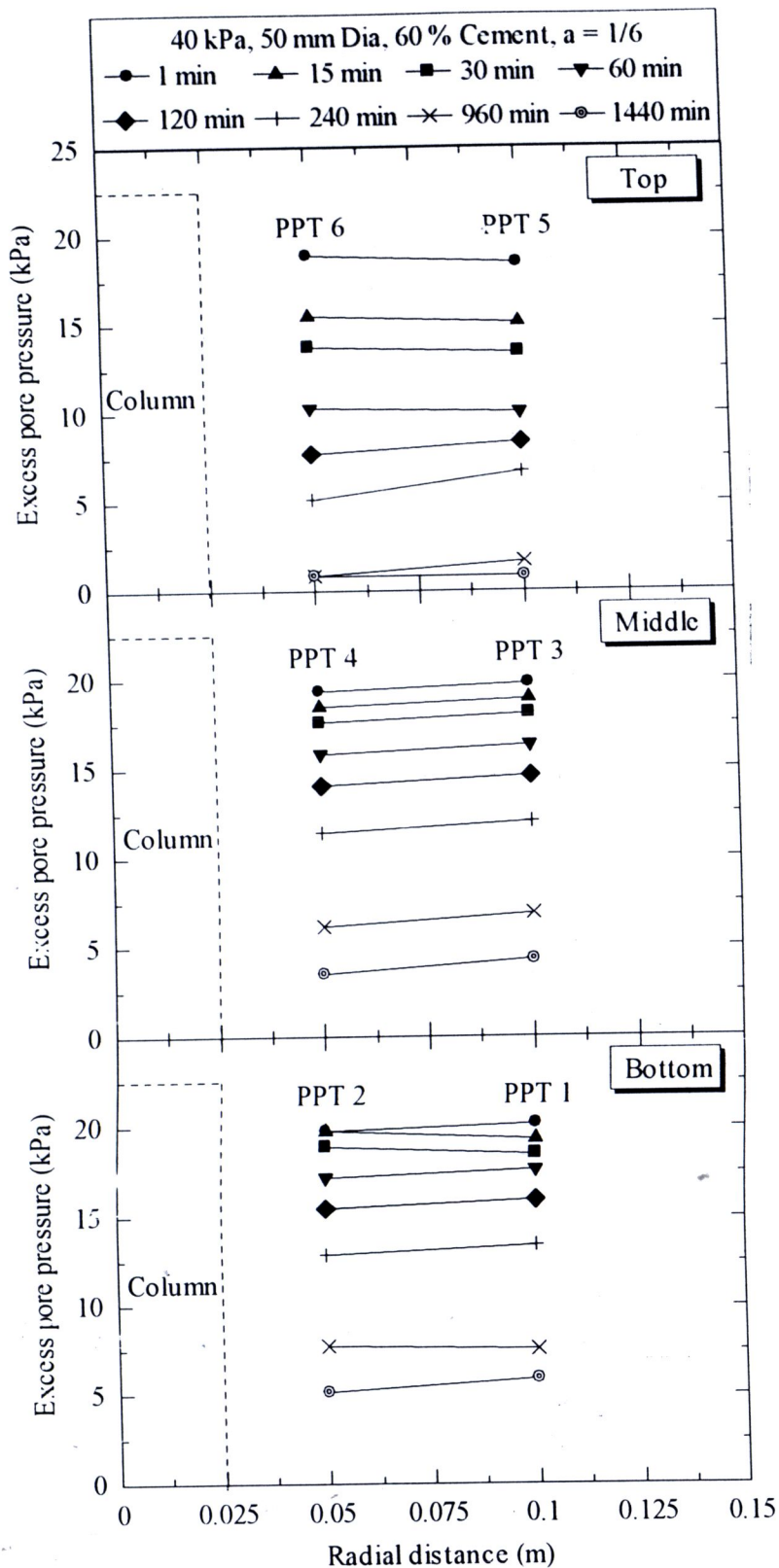
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่ความเค้นกดทับ 60 กิโลปาสกาล



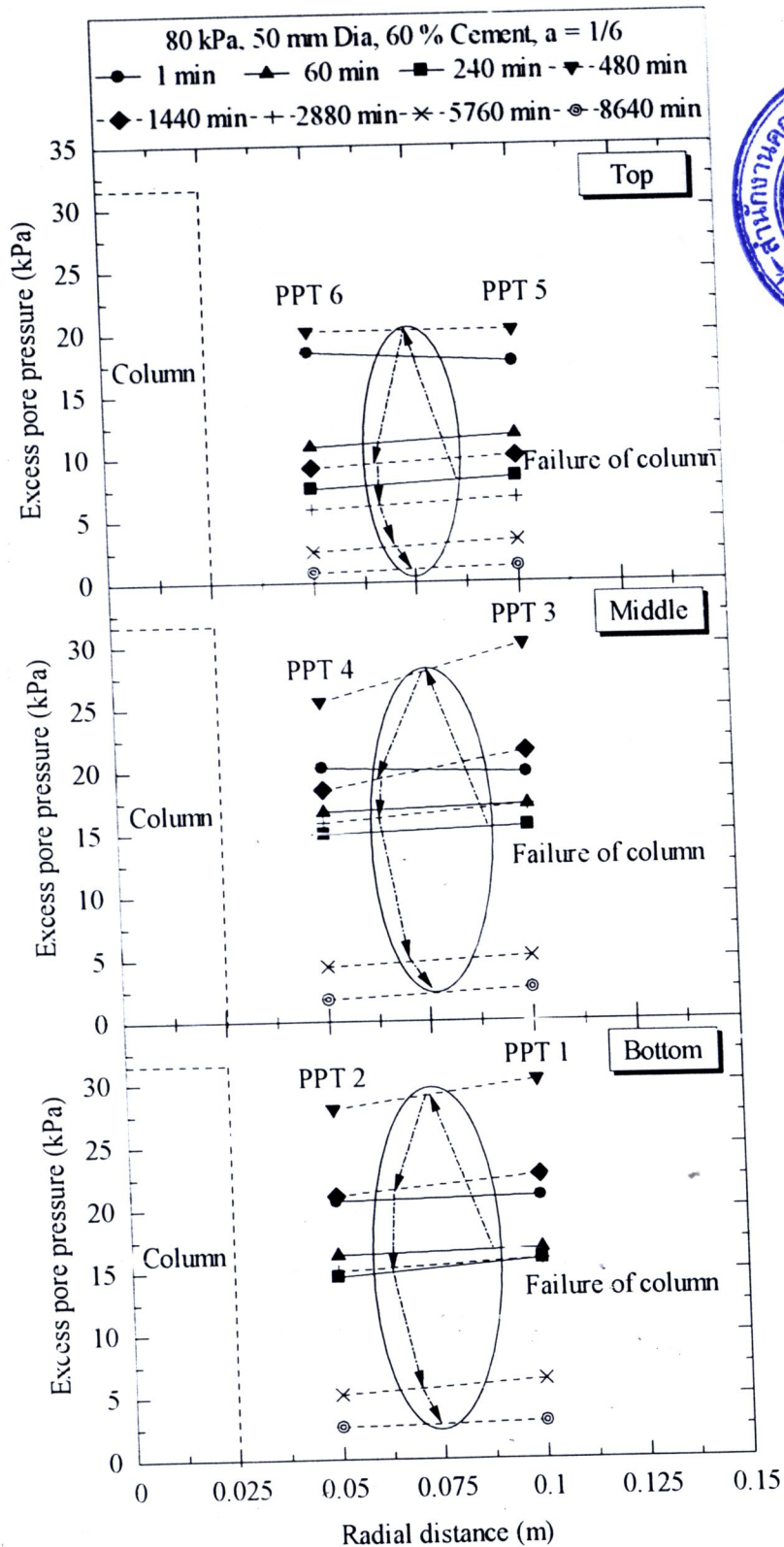
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่ความเค้นกดทับ 80 กิโลปาสกาล

รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมีที่น้ำหนักบรรทุก 40 กิโลปาสกาล ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกแก่ชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ความดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นความดันน้ำส่วนเกินจะลดลงตามเวลา ความดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นที่เวลาใดๆ มีค่าลดลงตามระยะทางจากขอบถึงเสาเข็ม แต่อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของความดันน้ำส่วนเกินมีไม่มากนัก

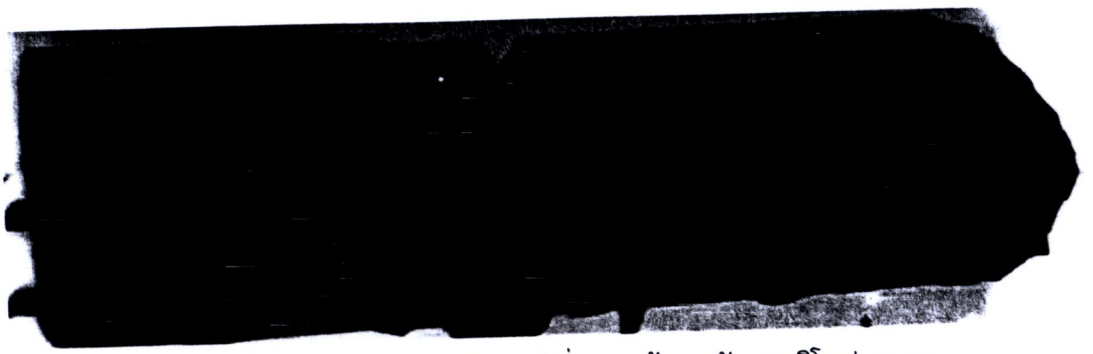
รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมีที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลปาสกาล (เสาเข็มเกิดการวิบัติ) ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการวิบัติ (240 นาที) ความดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ความดันน้ำส่วนเกินที่ใกล้เสาเข็มมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการวิบัติของเสาเข็มทำให้เกิดช่องว่างตามรอยแตกหัก เสาเข็มที่สภาวะนี้จึงทำหน้าที่เสมือนเสาระบายน้ำในแนวตั้ง (รูปที่ 3.14) และการวิบัติของเสาเข็มทำให้ความเค้นในแนวตั้ง (σ_v) ส่งถ่ายมายังดินเหนียวอ่อนทั้งหมด สังเกตได้จาก stress concentration ratio, n ที่ลดลง ซึ่งทำให้ตึกมีการอัดตัวคายน้หลังจากเสาเข็มวิบัติเพิ่มขึ้นอย่างมาก (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมี
ที่ความเค้นกดทับ 40 กิโลปาสกาล



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมี
ที่ความเค้นกดทับ 80 กิโลปาสกาล

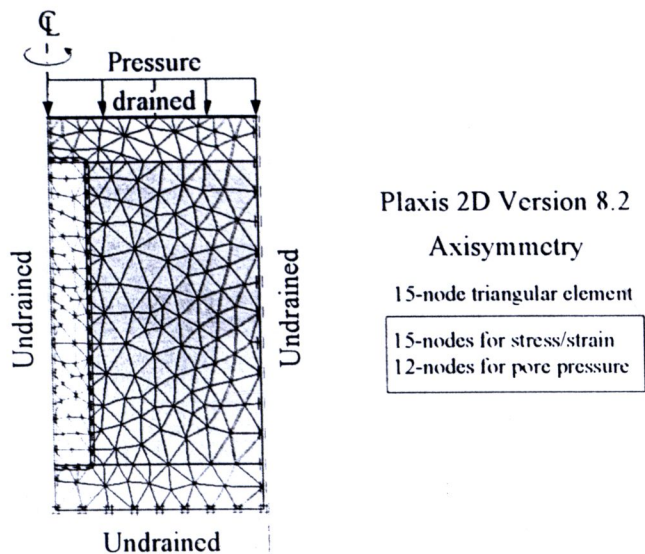


รูปที่ 3.14 การวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ความเค้นกดทับ 80 กิโลปาสกาล

