



รายงานการวิจัย

การพัฒนาแบบจำลองดินสำหรับดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน
(Development of a Soil Model for Cemented Clay)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2550-2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2552

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงได้ ถ้าปราศจากการช่วยเหลือทางจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นไปได้ยาก ผู้เขียนต้องขอขมา มา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้เขียนขอขอบคุณ Dr. Martin D Liu, อาจารย์ประจำ School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong ประเทศออสเตรเลีย และคุณจิระยุทธ สืบสุข นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับคำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านการพัฒนาแบบจำลองดิน Structured Cam Clay (SCC) สำหรับดินซีเมนต์

ท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ 2550-2551

สุขสันต์ หอพิบูลสุข

หัวหน้าโครงการวิจัย

กุมภาพันธ์ 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมทางกลของดินเหนียวซีเมนต์ และจำลองพฤติกรรมทางกลโดยอาศัยหลักการของแบบจำลอง Structured Cam Clay จากการพิจารณาคุณสมบัติเด่นเฉพาะของดินเหนียวซีเมนต์ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลอง Structured Cam Clay สำหรับดินซีเมนต์ โดยการปรับปรุงพารามิเตอร์ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยให้รวมอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานต่อพฤติกรรมด้านแรงเฉือนและการเสียรูปพลาสติก และการปรับปรุง Destructuring function ให้สามารถอธิบายเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดินซีเมนต์เนื่องจากการแตกสลายของโครงสร้างดินซีเมนต์ แบบจำลองที่พัฒนานี้ได้ถูกนำไปใช้ในการจำลองพฤติกรรมของดินเหนียวซีเมนต์ ที่มีระดับความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานต่างๆ จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่พัฒนานี้สามารถจำลองพฤติกรรมที่ซับซ้อนของดินซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี ท้ายสุด ผู้วิจัยได้อธิบายถึงอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานต่อพารามิเตอร์ของแบบจำลอง พร้อมทั้งนำเสนอสมการเชิงประสพการณ์ในการทำนายพารามิเตอร์ของแบบจำลองจากความแข็งแรงพันธะเชื่อมประสาน

ABSTRACT

In this paper, a theoretical study on the mechanical behaviour of cemented clay is made. The theoretical framework of the Structured Cam Clay (SCC) model has been extended to describe the behaviour of cemented clay. Considering special features of the behaviour of cemented clays, some modifications are proposed to the SCC model. The mean effective stress parameter is modified to include the influence of cementation on strength characteristics and plastic deformation explicitly. Also, the destructuring function is modified to describe the removal of soil-cementation structure dominated by the crushing of soil-cementation structure. The revised model is thus employed to simulate and predict the behaviour of cemented clays with various degrees of cementation. It is seen that the complicated behaviour of cemented clays can be represented reasonably well by the theoretical framework of the SCC model. Finally the influence of cementation on model parameters is discussed and empirical equations are proposed to determine key parameters that are directly linked to cementation.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ก
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม.....	4
2.2 ประเภทของดินซีเมนต์.....	5
2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement).....	5
2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์.....	5
2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.4 ปฏิกิริยาทางเคมีของดินซีเมนต์.....	7
2.5 โครงสร้างดินดินซีเมนต์.....	8
2.6 พฤติกรรมทางวิศวกรรม (Engineering behavior) ของดินเหนียวซีเมนต์.....	9
2.6.1 การอัดตัว (Compressibility).....	9
2.6.2 พฤติกรรมด้านแรงเฉือน.....	10
2.6.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน.....	13
2.7 การพัฒนาแบบจำลอง Constitutive บนพื้นฐานของหลักการสภาวะวิกฤติ.....	13
2.8 ทฤษฎี Cam Clay (Roscoe et al., 1963).....	14
2.9 ทฤษฎี Modified Cam Clay (Roscoe et al., 1963).....	15
2.10 แบบจำลอง Structured Cam Clay (Liu and Carter, 2002).....	16
บทที่ 3 การพัฒนาแบบจำลอง Structured Cam Clay สำหรับดินซีเมนต์.....	19
3.1 บทนำ.....	19

บทที่ 3 การพัฒนาแบบจำลอง Structured Cam Clay สำหรับดินซีเมนต์.....	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 พฤติกรรมของดินซีเมนต์.....	19
3.3 แบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์.....	20
3.3.1 การปรับปรุงพารามิเตอร์ความเค้นเฉื่อยประสิทธิผล.....	22
3.3.2 วัสดุจินตนาการ.....	22
3.3.3 พฤติกรรมยืดหยุ่น.....	23
3.3.4 พฤติกรรมคราก.....	24
3.4 ผลการจำลองพฤติกรรมของดินด้วยแบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์.....	27
3.5 ความแม่นยำของแบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์.....	31
3.6 บทสรุป.....	37
เอกสารอ้างอิง.....	39
ประวัตินักวิจัย.....	42

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคินเนียวกรุงเทพในสถานะปั้นใหม่และธรรมชาติ.....	27
3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคินเนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์.....	27
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์.....	31
3.4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ได้จากการประมาณ สำหรับซีเมนต์ 6 และ 12 เปอร์เซ็นต์.....	35

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1996).....	8
2.2 ไดอะแกรมเส้นการอัดตัวของดินเหนียวซีเมนต์และดินเหนียวปั้นใหม่ (Horpibulsuk et al., 2007).....	9
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความดันน้ำส่วนเกินกับความเครียดเฉือน ของดินซีเมนต์ที่ความเค้นเบี่ยงเบนต่ำกว่าความเค้นคราก (Horpibulsuk et al., 2004b)...	10
2.4 เส้นทางการเดินของความเค้นของดินตัวอย่างที่ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลต่ำมาก (Horpibulsuk et al., 2004b)	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความดันน้ำส่วนเกินกับความเครียดเฉือน ของดินซีเมนต์ที่ความเค้นเบี่ยงเบนสูงกว่าความเค้นคราก (Horpibulsuk et al., 2004b)...	12
2.6 เส้นทางการเดินของความเค้นของดินตัวอย่างที่ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลสูงกว่าความ เค้นคราก (Horpibulsuk et al., 2004b)	12
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้ พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (รุ่งลาวัลย์และสุขสันต์, 2546).....	13 ^{**}
2.8 ลักษณะการอัดตัวของดินเหนียวโครงสร้างตามธรรมชาติ (Liu and Carter, 2002).....	17
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นแนวตั้งของดินเหนียวกรุงเทพมหานคร ซีเมนต์ (Lorenzo and Bergado, 2004).....	20
3.2 วัสดุเชิงจินตนาการของแบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์	24
3.3 ผลการจำลองการอัดตัวด้วยแบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์โดยใช้ข้อมูลจากตาราง ที่ 3.1 และ 3.2.....	27
3.4 ผลการจำลองพฤติกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่.....	28
3.5 ผลการจำลองพฤติกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวธรรมชาติ.....	28
3.6 ผลการจำลองพฤติกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวซีเมนต์.....	28
3.7 เส้นทางการเดินของความเค้นประสิทธิผลที่ความเค้นเฉื่อยประสิทธิผล เท่ากับ 10 กิโลปาสกาล.....	29

3.8 เส้นทางการเดินของความเค้นประสิทธิผลที่ความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล เท่ากับ 750 กิโลปาสกาล.....	30
3.9 การจำลองการอัดตัวคายน้ำของดินซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์.....	32
3.10 ผลเปรียบเทียบเส้นทางการเดินของความเค้น สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b).....	32
3.11 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบน สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b).	33
3.12 ผลเปรียบเทียบเส้นทางการเดินของความเค้น สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 6 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b).....	35
3.13 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบน สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 6 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b).	35
3.14 ผลเปรียบเทียบเส้นทางการเดินของความเค้น สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b).....	36
3.15 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบน สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b)	36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

โครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ของประเทศไทยที่มีอยู่ในขณะนี้ส่วนใหญ่เป็นโครงการสาธารณูปโภคพื้นฐานสำหรับสร้างความเป็นอยู่ที่ดีแก่ประชาชนและสนับสนุนความน่าเชื่อถือทางเศรษฐกิจของประเทศ โครงการก่อสร้างดังกล่าวล้วนแต่เกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างโครงสร้างบนพื้นดินแทบทั้งสิ้น โดยสภาพภูมิประเทศของสถานที่ก่อสร้างโครงการเหล่านั้นส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าชั้นดินบริเวณดังกล่าวเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ (Low shear strength) และการอัดตัวสูง (High compressibility) การก่อสร้างบนชั้นดินประเภทนี้จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพให้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น เกิดอัดตัวต่ำเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยการเติมซีเมนต์ (Cement stabilization) ถือเป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ วิธีการปรับปรุงเช่นนี้มีชื่อเรียกแตกต่างกันตามกระบวนการนำซีเมนต์เข้าผสมกับดิน เช่น Jet grouting และ Deep mixing เป็นต้น

การเติมซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินนั้นทำให้พฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเปลี่ยนไป ดินซีเมนต์ได้ถูกจำแนกไว้เป็นดินพันธะเชื่อมประสาน (Cemented soil) ตามการจำแนกประเภทของดินที่เสนอโดยซุซสันดีและรู้งลาวัลย์ (2545) Horpibulsuk et al. (2004b) ได้แสดงให้เห็นว่าพันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดิน และชี้ชัดว่าพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินไร้พันธะเชื่อมประสานและดินพันธะเชื่อมประสานมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อวิศวกรในการเลือกใช้แบบจำลองดินสำหรับการคำนวณวิเคราะห์โดยวิธี Numerical method วิศวกรโดยมากเข้าใจว่าดินซีเมนต์นั้นเป็นดินอัดตัวมากกว่าปกติตามการจำแนกแบบดั้งเดิม และเลือกใช้แบบจำลองดินพื้นฐานเดิม เช่น Cam clay model และ Modified cam clay model เป็นต้น ทำให้การทำนายพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินนั้นผิดพลาดมากเมื่อนำมาใช้กับพันธะเชื่อมประสาน (Cemented soil)

การออกแบบทางด้านวิศวกรรมฐานราก (Foundation engineering) และงานโครงสร้างดิน (Earth structure) ในปัจจุบันนี้ใช้วิธี Limit equilibrium analysis ร่วมกับวิธี Numerical analysis เพื่อคำนวณการเสถียรและการเปลี่ยนแปลงความเค้นในมวลดินที่เวลาต่างๆ วิธี Numerical analysis จำเป็นต้องใช้เทคนิควิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element method) หรือวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) ร่วมกับแบบจำลองดิน (Soil model) Cam clay model (Roscoe et al., 1963) เป็นแบบจำลองดินพื้นฐาน (Simple model) อันหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบันเพราะพารามิเตอร์ของแบบจำลองมีไม่มากและหา

ได้ง่ายจากการทดลองพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ และสามารถจำลองพฤติกรรมของดินไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวปกติได้ดี แต่ยังมีข้อด้อยที่ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินที่มีพันธะเชื่อมประสานได้ เพราะพัฒนามาจากแนวคิดการจำแนกดินแบบดั้งเดิม (ดินเหนียวอัดตัวปกติและดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ) นอกจากแบบจำลองพื้นฐานอย่าง Cam clay model แล้ว ก็มีแบบจำลองดินชั้นสูง (Advanced soil model) เช่น Lade's double hardening model (Lade, 1977), MIT soil model (Whittle, 1987), Al-Tabbaa and Wood model (Al-Tabbaa and Wood, 1989) เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองดินเหล่านี้ต้องการพารามิเตอร์จำนวนมากและมักจะหาได้จากการทดลองที่ยุ่งยาก โดยอาศัยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นพิเศษ ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง แบบจำลองดินเหล่านี้จึงไม่ค่อยนิยมนำมาใช้ในงานออกแบบเท่าใดนัก ส่วนใหญ่ใช้ในงานวิจัยในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ส่วนการออกแบบจะนิยมใช้แบบจำลองดินที่หาพารามิเตอร์ง่ายและค่าใช้จ่ายน้อยกว่า ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองดินสำหรับดินพันธะเชื่อมประสานที่ใช้พารามิเตอร์ของดินน้อย ค่าใช้จ่ายถูก และสามารถจำลองพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินพันธะเชื่อมประสานได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะการปรับปรุงดิน โดยการเติมซีเมนต์จะเข้ามามีบทบาทในงานก่อสร้างในประเทศไทยมากขึ้นเรื่อยๆ การเข้าใจพฤติกรรมของดินซีเมนต์และมีเครื่องมือ (Tool) ที่ดีไว้ใช้ทำนายพฤติกรรมของดินผสมซีเมนต์ได้นั้น จะทำให้วิศวกรผู้ออกแบบมีความมั่นใจในการออกแบบมากขึ้น อีกทั้งในปัจจุบันโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์โดยวิธี Numerical analysis สำหรับงานวิศวกรรมปฐพีที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปเป็นโปรแกรมของมหาวิทยาลัยหรือบริษัทในต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ด้วยเหตุนี้เองจึงไม่ค่อยปรากฏการพัฒนาในงานวิจัยด้าน Numerical analysis มากนักในประเทศไทย การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์โดยวิธี Numerical analysis เพื่อเป็นเครื่องมือมาตรฐานรองรับสำหรับงานวิจัยและงานออกแบบในประเทศจึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศออกไปแข่งขันในเวทีโลก

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานอย่างง่าย (Simple soil model) (ต้องการพารามิเตอร์จำนวนน้อยและสามารถหาได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ) สำหรับนำไปใช้ร่วมกับการวิเคราะห์โดยวิธี Numerical analysis ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างด้านวิศวกรรมฐานรากและงานโครงสร้างดิน ที่ก่อสร้างบนดินซีเมนต์หรือใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

แบบจำลองที่นำเสนอเป็นสำหรับทำนายพฤติกรรมของดินพันธะเชื่อมประสานอย่างง่าย ซึ่งสามารถใช้ร่วมกับโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานและจุดเริ่มต้นที่สำคัญของงานวิจัยด้านแบบจำลองดินชั้นสูงในประเทศต่อไป นอกจากนี้ แบบจำลองดังกล่าวยังใช้พารามิเตอร์จำนวนน้อย ซึ่ง

หาได้ง่ายจากการทดสอบพื้นฐานในห้องปฏิบัติการได้ทั้งหมด ส่งผลการออกแบบกระทำได้อย่างถูกต้อง
ตามหลักวิชาการภายใต้วงเงินที่เหมาะสม

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม

การปรับปรุงดินโดยใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) ได้เกิดขึ้นเป็นเวลากว่าหลายพันปีล่วงมาแล้ว ซึ่งปรากฏมีหลักฐานเกี่ยวกับการปรับปรุงดินที่ใช้สัจจรตั้งแต่สมัยโรมัน โดยการใส่ปูนขาว หรือสาร Pozzolans ผสมกับดินที่ใช้ทำพื้นทาง เพื่อให้ดินมีสภาพการใช้งานที่ดีขึ้น (Woods และ Yoder, 1952)

