

ขอแสดงความยินดีอาจารย์ครุศาสตร์โยธาและวิศวกรรมโยธาถึงแวดล้อม วทอ.



ตามที่สมาคมทางหลวงแห่งประเทศไทยได้จัดประกวดบทความวิจัย ครั้งที่ 3 ในหัวข้อ “สร้างสรรค์งานวิจัย สู่สังคมแห่งการพัฒนา” โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ส่งเสริมให้วิศวกร นักวิจัย หรือบุคคลทั่วไป สร้างสรรค์ผลงานทางวิชาการเพื่อการพัฒนาความรู้ใหม่ๆ ด้านวิศวกรรมงานทาง และเพื่อนำเสนอผลงานด้านวิศวกรรมงานทางที่ได้รับผลสำเร็จสามารถพัฒนาระบบงานทางให้ดียิ่งขึ้น หรือใช้แก้ปัญหาทางงานทางสำคัญๆ ที่เกิดขึ้นจริง อันจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ทาง ตลอดจนเป็นการเปิดโอกาส ให้วิศวกร นักวิจัย หรือบุคคลทั่วไป ได้เผยแพร่ผลงานทางวิชาการของตนออกสู่สาธารณชน ผลการตัดสินปรากฏว่าอาจารย์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2 ท่าน คือ รองศาสตราจารย์ดร.พานิช วุฒิปฤกษ์ จากภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข จากภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วทอ. ได้รับรางวัลบทความรองชนะเลิศอันดับ 2 ร่วมกันในเรื่อง “ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนดินเหนียว และดินตะกอนทราย ที่ส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมงานทาง”

ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนดินเหนียว และดินตะกอนทราย ที่ส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์
เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมการทาง

รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิฤกษ์

ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชรัตน์ ธีระวัฒนสุข

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา และสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ วิชัย สังวรปทานสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ : การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินอ่อนในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของดินคันทางเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความเหมาะสมสำหรับดินเม็ดละเอียด ทำให้ดินเหนียวอ่อนเปลี่ยนสภาพไปเป็นดินซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้คันทางมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามดินเหนียวตามธรรมชาติจะประกอบด้วยดินตะกอนทรายซึ่งจัดเป็นดินเม็ดละเอียดเช่นเดียวกัน โดยมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิด การมีอยู่ของดินตะกอนทรายส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างดินและซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนดินเหนียว ดินตะกอนทราย และคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญ ภายหลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ตัวอย่างดินเม็ดละเอียดที่ใช้ในการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ดินเหนียวสังเคราะห์และดินเหนียวธรรมชาติ โดยมีอัตราส่วนผสมต่อน้ำหนักแห้งระหว่างดินตะกอนทรายและดินเหนียวที่ 0 : 100 , 15 : 85 , 30 : 70 และ 45 : 55 ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างที่เป็นดินเหนียวสังเคราะห์ผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 , 15 ต่อน้ำหนักดินแห้ง บ่มที่อายุการบ่ม 28 วัน สำหรับตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 , 15 และ 20 ต่อน้ำหนักดินแห้ง บ่มที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่ากำลังครากมีค่าสูงขึ้นแปรผันตรงกับปริมาณสัดส่วนดินตะกอนทรายที่เพิ่มสูงขึ้นทั้งในตัวอย่างดินผสมที่เป็นดินเหนียวสังเคราะห์และดินเหนียวธรรมชาติ ดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวคาโอลิไนท์มีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนดินตะกอนทรายสูงขึ้น ทั้งนี้กำลังครากของดินมีความสัมพันธ์กับประเภทของดินเม็ดละเอียด โดยดินเหนียวคาโอลิไนท์มีกำลังครากสูงกว่าดินเหนียวเบนโทไนท์ที่มีปริมาณดินตะกอนทรายและซีเมนต์เท่ากัน ดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวคาโอลิไนท์มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างดินเหนียวเบนโทไนท์ กำลังครากที่สูงขึ้นแปรผันตรงกับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การลดลงของดัชนีการอัดตัวและดัชนีการอัดตัวซ้ำแปรผกผันกับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ดินเม็ดละเอียด ดินตะกอนทราย กำลังคราก ดัชนีการอัดตัว ดัชนีการอัดตัวซ้ำ

1. บทนำ

พื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยาซึ่งครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเกิดจากการตกตะกอนของมวลตะเลียดเมื่อความแรงของกระแสในแม่น้ำลดลงขณะที่น้ำทะเลหนุนสูงทำให้เกิดสภาวะน้ำนิ่ง เปิดโอกาสให้มวลตะเลียดซึ่งประกอบด้วยอนุภาคดินเหนียวและทรายแป้งตกตะกอนลง โดยสัดส่วนของทรายแป้งที่ปะปนอยู่ในดินเหนียวนั้นมีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติในแต่ละปี เป็นที่ทราบกันว่าดินเหนียวอ่อนเป็นดินมวลตะเลียดเกิดจากการผุพังทางเคมี มีค่าดัชนีความชื้นเหลือสูง มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ มีอัตราส่วนช่องว่างมากและยุบตัวได้มากในสภาวะรับน้ำหนัก ขณะที่ทรายแป้งซึ่งมีขนาดตะเลียดเช่นเดียวกันแต่เกิดจากการผุพังทางกายภาพของหิน มีค่าดัชนีความชื้นเหลือต่ำถึงต่ำมากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับทรายตะเลียด มีความสามารถรับแรงแบกทานได้ดีกว่าดินเหนียว ดังนั้นการมีทรายแป้งปะปนอยู่ในดินเหนียวในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ดินเหนียวตามธรรมชาติมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันไปด้วย