3.3 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)

พฤติกรรมการณ์การอัดตัวคายนํ้าของชั้นดินที่เสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ (ก่อนการวิบัติของเสาเข็ม) จำลองโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2 โดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมประกอบด้วย 15 โหนด โดยแบ่งเป็น 15 โหนด สำหรับความเค้นกับความเครียด และ 12 โหนด สำหรับความดันนํ้า (รูปที่ 3.15) ผลการจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบในแบบจำลองย่อส่วนและอธิบายกลไกการอัดตัวคายนํ้าในชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อส่วน โมดูลัสประสิทธิผล (E') ของเสาเข็มดินซีเมนต์ประมาณได้จากผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวประมาณได้ด้วยสมการ $E_u = 1.5(E'/1 + \nu')$ ของ D'Appolonia et al (1971) และประมาณค่า $\nu' = 0.3$ เนื่องจาก E_u มีค่าประมาณคงที่จะเห็นได้ว่า E' ไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al (2004b)

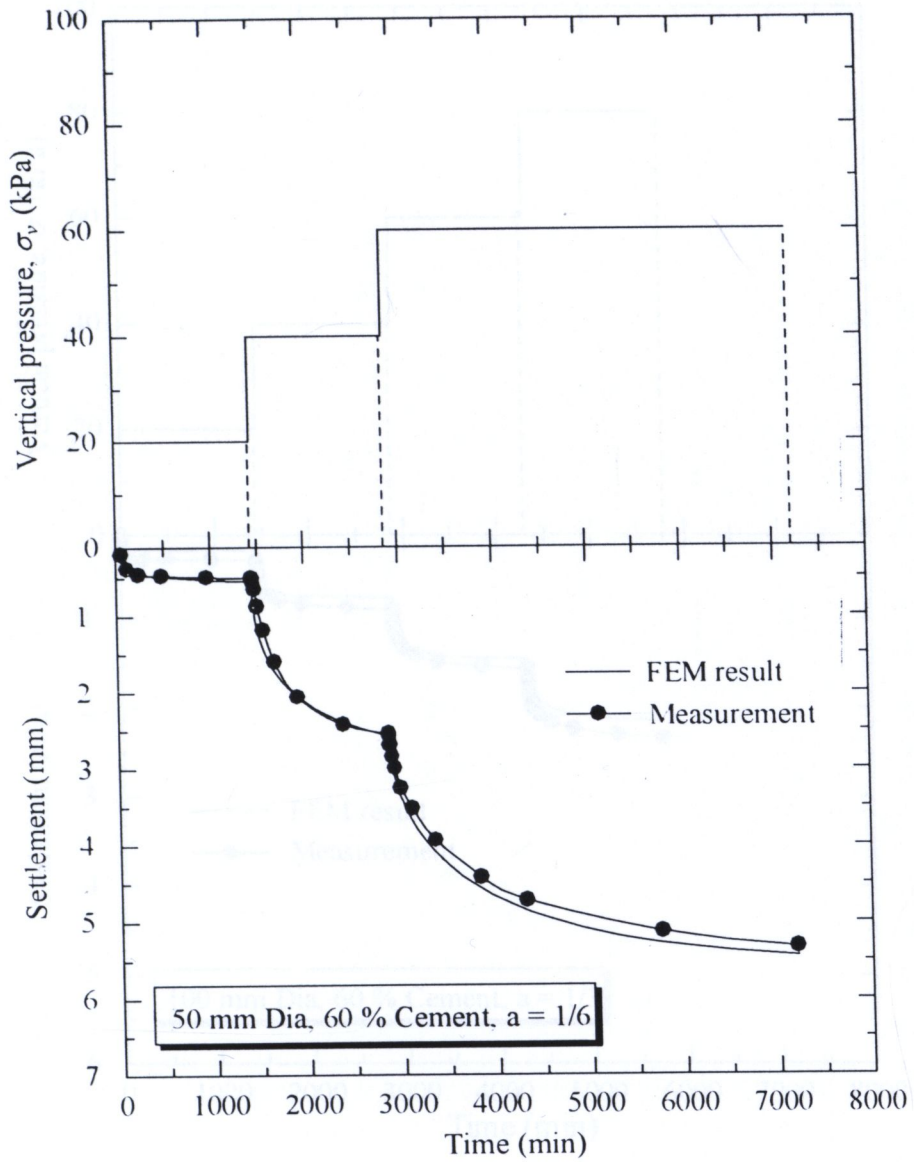
รูปที่ 3.16 ถึง 3.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวตั้ง (σ_v) และการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากผลทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis ค่าการทรุดตัวและระยะเวลาการทรุดตัวแปรผันอย่างมากกับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม a (เมื่อ $a = d_p / D_c$, d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และ D_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit cell) ชั้นดินเสริมเสาเข็มที่มีค่า a สูงจะมีการทรุดตัวต่ำ แม้ว่าปริมาณปูนซีเมนต์จะมีค่าต่างกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าปริมาณปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อค่าการทรุดตัวสุดท้ายและระยะเวลาการทรุดตัว เนื่องจากค่า E' ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์



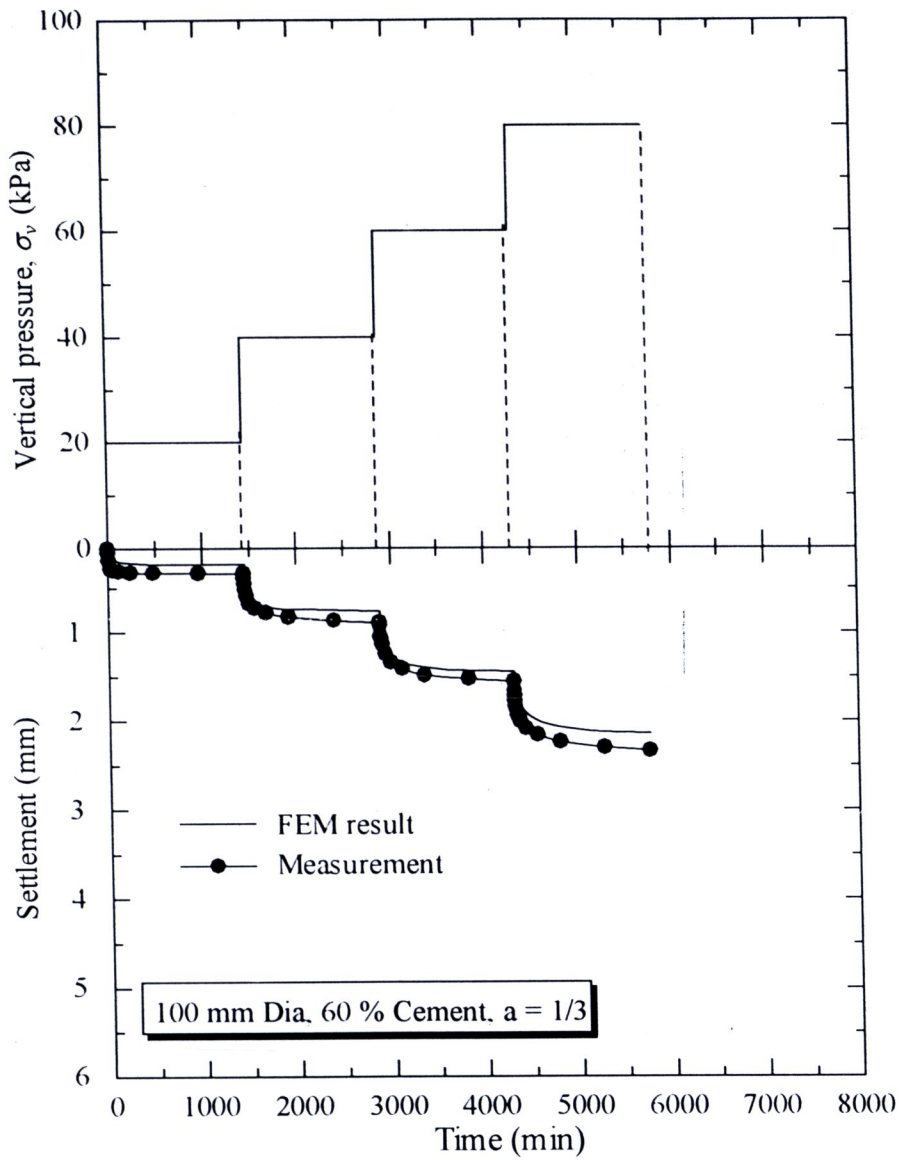
รูปที่ 3.15 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกายภาพย่อยส่วน

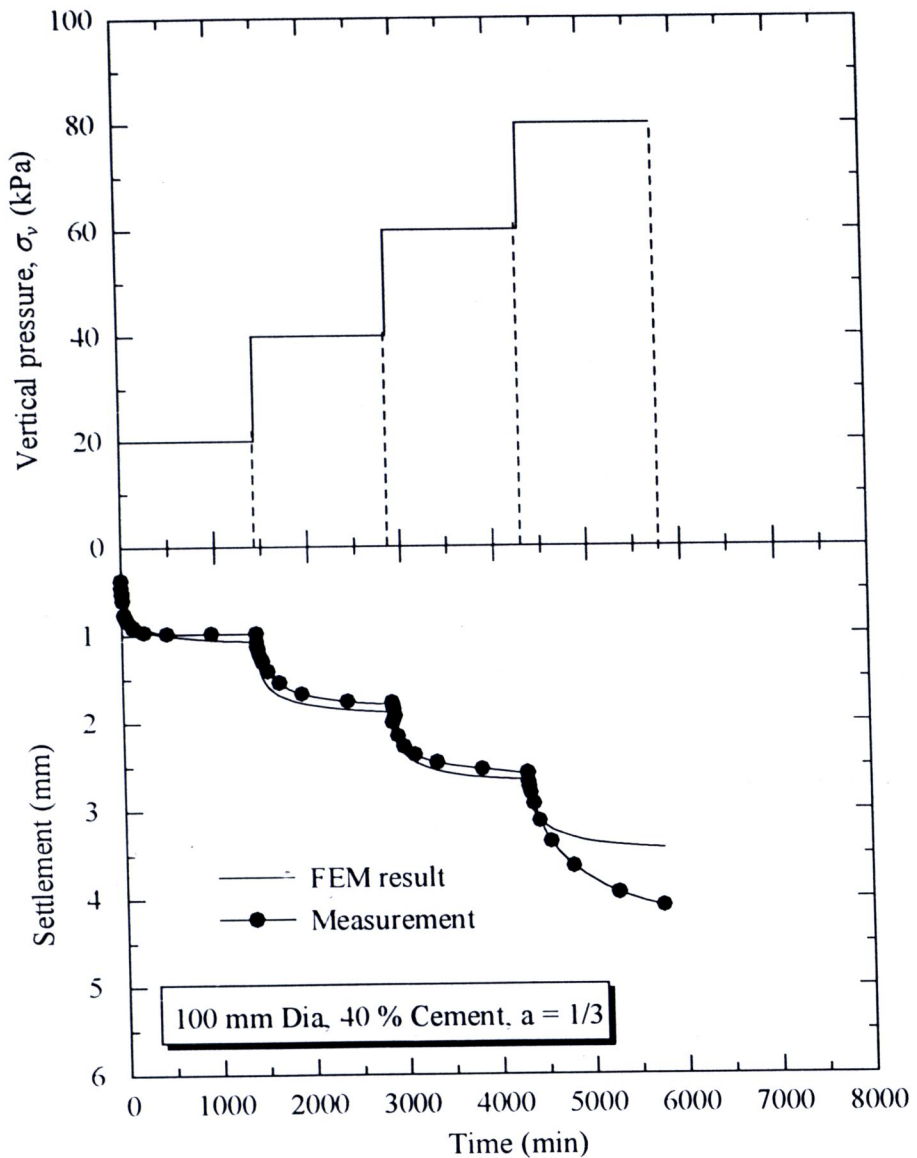
Soil	Sand	Bangkok clay	Soil-cement column	Unit
Model	Mohr-coulomb	Soft soil	Mohr-coulomb	-
γ_{dry}	17	16	13 (C = 40%) 14 (C = 60%)	kN/m ³
γ_{sat}	20	18	13 (C = 40%) 14 (C = 60%)	kN/m ³
k_v	3.43×10^{-4}	1.0×10^{-7}	5.0×10^{-6}	m/min
k_h	3.43×10^{-4}	1.0×10^{-7}	5.0×10^{-6}	m/min
E'	13,000 (Top) 52,000 (Bottom)	-	112,000 (C = 40%) 120,000 (C = 60%)	kPa
ν'	0.3	0.3	0.3	-
λ^*	-	0.095	-	-
κ^*	-	0.0095	-	-
c'	1	1	600	kPa
ϕ'	37	21	25	degrees