Portland Cement Association (1956) รายงานว่าปี 1940 ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการก่อสร้างงานถนนด้วยดินซีเมนต์ซึ่งมีพื้นที่มากกว่า 5.7 ล้านตารางเมตร ส่วนการนำดินซีเมนต์มาใช้ในงานสนามบินได้เริ่มขึ้นระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ในช่วงปี 1941-1944 ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 16.8 ล้านตารางเมตร ภายหลังสงครามครั้งที่ 2 ยุติ จึงมีการสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางของถนนผิวคอนกรีต ใช้เป็นไหล่ทาง ที่จอดรถ พื้นคลังสินค้า รองพื้นอ่างเก็บน้ำ คู และคลองอีกด้วย

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ที่ได้กำเนิดขึ้นในโลกว่า กิจการรับเหมาก่อสร้างที่เกี่ยวกับถนนในเมือง Sarasota รัฐ Florida ได้ก่อสร้างในปี 1915 น่าจะเป็นการเริ่มต้นครั้งแรกในโลกเกี่ยวกับถนนซีเมนต์ จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวมาผสมกับทราย และซีเมนต์ จากนั้นก็นำส่วนผสมที่ได้ไปเคลือบ และบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน และยังได้อ้างถึงรายงานของ Mill (1935) ว่าในปี 1932 South California State Department ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินและซีเมนต์ ภายใต้การดูแลของ Dr. C.H. Moorefield ซึ่งได้รายงานผลการทดสอบว่า ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถเข้ากันได้ และนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนได้

Terrel and Davidson (1961) ได้บันทึกว่าเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองของ South California State Department ในปี 1935 Bureau of Public Road และ Portland Cement Association (PCA) ได้ร่วมมือกันสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ ใกล้เมือง Johnsonville ขึ้น ถนนสายนี้ต่อมากลายเป็นที่รู้จักว่าเป็นโครงการแรกของวิศวกรรมถนนซีเมนต์

สำหรับประเทศไทย การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์เริ่มในปี พ.ศ. 2508 โดยกรมทางหลวงร่วมกับบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด ได้ทดลองนำดินผสมซีเมนต์ (ซีเมนต์ + ลูกกรง) มาใช้เป็นพื้นทางครั้งแรกในทางสายวารินชำราบ – เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี โดยทำการทดลองระยะทางยาว 5 กิโลเมตร

ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ กรมทางหลวงจึงได้ออกแบบถนนหลายสายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้ดินซีเมนต์เป็นพื้นทาง (Soil Cement Base) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การได้ดี

2 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization (1959) แบ่งดินผสมซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมและลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้

2.2.1 Soil-Cement เป็นการนำดินและซีเมนต์มาผสมกันแล้วบดอัดโดยวิธีทางกล แล้วทำการไม่ให้แข็งตัว ซีเมนต์มีปริมาณสูงพอจนทำให้มีกำลังอัด หรือกำลังแบกทานตามที่กำหนด และมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์กลายเป็นวัสดุก่อสร้างที่แข็งแรงทนทาน มีความชื้นเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีความหล่อลื่นเพียงพอในการบดอัดให้ได้ความแน่นสูงสุด

2.2.2 Cement Modified Granular Soil ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินจำพวกทรายและกรวด (Granular Soil) บางชนิด เพื่อลดค่าดัชนีสภาพพลาสติก ดินซีเมนต์ประเภทนี้มักใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง และใช้เป็นชั้นพื้นทางของถนนผิวจราจรคงรูป (Rigid Pavement) และผิวจราจรยืดหยุ่น (Flexible pavement) ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ประมาณร้อยละ 1-3

2.2.3 Cement Modified Silt-Clay Soil ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้้น้อยมาก โดยมีจุดประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติการบวมตัวและหดตัวของดินที่อ่อนมาก หรือเป็นพื้นที่ที่ดินเปียกน้ำ

2.2.4 Cement - Treated Soil Slurries and Grouts เป็นการนำเอาดินและซีเมนต์ผสมน้ำ ให้มีสภาพเหลวพอประมาณ ดินซีเมนต์ประเภทนี้จะใช้ในการบำรุงรักษาถนน ใช้ในการยา หรืออุดรอยร้าวเกิดขึ้น เช่น รอยร้าวในอุโมงค์ส่งน้ำ

2.2.5 Plastic Soil - Cement เป็นการนำดิน ซีเมนต์ และน้ำมาผสมเข้าด้วยกันให้มีสภาพเหลวมาก ใช้ในงานลาดปูลงบนพื้นที่ที่มีความลาดเอียง เช่น การลาดท้องคลองชลประทาน การลาดผิวหน้าถนนทาง

3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญคือ 1) Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk) 2) Argillaceous Material ได้แก่ Silica ซึ่งอยู่ในรูปของดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale) 3) Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron) หรือ สีลาแลง (laterite) เมื่อทำการเผาวัสดุดังกล่าวทั้งหมดรวมกันในหม้อเผา ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์ และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , NaO , TiO_2 , P_2O_5 ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.1 ออกไซด์หลักจะ

วมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) และเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 2536)

ออกไซด์	ร้อยละ โดยน้ำหนัก
<u>ออกไซด์หลัก</u>	
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-0.6
<u>ออกไซด์รอง</u>	
MgO	0.1-5.5
Na ₂ + K ₂ O	0.5-1.3
TiO ₂	0.1-0.4
P ₂ O ₅	0.1-0.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 2536)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	3CaO . SiO ₂	C ₃ S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	2CaO . SiO ₂	C ₂ S
ไตรแคลเซียม อลูมินา	3CaO . Al ₂ O ₃	C ₃ A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์	4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.3.2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว

2.3.2.2 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้งานที่เกิดความร้อนปานกลาง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง ปัจจุบันไม่มีผลิตในประเทศไทย

2.3.2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปอร์ตแลนด์เมนต์ตราอรอาวัน ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจก่อให้เกิดการแตกร้าวได้

2.3.2.4 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ในประเทศไทยไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับเถ้าลอย

2.3.2.5 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีไตรแคลเซียม (C_3A) ต่ำ จึงทำให้มีการพัฒนากำลังอัดช้า ทำให้เกิดความร้อนต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดา ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้างฟ้า และตราปลาวลาม

2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของดินซีเมนต์

เมื่อผสมซีเมนต์เข้ากับเม็ดดินและน้ำ ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้ได้สารประกอบ Calcium silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน และได้ Hydrate Lime ที่แยกตัวออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ Hydrate Lime ทำปฏิกิริยาจับซิลิกาและอลูมินาที่ได้จากแร่ดินเหนียว ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้นอีก

ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบด้วย Mechanical Interlock และพันธะเชื่อมประสาน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์กับซิลิกาและอลูมินา ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นตามผิวของเม็ดดินโดยจะเกาะอยู่รอบๆ เม็ดดิน ทำให้เม็ดดินเชื่อมกัน เป็นผลให้เม็ดดินมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น (Lame, et al. 1959)

Herzog and Mitchell (1963) ได้ศึกษาปฏิกิริยาของซีเมนต์กับดินเหนียวและพบว่า การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิด CSH และ CAH เป็นกระบวนการแรก ส่วนกระบวนการที่สองเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา และอลูมินากับ Calcium Ion ที่เกิดจาก Hydrate Lime ทำให้ได้ CSH และ CAH ชันกัน แต่ต้องใช้ระยะเวลาการเกิดนานกว่ากระบวนการแรก จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

Moh (1965) พบว่าปฏิกิริยาของดินซีเมนต์สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



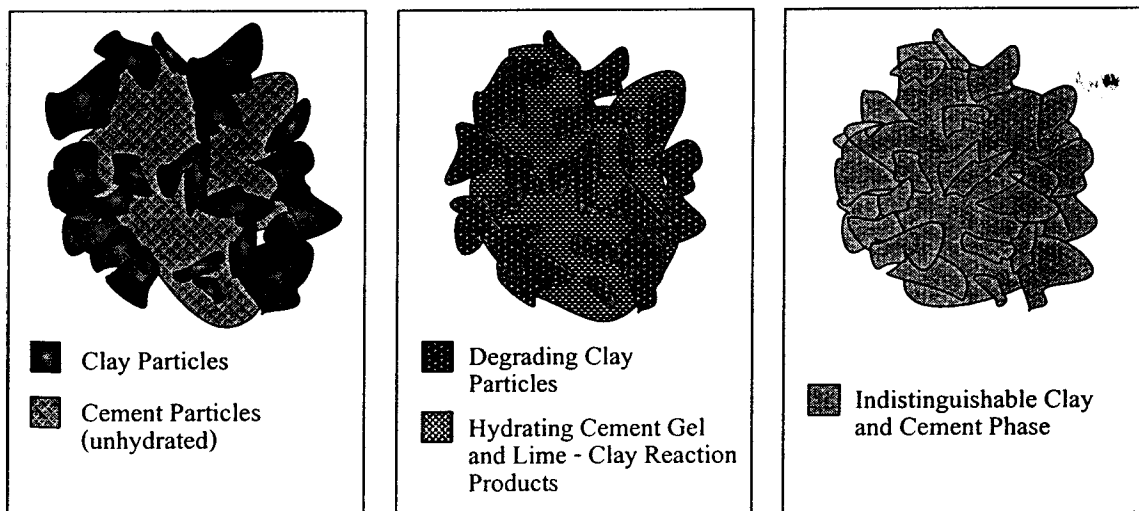
Michell and Jack (1966) อธิบายว่า เมื่อผสมซีเมนต์ลงไปในเม็ดดิน จะเกิดปฏิกิริยาและได้สารตกค้างเป็น CSH ปฏิกิริยาช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน ประกอบด้วยการแทนที่หรือการแลกเปลี่ยน Valency โดยการดูดซับ Cation ของแคลเซียม และเม็ดดินจะดูดซับเอา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เข้าไว้ ใต้อายุการบ่มที่ทำให้มีการเชื่อมยึดติดกันของเม็ดดิน

Terrel et al. (1979) ได้กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า ดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) โดยเฉพาะที่มีส่วนผสมของดินเหนียวอยู่ แร่ดินเหนียวจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยากับ Hydrate lime ก่อให้เกิดสารประกอบ CSH และ CAH

เกษม และพินิต (2536) ได้ศึกษาพบว่า ดินเหนียวปกติเป็นดินที่มีแร่ซิลิกาผสมอยู่สูง ซึ่งแร่เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งทำให้ดินเปลี่ยนแปลงสมบัติไป สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่ม และการยุบตัวน้อยลง

1.5 โครงสร้างดินซีเมนต์

Michell and Jack (1966) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินหลังจากผสมปูนซีเมนต์แล้ว โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 ภายใต้การกดอัด ปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อนุภาคของปูนซีเมนต์จะผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(ก) ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์เริ่มทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน และ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในดิน เป็นผลให้เกิดวัสดุเชื่อมประสาน จากนั้นซีเมนต์เจลและวัสดุเชื่อมประสานจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังรูปที่ 2.1(ข) ภายใต้การบ่มระยะยาว การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ มีผลทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วดังรูปที่ 2.1(ค) เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Michell และ Jack ,1966)

12.6 พฤติกรรมทางวิศวกรรม (Engineering behavior) ของดินเหนียวซีเมนต์

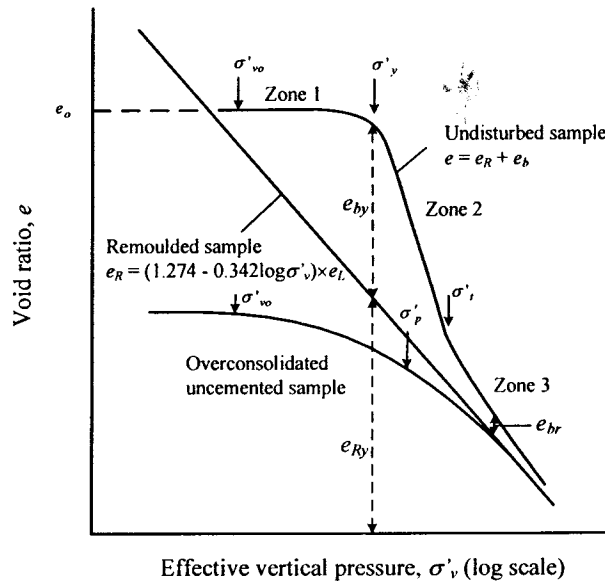
12.6.1 การอัดตัว (Compressibility)

Horpibulsuk et al. (2007) ได้เสนอไดอะแกรมการอัดตัว (Compression) ของดินเหนียวซีเมนต์ (Cemented clay) และดินเหนียวปั้นใหม่ ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าการอัดตัวของดินเหนียวซีเมนต์มีลักษณะเป็นตัว S กลับหัว ประกอบด้วยการอัดตัวที่แตกต่างกัน 3 โซน

โซน 1: เป็นโซนที่มีค่าการอัดตัวต่ำเนื่องจากความต้านทานของพันธะเชื่อมประสาน

โซน 2: เริ่มจากความเค้นคราก (Yield stress, σ'_y) จนถึงความเค้นที่จุดเปลี่ยนผัน (Transitional stress, σ'_t) ในโซนนี้ จะเกิดการอัดตัวที่มากเนื่องจากการแตกร้าวของพันธะเชื่อมประสาน (Break-up of cementation)

โซน 3: เริ่มต้นตั้งแต่ความเค้นที่มากกว่าความเค้นที่จุดเปลี่ยนผัน (Transition stress, σ'_t) เส้นการอัดตัวของดินเหนียวซีเมนต์มีแนวโน้มที่เข้าใกล้เส้นการอัดตัวของดินเหนียวปั้นใหม่ แต่จะไม่ใช่เส้นเดียวกันเนื่องจากแรงต้านทานของพันธะเชื่อมประสาน โดยที่เส้นการอัดตัวทั้งสองมีลักษณะขนานกัน



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมเส้นการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวซีเมนต์และดินเหนียวปั้นใหม่

(Horpibulsuk et al., 2007)