การก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคและสาธารณูปการขนาดใหญ่ เช่น ถนน สนามบิน อาคารสูง ฯลฯ เพื่อรองรับการขยายตัวทางเศรษฐกิจทั้งในเขตกรุงเทพและปริมณฑล มักประสบปัญหาเกี่ยวกับสภาพของดินที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการก่อสร้างและการทำงานของดินที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการก่อสร้างและการทำงานของดินด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะหากเป็นโครงสร้างคันทางซึ่งวางบนดินเหนียวอ่อนโดยตรงจะเกิดปัญหาการทรุดตัวที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นเวลานาน การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนเพื่อรองรับโครงสร้างคันทางเพื่อลดการทรุดและลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงจึงเป็นสิ่งจำเป็น ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเกิดจากการสะสมตัวของดินตะกอนที่ตกในทะเล สามารถแบ่งออกได้ 2 ชุด ได้แก่ ดินตะกอนตอนบนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนสลับชั้นทราย ลึกตั้งแต่ 0-20 เมตร ความลึกขึ้นกับตำแหน่ง โดยจะลึกมากบริเวณตอนใต้ใกล้ทะเล และดินตะกอนตอนล่าง เป็นดินเหนียวแน่น (Stiff Clay) สลับชั้นทราย ในระดับความลึกตั้งแต่ 20-25 เมตรลงไป

ทรายแป้ง (silt) จัดเป็นมวลเม็ดขนาดเล็กซึ่งผุพังด้วยกระบวนการทางกายภาพ ต่างจากดินเหนียวที่ผุพังด้วยกระบวนการทางเคมี ดินทั้งสองประเภทนี้มีจัดเป็นมวลตะเลียดที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน และมักพบผสมปะปนกัน โดยสัดส่วนของส่วนผสมระหว่างทรายแป้งและดินเหนียวที่ผสมอยู่ในเนื้อดินแต่ละแห่งนั้นแตกต่างกันออกไปตามลักษณะภูมิประเทศและลักษณะการพัดพาของน้ำตามฤดูกาล การที่ทรายแป้งและดินเหนียวมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมและทางเคมีแตกต่างกันมาก ดังนั้นสัดส่วนของทรายแป้งในดินเหนียวย่อมส่งผลกระทบต่อการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี เช่นการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง (Jet Grouting) ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อนำมาประยุกต์ใช้รองรับคันทาง

การปรับปรุงดินวิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือการปรับปรุงทางเคมีโดยใช้ซีเมนต์หรือปูนขาว ในเอเชียนิยมปูนซีเมนต์มากกว่า เพราะซีเมนต์หาได้ง่ายมีราคาถูก อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพสูงกว่าในเทอมของความแข็งแรงดีกว่าปูนขาวมาก (Broms, 1984) การปรับปรุงดินโดยใช้ซีเมนต์เป็นที่นิยมทั้งในระดับต้นและลึก การปรับปรุงระดับต้นเป็นการปรับปรุงชั้นดินเดิมของถนนและสนามบินและโครงสร้างอื่นๆที่คล้ายคลึงกัน โดยปกติจะใช้ซีเมนต์ในปริมาณต่ำ การปรับปรุงในทางลึกเป็นการใช้น้ำซีเมนต์หรือผงซีเมนต์เพื่อก่อรูปร่างเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินฐานรากแต่การผสมโดยใช้น้ำซีเมนต์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเพราะไม่ปนเปื้อนคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอาจทำให้เกิดคาร์บอนเข้และส่งผลเสียต่อสุขภาพ โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ถูกพิจารณาว่าเป็นการเสริมความแข็งแรงหรือเป็นเสาเข็มถ่ายน้ำหนักผ่านผิวและปลายล่างของเสาเข็มดินซีเมนต์

การผสมทางลึกโดยทั่วไปที่ใช้เพื่อติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ลงในตะกอนดินเหนียวอ่อน มี 2 วิธีคือการผสมโดยใช้วิธีทางกลหรือโดยการฉีดด้วยแรงดันสูง (Kamon, 1996) การผสมโดยวิธีทางกลเป็นการนำสารเคมีมาผสมโดยใช้ใบมีดผสม ขณะที่การผสมโดยการอัดฉีดน้ำปูนแรงดันสูงเป็นการผสมผ่านน้ำหรือ

สารละลาย ดังนั้นการผสมทางกลหรือวิธีอัดดินน้ำปูนจึงทำให้ส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และดินเหนียวมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากตะกอนดินเหนียวอ่อนมักมีน้ำอยู่มากเป็นปกติอยู่แล้ว ปริมาณน้ำสูงมากในส่วนผสมดินเหนียวซีเมนต์ในที่นี้หมายถึงปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในส่วนผสมดินซีเมนต์ โดยรวมเอาน้ำจากดินเหนียวธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณอย่างน้อยเท่ากับขีดจำกัดเหลวของดินเข้าไว้ด้วย

การผสมทางกลมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามสารผสมและกระบวนการที่ใช้ Porbaha (1998) แนะนำให้ใช้คำว่า การผสมกล นอกจากนี้ยังมีคำว่า เส้าเข็มดินซีเมนต์ หรือเส้าเข็มซีเมนต์ หรือ เส้าเข็มผสมในทางกล (Bergado และคณะ., 1999) และคำว่า เส้าเข็มดินซีเมนต์ หรือ เส้าเข็มผสมในทางกล (Miura และคณะ., 1997; Porbaha, 1998; Petchgate และคณะ., 2003)