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา
ที่ $a = 1/6$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสคาล

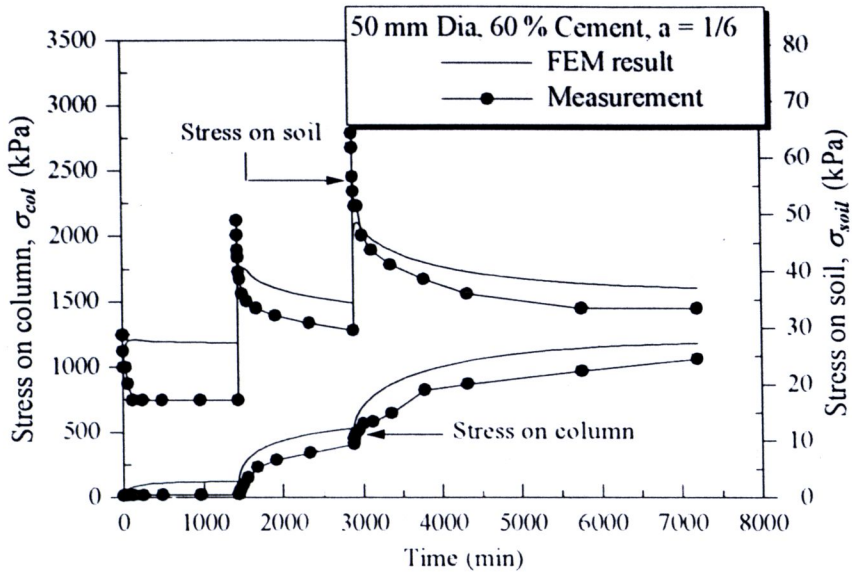


รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสกาล

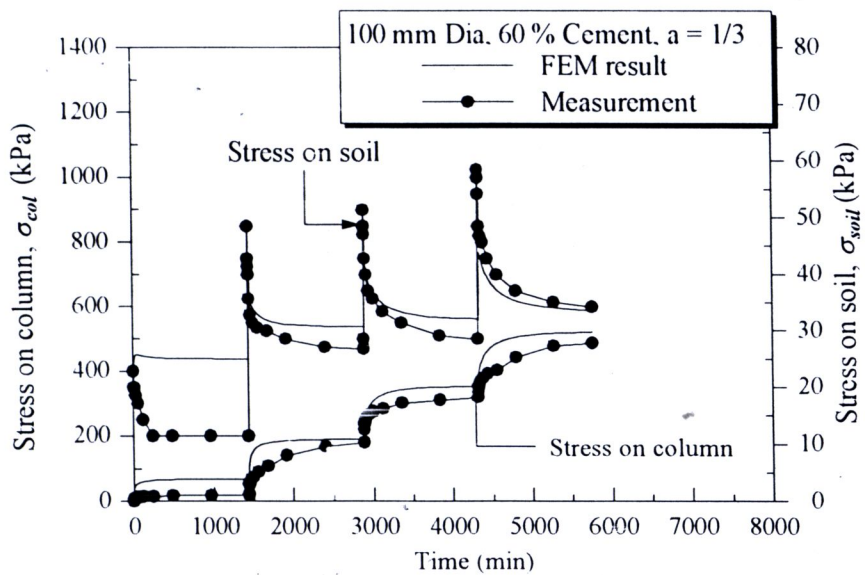


รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวกับเวลา
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 500$ กิโลปาสกาล

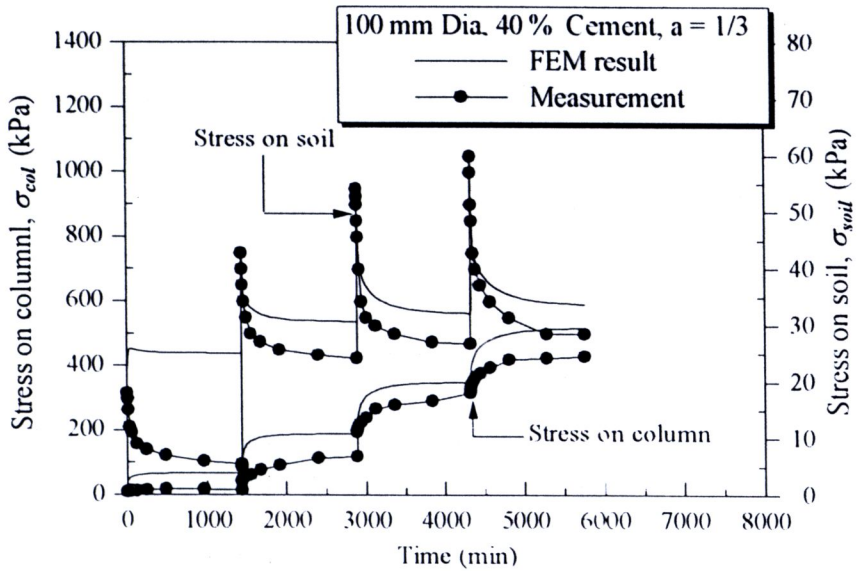
รูปที่ 3.19 ถึง 3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลา จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์รับน้ำหนักบรรทุก ความเค้นในดิน (σ_{soil}) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนความเค้นในเสาเข็ม (σ_{col}) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นกับเวลา ตามการตอบสนองของ σ_{soil} เพื่อปรับสมดุลของแรงในแนวดิ่ง สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มทำหน้าที่รับแรงเกือบทั้งหมดจากน้ำหนักบรรทุก ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็มแปรผันอย่างมากกับ a และน้ำหนักบรรทุก ซึ่งค่า a ยิ่งต่ำ σ_{col} ยิ่งมีค่ามาก



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในเสาเข็มดินซีเมนต์และความเค้นในดินกับเวลา
ที่ $a = 1/6$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสกาล

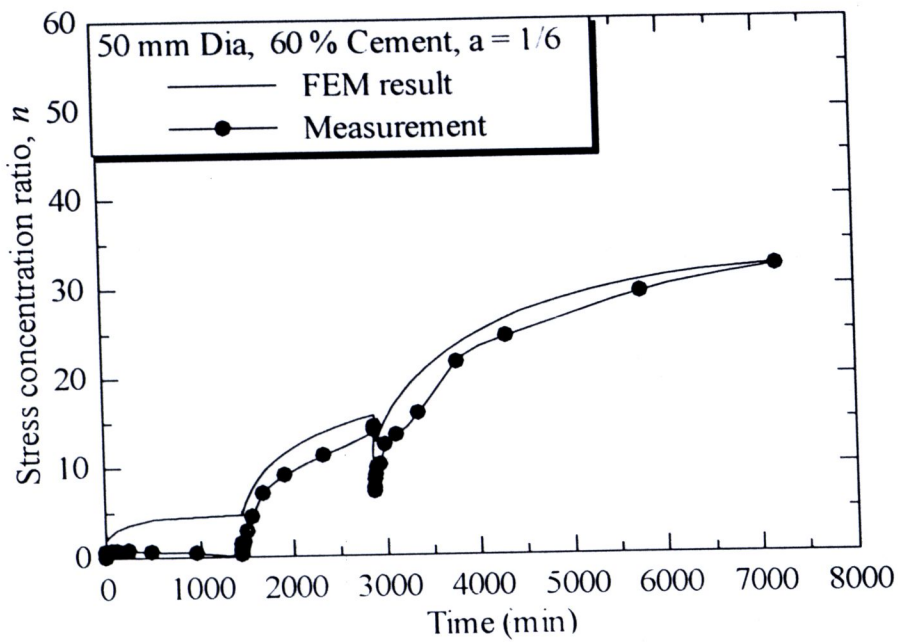


รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในเสาเข็มและความเค้นในดินกับเวลา
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสกาล

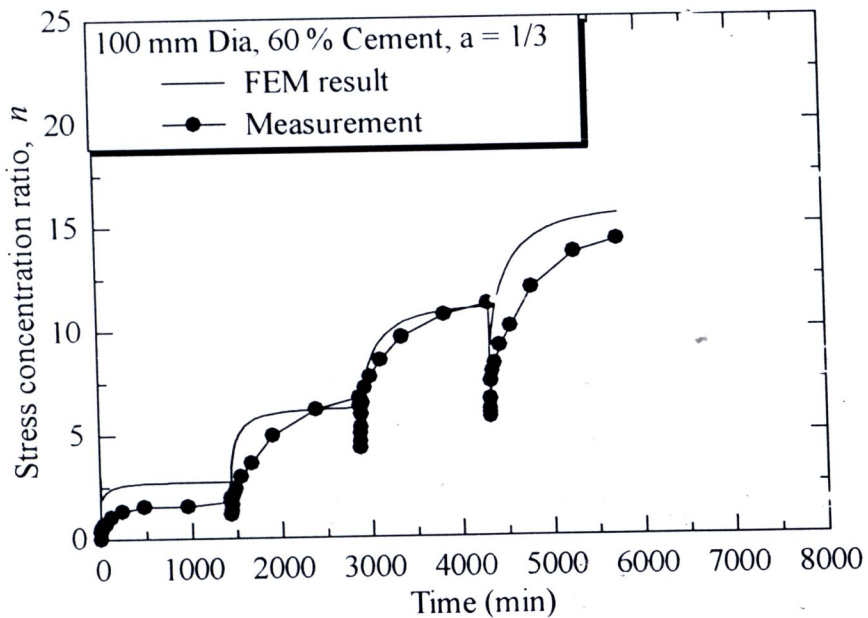


รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในเสาเข็มและความเค้นในดินกับเวลา
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 500$ กิโลปาสกาล