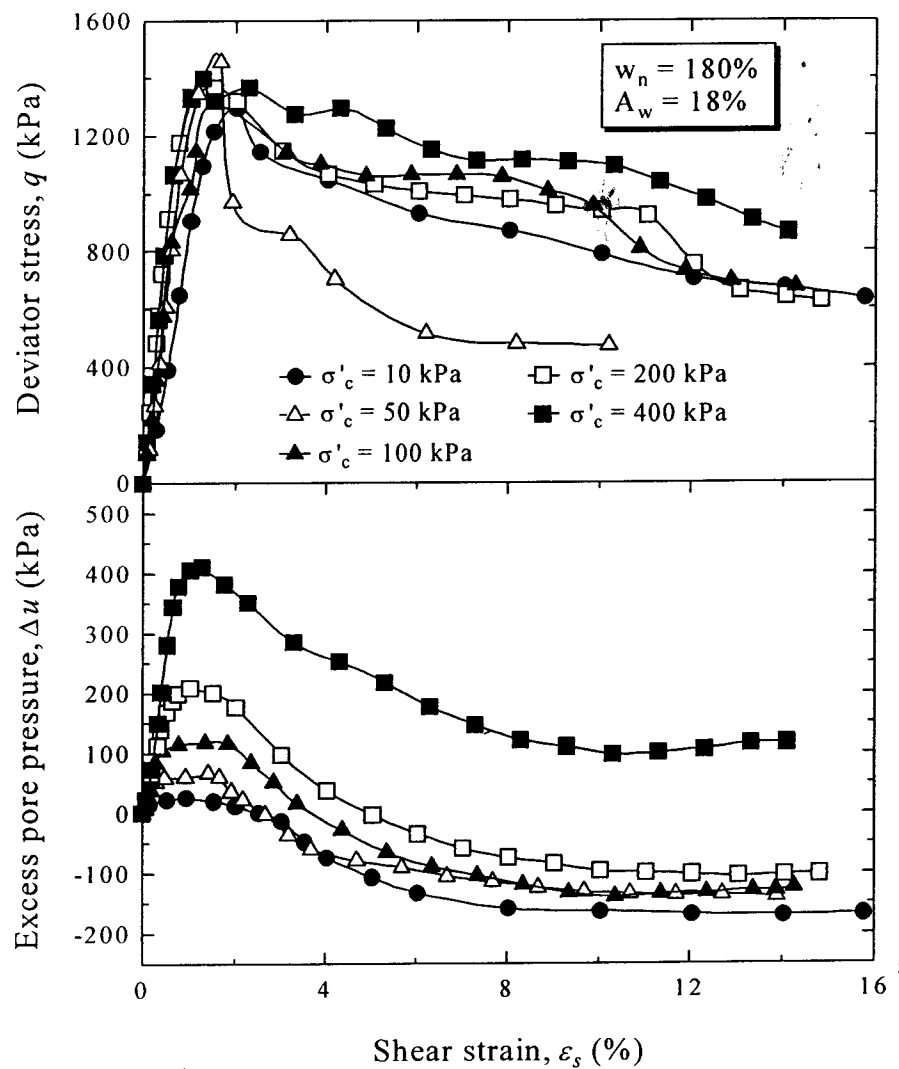
จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าที่ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งเดียวกัน อัตราส่วนโพรงของดินเหนียวซีเมนต์ (e) มีค่าเท่ากับผลรวมของอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวปั้นใหม่ (e_R) และอัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน (Additional void ratio due to cementation bond, e_b) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$e = e_R + e_b \quad (1)$$

คือ e_r คืออัตราส่วนโพรงของดินเหนียวปั้นใหม่ ซึ่งสามารถประมาณได้จากอัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัด
 หลว (Horpibulsuk et al., 2007) และ e_r คืออัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของพันธะเชื่อม
 ประสาน ซึ่งสามารถประมาณได้จากฟังก์ชันพาวเวอร์ของความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al.,
 ๒๐๐๗)

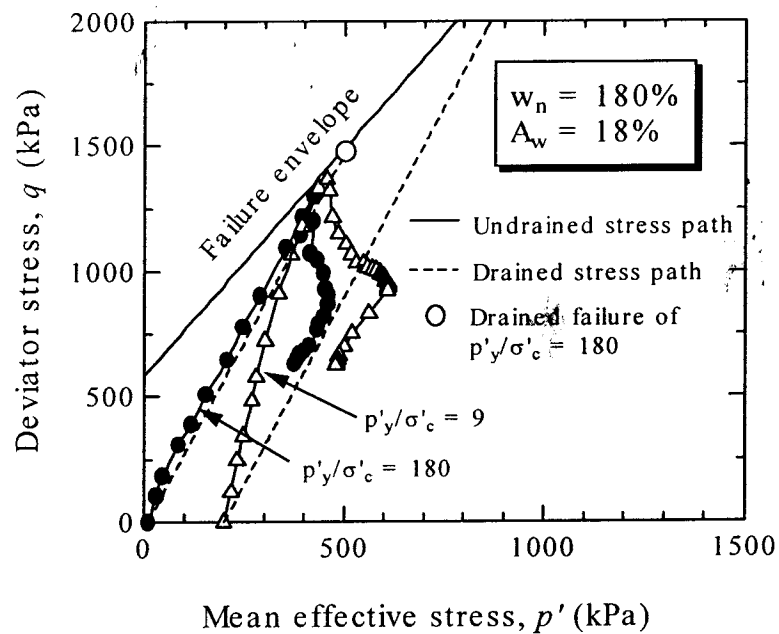
6.2 พฤติกรรมด้านแรงเฉือน

Horpibulsuk et al. (2004b) ได้วิเคราะห์ผลทดสอบแรงอัดสามแกนของดินซีเมนต์ ที่ปริมาณ
 ซีเมนต์ต่างๆ ภายใต้ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลต่างๆ และพบว่าพฤติกรรมด้านแรงเฉือนของดินซีเมนต์มี
 ความแตกต่างกันตามแต่ความเค้นรอบข้างประสิทธิผล (ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลต่ำกว่าความเค้น
 คราก และความเค้นรอบข้างประสิทธิผลสูงกว่าความเค้นคราก)



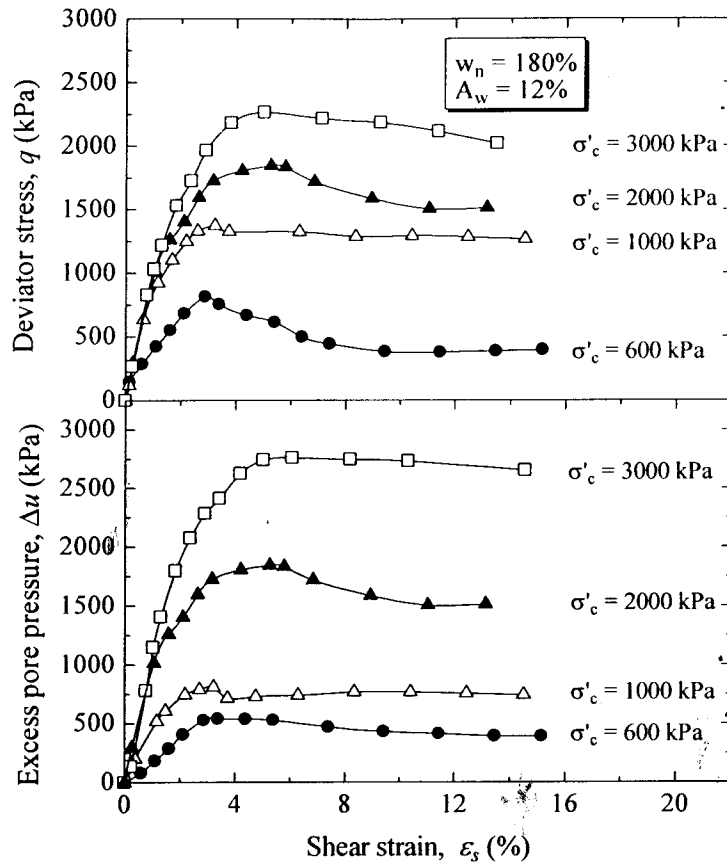
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความดันน้ำส่วนเกินกับความเครียดเฉือนของดิน
 ซีเมนต์ที่ความเค้นเบี่ยงเบนต่ำกว่าความเค้นคราก (Horpibulsuk et al., 2004b)

รูปที่ 2.3 แสดงผลทดสอบแรงอัดสามแกนของดินซีเมนต์ที่ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลต่ำกว่าความเค้นคราก จะเห็นได้ว่าความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดและมีค่าลดลงจนถึงความเค้นเบี่ยงเบนวิกฤติ ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดมีค่าประมาณคงที่ไม่แปรผันตามความเค้นรอบข้างประสิทธิผล ในขณะที่ความดันน้ำส่วนเกินสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นรอบข้างประสิทธิผล สิ่งนี้เป็นลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ รูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางดินของความเค้นประสิทธิผล (Effective stress paths) ของดินซีเมนต์ที่อัตราส่วน $p'/\sigma'_c = 9$ และ 180 จะเห็นได้ว่าความดันน้ำส่วนเกินของดินตัวอย่างก่อนถึงความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum deviator stress) มีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated clay)

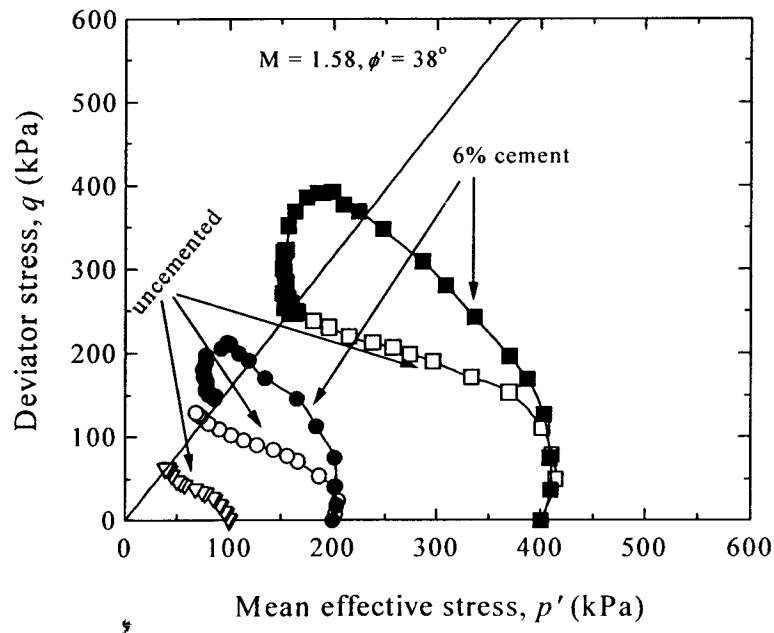


รูปที่ 2.4 เส้นทางดินของความเค้นของดินตัวอย่างที่ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลต่ำมาก (Horpibulsuk et al., 2004b)

พฤติกรรมด้านแรงเฉือนของดินซีเมนต์ภายใต้ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลสูงกว่าความเค้นครากแสดงดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 จะเห็นได้ว่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดและความดันน้ำส่วนเกินสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นรอบข้างประสิทธิผล และเส้นทางดินของความเค้นมีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นทางดินของความเค้นของดินเหนียวอัดตัวปกติ ความแตกต่างทางวิศวกรรมระหว่างดินเหนียวซีเมนต์และดินเหนียวอัดตัวปกติคือความเค้นเฉือนของดินซีเมนต์จะมีค่าลดลงหลังจากความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (Strain softening) เนื่องจากการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสาน ขณะที่ ดินเหนียวอัดตัวปกติจะมีความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นตามความเครียดเฉือน (Strain hardening) ด้วยเหตุนี้เอง เส้นทางดินของความเค้นจึงแสดงทั้งความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดและความเค้นเบี่ยงเบนวิกฤติ ขณะที่ ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดและความเค้นเบี่ยงเบนวิกฤติของดินเหนียวอัดตัวปกติจะเป็นค่าเดียวกัน (รูปที่ 2.7)



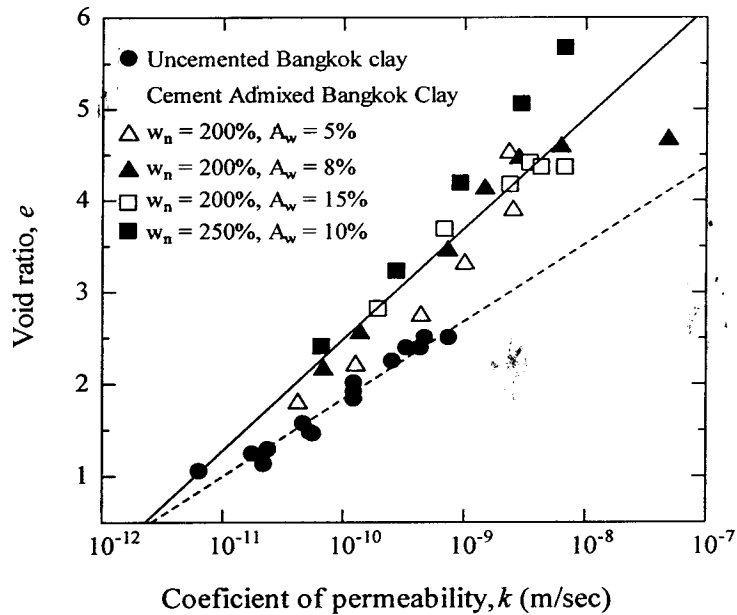
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความดันน้ำส่วนเกินกับความเครียดเฉือนของดินซีเมนต์ภายใต้ความเค้นเบี่ยงเบนสูงกว่าความเค้นคราก (Horpibulsuk et al., 2004b)



รูปที่ 2.6 เส้นทางดินของความเค้นของดินตัวอย่างภายใต้ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลสูงกว่าความเค้นคราก (Horpibulsuk et al., 2004b)

6.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สุขสันต์ และ รุ่งลาวัลย์ (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือน และลดการทรุดตัวแล้ว ยังลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างที่บ้น้ำ เช่น งานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกร้าว และ Cut - off wall เป็นต้น



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (รุ่งลาวัลย์และสุขสันต์, 2546)

7 การพัฒนาแบบจำลอง Constitutive บนพื้นฐานของหลักการสภาวะวิกฤติ

หลักการสภาวะวิกฤติ (Critical state concept) และผิวขอบเขตสถานะ (State boundary surface) ถูกนำเสนอขึ้นในปี ค.ศ.1958 โดย Roscoe, Schofield และ Wroth ซึ่งพัฒนามาจากเส้นชั้นอัตราส่วนโพรงคงที่ของ Rendulic (1936) อัตราส่วนโพรงวิกฤติและพฤติกรรม Liquefaction ของทรายที่เสนอโดย Casagrande (1938) และ Taylor (1948) และขอบเขตการวิบัติของ Hvorslev

ทฤษฎีของ Cam Clay พิจารณาว่าการครากเชิงปริมาตรเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเส้นทางเดินของความเค้นประสิทธิผลอยู่บนผิวขอบเขตสถานะ ที่สภาวะนี้พฤติกรรมของดินเป็นไปตาม Normality rule และพลังงานที่สลาย (Energy dissipation) ก็กับการเฉือนเชิงพลาสติกแปรผันตามพารามิเตอร์สถานะวิกฤติ M แบบจำลอง Cam Clay พลังงานที่สลายไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตร

พลาสติก สำหรับสถานะความเค้นภายในผิวขอบเขตสถานะ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเป็นแบบยืดหยุ่น และการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือนเกิดขึ้นน้อยน้อยมากและสามารถประมาณเท่ากับศูนย์ได้