ได้มีผู้นำดินเหนียวปรับปรุงด้วยซีเมนต์ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการจำนวนมาก (Broms, 1986; Uddin และคณะ., 1997; Watanabe และคณะ., 2000) ส่วนมากเป็นการควบคุมปริมาณซีเมนต์และเวลาเป็นสิ่งสำคัญ ในประเทศญี่ปุ่น (Miura และคณะ., 2001) พิสูจน์ให้เห็นว่าทั้งปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยควบคุมพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ รวมทั้งระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างอีกด้วย การผสมน้ำซีเมนต์และวิธีการฉีดข้อมทำให้ปริมาณน้ำในดินเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องแปลงสภาพดินโดยการผสมร่วมกับน้ำก่อนการผสมน้ำซีเมนต์น้ำที่มีอยู่ในสารละลายซีเมนต์ทำให้ปริมาณน้ำในเนื้อดินซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นนอกจากปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่มแล้ว ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในดินเหนียวผสมซีเมนต์ก็เป็นตัวแปรสำคัญที่มีต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสมซีเมนต์ด้วยเช่นกัน ปัจจุบันเส้าเข็มดินซีเมนต์เป็นที่นิยมใช้เพื่อแก้ปัญหาการทรุดตัวของคันทางที่ก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อน แต่จากที่ได้กล่าวแล้วว่า นักวิจัยในอดีตได้ศึกษาเฉพาะ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำและระยะเวลาในการบ่มเป็นพารามิเตอร์ควบคุมในการศึกษาพฤติกรรมของดิน

เหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ดังนั้นการยุบตัวและความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์จึงถูกกำหนดลักษณะโดยการใช้ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เท่านั้น

ถึงแม้ว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวด้วยกระบวนการทางเคมีโดยการผสมซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับดินเหนียวเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม แต่ก็ยังพบปัญหาอื่นๆตามมา เช่นการบวมตัวและการเปลี่ยนรูปของดินเหนียวผสมซีเมนต์ ดังนั้นการมีทรายแฉ่งซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีการทรุดตัวหรือบวมตัวเหมือนดินเหนียวปะปนอยู่ในดินเหนียวตามธรรมชาติย่อมช่วยให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น เช่นทำให้ลดการบวมตัวของดินเหนียวผสมซีเมนต์ลงและลดการทรุดของดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงได้มากขึ้น

งานวิจัยเรื่องจึงนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของทรายแฉ่งที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเพื่อหาผลของปริมาณสัดส่วนทรายแฉ่งที่ทำให้ดัชนีการบวมตัวของตัวอย่างดินเหนียวผสมซีเมนต์ลดลง โดยตัวอย่างทรายแฉ่ง (Silt) ได้จากการแยกออกจากดินเหนียวธรรมชาติ (Natural clay) ซึ่งเก็บจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือโดยวิธีการร่อนแบบเปียก (wet sieve) ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200 และ ค้างตะแกรงร่อนเบอร์ 400

2.การแบ่งกลุ่มตัวอย่าง

ประกอบด้วยดินตัวอย่าง 6 ประเภทดังนี้ (1) ดินเหนียวเบนโทไนท์ (2) ดินเหนียวคาโอลิไนท์ (3) ดินเหนียวเบนโทไนท์ ผสมดินเหนียวคาโอลิไนท์ ในอัตราส่วน 50:50 ของน้ำหนักแห้ง (4) ดินเหนียวเบนโทไนท์ ผสมดินเหนียวคาโอลิไนท์ ในอัตราส่วน 75:25 ของน้ำหนักแห้ง (5) ดินเหนียวเบนโทไนท์ ผสม ดินเหนียวคาโอลิไนท์ ในอัตราส่วน 25:75 ของน้ำหนักแห้ง (6) ดินเหนียวธรรมชาติจากพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ได้จากการขุดเปิดที่ความลึก 3 ถึง 4 เมตร คัดเฉพาะดินเหนียวที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 400 เท่านั้น จากนั้นเตรียมตัวอย่างโดยนำ

ดินเหนียวทั้ง 6 ประเภทมาผสมกับทรายแป้งที่คัดแยกไว้ ในอัตราส่วนของดินเหนียวแต่ละประเภทต่อทรายแป้ง ในอัตราส่วน 0:100 15:85 30:70 และ 45:55 ผสมซีเมนต์ กับดินตัวอย่างทั้งหมดในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 15 และ 20 ของน้ำหนักตัวอย่างแห้ง

3. ขั้นตอนการทดสอบ

ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวตัวอย่างทุกประเภทได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ชิดจำกัดเหลว ชิดจำกัดพลาสติก การกระจายตัวของเม็ดดิน จากนั้นเตรียมตัวอย่างโดยนำดินเหนียวทั้ง 6 ประเภทผสมกับทรายแป้งตามอัตราส่วนกำหนด ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นตัวเชื่อมประสาน โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ต่อน้ำหนักแห้งของดินผสมทรายแป้งในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 และ 15 สำหรับตัวอย่างดินสังเคราะห์และร้อยละ 7.5, 15 และ 20 สำหรับดินเหนียวธรรมชาติ ใช้ปริมาณน้ำเท่ากับชิดจำกัดเหลวของดินเหนียวตัวอย่างตามที่ทดสอบได้ นำส่วนผสมที่ได้เทลงในแบบหล่อ PVC เป็นชั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วเคาะเบาๆ เพื่อไล่ฟองอากาศ หุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ได้ตัวอย่างจำนวน 72 ตัวอย่าง นำไปบ่มจนครบอายุการบ่มตามต้องการคือ 7 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดจึงนำไปทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างที่หล่อไว้



รูปที่ 2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

4. การทดสอบดินเหนียวสังเคราะห์

ดินเหนียวสังเคราะห์ทั้ง 5 ประเภทถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วยชิดจำกัดเหลว ชิดจำกัดพลาสติก และความถ่วงจำเพาะ ผลแสดงในตารางที่ 1