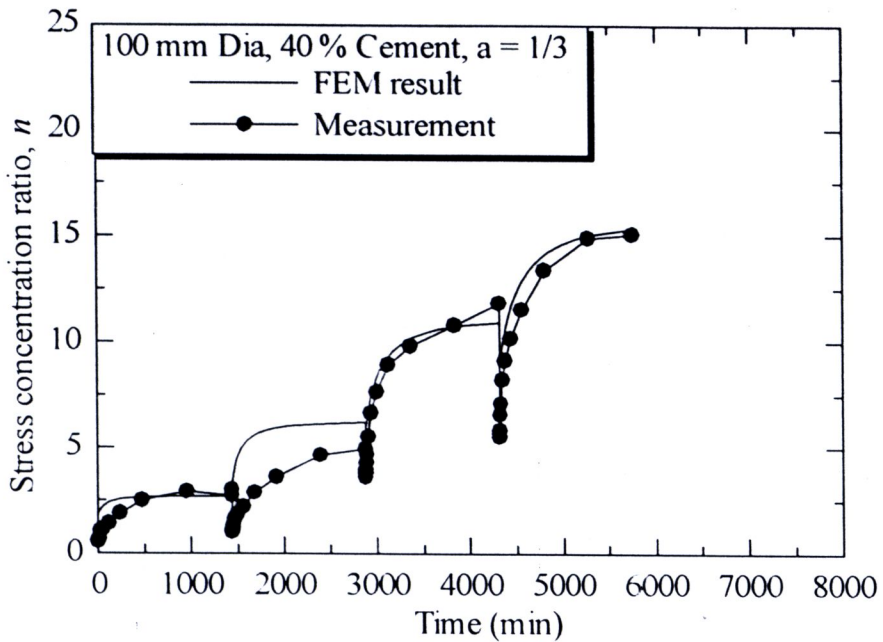
รูปที่ 3.22 ถึง 3.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, n กับเวลา เมื่อให้น้ำหนักบรรทุก stress concentration ratio, n จะเพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจาก σ_{col} เพิ่มขึ้นตามเวลา ในขณะที่ σ_{soil} ลดลงตามเวลา ความแตกต่างของ σ_{soil} ในแต่ละความเค้นกดทับมีค่าน้อยมาก (รูปที่ 3.19 ถึง 3.21) ภายใต้ความเค้นแนวตั้งที่เท่ากัน ค่า stress concentration ratio, n จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของ a ($n = 35$ สำหรับ $a = 1/6$ และ $n = 15$ สำหรับ $a = 1/3$) และปริมาณปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อ stress concentration ratio, n



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, n กับเวลา
ที่ $a = 1/6$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสคาล

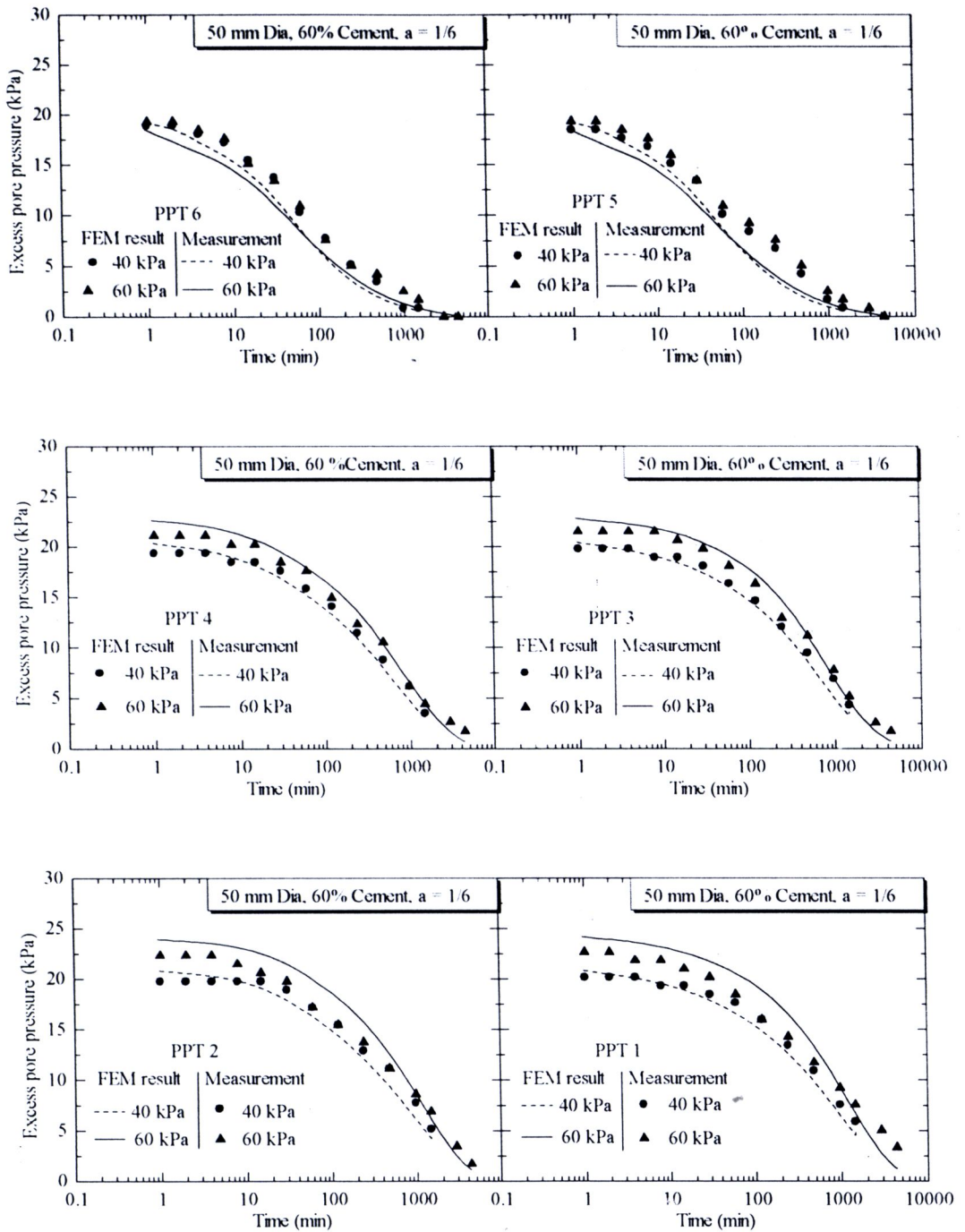


รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, n กับเวลา
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสคาล

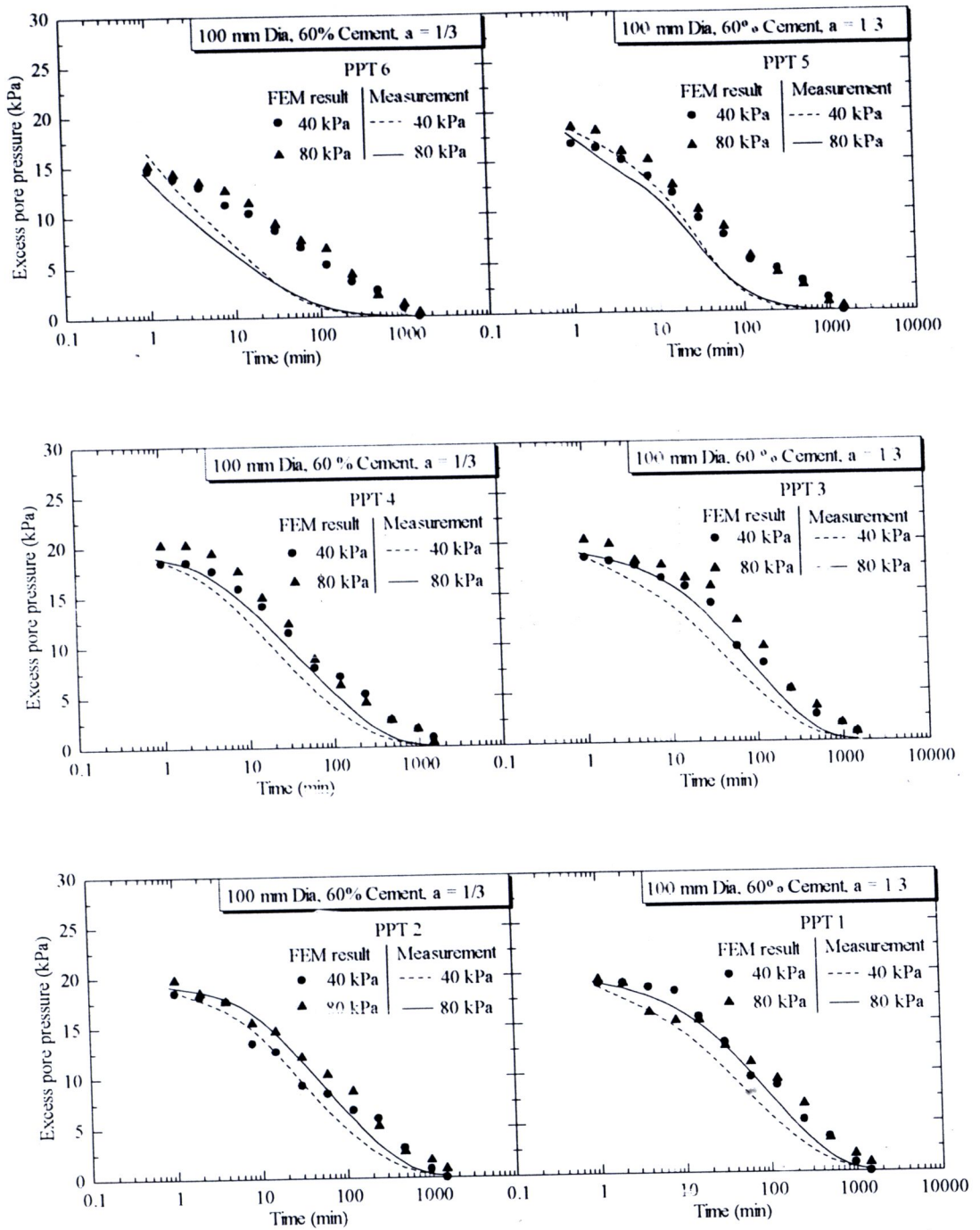


รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress concentration ratio, n กับเวลา
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 500$ กิโลปาสกาล