ต่อมาได้มีการปรับปรุงแบบจำลองใหม่โดย Roscoe and Burland (1968) โดยพิจารณาว่าการสลายพลังงานก่อให้เกิดทั้งความเครียดเชิงปริมาตรพลาสติกและความเครียดเฉือนพลาสติก แบบจำลองของพวกเขานุญาตให้เกิดความเครียดเฉือนพลาสติกภายในผิวขอบเขตสถานะ โดยใช้ชุดของผิวครากที่กล่าวความเค้นเบี่ยงเบนคงที่ แต่ละชุดคือผิวครากเชิงปริมาตร (Volumetric yield locus) ทางด้านหนึ่งของเส้นสภาวะวิกฤติ ความเครียดเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำคำนวณได้โดยอาศัยเส้นชั้นแรงเฉือน (Shear contours) (Wroth and Loudon, 1967) ต่อมาสมการสมดุลของพลังงานของทฤษฎี Modified Cam Clay ของ Burland (1965) และ Roscoe and Burland (1968) ได้รับการปรับปรุงโดย Dafalias (1987) เพื่อใช้บรรยายพฤติกรรมของดินเหนียวอัดตัวปกติภายใต้สภาวะความเค้นที่ไม่เหมือนกันทุกทิศทาง (Anisotropic stress conditions)

8 ทฤษฎี Cam Clay (Roscoe et al., 1963)

แบบจำลอง Cam Clay ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติและดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติเล็กน้อย Roscoe et al. (1963) สมมติว่าพลังงานที่จะสลาย (Energy dissipation) ไปสู่แต่ละอิลลิเมนต์ของดินเป็นฟังก์ชันของความเครียดเบี่ยงเบนพลาสติกเพียงอย่างเดียว พลังงานที่จะสลายนี้สามารถประมาณได้โดยการสมมติว่าแกนความเค้นหลัก (Principal axes of stress) และการเพิ่มขึ้นของความเครียดพลาสติกอยู่ในแนวเดียวกัน

$$dW = p'd\varepsilon_v^p + qd\varepsilon_d^p \quad (2.1)$$

เมื่อ dW คือพลังงานที่สลายต่อปริมาตรของดินหนึ่งหน่วย

p', q คือความเค้นเฉลี่ยหลักประสิทธิผล และความเค้นเบี่ยงเบน

$d\varepsilon_v^p, d\varepsilon_d^p$ คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรพลาสติก และการเปลี่ยนแปลงความเครียดเบี่ยงเบน

พลาสติก ตามลำดับ

สมการที่ (2.1) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$dW = p'd\varepsilon_v^p + qd\varepsilon_d^p = Mp'd\varepsilon_d^p \quad (2.2)$$

เมื่อ M คือความชันของเส้นสภาวะวิกฤติบนระนาบ (q, p') สมการที่ (2.2) นี้ทำให้เกิด Flow rule ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{d\varepsilon_d^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{1}{M - \eta} \quad (2.3)$$

เมื่อ η คืออัตราส่วนความเค้น (q/p')

จากการประยุกต์ใช้ Normality rule จะได้ฟังก์ชันผิวครากดังนี้

$$i = Mp' \ln \left(\frac{p'_0}{p'} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ p'_0 คือความเค้นคราก ในทฤษฎีนี้ การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเบี่ยงเบนและความเครียดเชิงปริมาตรสำหรับสถานะของความเค้นที่อยู่บนผิวขอบเขตสถานะแสดงได้ดังนี้

$$i\varepsilon_d^p = \left(\frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \right) \left(\frac{p' d\eta + M dp'}{Mp' (M - \eta)} \right) \quad (2.5)$$

$$i\varepsilon_v^p = \left(\frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \right) \left(\frac{(\lambda - \kappa) d\eta}{M} + \lambda \frac{dp'}{p'} \right) \quad (2.6)$$

ผิวขอบเขตสถานะสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$i = \frac{\lambda M}{(\lambda - \kappa)} \ln \left(\frac{p'_0}{p'} \right) \quad (2.7)$$

9 ทฤษฎี Modified Cam Clay (Burland, 1965)

Burland (1965) ได้ปรับปรุงข้อจำกัดของแบบจำลอง Cam Clay โดยการปรับเปลี่ยนสมการพลังงาน ซึ่งพิจารณาว่าพลังงานที่สลายไปจะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรด้วย สมการพลังงานที่สลายตัวของแบบจำลอง Modified Cam Clay แสดงได้ดังนี้

$$iW = p' \left[(d\varepsilon_v^p)^2 + (M d\varepsilon_d^p)^2 \right] \quad (2.8)$$

Flow rule และ ผิวครากของแบบจำลองนี้แสดงได้ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

$$\frac{i\varepsilon_d^p}{i\varepsilon_v^p} = \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \quad (2.9)$$

$$v' = \frac{p_0 M^2}{M^2 - \eta^2} \quad (2.10)$$

จะเห็นได้ว่ารูปร่างของผิวครากมีลักษณะเป็นวงรี การเปลี่ยนแปลงความเครียดเบี่ยงเบนและ
แกมเครียดเชิงปริมาตรคำนวณได้จาก

$$\varepsilon_d^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left(\frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \right) \left(\frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} + \frac{dp'}{p'} \right) \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_v^p = \frac{1}{1 + e} \left(\frac{2\eta(\lambda - \kappa)d\eta}{M^2 + \eta^2} + \lambda \frac{dp'}{p'} \right) \quad (2.12)$$

สมการผิวขอบเขตสถานะของแบบจำลอง Modified Cam Clay แสดง ได้ดังนี้

$$\frac{v'}{v'_0} = \left(\frac{M^2}{M^2 + \eta^2} \right)^{\left(\frac{1 - \kappa}{\lambda} \right)} \quad (2.13)$$

10 แบบจำลอง Structured Cam Clay (Liu and Carter, 2002)

แบบจำลอง Structured ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Liu and Carter (2002) เพื่อใช้ในการทำนาย
พฤติกรรมของดินเหนียวโครงสร้างตามธรรมชาติ (Natural structured clay) แบบจำลองนี้ใช้คุณสมบัติ
ของดินเหนียวปั้นใหม่เป็นคุณสมบัติเส้นอ้างอิง โดยใช้สัญลักษณ์ * แทนคุณสมบัติของดินเหนียวปั้น
ใหม่ แบบจำลองนี้สมมติว่าดินเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อสถานะของความเค้น
ประสิทธิผลอยู่ภายในผิวคราก (Yield surface) และเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและพลาสติก
lastoplastic behavior) เมื่อสถานะของความเค้นประสิทธิผลอยู่บนผิวคราก พฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเมื่อ
สถานะของความเค้นอยู่ภายในผิวครากสามารถอธิบายได้ตามกฎของ Hook ดังนี้

$$\varepsilon_v^e = \left(\frac{\kappa^*}{1 + e} \right) \frac{dp'}{p'} \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_d^e = \frac{2(1 + \nu^*)}{9(1 - 2\nu^*)} \left(\frac{\kappa^*}{1 + e} \right) \frac{dq}{p'} \quad (2.15)$$

อ κ^* คือดัชนีการบวมตัวยืดหยุ่น ν^* คืออัตราส่วนโพซง และ e คืออัตราส่วนโพรง

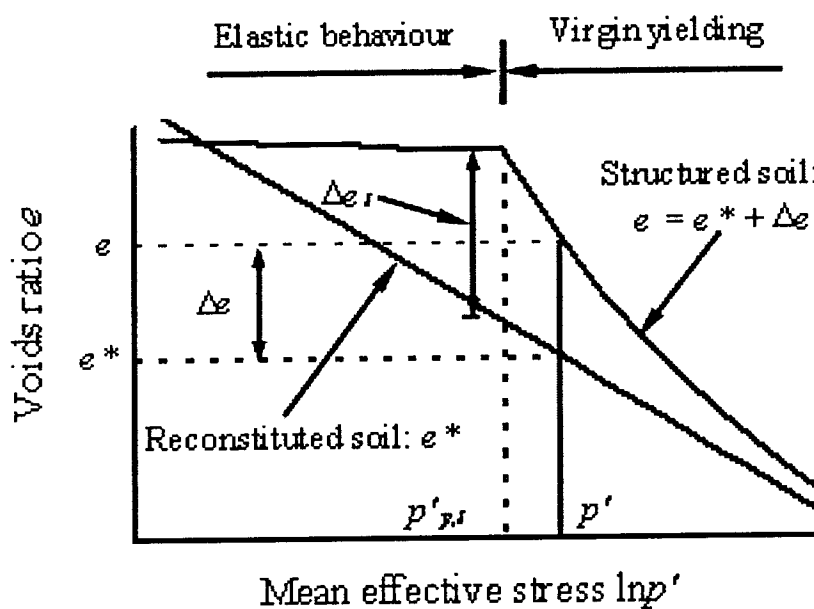
ผิวคราก (Yield surface) ของดินเหนียวโครงสร้างบนความสัมพัทธ์ $q-p'$ ถูกสมมติเป็นวงรี
(elliptical) เช่นเดียวกับแบบจำลองดิน Modified Cam Clay

พฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและพลาสติกเมื่อสถานะของความเค้นอยู่บนผิวครากสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อ e และ e^* คืออัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์และของดินปั้นใหม่ ที่ความเฉลี่ยประสิทธิผลเดียวกัน ตามลำดับ $p'_{y,i}$ คือ ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยที่จุดคราก (Yielding) ของดินซีเมนต์ Δe คือความแตกต่างของอัตราส่วนโพรงส่วนของดินซีเมนต์และดินปั้นใหม่ที่สถานะความเค้น (State of stress) เดียวกัน ดังนั้นการอัดตัวบริสุทธิ์ (Virgin compression) สามารถแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$e = e^* + (\Delta e_i - c) \left(\frac{p'_{y,i}}{p'} \right)^b + c \quad (2.16)$$

เมื่อ b และ c คือค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน Δe_i คือความแตกต่างของอัตราส่วนโพรงส่วนของดินซีเมนต์และดินปั้นใหม่ที่จุดคราก พารามิเตอร์ c ถูกกำหนดโดยสมการดังนี้

$$c = \lim_{p' \rightarrow \infty} \Delta e \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.8 ลักษณะการอัดตัวของดินเหนียวโครงสร้างตามธรรมชาติ (Liu and Carter, 2002)

จากสมการที่ (2.16) การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเชิงปริมาตรพลาสติก (Plastic volumetric strain) เมื่อสถานะของความเค้นอยู่บนผิวคราก (Yield surface) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + \left\{ (\lambda^* - \kappa^*) + b\Delta e \left(\frac{M^*}{M^* - \eta} \right) \right\} \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} \quad (2.18)$$

ความเครียดเบี่ยงเบนพลาสติกของดินเหนียวโครงสร้างสามารถหาได้จาก Flow rule เช่นเดียวกับแบบจำลอง Modified Cam clay Liu and Carter ได้นำเสนอ Flow rule ใหม่โดยพิจารณาว่าดินเหนียวโครงสร้างจะเกิดความเครียดเบี่ยงเบนน้อยกว่าดินเหนียวปั้นใหม่ ดังนั้น

$$\epsilon_d^p = \frac{2(1-\omega\Delta e)\eta}{M^{*2}-\eta^2} \times \left\{ (\lambda^*-k^*) + b\Delta e \left(\frac{M^*}{M^*-\eta} \right) \right\} \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} \quad (2.19)$$

โดย ω คือพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ซึ่งอธิบายอิทธิพลของโครงสร้างดินต่อ Flow rule ตัวบนของสูตรนี้ต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ มิเช่นนั้น เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงความเครียดพลาสติกจะมีทิศทางพุ่งเข้าสู่ผิวครากเสมอ ดังนั้น

$$0 < 1 - \omega\Delta e_i \leq 1 \quad (2.20)$$

หรือ

$$\omega \geq \omega \leq \frac{1}{\Delta e_i} \quad (2.21)$$

บทที่ 3

การพัฒนาแบบจำลอง Structured Cam Clay สำหรับดินซีเมนต์

1 บทนำ

ดินเหนียวอ่อนมักพบอยู่โดยทั่วไปทุกที่ของโลก ดินชนิดนี้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำและการคืบตัวสูง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากในงานวิศวกรรมปฐพี ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงดิน (Kamon and Bergado, 1991) การปรับปรุงที่นิยมเทคนิคหนึ่งคือการเสริมกำลังให้กับดินด้วยซีเมนต์ ซึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ จนถึงปัจจุบันได้มีงานวิจัยหลายชิ้นทั้งในห้องปฏิบัติการและสนามที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ (เช่น Kasama et al., 2000 และ Horpibulsuk et al., 2004b)

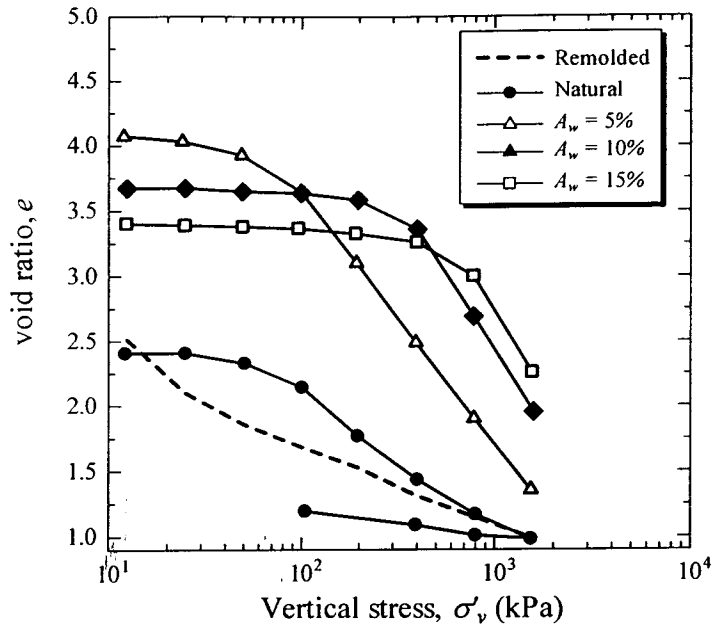
ถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนาแบบจำลองดินอย่างต่อเนื่องเพื่อจำลองพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินโครงสร้าง (Gens and Nova, 1993; Whittle, 1993; Wheeler, 1997; Rouainia and Muir Wood, 2000; และ Kavvas and Amorosi, 2000) แต่ส่วนใหญ่แล้ว แบบจำลองเหล่านี้มักมีความยุ่งยากและซับซ้อนทั้งพารามิเตอร์ต้องการหาได้ยากในทาง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอพฤติกรรมของดินซีเมนต์ และพัฒนาแบบจำลองดินซีเมนต์

แบบจำลองอย่างง่าย “Structured Cam Clay (SCC) model” ที่เสนอโดย Liu and Carter (Liu and Carter, 2002, Carter and Liu 2005) ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองดินซีเมนต์ งานวิจัยนี้จะปรับปรุงแบบจำลอง SCC โดยการเพิ่มอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) และท้ายสุดวิจัยจะแสดงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่นี้ โดยการจำลองพฤติกรรมของดินซีเมนต์

2 พฤติกรรมของดินซีเมนต์

ความเข้าใจในพฤติกรรมของดินซีเมนต์เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาแบบจำลองดินซีเมนต์ ลักษณะที่เด่นชัดของดินซีเมนต์สามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