4.1 ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength, Y)

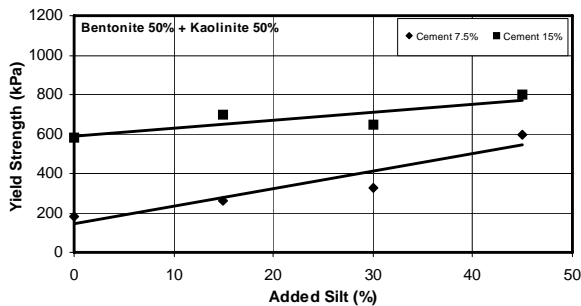
การทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) ของดินเหนียวสังเคราะห์ในทุกอัตราส่วนผสมโดยแปรผันปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ดังตัวอย่างในกรณีของดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสมดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50% (B 0.50+K 0.50) ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าความแข็งแรงที่จุดครากมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือที่อัตราส่วนผสมของดินตัวอย่าง 100 % : Silt 0 % : Cement 7.5 % มีค่ากำลังที่จุดครากต่ำที่สุดเท่ากับ 180 kPa ที่อัตราส่วนผสมของดินตัวอย่าง 55 % : Silt 45 % : Cement 15 % มีค่ากำลังครากสูงที่สุดเท่ากับ 800 kPa ในกรณีนี้ ตัวอย่างดินผสมระหว่าง ดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสมกับ ดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50% (B 0.50+K 0.50) มีอัตราส่วนของดินเหนียวเบนโทไนท์และดินเหนียวคาโอลิไนท์ในอัตราส่วนที่เท่ากันจึงสามารถ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินผสมระหว่างดินเหนียวสังเคราะห์และทรายแป้ง

อัตราส่วนผสม	LL (%)	PL (%)	PI (%)	G _s
Bentonite (B)				
(B) 100% : (M) 0%	460.0	43.60	416.40	2.51
(B) 85% : (M) 15%	374.0	31.23	342.77	2.56
(B) 70% : (M) 30%	311.0	21.73	289.27	2.62
(B) 55% : (M) 45%	236.0	18.90	217.10	2.67
Bentonite 75 % + Kaolinite 25 % (B0.75 + K0.25)				
(B0.75 + K0.25) 100% : (M) 0%	310.0	48.60	261.40	2.55
(B0.75 + K0.25) 85% : (M) 15%	272.0	30.89	241.11	2.60
(B0.75 + K0.25) 70% : (M) 30%	197.0	29.25	167.75	2.64
(B0.75 + K0.25) 55% : (M) 45%	152.0	27.15	124.85	2.69
Bentonite 50 % + Kaolinite 50 % (B0.50 + K0.50)				
(B0.50 + K0.50) 100% : (M) 0%	207.0	37.76	169.24	2.59
(B0.50 + K0.50) 85% : (M) 15%	175.0	32.54	142.46	2.63
(B0.50 + K0.50) 70% : (M) 30%	160.0	27.85	132.15	2.67
(B0.50 + K0.50) 55% : (M) 45%	105.0	26.77	78.23	2.71
Bentonite 25 % + Kaolinite 75 % (B0.25 + K0.75)				
(B0.25 + K0.75) 100% : (M) 0%	160.0	43.94	116.06	2.63
(B0.25 + K0.75) 85% : (M) 15%	115.0	38.03	76.97	2.66
(B0.25 + K0.75) 70% : (M) 30%	100.0	29.49	70.51	2.70
(B0.25 + K0.75) 55% : (M) 45%	89.0	24.46	64.54	2.73
Kaolinite (K)				
(K) 100% : (M) 0%	65.2	29.73	35.47	2.67
(K) 85% : (M) 15%	56.0	26.47	29.53	2.70
(K) 70% : (M) 30%	41.6	25.77	15.83	2.73
(K) 55% : (M) 45%	35.6	18.83	16.77	2.76

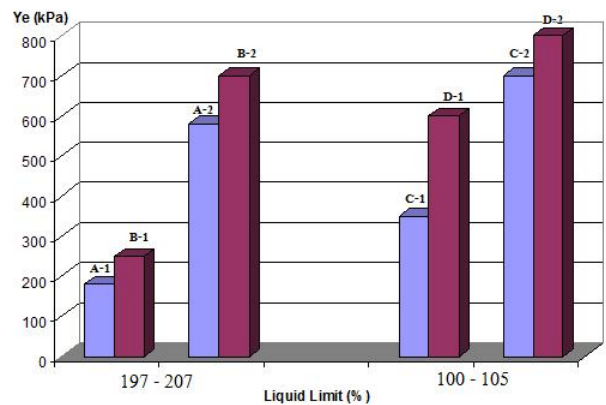
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของดินผสมที่เป็นดินเหนียวธรรมชาติ

อัตราส่วนผสม	LL (%)	PL (%)	PI (%)	G _s
Natural Clay 100% : Silt 0%	51.85	28.57	23.16	2.63
Natural Clay 85% : Silt 15%	48.40	25.64	22.76	2.64
Natural Clay 70% : Silt 30%	40.00	23.27	16.73	2.65
Natural Clay 55% : Silt 45%	34.90	21.79	13.11	2.66



รูปที่ 3 อิทธิพลของทรายแป้งและซีเมนต์ต่อกำลังครากของดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% + ดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50%