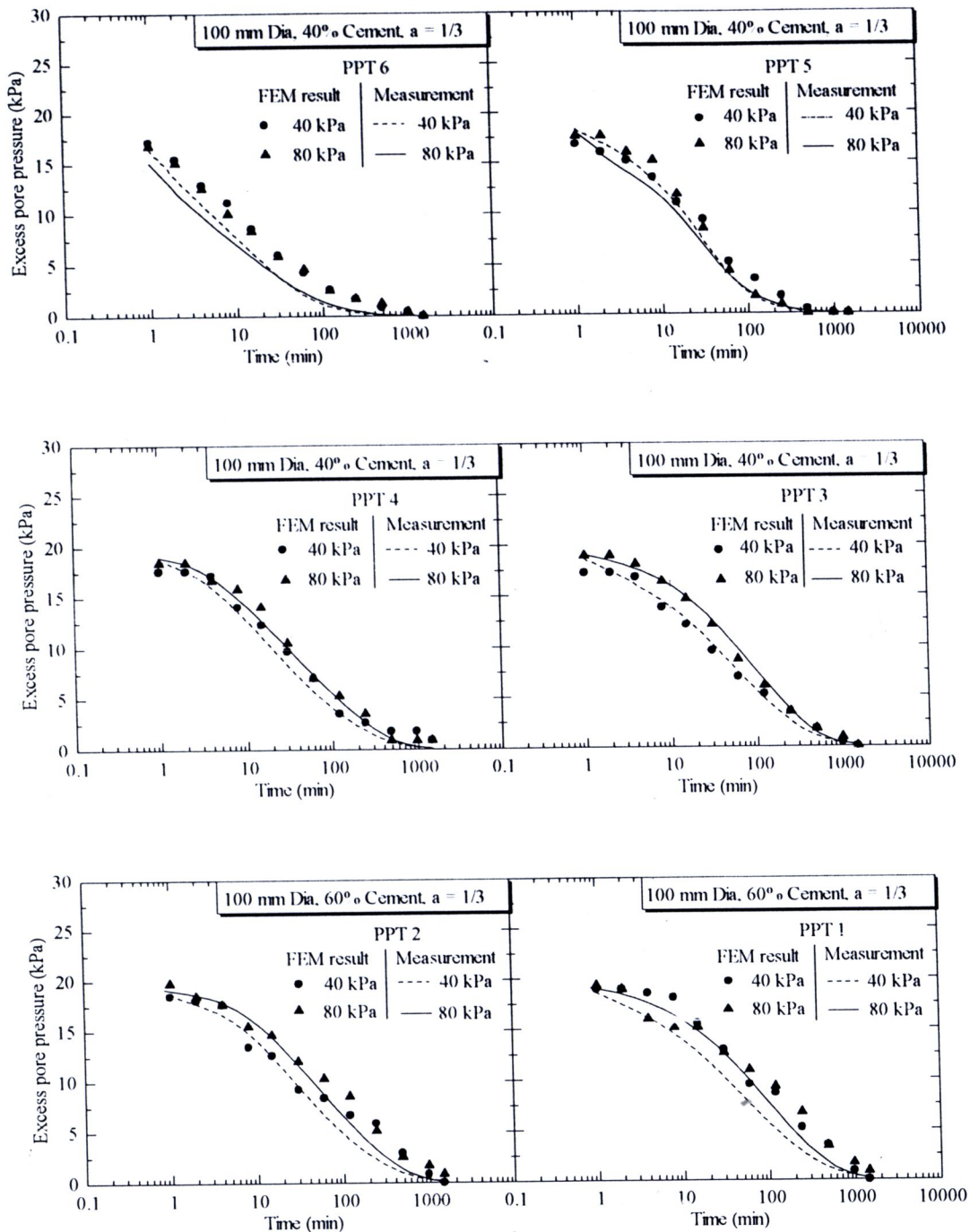
รูปที่ 3.25 ถึง 3.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อชั้นดินรับน้ำหนักบรรทุก ความดันน้ำส่วนเกินเริ่มต้นจะมีค่าใกล้เคียงค่าความ
เค้นรวมที่เปลี่ยนแปลง และความดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามเวลา เนื่องจากการ
ลดลงของความเค้นในดินเหนียว (ความเค้นส่งผ่านไปยังเสาเข็ม) รูปที่ 3.28 และ 3.29 แสดงการ
เปลี่ยนแปลงของความดันน้ำส่วนเกินกับตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี ที่เวลาใดๆ จะเห็นได้ว่าที่ระดับ
ความลึกเดียวกัน ความดันน้ำส่วนเกินบริเวณด้านบนของเสาเข็มจะระบายได้เร็วกว่าดินเหนียวรอบ
ข้าง เนื่องจากความเค้นครากของเสาเข็มมีค่าสูงกว่าความเค้นกดทับมาก เสาเข็มดินซีเมนต์จึงแสดง
พฤติกรรมเช่นเดียวกับดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated clay) ความดันน้ำ
ส่วนเกินในเสาเข็มตรงกึ่งกลางและด้านล่างจะต่ำกว่าดินเหนียวอ่อนล้อมรอบเล็กน้อย สิ่งนี้แสดงให้เห็น
เห็นว่าในช่วงกลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ อัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำมีอิทธิพลต่อการระบายออกของ
ความดันน้ำส่วนเกินน้อยกว่าระยะทางระบายน้ำ ความดันน้ำส่วนเกินในมวลดินจะระบายได้เร็วเมื่อ
ค่า a สูง (รูปที่ 3.28) ถึงแม้ปริมาณปูนซีเมนต์จะต่างกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าอัตราการระบาย
น้ำไม่แปรผันตามกำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์



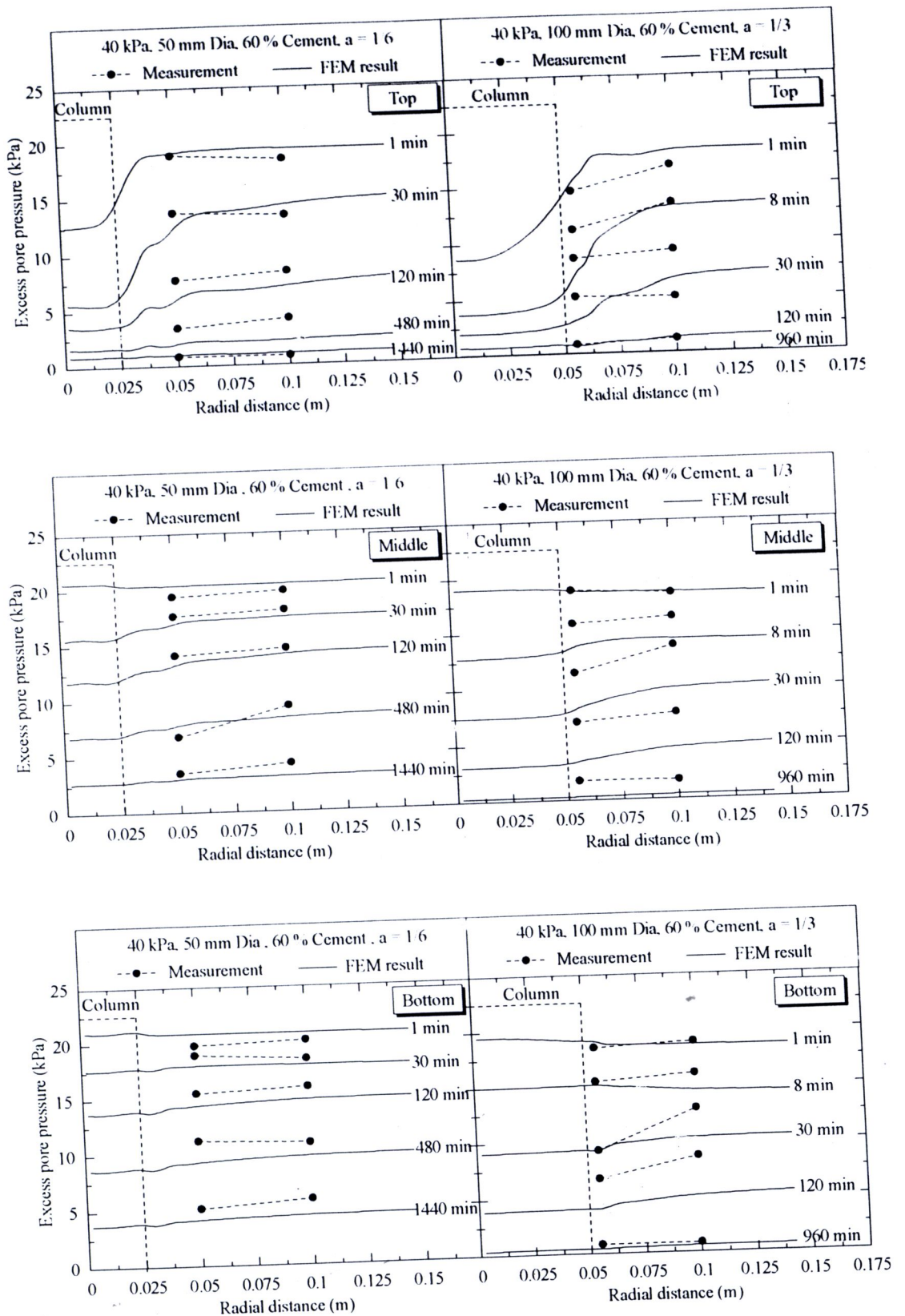
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่ตำแหน่งต่าง ๆ
ที่ $a = 1/6$ และ $q_u = 1290$ กิโลปาสคาล



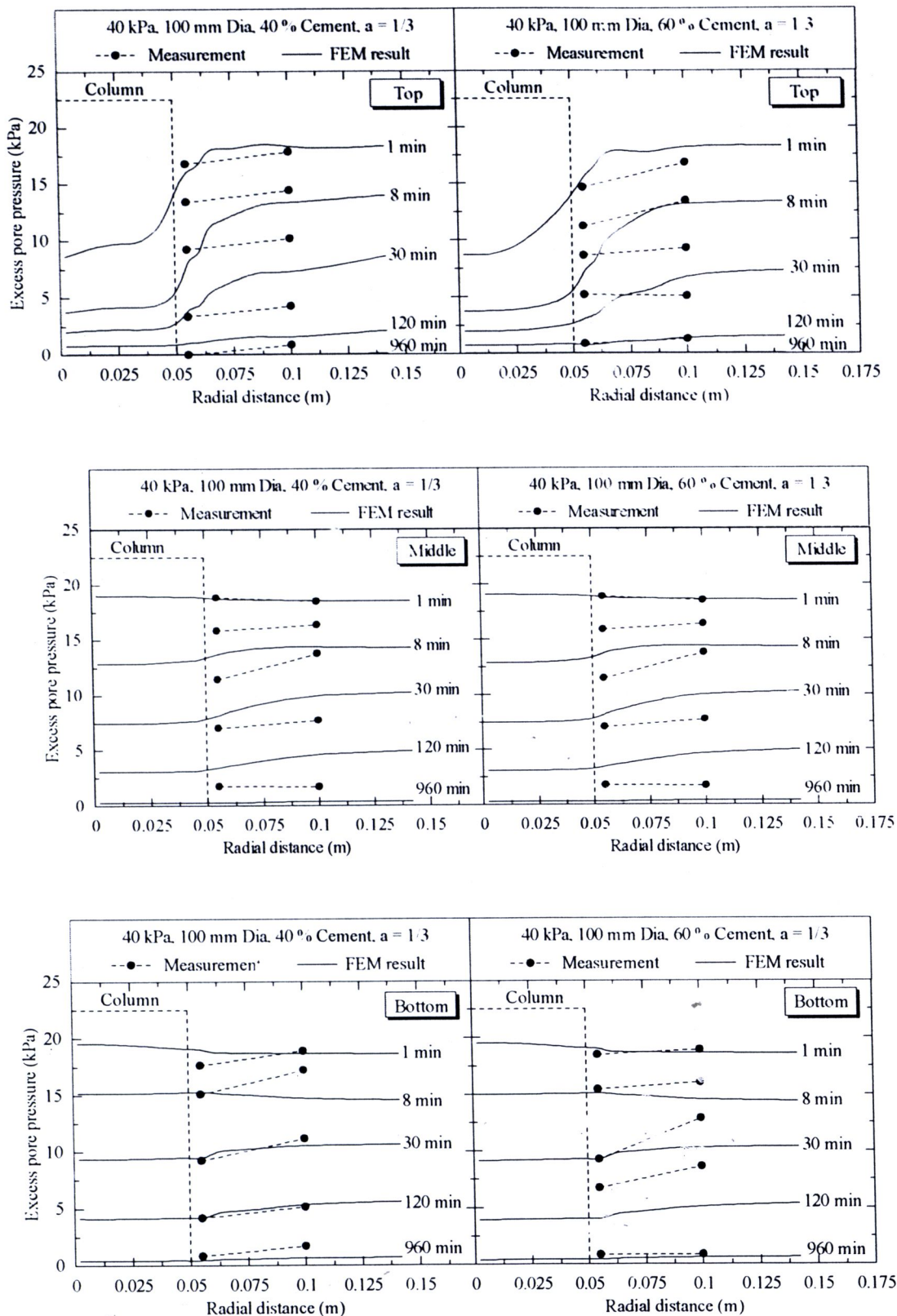
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่ตำแหน่งต่างๆ
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสกาล



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ของความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ที่ตำแหน่งต่างๆ
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 500$ กิโลปาสกาล

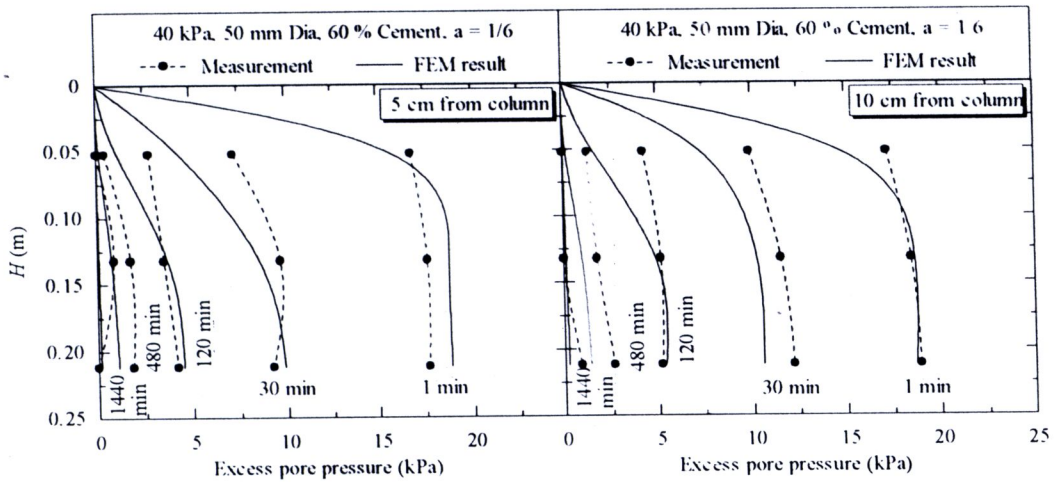


รูปที่ 3.28 การเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางในแนวรัศมี ที่เวลาใด ๆ
เมื่อกำลังอัดมีค่าเท่ากัน แต่ a มีค่าต่างกัน

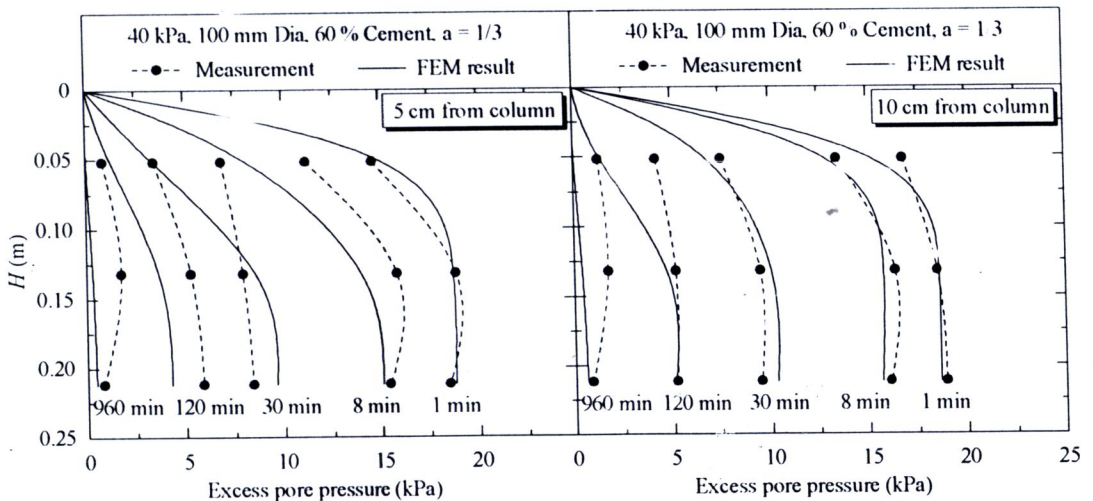


รูปที่ 3.29 การเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางในแนวรัศมี ที่เวลาใด ๆ
เมื่อ a มีค่าเท่ากัน แต่กำลังอัดมีค่าต่างกัน

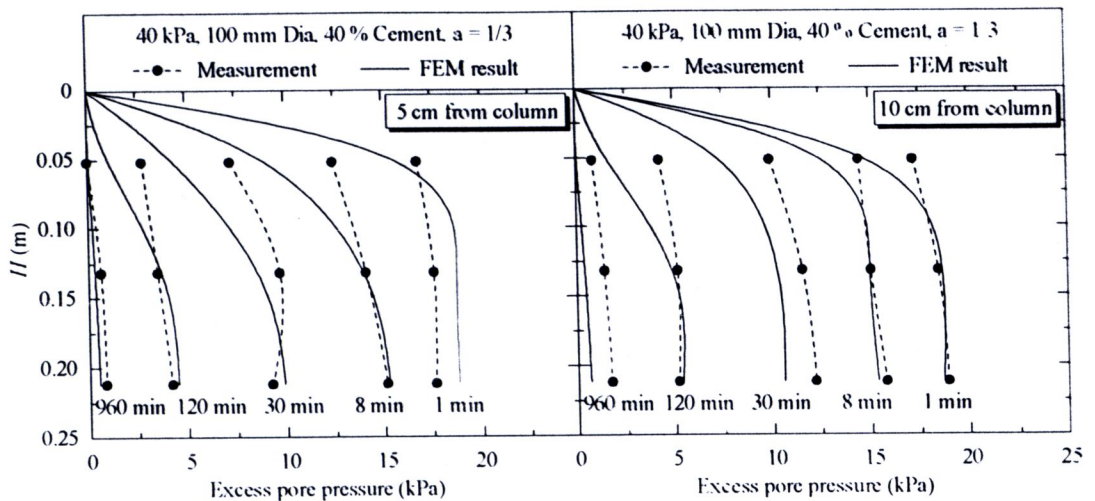
รูปที่ 3.30 ถึง 3.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความดันส่วนเกินน้ำตามความลึก ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าการอัดตัวคายน้ำในดินเหนียวอ่อนมีพฤติกรรมเป็นแบบการระบายน้ำในทิศทางเดียว ทั้งบริเวณใกล้เสาเข็มและไกลเสาเข็ม ซึ่งคล้ายกับการอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ (1-D Consolidation) ของ Terzaghi (1925) ความดันน้ำส่วนเกินมีค่าสูงสุดที่ด้านล่าง และมีค่าสูงสุดที่ด้านบน (ขอบเขตระบายน้ำ) สำหรับทุกระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ



รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับความลึก ที่เวลาต่างๆ
ที่ $a = 1/6$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสกาล



รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับความลึก ที่เวลาต่างๆ
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 1200$ กิโลปาสกาล



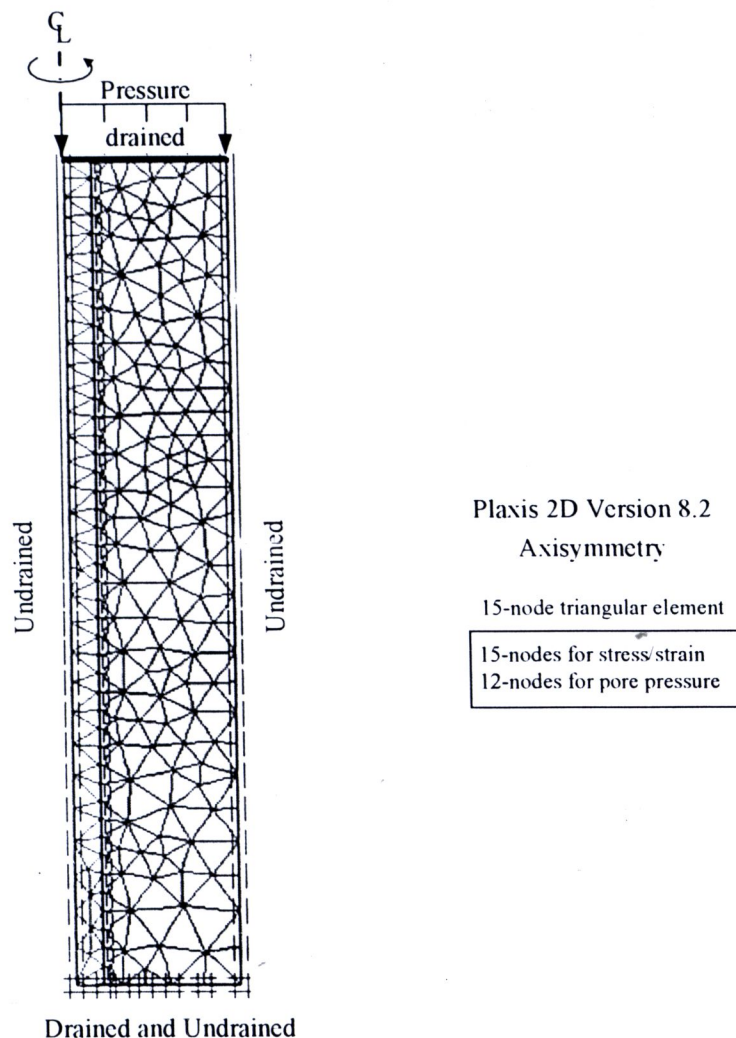
รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับความลึก ที่เวลาต่างๆ
ที่ $a = 1/3$ และ $q_u = 500$ กิโลปาสกาล

3.4 การจำลองพฤติกรรมของความดันน้ำส่วนเกินแบบระบายน้ำทางเดียวและสองทางในชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