- 1) เนื่องจากอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน อัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์จึงอยู่ในสถานะ Meta-stable state (Horpibulsuk et al., 2004a และ 2007) อัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็นอัตราส่วนโพรงพื้นฐานของดินเนื่องจากแพบริค และอัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อ A_w คือปริมาณซีเมนต์ และผลทดสอบได้จาก Lorenzo and Bergado, 2004



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นแนวตั้งของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ (Lorenzo and Bergado, 2004)

- 2) พันธะเชื่อมประสานเพิ่มความต้านทานการเสียรูปยืดหยุ่น แต่ลดความต้านทานการเสียรูปพลาสติก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า พันธะเชื่อมประสานยิ่งมาก ดัชนีการอัดตัว (λ) ก็ยิ่งสูงตาม (Horpibulsuk et al., 2004a)
- 3) ความเค้นครากและผิวความเค้นคราก (Yield surface) เพิ่มขึ้นตามความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสาน ซึ่งควบคุมโดยปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม (Clough et al., 1981; Miura et al., 2001, Horpibulsuk et al., 2005)
- 4) พฤติกรรมการลดลงของความเค้นเบี่ยงเบนตามความเครียดเบี่ยงเบน (Strain softening behavior) เกิดขึ้นกับดินที่อยู่ภายในและบนผิวขอบเขต (State boundary surface) เนื่องจากการแตกสลายของโครงสร้างดินซีเมนต์ (Crushing of cementation structure) (Horpibulsuk et al., 2004b) หลังจากสภาวะวิบัติ (Failure state) ความเค้นเบี่ยงเบนจะลดลงจนกระทั่งถึงความสภาวะวิกฤติ (Critical state) เส้นสภาวะวิกฤติของดินซีเมนต์และดินเหนียวธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกัน

3.3 แบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์

ในหัวข้อนี้ แบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้กรอบความคิดของ SCC ที่เสนอโดย Liu and Carter (Liu and Carter, 2002; Carter and Liu, 2005) การปรับปรุงทำขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับดินซีเมนต์

วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาแบบจำลอง SCC คือการนำเสนอแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อแก้ปัญหาด้านวิศวกรรมปฐพี ดังนั้น แบบจำลองจึงมีง่ายต่อการใช้งาน เพื่อยังคงไว้ซึ่งวัตถุประสงค์เช่นเดิม อิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานจึงถูกนำเสนอในแบบจำลองอย่างตรงไปตรงมา (ไม่ซับซ้อน) อีกทั้งพารามิเตอร์ของแบบจำลองก็ยังสามารถหาได้ง่ายจากผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองมีนิยามดังนี้ σ'_i and ε_i คือความเค้นและความเครียดประสิทธิผลในส่วนประกอบ Cartesian ตามลำดับ รูปแบบอย่างง่ายสำหรับความเค้นและความเครียดสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน คือ σ'_1 (หรือ ε_1) and σ'_3 (หรือ ε_3) ซึ่งคือความเค้นประสิทธิผลตามแนวแกน (หรือความเครียด) และความเค้นประสิทธิผลตามแนวรัศมี (หรือความเครียด) ตามลำดับ

ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean effective stress, p') ความเค้นเบี่ยงเบน (Deviatoric stress, q) และอัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, η) มีนิยามดังนี้

$$\begin{aligned} p' &= \frac{1}{3}(\sigma'_{11} + \sigma'_{22} + \sigma'_{33}) \\ &= \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \end{aligned} \quad \text{สำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma'_{11} - \sigma'_{22})^2 + (\sigma'_{22} - \sigma'_{33})^2 + (\sigma'_{33} - \sigma'_{11})^2 + 6(\sigma'^2_{12} + \sigma'^2_{23} + \sigma'^2_{31})} \\ &= \sigma'_1 - \sigma'_3 \end{aligned} \quad \text{สำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน} \quad (3.2)$$

$$\eta = \frac{q}{p'} \quad (3.3)$$

การเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain increment, $d\varepsilon_v$) และการเปลี่ยนแปลงความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric strain increment, $d\varepsilon_d$) มีนิยามดังนี้

$$\begin{aligned} d\varepsilon_v &= d\varepsilon_{11} + d\varepsilon_{22} + d\varepsilon_{33} \\ &= d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3 \end{aligned} \quad (3.4)$$

และ

$$\begin{aligned} d\varepsilon_d &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_{11} - d\varepsilon_{22})^2 + (d\varepsilon_{22} - d\varepsilon_{33})^2 + (d\varepsilon_{33} - d\varepsilon_{11})^2 + 6(d\varepsilon_{12}^2 + d\varepsilon_{23}^2 + d\varepsilon_{31}^2)} \\ &= \frac{2}{3}(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) \end{aligned} \quad \text{สำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน} \quad (3.5)$$

3.3.1 การปรับปรุงพารามิเตอร์ความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล

จากการวิเคราะห์ผลทดสอบ เราสามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมของดินซีเมนต์มีลักษณะเช่นเดียวกับดินไม่เชื่อมแน่น โดยที่พันธะเชื่อมประสานมีผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล (Gens and Nova, 1993; Kasama et al., 2000 และ Horpibulsuk, 2001) ดังนั้น ความเค้นประสิทธิผลปรับปรุง (Modified effective stress, \bar{p}') มีนิยามดังนี้

$$\bar{p}' = p' + \frac{C}{M} \quad (3.6)$$

เมื่อ p' คือความเค้นเฉลี่ย M คือความชันของเส้นขอบเขตการวิบัติ (Slope of failure envelope) และ C คือหน่วยแรงเหนียวน้ำ ดังนั้น อัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยปรับปรุง (Modified stress ratio, $\bar{\eta}$) มีนิยามดังนี้

$$\bar{\eta} = \frac{q}{\bar{p}'} \quad (3.7)$$

3.3.2 วัสดุจินตนาการ

ดินซีเมนต์ในแบบจำลอง SCC ถูกพิจารณาเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic material) ซึ่งมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) และยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastoplastic) ผิวความเค้นครากแปรผันตามความเครียดเชิงปริมาตรพลาสติก พฤติกรรมของดินถูกสมมติเป็นแบบยืดหยุ่นเมื่อความเค้นเดินทางอยู่ภายในผิวความเค้นคราก พฤติกรรมยืดหยุ่น-พลาสติกเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเดินทางบนผิวความเค้นคราก

พฤติกรรมทางกลของดินซีเมนต์เชิงจินตนาการแสดงดังรูปที่ 3.2 ในรูปนี้ e แทนอัตราส่วนโพรงสำหรับดินเหนียวซีเมนต์ e^* แทนอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวปั้นใหม่ ซึ่งไม่ได้รับอิทธิพลจากพันธะเชื่อมประสาน $p'_{y,i}$ คือความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ที่ดินซีเมนต์เริ่มเกิดการคราก และ Δe คืออัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน ซึ่งมีคือความแตกต่างของอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวซีเมนต์และของดินเหนียวปั้นใหม่ ดังนั้น พฤติกรรมการอัดตัวบริสุทธิ์ (Virgin compression behavior) ของดินซีเมนต์สามารถประมาณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$e = e^* + \Delta e \quad (3.8)$$

จากการวิเคราะห์ผลทดสอบการอัดตัวของดินซีเมนต์หลายชนิด ผู้วิจัยพบว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นที่เสนอโดย Liu and Carter

$$e = e^* + (\Delta e_i - c) \left(\frac{p'_{y,i} + C/M}{\bar{p}'} \right)^b + c \quad (3.9)$$

เมื่อ b และ c คือพารามิเตอร์ของดินเหนียวซีเมนต์ที่อธิบายอัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน Δe_i คืออัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นที่จุดเริ่มต้นการครากของดินเหนียวซีเมนต์ พารามิเตอร์ c สามารถประมาณได้จากสมการดังนี้

$$c = \lim_{p' \rightarrow \infty} \Delta e \quad (3.10)$$

ดำเนินการตามกรอบความคิดของแบบจำลอง Modified Cam Clay (MCC) ผิวความเค้นครากของดินเหนียวซีเมนต์บนระนาบ $q-p'$ สามารถประมาณด้วยสมการวงรี (รูปที่ 3.2b) ดังนี้

$$f = q^2 - M\bar{p}'(p'_s - \bar{p}') = 0 \quad (3.11)$$

เมื่อ p'_s คือขนาดของผิวคราก ซึ่งเคลื่อนไปทางซ้ายของแกน p' เป็นระยะ C/M ขนาดของผิวครากเริ่มต้น ($p'_{s,i}$) มีความสัมพันธ์กับความเค้นครากเฉลี่ยเริ่มต้น $p'_{y,i}$ ดังนี้

$$p'_{s,i} = p'_{y,i} + C/M \quad (3.12)$$

3.3.3 พฤติกรรมยืดหยุ่น

สำหรับความเค้นที่อยู่ภายในผิวคราก การเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นถูกสมมติให้มีพฤติกรรมยืดหยุ่น เพื่อความง่าย การเสีรูปร่างยืดหยุ่นของดินซีเมนต์เป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) ดังนี้

$$d\varepsilon_v^e = \frac{3(1-2\nu)}{E} dp' \quad (3.13)$$

$$d\varepsilon_d^p = \frac{2(1+\nu)}{3} \frac{dq}{E} \quad (3.14)$$

เมื่อ ν คืออัตราส่วนโพรง และ E คือโมดูลัสของยัง ความสัมพันธ์ระหว่าง E , ν , \bar{p}' และดัชนีการบวมตัวยืดหยุ่น κ เป็นดังนี้

$$E = \frac{3(1-2\nu)(1+e)}{\kappa} \bar{p}' \quad (3.15)$$

$$\langle \Delta e - c \rangle = \begin{cases} \Delta e - c & \text{if } \{|\Delta e| - |c|\} \geq 0 \\ 0 & \text{if } \{|\Delta e| - |c|\} < 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

x) แทนค่าบวกของปริมาณ x

ในสมการที่ (3.16) อัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้าง (Δe) จะมีค่าลดลง เมื่อสถานะความเค้นมีค่าเข้าใกล้สภาวะวิกฤติ และมีค่าเท่ากับศูนย์ที่สภาวะวิกฤติ สำหรับการพัฒนาสมการการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลปรับปรุงและสมมติค่าความชันของขอบเขตการวิบัติและของเส้นสภาวะวิกฤติที่มีค่าเท่ากันและเท่ากับ M และยังพิจารณาอีกค่าความแตกต่างของอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวซีเมนต์และดินเหนียวปั้นใหม่ที่มีความเค้นกดทับสูงมีค่าประมาณคงที่เท่ากับ c ดังนั้น สมการการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรสำหรับดินซีเมนต์จึงเป็น

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + \left\{ (\lambda^* - \kappa) + b \langle \Delta e - c \rangle \left[1 + \frac{\gamma \bar{\eta}}{M - \bar{\eta}} \right] \right\} \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} \quad (3.18)$$

การเปลี่ยนแปลงความเครียดเบี่ยงเบนสามารถคำนวณได้จาก Flow rule ที่พัฒนาขึ้นใหม่ดังนี้

$$d\varepsilon_d = d\varepsilon_d^e + \frac{2\bar{\eta}}{|M^2 - \bar{\eta}^2| + \omega \left| 1 - \sqrt{\frac{p'_o}{p'_s}} \right|} \times \left\{ (\lambda^* - \kappa) + b \langle \Delta e - c \rangle \left[1 + \frac{\gamma \bar{\eta}}{M - \bar{\eta}} \right] \right\} \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} \quad (3.19)$$

เมื่อ ω คือพารามิเตอร์ของแบบจำลอง p'_o คือขนาดของผิวครากเทียบเท่า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการอัดตัวแบบเท่ากันทุกทิศทาง ดังสมการต่อไปนี้

$$p'_o = \frac{\exp\left(\frac{e_{IC}^* - e + c}{\lambda^* - \kappa}\right)}{p'^{\left(\frac{\kappa}{\lambda^* - \kappa}\right)}} \quad (3.20)$$

หลักการพัฒนา Flow rule สำหรับดินซีเมนต์เป็นดังนี้

- 1) Flow rule ของดินซีเมนต์ควรเป็นตัวเดียวกันกับของแบบจำลองดิน MCC เมื่อพันธะเชื่อมประสานแตกสลายหมดแล้ว ($\Delta e = 0$)
- 2) ดินซีเมนต์ไม่สามารถเข้าสู่สภาวะวิกฤติได้ หากพันธะเชื่อมประสานยังไม่สลายไปหมด ($\Delta e - c > 0$)

3) ดินซีเมนต์เข้าสู่สภาวะวิกฤติ ($\frac{d\varepsilon_d^p}{d\varepsilon_v^p} = \infty$) เมื่อ $\bar{\eta} = \eta = M$ และ $(\Delta e - c > c)$

ระหว่างการลดลงของความเค้นเบี่ยงเบนตามความเครียดเบี่ยงเบน (Softening behavior) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรสามารถอธิบายได้โดยอาศัยสมการที่ (3.18) แต่สมการการเปลี่ยนแปลงความเครียดเบี่ยงเบนต้องมีการปรับปรุง เพื่อให้ความเครียดเบี่ยงเบนมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้น

$$d\varepsilon_d^p = -\frac{2\bar{\eta}}{|M^2 - \bar{\eta}^2| + \omega \left| 1 - \sqrt{p'_o/p'_s} \right|} \times \left[(\lambda^* - \kappa) - \frac{\gamma\bar{\eta}b(\Delta e - c)}{M - \bar{\eta}} \right] \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} \quad (3.21)$$

3.3.5 การแตกสลายของพันธะเชื่อมประสาน

ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Huang, 1994 และ Horpibulsuk et al., 2004b) แสดงให้เห็นว่าการแตกสลายของโครงสร้างดินซีเมนต์ (Crushing of cementation structure) เกิดขึ้นเมื่อดินถึงจุดวิกฤติ ซึ่งจะก่อให้เกิดกระบวนการลดของความเค้นตามความเครียด (Softening process) เพื่อความง่ายในการจำลองพฤติกรรมของดินซีเมนต์ ผู้วิจัยขอเสนอสมมติฐานดังนี้

ระหว่างการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสาน สถานะของความเค้นประสิทธิผลจะเคลื่อนตัวตามเส้น M แต่สามารถเคลื่อนขึ้นหรือลง ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเพิ่มหรือลดความเค้นเบี่ยงเบน (Hardening or softening)

จากการศึกษา ผู้วิจัยขอเสนอสมการสำหรับการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสานในพจน์ของ

$$dC = -2 \left(\frac{C}{C_m} \right) \frac{|dp'|}{\sqrt{\left(\frac{q}{p'} - M \right)}} \quad (3.22)$$

เมื่อ C_m คือหน่วยแรงเหนียว (Cohesion) เริ่มต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} dq = Mdp' - dC \\ d\varepsilon_v = \left(\frac{\kappa}{1+e} \right) \frac{dp'}{p'} + d\varepsilon_v^p \\ d\varepsilon_d = \frac{2(1+\nu)}{9(1-2\nu)} \left(\frac{\kappa}{1+e} \right) \frac{dq}{B'} + \frac{2\bar{\eta} |d\varepsilon_v^p|}{\omega(1-2\nu) \left| 1 - \sqrt{p'_o/p'_s} \right|} \end{array} \right. \quad (3.23)$$