รับกำลังได้สูงขึ้นตาม ปริมาณดินเหนียวคาโอลิไนท์ที่มากขึ้นและมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีกว่า และกำลังครากของตัวอย่างดินผสมมีค่าสูงขึ้นแปรผันตรงกับปริมาณทรายแป้งและปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น จากผลการทดสอบตัวอย่างที่เป็นดินเหนียวสังเคราะห์ในทุกอัตราส่วนผสมสรุปได้ว่ากำลังครากของตัวอย่างดินสังเคราะห์ผสมมีค่าสูงขึ้นแปรผันตรงกับปริมาณทรายแป้งและปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาตัวอย่างดินสังเคราะห์ผสมที่มีปริมาณขีดจำกัดเหลวใกล้เคียงกัน เพื่อศึกษาผลกระทบจากปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังครากของตัวอย่างดินเหนียวสังเคราะห์พบว่าปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ส่งผลกระทบจากต่อกำลังครากของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลกระทบจากปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังครากของตัวอย่างดินเหนียวสังเคราะห์

เมื่อ A-1 คือ (B0.50 + K0.50) 100% : (M) 0% : CEMENT 7.5%, B-1 คือ (B0.75 + K0.25) 100% : (M) 30% : CEMENT 7.5%

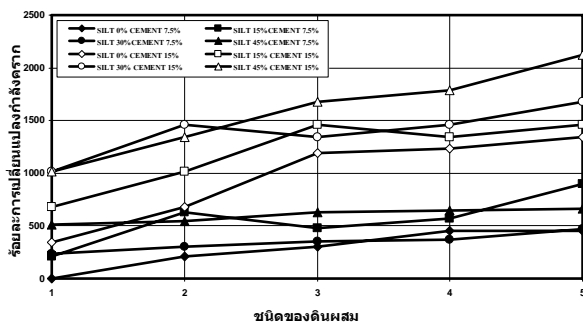
A-2 คือ (B0.50 + K0.50) 100% : (M) 0% : CEMENT 15%, B-2 คือ (B0.75 + K0.25) 100% : (M) 30% : CEMENT 15%

C-1 คือ (B0.25 + K0.75) 70% : (M)30% : CEMENT 7.5%, D-1 คือ (B0.50 + K0.50) 55% : (M) 45% : CEMENT 7.5%

C-2 คือ (B0.25 + K0.75) 70% : (M)30% : CEMENT 15%, D-2 คือ (B0.50 + K0.50) 55% : (M) 45% : CEMENT 15%

จากรูปที่ 4 พบว่ามีตัวอย่างดินสังเคราะห์ผสมที่มีปริมาณขีดจำกัดเหลวใกล้เคียงกันมีอยู่ 4 อัตราส่วนคือ (B0.50 + K0.50) 100% : (M) 0% และ (B0.75 + K0.25) 70% : (M) 30% มีปริมาณขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 207% และ 197 % ตามลำดับ ขณะที่อัตราส่วน (B0.25 + K0.75) 70% : (M) 30% และ (B0.50 + K0.50) 55% : (M) 45% มีปริมาณขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 100% และ 105 % ตามลำดับ จากผลการเปรียบเทียบกำลังครากของตัวอย่างดินสังเคราะห์ผสมที่มีปริมาณขีดจำกัดเหลวใกล้เคียงกันและผสมซีเมนต์ในปริมาณเท่ากัน พบว่ากำลังครากของตัวอย่างดินสังเคราะห์ผสมมีค่าสูงขึ้น โดยแปรผันตรงกับปริมาณทรายแป้งและปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังครากของตัวอย่างดินสังเคราะห์ผสมคือปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์

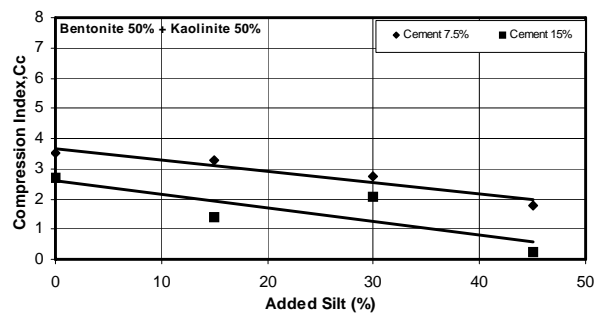
เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงร้อยละของกำลังครากพบว่าดินเหนียวสังเคราะห์ที่ไม่มีผสมทรายแป้งมีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่เมื่อเพิ่มทรายแป้งลงในส่วนผสมพบว่าร้อยละของกำลังครากมีการเปลี่ยนแปลงลดลงใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ร้อยละของกำลังครากที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินเหนียวสังเคราะห์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ

4.2 ดัชนีการอัดตัว (Compression Index, c_c)

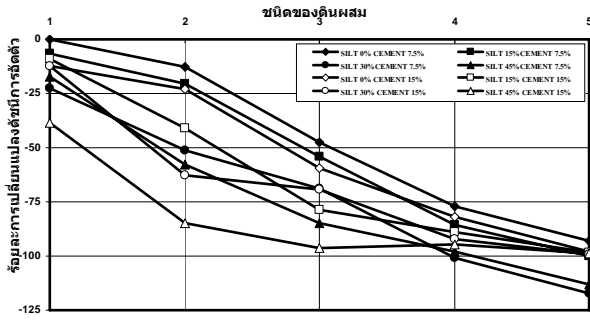
การทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาดัชนีการอัดตัว (Compression Index, c_c) ของดินเหนียวสังเคราะห์ในทุกอัตราส่วนผสม โดยแปรผันปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์เช่นกัน ดังตัวอย่างในกรณีดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสม ดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50% (B



รูปที่ 6 อิทธิพลของทรายแป้งและซีเมนต์ต่อดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% + ดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50%