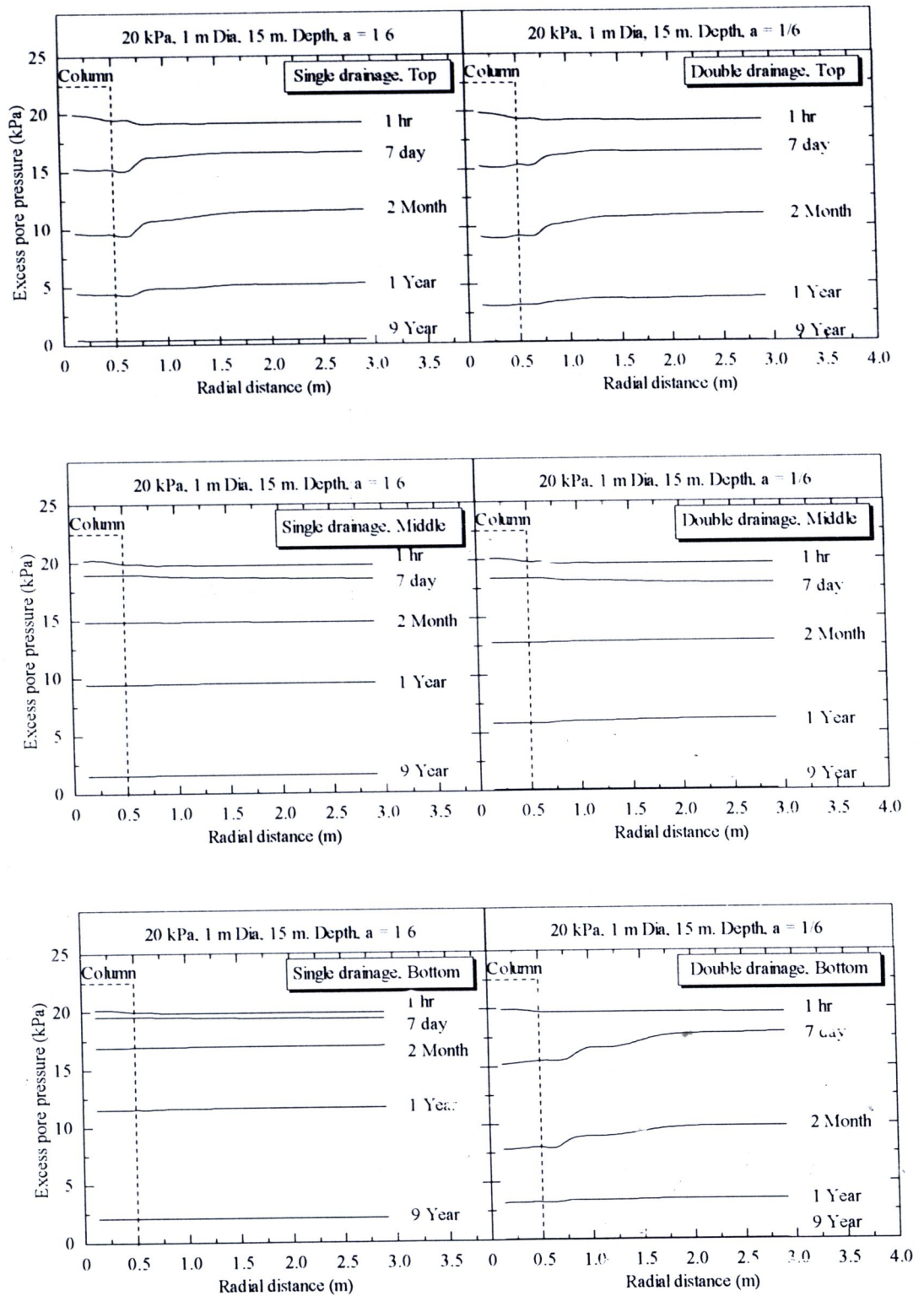
จากหัวข้อที่แล้ว จะพบว่าโปรแกรม Plaxis สามารถจำลองพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี หัวข้อนี้จะศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีขนาดจริง เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเค้นกดทับในสนามและอิทธิพลของขนาดชั้นดินจำลอง การศึกษาพฤติกรรมของความดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ ขอบเขตระบายน้ำทางเดียว และขอบเขตระบายน้ำสองทาง โดยวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสมมาตรรอบแกน ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D Version 8.2 ใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมประกอบด้วย 15 โหนด โดยแบ่งเป็น 15 โหนด สำหรับความเค้นกับความเครียด และ 12 โหนด สำหรับความดันน้ำ (รูปที่ 3.33) เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p เท่ากับ 1.0 เมตร D_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit cell เท่ากับ 6.0 เมตร และความลึก 15 เมตร ค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์แสดงใน ตารางที่ 3.2 ค่า E' ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 120,000 กิโลปาสกาล

รูปที่ 3.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำส่วนเกินตามแนวรัศมีในกรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียวและสองทาง ที่เวลาใดๆ จะเห็นได้ว่าความดันน้ำส่วนเกินบริเวณด้านบนของเสาเข็มทั้งในกรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียวและสองทางจะระบายได้เร็ว การระบายความดันน้ำส่วนเกินในบริเวณกึ่งกลางของเสาเข็มทั้งสองกรณีจะต่ำกว่าดินเหนียวอ่อนเล็กน้อย และการระบายความดันน้ำส่วนเกินบริเวณด้านล่างของเสาเข็มกรณีขอบเขตระบายน้ำสองทางจะเกิดขึ้นเร็วกว่ากรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียว เนื่องจากอยู่ใกล้ขอบเขตการระบายน้ำ

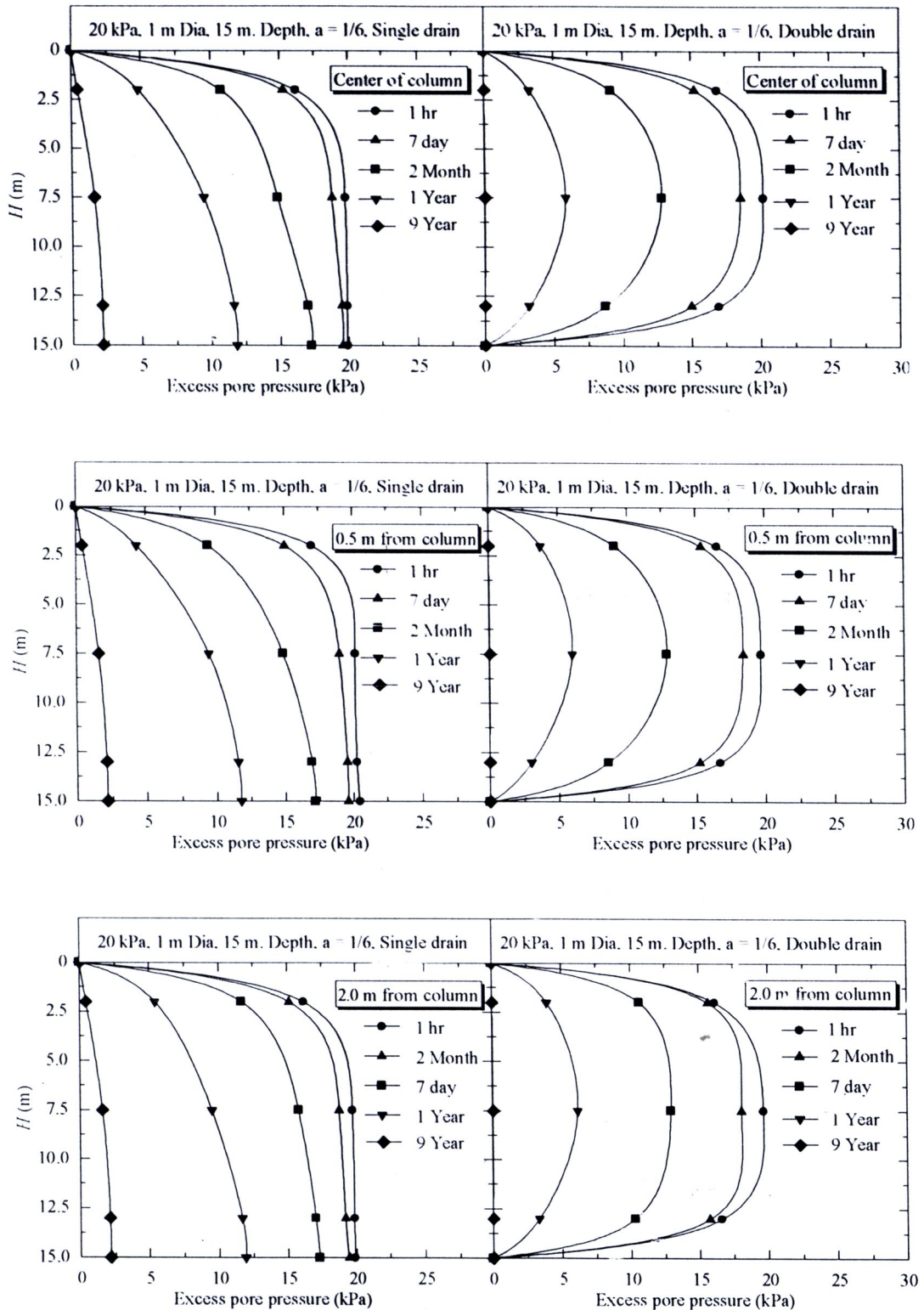
รูปที่ 3.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินในกรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียวและสองทางตามความลึก ที่เวลาต่างๆ การระบายของความดันน้ำทั้งสองกรณีมีลักษณะคล้ายกับการอัดตัวคายน้ำหนึ่งทิศทาง ทั้งบริเวณใกล้เสาเข็มและไกลเสาเข็ม และความดันน้ำส่วนเกินจะระบายได้เร็วเมื่ออยู่ใกล้กับขอบเขตระบายน้ำ รูปที่ 3.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาทั้งกรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียวและสองทาง พบว่าดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์มีการทรุดตัวสุดท้ายของทั้งสองกรณีเท่ากัน เพียงแต่อัตราการทรุดตัวต่างกัน กล่าวคือ กรณีขอบเขตระบายน้ำสองทางจะมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วกว่ากรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียว ถ้าเปรียบเทียบกับ การระบายน้ำในชั้นดินเหนียวที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ช่วยลดระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ หรืออาจกล่าวได้ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของชั้นดิน (Coefficient of consolidation, c_v)



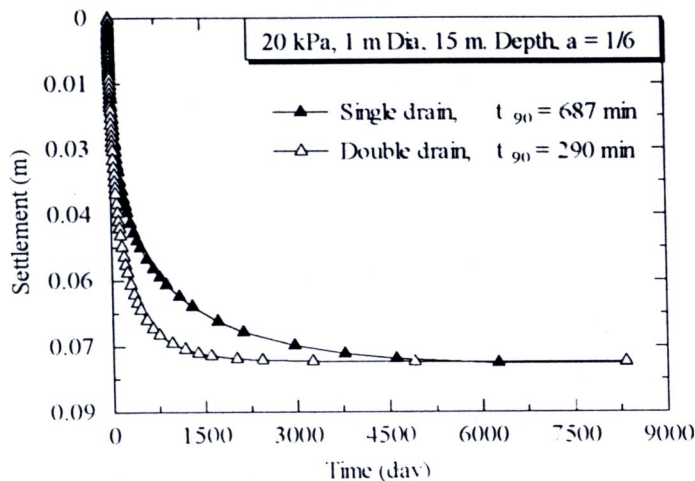
รูปที่ 3.33 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร และยาว 15.0 เมตร



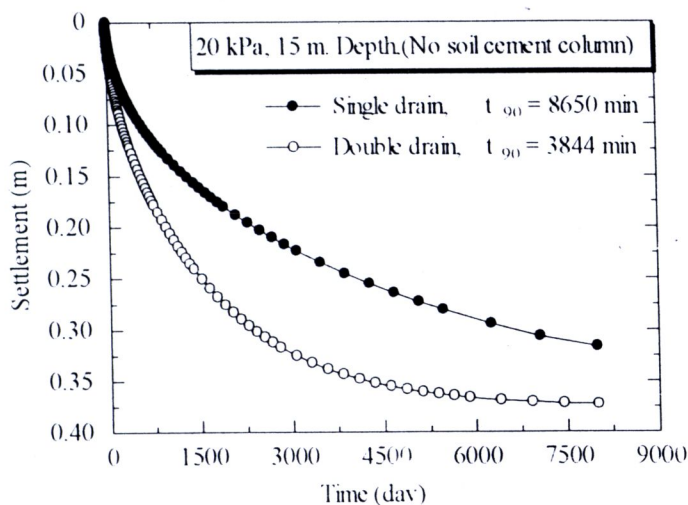
รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับระยะทางตามแนวรัศมี ที่เวลาใดๆ
กรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียวและสองทาง



รูปที่ 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินกับคามลึก ที่เวลาใดๆ
กรณีขอบเข้ระบายน้ำทางเดียวและสองทาง



(a) ชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์



(b) ชั้นดินเหนียวธรรมชาติ (ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์)