3.4 ผลการจำลองพฤติกรรมของดินด้วยแบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์

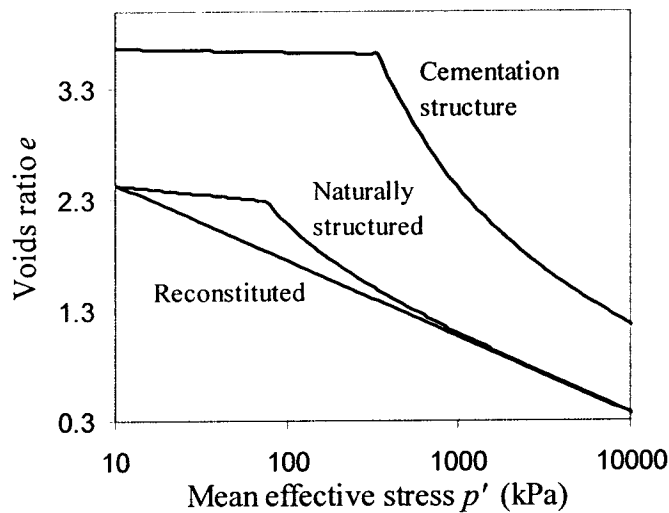
ในหัวข้อนี้ ความสามารถของแบบจำลองดินจะถูกแสดงให้เห็นโดยการจำลองพฤติกรรมของดินในสถานะปั้นใหม่ สถานะตามธรรมชาติ และสถานะปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ค่าของ M , ν , ω , γ เป็นค่าสมมติ อัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเริ่มต้นสำหรับดินเหนียวตามธรรมชาติเท่ากับ 0.45 และสำหรับดินซีเมนต์เท่ากับ 2.23 จากตารางที่ 3.1 และ 3.2 จะเห็นได้ว่าพันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อดัชนีการบวมตัวยืดหยุ่น (Elastic swelling index) ผลการจำลองการอัดตัวของดินเหนียวปั้นใหม่ ดินเหนียวตามธรรมชาติ และดินเหนียวซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯในสถานะปั้นใหม่และธรรมชาติ

λ^*	κ^*	M	e_{IC}^*	ν^*	b	$p'_{y,i}$ (kPa)	ω	γ
0.3	0.07	1.2	3.13	0.25	1	75	1	1

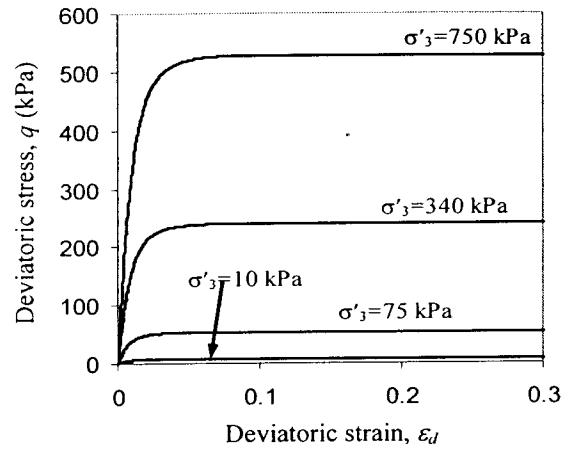
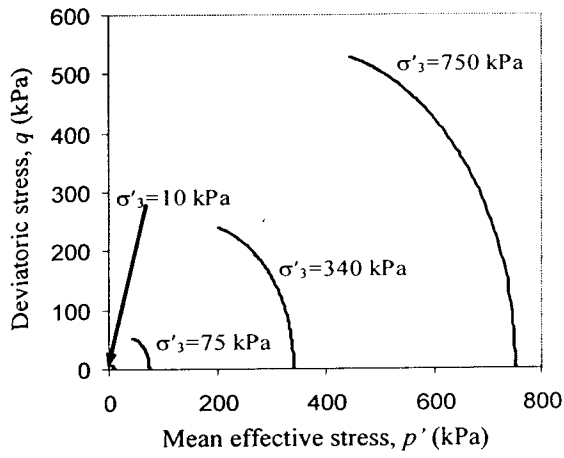
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์

κ	b	c	$p'_{y,i}$ (kPa)	C (kPa)	ω	γ
0.015	0.8	0.7	340	80	1	1

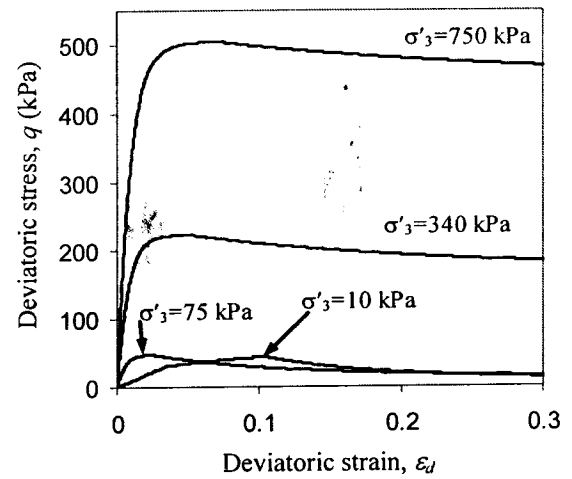
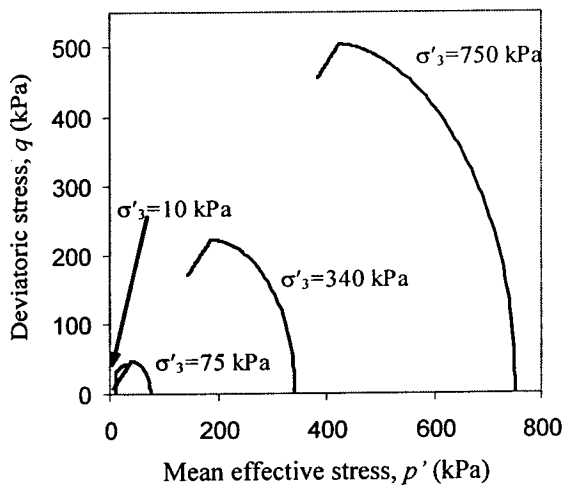


รูปที่ 3.3 ผลการจำลองการอัดตัวด้วยแบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์ โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3.1 และ 3.2

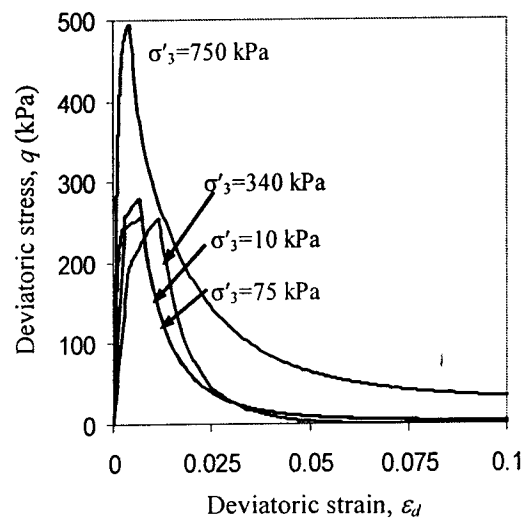
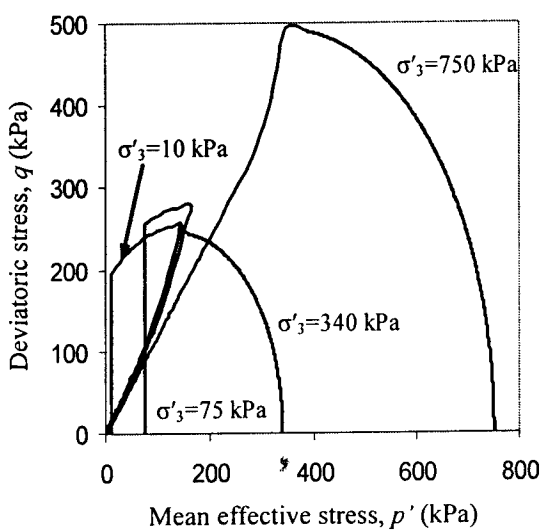
ผู้วิจัยได้ทำการจำลองพฤติกรรมการเฉือนในสถานะไม่ระบายน้ำด้วยแบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์สำหรับทั้งสามสถานะ โดยการจำลองที่ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลเท่ากับ 10, 75, 340 และ 750 กิโลปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 สำหรับดินเหนียวปั้นใหม่ ดินเหนียวตามธรรมชาติ และดินเหนียวซีเมนต์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ผลการจำลองพฤติกรรมกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่

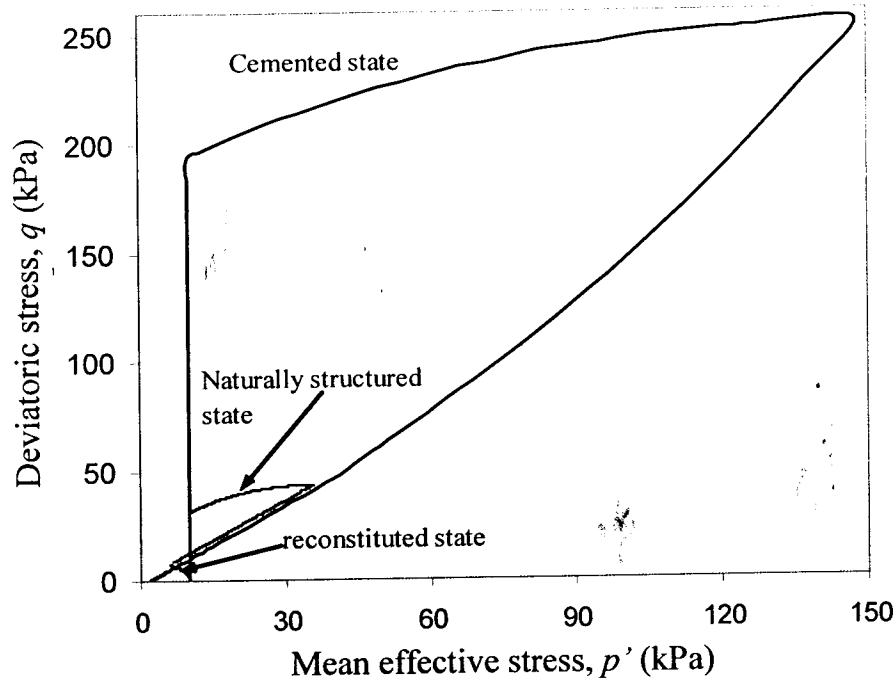


รูปที่ 3.5 ผลการจำลองพฤติกรรมกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวธรรมชาติ



รูปที่ 3.6 ผลการจำลองพฤติกรรมกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวซีเมนต์

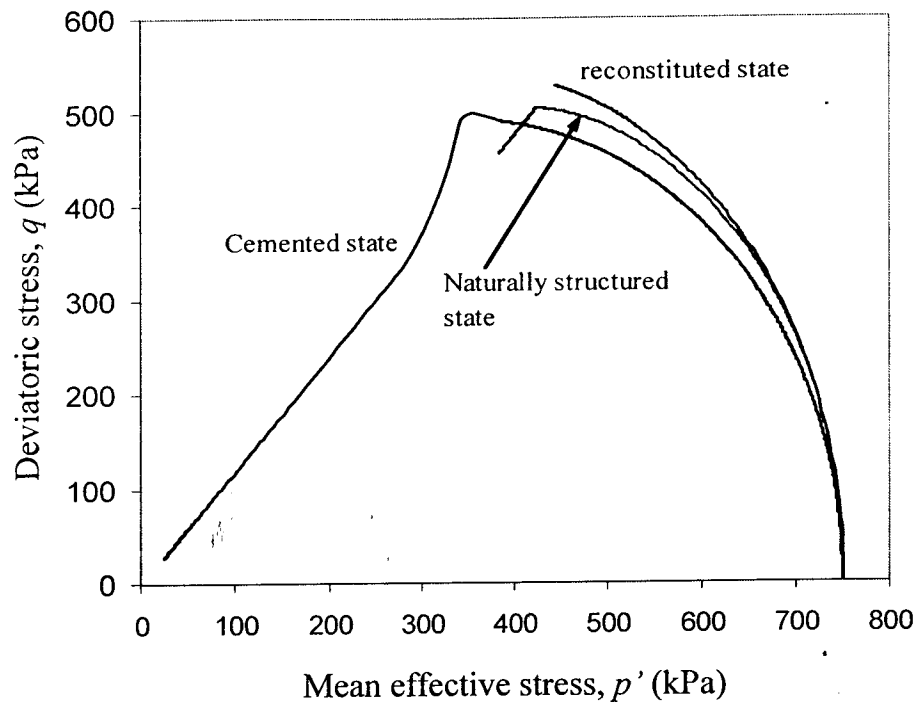
ผลเปรียบเทียบของพฤติกรรมของดินเหนียวทั้งสามสถานะแสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 สำหรับเส้นทางเดินของความเค้นประสิทธิผลเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 750 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ในรูปที่ 3.7 ดินเหนียวปั้นใหม่แสดงพฤติกรรมเหมือนวัสดุคราก (Yield material) ขณะที่ ดินทั้งสองสถานะแสดงพฤติกรรมเหมือนวัสดุอัดตัวมากกว่าปกติ ในรูปที่ 3.8 วัสดุทั้งสามแสดงพฤติกรรมเหมือนวัสดุคราก



รูปที่ 3.7 เส้นทางเดินความเค้นประสิทธิผลที่ความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลเท่ากับ 10 กิโลปาสกาล

ในการศึกษา ดินทั้งสามสถานะจะถูกอัดตัวคายน้ำจนถึงสถานะของความเค้นเริ่มต้น อัตราส่วนโพรงเริ่มต้นของดินเหนียวทั้งสามสถานะสามารถคำนวณได้โดยอาศัยพารามิเตอร์ของแบบจำลองและค่าอัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเริ่มต้น (Initial additional void ratio) การแตกสลายของโครงสร้างเกิดขึ้นเมื่อสถานะของความเค้นมีค่าเกินกว่าความเค้นคราก ดังนั้น สำหรับดินเหนียวธรรมชาติ อัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นที่ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลเท่ากับ 340 และ 750 กิโลปาสกาล มีค่าเท่ากับ 0.106 และ 0.048 ตามลำดับ สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ อัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นที่ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลเท่ากับ 750 กิโลปาสกาล มีค่าเท่ากับ 1.57

จากผลการจำลองข้างต้น (รูปที่ 3.3 ถึง 3.7) จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง SCC สามารถจำลองพฤติกรรมของดินเหนียวปั้นใหม่ ดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Burland (1990); Huang and Airey (1998); Leroueil (2002); Horpibulsuk et al (2004) และ Lorenzo and Bergado (2004)



รูปที่ 3.8 เส้นทางเดินความเค้นประสิทธิผลที่ความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลเท่ากับ 750 กิโลปาสกาล

พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมของดิน สำหรับดินเหนียวปั้นใหม่ พฤติกรรมของดินในสภาวะครากมีลักษณะเป็นแบบแข็งตัว (Hardening) (ความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นตามความเครียดเบี่ยงเบน) และความดันน้ำส่วนเกินมีค่าเป็นบวกเสมอ พฤติกรรมไม่เสถียรมักพบบ่อยกับดินซีเมนต์ พันธะเชื่อมประสานยังแข็งแรงมากเท่าไร การลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนหลังจุดวิบัติก็ยิ่งมากเท่านั้น ดังจะเห็นได้ว่าดินเหนียวอ่อนบางชนิด กำลังต้านทานแรงเฉือนสุดท้าย (Final shear strength) หลังจากการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสานอย่างสมบูรณ์ มีค่าประมาณศูนย์

สำหรับดินเหนียวโครงสร้างตามธรรมชาติ พันธะเชื่อมประสานสามารถถูกทำลายได้อย่างง่ายดาย เมื่อเกิดการเสีรูปร่างเนื่องจากความเค้นเบี่ยงเบน ดังนั้น คุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวธรรมชาติจึงมีลักษณะคล้ายคลึงกับของดินเหนียวปั้นใหม่

พันธะเชื่อมประสานเนื่องจากปูนซีเมนต์มีความแข็งแรงกว่าพันธะตามธรรมชาติมาก ด้วยเหตุนี้เอง ดินเหนียวซีเมนต์จึงมีอัตราส่วนโพรง กำลังต้านทานแรงเฉือน และสติเฟเนส สูงกว่าของดินเหนียวธรรมชาติมาก สิ่งนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน ดินมีหน่วยแรงเหนียวน่าและมีความสามารถต้านแรงดึง พฤติกรรมดังกล่าวนี้ถูกพิจารณาในแบบจำลองโดยการปรับปรุงพารามิเตอร์ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย

การลดลงของความเค้นเบี่ยงเบนหลังจุดวิบัติเกิดจากการแตกสลายของโครงสร้างดินเพื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤติ ระหว่างการแตกสลาย สถานะความเค้นประสิทธิผลเดินทางพุ่งลงตามเส้นสภาวะวิกฤติ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานยังคงอยู่ (Cotecchia and Chadler, 2000) หลังจุด

วิบัติ ลักษณะเช่นนี้มีความแตกต่างอย่างมากจากดินเหนียวธรรมชาติ และสามารถจำลองโดยแบบจำลองดินซีเมนต์

3.5 การจำลองพฤติกรรมของดินซีเมนต์

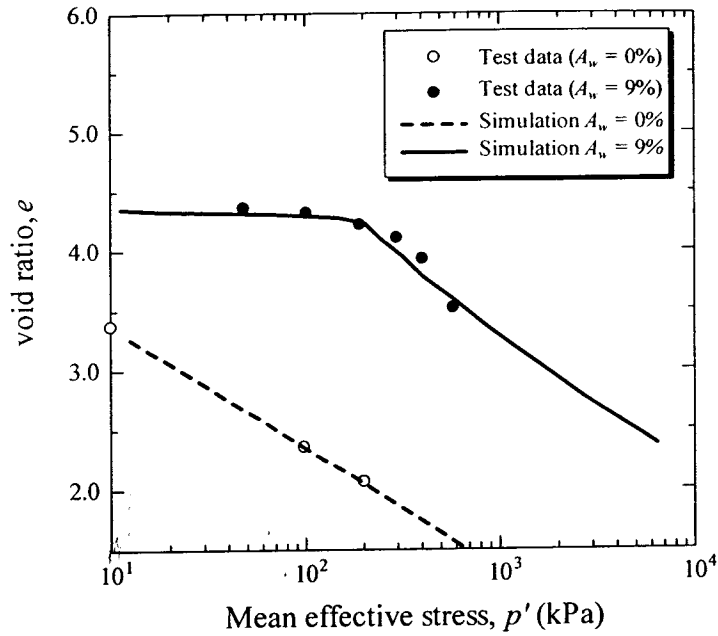
ในหัวข้อนี้ แบบจำลองดินซีเมนต์ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยผลทดสอบแรงเฉือนของดินเหนียวอะริเอเคผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์และความเค้นรอบข้างประสิทธิผลต่างๆ ซึ่งทดสอบโดย Horpibulsuk et al. (2004b) ดินเหนียวที่ใช้ทดสอบนี้เก็บจากความลึก 2.0 เมตร จากผิวดิน ที่เมืองสาเก ประเทศญี่ปุ่น ดินเหนียวนี้จัดเป็นดินเหนียวปนดินตะกอนสีเทา ประกอบด้วยดินเหนียว 55 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 44 เปอร์เซ็นต์ และทราย 1 เปอร์เซ็นต์ ในการทดสอบ ดินเหนียวถูกนำมาปั้นใหม่กับน้ำจนได้ปริมาณความชื้น 180 เปอร์เซ็นต์ และผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ที่ปริมาณซีเมนต์ 6, 9 และ 12 เปอร์เซ็นต์ รายละเอียดของการทดสอบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Horpibulsuk et al. (2004b)

การคำนวณแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการจำลองพฤติกรรมของดินซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถของแบบจำลองถูกแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนโดยการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลทดสอบ ส่วนที่สองเป็นการทำนายพฤติกรรมของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ และนำเสนอสมการเชิงประสพการณ์ในการประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลอง และท้ายสุดจะทำการศึกษาความเป็นได้ของการประยุกต์ใช้แบบจำลองดินซีเมนต์ในปัญหาจริง

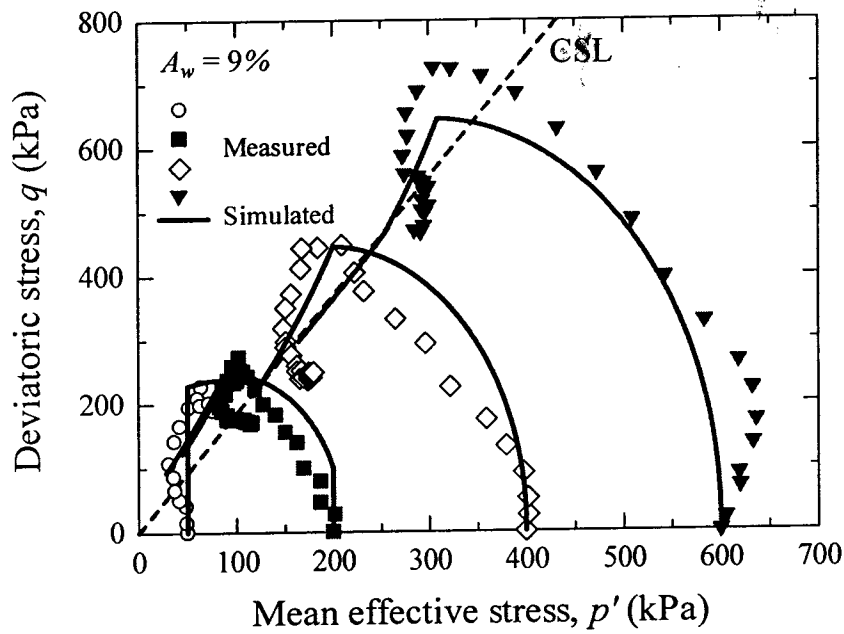
สำหรับการจำลองพฤติกรรมของดินซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ ตารางที่ 3.3 แสดงค่าของพารามิเตอร์แต่ละตัว พารามิเตอร์ e_{IC}^* , λ^* , $p'_{y,i}$, E , b , และ c ประมาณได้จากผลทดสอบการอัดตัวของดินซีเมนต์และดินเหนียวปั้นใหม่ ผลการจำลองกราฟการอัดตัวคาน้ำเปรียบเทียบกับผลทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.9 ค่าโมดูลัสของยัง (Young modulus, E) มีค่าประมาณคงที่ ดังนั้น ค่าของดัชนีการบวมตัวยืดหยุ่น (κ) จึงมีค่าแปรผันตามความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลปัจจุบัน (Current mean effective stress, p') และสามารถประมาณได้จากสมการที่ (3.15) อัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นเริ่มต้น (Δe_i) มีค่าเท่ากับ 2.2 ค่าของพารามิเตอร์กำลังต้านทานแรงเฉือน (M และ C) ได้จากการสร้างขอบเขตความแข็งแรงบนระนาบ $q - p'$ และค่าของ ν^* , ω , และ γ ได้จากการทำ Curve fitting

ตารางที่ 3.3 ค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์

λ^*	E (kPa)	M	e_{IC}^*	ν^*	b	c	C (kPa)	$p'_{y,i}$ (kPa)	ω	γ
0.44	20000	1.85	4.37	0.25	0.6	1.8	80	210	1.2	1



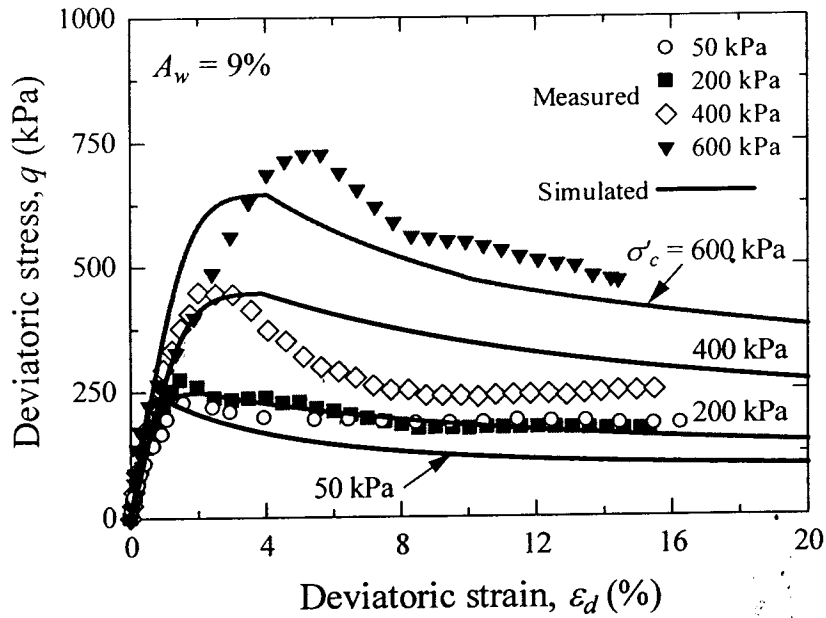
รูปที่ 3.9 การจำลองลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.10 ผลเปรียบเทียบเส้นทางเดินของความเค้น สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์
(ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b)

การจำลองพฤติกรรมด้านแรงเฉือนของดินซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ กระทำที่ความเค้นรอบข้าง ประสิทธิภาพเท่ากับ 50, 200, 400 และ 600 กิโลปาสกาล ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบของเส้นทางเดินของความเค้น (Stress paths) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและ

และความเครียดเบี่ยงเบนรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของดินซีเมนต์สามารถจำลองได้ด้วยแบบจำลองดินซีเมนต์ด้วยความแม่นยำสูง



รูปที่ 3.11 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบน สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b)

เพื่อประโยชน์สูงสุดของแบบจำลองดินซีเมนต์ในการแก้ปัญหาจริง วิธีการที่ง่ายและประหยัด ในการประมาณพารามิเตอร์มีความจำเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับดินชนิดเดียวกันที่ได้รับ การปรับปรุงด้วยปริมาณซีเมนต์ต่างๆ พารามิเตอร์ของแบบจำลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ พารามิเตอร์ที่ไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ และพารามิเตอร์ที่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ จากการ วิเคราะห์ผลทดสอบ พารามิเตอร์ที่แทบจะไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ ได้แก่ e^*_{IC} , λ^* , ν , b , M , ω และ γ ดังนั้น พารามิเตอร์เหล่านี้สามารถประมาณได้จากผลทดสอบของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ค่า ใดค่าหนึ่ง และสมมติว่าเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ พารามิเตอร์สี่ตัวที่เหลือแปรผัน อย่างมากกับปริมาณซีเมนต์ ได้แก่ E , C , c และ $p'_{y,i}$

ในส่วนนี้ สมการเชิงประสบการณ์ในการประมาณค่าของพารามิเตอร์ทั้งสี่ตัวข้างต้นได้ถูก นำเสนอขึ้น จากการศึกษาพบว่า C และ $p'_{y,i}$ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังอัดแกนเดียว (q_u) ซึ่งเป็น ตัวแปรที่สามารถหาได้ง่ายในงานวิศวกรรมปฐพี

$$C = \frac{1}{2} q_u \quad (3.23)$$

$$p'_{y,i} = q_u \quad (3.24)$$

เนื่องจากกำลังต้านทานแรงเฉือนมักเป็นตัวบ่งชี้ถึงสติเฟเนสของดิน (Atkinson, 2007) ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของยังและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์ ดังนี้

$$\frac{E}{q_u} = \text{constant}$$

สำหรับพารามิเตอร์ c ผู้วิจัยได้เสนอว่าอัตราส่วนระหว่าง c ต่อ Δe_i มีค่าประมาณคงที่สำหรับดินซีเมนต์ชนิดหนึ่งๆ ดังนี้

$$\frac{c}{\Delta e_i} = \text{Constant}$$

ดังนั้น ถ้าเราทราบสถานะของดินที่อยู่บนผิวคราก สมมติเป็น (p'_i, q_i, e_i) เราก็จะสามารถประมาณค่า Δe_i ได้ดังนี้

$$\Delta e_i = e_i - \kappa \ln\left(\frac{p'_{y,i}}{p'_i}\right) - e_{IC} * + (\lambda * - \kappa) \ln(p'_{y,i}) \quad (3.25)$$

สำหรับดินเหนียวอะริเออะผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ค่าคงที่สำหรับความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถหาโดยการทำ Linear regression ของผลทดสอบดินซีเมนต์ได้ดังนี้

$$\frac{E}{q_u} = 90 \quad (3.26)$$

$$\frac{c}{\Delta e_i} = 0.82 \quad (3.27)$$

ดังนั้น พารามิเตอร์สำหรับดินเหนียวอะริเออะผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 6 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ได้รับการประมาณโดยอาศัยค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่าต่างๆ ของดินซีเมนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโพรงเริ่มต้นประมาณจากปริมาณความชื้นของดิน