0.50+K 0.50) ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 โดยที่อัตราส่วนดินสังเคราะห์ผสม 55 % : Silt 45 % : Cement 15 % ให้ค่า c_c ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.252 และที่อัตราส่วนดินสังเคราะห์ผสม 100 % : Silt 0 % : Cement 7.5 % ให้ค่า c_c สูงที่สุดเท่ากับ 3.495 เนื่องจากตัวอย่างดินผสมดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสมดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50% (B 0.50+K 0.50) มีอัตราส่วนของดินเหนียวเบนโทไนท์ และดินเหนียวคาโอลิไนท์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ตัวอย่างดินสังเคราะห์ผสมมีดัชนีการอัดตัวลดลงตามปริมาณดินเหนียวคาโอลิไนท์ที่มากขึ้นเนื่องจากโดยธรรมชาติ ดินคาโอลิไนท์มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเบนโทไนท์จึงอัตราส่วนช่องว่างน้อยกว่า

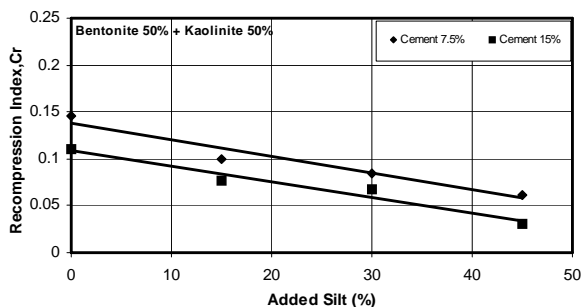
เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงร้อยละของดัชนีการอัดตัวของดินสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าที่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายแป้งร้อยละ 45 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการอัดตัวสูงทั้งตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 7.5 และ 15 ส่วนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายแป้งร้อยละ 0, 15 และ 30 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



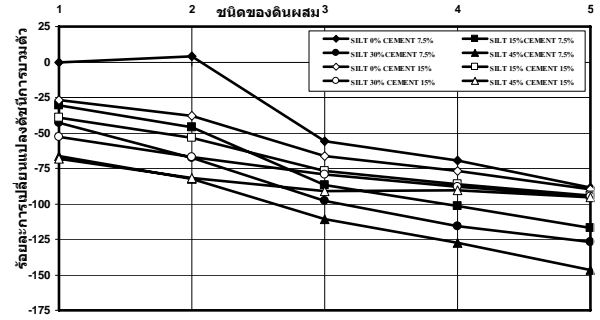
รูปที่ 7 ร้อยละของดัชนีการอัดตัวที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินเหนียวสังเคราะห์

4.3 ดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index ,c_r)

การทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index ,c_r) ของดินเหนียวสังเคราะห์ ในทุกอัตราส่วนผสมโดยแปรผันปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ เช่นกัน ดังตัวอย่างการทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำของดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสม ดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50% (B 0.50+K 0.50) ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 ที่อัตราส่วนดินสังเคราะห์ผสม 55 % : Silt 45 % : Cement 15 % ให้ค่า C_r ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.038 ที่อัตราส่วนดินสังเคราะห์ผสม 100 % : Silt 0 % : Cement 7.5 % ให้ค่า C_r สูงที่สุดเท่ากับ 0.145 และเนื่องจากตัวอย่างดินผสมดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสม ดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50% (B 0.50+K 0.50)



รูปที่ 8 อิทธิพลของทรายแป้งและซีเมนต์ต่อดัชนีการอัดตัวซ้ำของดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% + ดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50%



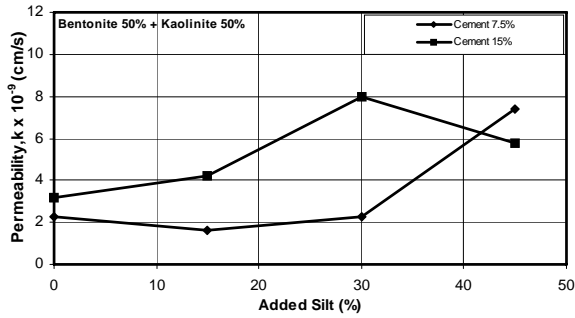
รูปที่ 9 ร้อยละของดัชนีการอัดตัวซ้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินเหนียวสังเคราะห์

มีอัตราส่วนของดินเหนียวเบนโทไนท์ และดินเหนียวคาโอลิไนท์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ตัวอย่างดินผสมจึงมีดัชนีการอัดตัวซ้ำลดลงตามปริมาณดินเหนียวคาโอลิไนท์ที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินสังเคราะห์เบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ ตัวอย่างดินผสมยังมีดัชนีการอัดตัวซ้ำลดลงตามปริมาณทรายแป้งและปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงร้อยละของดัชนีการอัดตัวซ้ำของดินสังเคราะห์จากผลของปริมาณซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงร้อยละของการอัดตัวซ้ำที่ใกล้เคียงกันในทุกตัวอย่าง ที่ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 7.5 และ 15

4.4 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

(Coefficient of Permeability ,k)

การทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) ของดินเหนียวสังเคราะห์ในทุกอัตราส่วนผสมโดยแปรผันปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ ดังตัวอย่างการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสมดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50% (B 0.50+K 0.50) ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามีค่าสูงขึ้นตามปริมาณทรายแป้งและปริมาณซีเมนต์ที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 10 โดยค่า k ต่ำที่สุดเท่ากับ $1.620 \times 10^{-9}(\text{cm/s})$ ที่อัตราส่วนดินสังเคราะห์ผสม 85 % : Silt 15 % : Cement 7.5 % และค่า k สูงที่สุดเท่ากับ $8.008 \times 10^{-9}(\text{cm/s})$ ที่อัตราส่วนดินสังเคราะห์ผสม 70 % : Silt 30 % : Cement 15 %