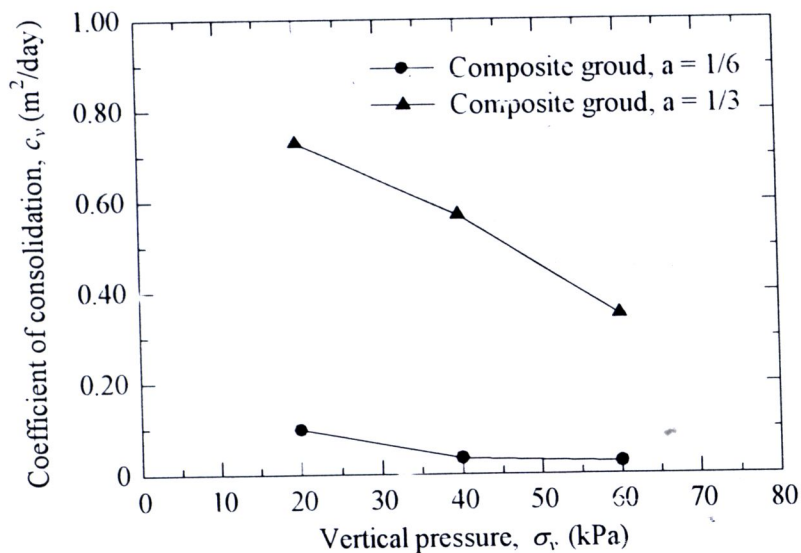
รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์
กรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียวและสองทาง

3.5 การประมาณการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์จากผลทดสอบการอัดตัวคาน้ำในแบบจำลองย่อส่วน

จากรูปที่ 3.36 จะเห็นได้ว่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์มีพฤติกรรมคล้ายกับการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวธรรมชาติที่ปราศจากเสาเข็ม แต่ค่าทรุดตัวสุดท้ายจะต่ำกว่า และระยะเวลาการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์จะเร็วกว่า หรือกล่าวได้ว่าเสาเข็มช่วยเพิ่มสติเฟนสและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำให้แก่ชั้นดินเหนียว ความดันน้ำส่วนเกินในเสาเข็ม

ดินซีเมนต์และดินเหนียวที่ส่วนกลางของชั้นดินที่เวลาหนึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ความแตกต่างของความดันน้ำส่วนเกินในเสาเข็มและดินเหนียวสังเกตได้อย่างชัดเจนเฉพาะบริเวณที่อยู่ใกล้ขอบเขตระบายน้ำ ดังนั้น หากสมมติว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแบบหนึ่งทิศทาง และความดันน้ำส่วนเกินในชั้นดินเหนียวและเสาเข็มดินซีเมนต์มีความสม่ำเสมอตลอดความลึก (ไม่พิจารณาอิทธิพลของความแตกต่างของความดันน้ำส่วนเกินบริเวณที่อยู่ใกล้ขอบเขตระบายน้ำ) สัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำคอมพอสิต (composite coefficient of consolidation, $c_{v(com)}$) ก็น่าจะสมารถใช้ในการประมาณการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ได้ หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการประมาณการทรุดตัวที่คำนวณโดยใช้ค่า $c_{v(com)}$ กับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (FEM) โดยที่ค่า $c_{v(com)}$ คำนวณได้โดยอาศัยทฤษฎีการอัดตัวคาน้ำในหนึ่งทิศทางของ Terzaghi (1925)

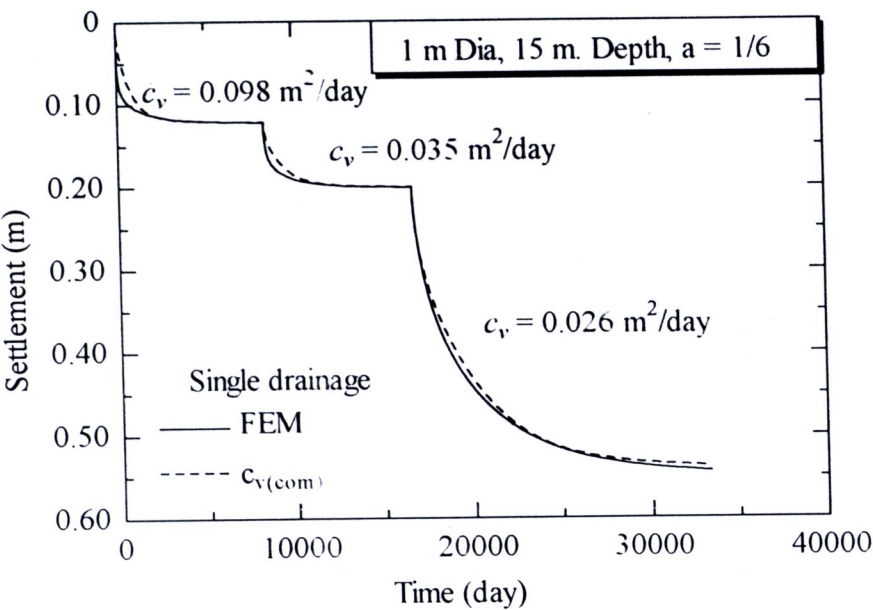
รูปที่ 3.37 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำของดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์กับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ที่หาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 3.4) $c_{v(com)}$ สำหรับเสาเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร ($a = 1/6$) และ 2.0 เมตร ($a = 1/3$) มีค่าเท่ากับ 0.096, 0.035 และ 0.026 ตารางเมตรต่อวัน และเท่ากับ 0.73, 0.57 และ 0.35 ตารางเมตรต่อวัน สำหรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 20 40 และ 60 กิโลปาสคาล ตามลำดับ



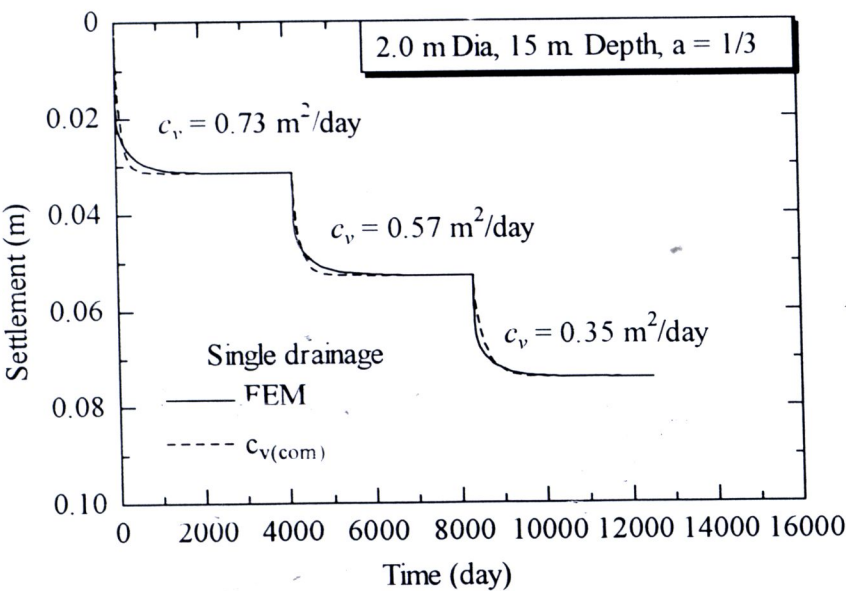
รูปที่ 3.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำกับความเค้นกดทับ สำหรับ $a = 1/6$ และ $1/3$

รูปที่ 3.38 ถึง 3.41 แสดงผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาโดยทฤษฎีการอัดตัวคาน้ำหนึ่งทิศทางและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เป็นที่น่าสนใจว่าความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา ที่คำนวณได้จากทั้งสองวิธีมีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น ในทางปฏิบัติ เราสามารถประมาณการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ได้อย่างง่ายดาย เพียงแค่ทำ

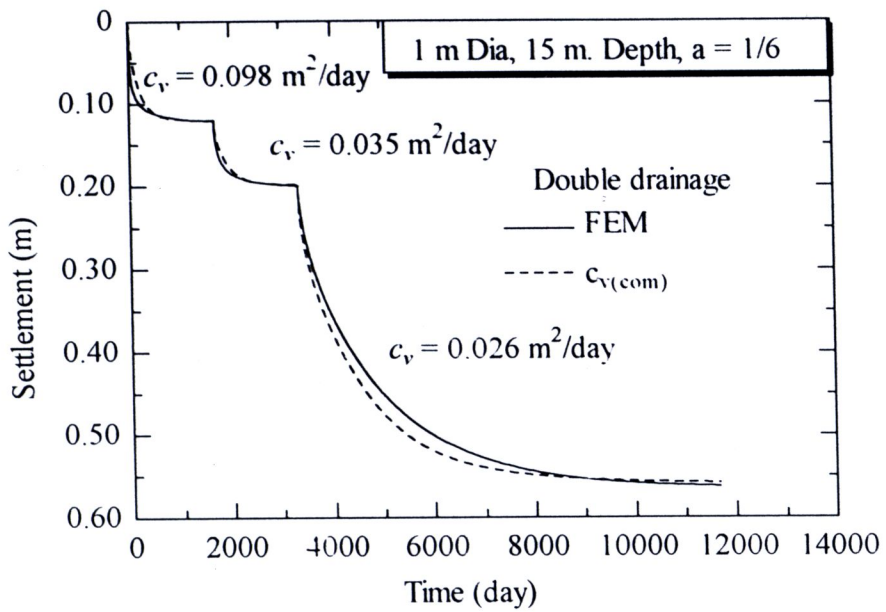
การทดสอบการอัดตัวด้วยน้ำของชั้นดินจำลองในห้องปฏิบัติการที่มีค่า a ตามความต้องการในสนาม และนำค่า $c_{v(com)}$ ที่ได้มาคำนวณการทรุดตัว



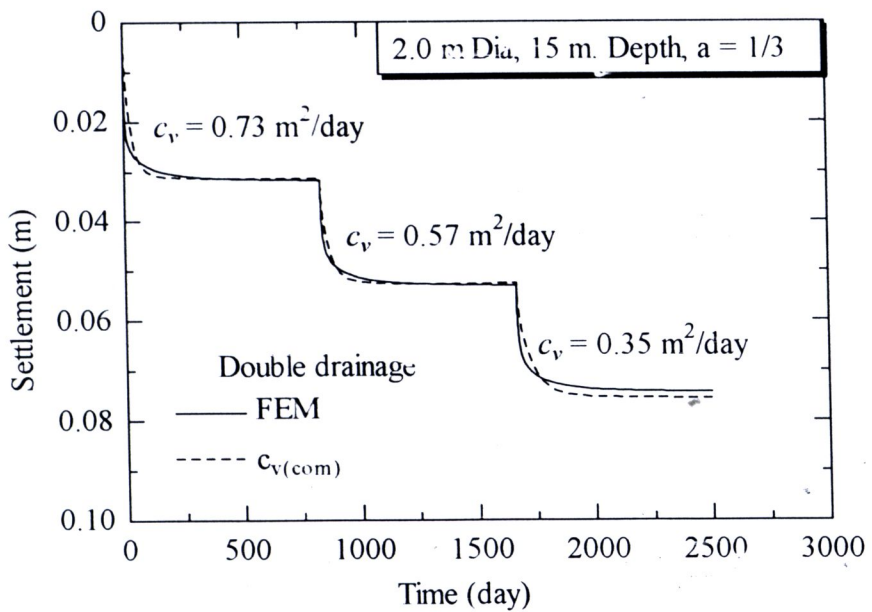
รูปที่ 3.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร และความลึก 15 เมตร (กรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียว)



รูปที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร และความลึก 15 เมตร (กรณีขอบเขตระบายน้ำทางเดียว)



รูปที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร และความลึก 15 เมตร (กรณีขอบเขตระบายน้ำสองทิศทาง)



รูปที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของชั้นดินเหนียวอ่อนเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร และความลึก 15 เมตร (กรณีขอบเขตระบายน้ำสองทิศทาง)