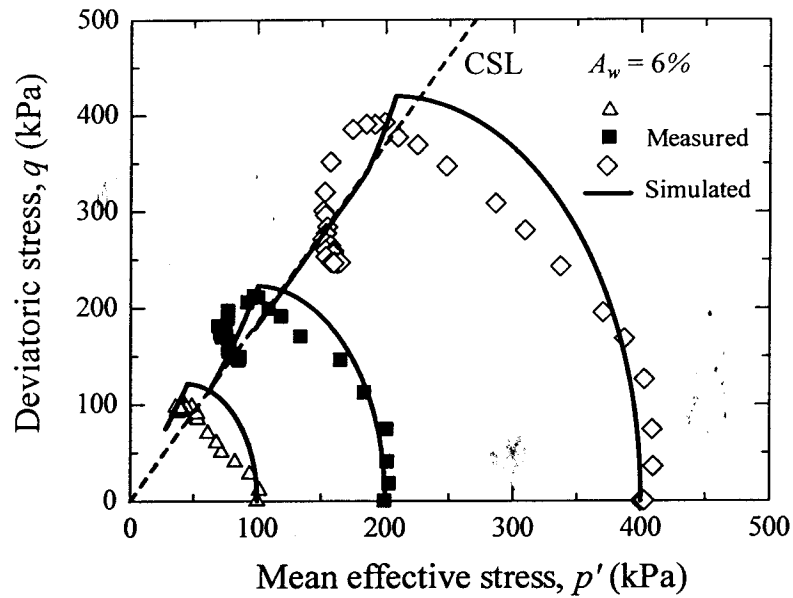
ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแปรผันตามความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสาน ดังแสดงในตารางที่ 3.4 จากพารามิเตอร์ข้างต้น เราสามารถทำนายพฤติกรรมของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ได้ รูปที่ 3.12 และ 3.14 แสดงผลเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดสอบของเส้นทางเดินของความเค้นประสิทธิผลของดินซีเมนต์ 6 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของดินซีเมนต์ 6 และ 12 เปอร์เซ็นต์ แสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.15

จากผลการเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองดินซีเมนต์สามารถจำลองพฤติกรรมการเฉือนของดินซีเมนต์ภายใต้ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลและปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองดินซีเมนต์สามารถใช้เป็นเครื่องมือ

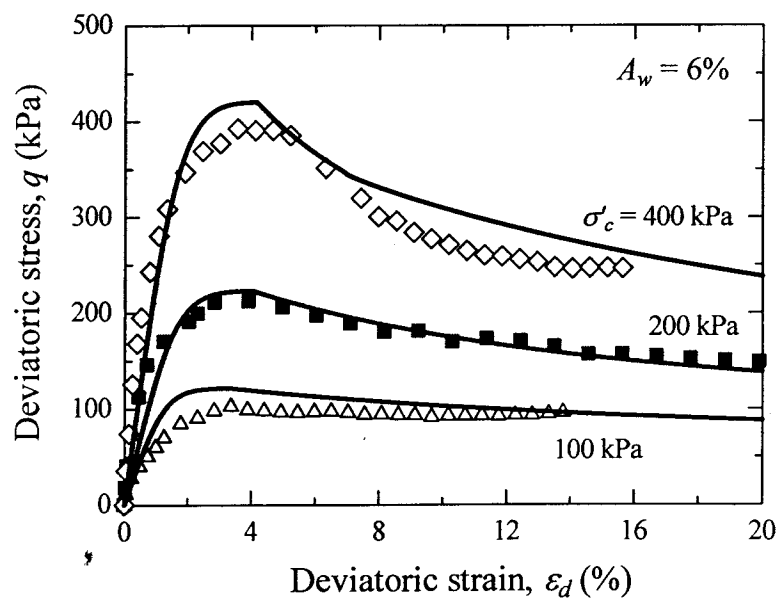
ในการแก้ปัญหาด้านวิศวกรรมปฐพีที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ได้จากการประมาณสำหรับซีเมนต์ 6 และ 12 เปอร์เซ็นต์

Values of model parameters	q_u (kPa)	C (kPa)	$p'_{y,l}$	E (kPa)	Δe_i	c
$A_w = 6\%$	78	39	78	7,000	1.72	0.6
$A_w = 12\%$	490	245	490	44,000	2.44	2.0



รูปที่ 3.12 ผลเปรียบเทียบเส้นทางของความเค้น สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 6 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b)



รูปที่ 3.13 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบน สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ 6 เปอร์เซ็นต์ (ผลทดสอบได้จาก Horpibulsuk et al., 2004b)

- 2) สำหรับดินซีเมนต์ที่มีค่าอัตราส่วนการอัดตัวมากกว่าปกติ (p'_s/p') สูง เส้นทางการเดินของความเค้นในระนาบ $q-p'$ จะมีทางเดินที่พุ่งขึ้นในแนวดิ่ง ซึ่งบ่งบอกพฤติกรรมยืดหยุ่นจนกระทั่งสัมผัสความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด ก็จะเกิดการลดลงของความเค้นเบี่ยงเบน (Strain softening) ซึ่งเส้นทางการเดินของความเค้นประสิทธิผลจะเคลื่อนเข้าสู่ขอบเขตวิบัติและเกิดการลดลงของอัตราส่วนความเค้น สิ่งนี้ก่อให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินที่เป็นลบ แต่อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะถึงขอบเขตวิบัติ เส้นทางการเดินของความเค้นประสิทธิผลเปลี่ยนทิศทางการเดินและเคลื่อนที่ลงเพื่อวิ่งเข้าหาเส้นสภาวะวิกฤติ ซึ่งจะทำให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินที่เป็นบวก (ดูการรอกกลับของเส้นทางการเดินของความเค้นดังรูปที่ 3.14 สำหรับความเค้นรอบข้างประสิทธิผลเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล) พฤติกรรมเช่นนี้จะไม่ปรากฏให้เห็นในดินเหนียวปั้นใหม่ ดังนั้น แบบจำลองในตระกูลของ Cam clay ซึ่งพัฒนาสำหรับดินเหนียวปั้นใหม่ จึงไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมเช่นนี้ของดินซีเมนต์ได้
- 3) สำหรับดินซีเมนต์ที่มีสถานะของความเค้นเริ่มต้นที่หรือใกล้กับจุดยอดของผิวคราก (ดินเหนียวอัดตัวปกติหรือดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติเล็กน้อย) เส้นทางการเดินของความเค้นจะโค้งงอในช่วงแรกเพื่อเข้าสู่เส้นสภาวะวิกฤติ ซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมแบบกึ่งยืดหยุ่นและพลาสติก ด้วยอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน เส้นทางการเดินของความเค้นประสิทธิผลจะเดินทางผ่านเส้นสภาวะวิกฤติและเข้าชนขอบเขตวิบัติ แต่อย่างไรก็ตาม ที่ขอบเขตวิบัตินี้ดินยังไม่เกิดการเสถียร ความเค้นเบี่ยงเบนของดินซีเมนต์จะลดลงพร้อมกับการพัฒนาความดันน้ำส่วนเกินที่เป็นบวกและการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสาน และท้ายสุดดินซีเมนต์จะเกิดการเสถียรที่เส้นสภาวะวิกฤติ
- 4) โครงสร้างของดินซีเมนต์มีความแข็งแรงสูงและดินซีเมนต์สามารถเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงที่สูงกว่าดินเหนียวปั้นใหม่มาก สำหรับดินเหนียวอะริเอเคผสมซีเมนต์ อัตราส่วนโพรงมีค่ามากกว่า 4.0 และอัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นมีค่ามากถึง 2.4 (ดูรูปที่ 3.9) กำลังต้านทานแรงเฉือนที่สภาวะวิกฤติของดินซีเมนต์มีค่าสูงมาก อีกทั้งยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 80 เป็น 200 กิโลปาสกาล สำหรับการเพิ่มปริมาณซีเมนต์จาก 6 เป็น 12 เปอร์เซ็นต์ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานยังคงมีอยู่แม้ว่าจะอยู่ในสภาวะวิกฤติ (Cotecchia and Chandler, 2000) ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองดินซีเมนต์ที่น่าเสนอ

3.6 บทสรุป

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเหนียวปั้นใหม่ ดินเหนียวตามธรรมชาติ และดินเหนียวซีเมนต์ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลอง Structured Cam Clay (SCC) สำหรับดินซีเมนต์ ซึ่งมีศักยภาพในการทำนายพฤติกรรมของดินทั้งสามสถานะ ภายใต้ความเค้นรอบข้างประสิทธิผลและปริมาณปูนซีเมนต์

ต่างๆ พารามิเตอร์ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยถูกปรับปรุงเพื่อให้สามารถรวมอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานต่อการเสีรูปร่างพลาสติก นอกจากนี้แล้ว ผู้วิจัยยังได้พัฒนาสมการการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสาน เพื่อใช้ในการอธิบายการลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนหลังจากสถานะวิบัติ

แบบจำลอง SCC สำหรับดินซีเมนต์นี้ เป็นแบบจำลองอย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นแบบจำลองที่ใช้แก้ปัญหาคทางด้านวิศวกรรมปฐพีในทางปฏิบัติ สมมติฐานพื้นฐานของกรอบความคิดนี้คือทั้งพฤติกรรม Hardening และการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสานแปรผันตามการเสีรูปร่างเชิงปริมาตรพลาสติก แบบจำลองดินซีเมนต์นี้จะกลายเป็นแบบจำลอง Modified Cam Clay เมื่อดินไม่มีพันธะเชื่อมประสานหรือพันธะเชื่อมประสานของดินถูกทำลายโดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ความแม่นยำของแบบจำลองแสดงให้เห็นได้จากผลเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบแรงอัดสามแกนและผลการจำลอง ซึ่งมีความใกล้เคียงกันอย่างมาก

เอกสารอ้างอิง

- เกษม เพชรเกตุ และ พินิต ตังบุญเต็ม (2540). การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. โยธา
สาร. หน้า 30-39.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร (2536). คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- รุ่งลาวัลย์ ราชัน และสุขสันต์ หอพิบูลสุข (2546) ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดิน
เหนียวซีเมนต์. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา. ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 หน้า 25-31.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน (2545) การจำแนกสถานะและลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดิน
เหนียวกรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8. หน้า GTE399-GTE404.
- Burland, J.B. (1965), "The yielding and dilation of clay", *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.211-214.
- Carter J.P. and Liu M.D. (2005), "Review of the Structured Cam Clay model", *Soil constitutive models: evaluation, selection, and calibration*, ASCE, Geotechnical special publication No. 128, pp.99-132.
- Casagrande, A. (1938), "Compaction tests and critical density investigations of cohesionless materials for Franklin Falls dam", *U.S. Engineer Corps*.
- Dafalias, Y.F. (1987), "An anisotropic critical state clay plasticity model", *Constitutive Laws for Engineering Materials Theory and Applications*, Vol.1, pp.513-522.
- Davidson, D.T. (1961), "Soil stabilization with Portland cement", *Highway Research Board*. 200 p.
- Gens, A. and Nova, R. (1993), "Conceptual bases for constitutive model for bonded soil and weak rocks". *Geotechnical Engineering of Hard Soil-Soft Rocks*, Balkema.
- Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963), "Reaction accompanying stabilization of clay with cement", *Highway Research Record*, pp.146-171.
- Kamon M. and Bergado D.T. (1991), "Ground improvement techniques", *Proc. of the Ninth Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Thailand, Vol.2 pp.526-546.
- Kasama, K., Ochiai, H. and Yasufuku, N. (2000), "On the stress-strain behaviour of lightly cemented clay based on an extended critical state concept". *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.37-47.
- Kavvas M. and Amorosi A. (2000), "A constitutive model for structured soils", *Geotechnique*, Vol.50, No.3, pp.263-273.

- Horpibulsuk S., (2001), *Analysis and Assessment of Engineering Behavior of Cement Stabilized Clays*, Ph.D. dissertation, Saga University, Saga, Japan.
- Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2004a), "Compressibility of cement admixed clays at high water content", *Geotechnique*, Vol.54, No.2, pp.151-154.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D.T. (2004b), "Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.10, pp.1096-1105.
- Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K. and Katkan, W. (2007), "Assessment of engineering properties of Bangkok clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.44, No.2, pp.173-187.
- Lorenzo G. A. and Bergado D. T. (2004), "Fundamental parameters of cement-admixed clay: new approach", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.130, No.10, pp.1042-1050.
- Liu M. D. and Carter J. P. (1999), "Virgin compression of structured soils", *Geotechnique*, Vol.49, No.1, pp.43-57.
- Liu M. D. and Carter J. P. (2000), "Modelling the destructuring of soils during virgin compression", *Geotechnique*, Vol. 50, No.4, pp.479-483.
- Liu M.D. and Carter J.P. (2002), "Structured cam clay model", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, No.6, pp.1313-1332.
- Michell, J.K. and Jack, E.K. (1966), "The fabric of soil – cement and its formation", *Proceeding 14th National Conference on Clay and Clay Minerals*, Vol.26, pp.279-305.
- Moh, Z.C. (1965), "Reaction of soil minerals with cement and chemical", *Highway Research Board*, pp.39-61.
- Portland Cement Association. (1956). *Soil – Cement Laboratory Handbook*. Illinois: Portland Cement Association.
- Rendulic, L. (1936), "Relation between void ratio and effective principal stress for a remoulded silty clay", Discussion, *Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics*, Vol.3, pp.48-51.
- Roscoe, K.H., and Burland, J.B. (1968), "On the generalized stress-strain behaviour of wet clay", *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, pp.535-609.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N., and Thurairajah, A. (1963), "Yielding of clays in states wetter than critical", *Geotechnique*, Vol.13, No.3, pp.535-609.

- Rouainia M. and Muir Wood D. (2000), "A kinematic hardening model for natural clays with loss of structure", *Geotechnique*, Vol. 50, No.2, pp.153-164.
- Taylor, D.W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, Wiley, New York.
- Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Michell, J.M. and Thomson, M.R. (1979), *Soil Stabilization in Pavement Structure a User 's Manual Mixture Design Consideration*, Washington : Government Printing Office.
- Wheeler S. J. (1997), "A rotational hardening elasto-plastic model for clays", *Proc. 14th Int. Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.431-434.
- Whittle A. J. (1993), "Evaluation of a constitutive model for overconsolidated clays", *Geotechnique*, Vol.43, No.2, pp.289-314.
- Wroth, C.P., and Loudon, P.A. (1967), "The correlation of strains within a family of triaxial test on overconsolidated samples of kolin", *Proceedings of the Geotechnical Conference*, Oslo, Vol.1, pp.159-163.

ประวัตินักวิจัย

ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี พ.ศ. 2541 และวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี จากมหาวิทยาลัย Saga ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544

ดร. สุขสันต์ ได้เริ่มปฏิบัติงานในตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ หัวหน้าหน่วยวิจัยเพื่อเทคโนโลยีการก่อสร้าง และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ท่านได้รับทุนสนับสนุนงานและทำวิจัยหลายทุนทั้งจากองค์กรภายในและภายนอกประเทศ และมีผลงานวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารและสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติและระดับประเทศกว่า 100 เรื่อง และมีผลงานประพันธ์หนังสือสองเล่ม “ปฐพีกลศาสตร์” และ “วิศวกรรมฐานราก” งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ ลักษณะทางวิศวกรรมของดินตามธรรมชาติ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดิน และเทคนิคการปรับปรุงดิน

ดร.สุขสันต์ มีประสบการณ์การเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาระดับบัณฑิตศึกษาและการให้บริการวิชาการ ท่านเป็นวิศวกรที่ปรึกษาด้านกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall) ให้กับบริษัท จีไอฟอรัม จำกัด นอกจากนี้ท่านยังเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินผลงานวิจัยและหนังสือให้กับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั้งในและต่างประเทศ