รูปที่ 10 อิทธิพลของทรายแป้งและซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสมดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50%

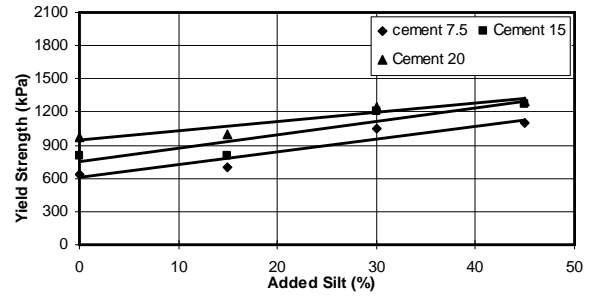
จากตัวอย่างดินสังเคราะห์ผสม ดินเหนียวเบนโทไนท์ 50% ผสม ดินเหนียวคาโอลิไนท์ 50% (B 0.50+K 0.50) ตัวอย่างดินผสมมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้นตามปริมาณดินเหนียวเบนโทไนท์ที่เพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าดินเหนียวคาโอลิไนท์มีคุณสมบัติที่บั่นน้ำน้อยกว่าดินเบนโทไนท์ ส่วนทรายแป้งที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ โครงสร้างดินเกิดช่องว่างในอนุภาคดินมากยิ่งขึ้น ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำมีค่า สูงขึ้น

5. การทดสอบดินเหนียวธรรมชาติ

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ ประกอบด้วยขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก ดัชนีพลาสติก และความถ่วงจำเพาะ ผลดังแสดงในตารางที่ 2

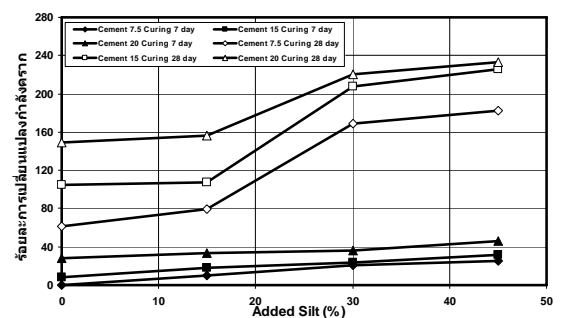
5.1 ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength, Y_u)

การทดสอบความแข็งแรงที่จุดครากของดินเหนียวธรรมชาติ (Natural Clay) กระทำที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน พบว่ามีค่าสูงขึ้นตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 11 ค่าความแข็งแรงที่จุดครากมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 630 kPa ที่อัตราส่วนผสมของ ดินเหนียวธรรมชาติ 100 % : Silt 0 % : Cement 7.5 % และมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1300 KPa ที่อัตราส่วนผสม ของดินเหนียวธรรมชาติ 55 % : Silt 45 % : Cement 20 % ตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ (Natural Clay) ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน สามารถรับกำลังได้สูงขึ้นตามปริมาณ

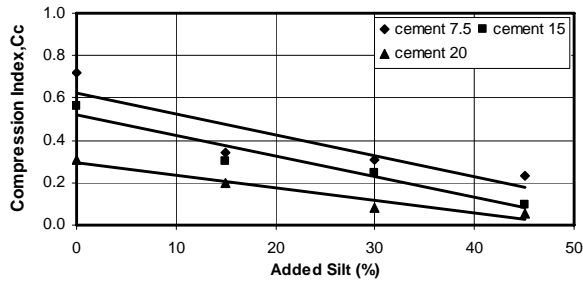


รูปที่ 11 อิทธิพลของทรายแป้งและซีเมนต์ต่อกำลังครากของดินเหนียวธรรมชาติที่อายุการบ่ม 28 วัน

ทรายแป้งและซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น สรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของทรายแป้งซึ่งมีความแข็งและทนทาน ช่วยให้โครงสร้างดินเหนียวธรรมชาติมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น จากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดสารประกอบที่ช่วยยึดเกาะอนุภาคของดินได้ดี ส่งผลให้โครงสร้างดินมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้พบว่าอายุการบ่มที่นานขึ้นช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้สมบูรณ์ ทำให้สารประกอบที่ช่วยยึดเกาะอนุภาคดินมีปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างดินมีความแข็งแรงสามารถรับกำลังได้สูงขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงร้อยละของกำลังคราก พบว่าที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน กำลังครากของดินธรรมชาติที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 7.5 และ 15 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 12



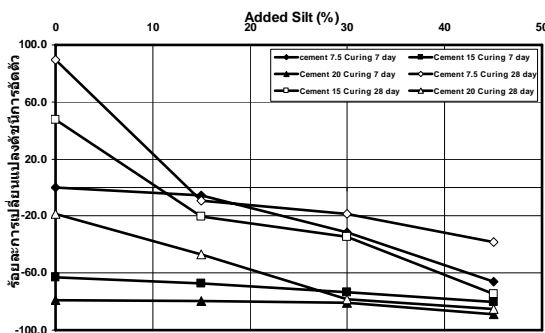
รูปที่ 12 ร้อยละของกำลังครากที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ



รูปที่ 13 อิทธิพลของทรายแป้งและซีเมนต์ต่อดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวธรรมชาติที่การบ่ม 28 วัน

5.2 ดัชนีการอัดตัว Compression Index (c)

จากการพิจารณาดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวธรรมชาติที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 13 ที่อัตราส่วนผสมดินเหนียวธรรมชาติ 55 % : Silt 45 % : Cement 20 % ให้ค่า C_c ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.056 ที่อัตราส่วนผสมดินเหนียวธรรมชาติ 100 % : Silt 0 % : Cement 7.5 % ให้ค่า C_c สูงที่สุดเท่ากับ 0.720 ตัวอย่างดินผสมชนิดที่เป็นดินเหนียวธรรมชาติ ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีดัชนีการอัดตัวลดลงตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น โดยดัชนีการอัดตัวมีค่าลดลงในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันทั้งหมด เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงร้อยละของดัชนีการอัดตัว พบว่าที่อายุการบ่ม 7 วัน ดัชนีการอัดตัวของดินธรรมชาติที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่าใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกันที่ อายุการบ่ม 28 วัน ดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวธรรมชาติที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 14



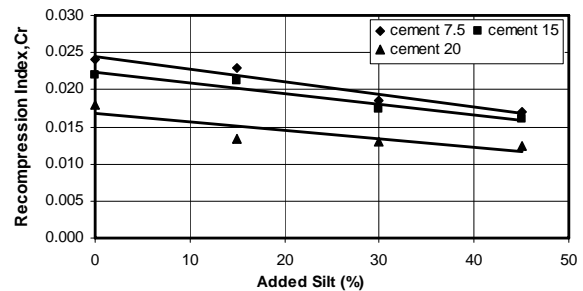
รูปที่ 14 ร้อยละของดัชนีการอัดตัวที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ

5.3 ดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index, c_r)

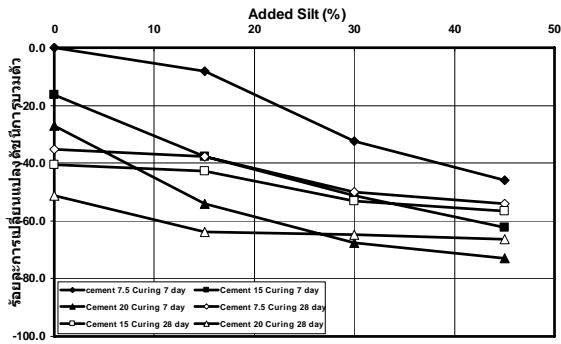
จากการพิจารณาดัชนีการอัดตัวซ้ำของดินเหนียวธรรมชาติที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 15 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมของดินเหนียวธรรมชาติ 55 % : Silt 45 % : Cement 20 % ให้ค่า C_r ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.013 ที่อัตราส่วนผสมของดินเหนียวธรรมชาติ 100 % : Silt 0 % : Cement 7.5 % ให้ค่า C_r สูงที่สุดคือ 0.024 ตัวอย่างดินที่เป็นดินเหนียวธรรมชาติ มีดัชนีการอัดตัวซ้ำตัวลดลงที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น โดยดัชนีการอัดตัวซ้ำที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ 7.5% และ 15% มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก สรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของทรายแป้ง ซีเมนต์ และอายุการบ่มที่นานขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการอัดตัวซ้ำมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงร้อยละของดัชนีการอัดตัวซ้ำของดินสังเคราะห์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละของการอัดตัวซ้ำมีอัตราสูงในตัวอย่างดินที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 7.5, 15 และ 20 ที่อายุการบ่ม 7 วัน แต่ที่อายุการบ่ม 28 วันมีอัตราการเปลี่ยนแปลงร้อยละของการบวมตัวที่ใกล้เคียงกันในตัวอย่างดินที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 7.5, 15 ดังแสดงในรูปที่ 16

5.4 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวธรรมชาติ Coefficient of Permeability (k)

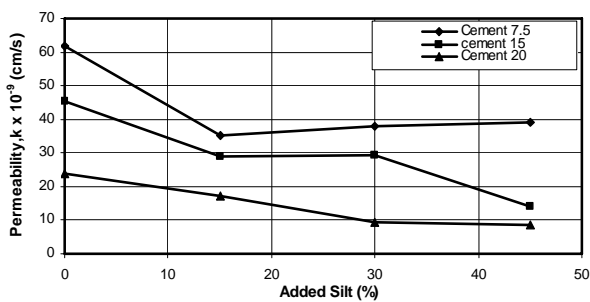
จากการพิจารณาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวธรรมชาติที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 15 อิทธิพลของทรายแป้งและซีเมนต์ต่อดัชนีการบวมตัวของดินเหนียวธรรมชาติที่การบ่ม 28 วัน

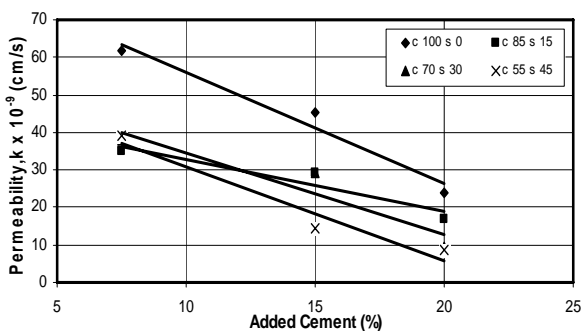


รูปที่ 16 ร้อยละของดัชนีการบวมตัวที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ



รูปที่ 17 อิทธิพลของทรายแป้งต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวธรรมชาติอายุ 28 วัน

โดยค่า k ต่ำที่สุดเท่ากับ 8.467×10^{-9} (cm/s) ที่อัตราส่วนผสมดินเหนียวธรรมชาติ 55 % : Silt 45 % : Cement 20 % ค่า และค่า k สูงที่สุดเท่ากับ 61.89×10^{-9} (cm/s) ที่อัตราส่วนผสมดินเหนียวธรรมชาติ 100 % : Silt 0 % : Cement 7.5 % กล่าวได้ว่า ตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อายุการบ่ม 28 วันสูงขึ้นตามปริมาณทรายแป้งที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 18 อิทธิพลของซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวธรรมชาติอายุ 28 วัน

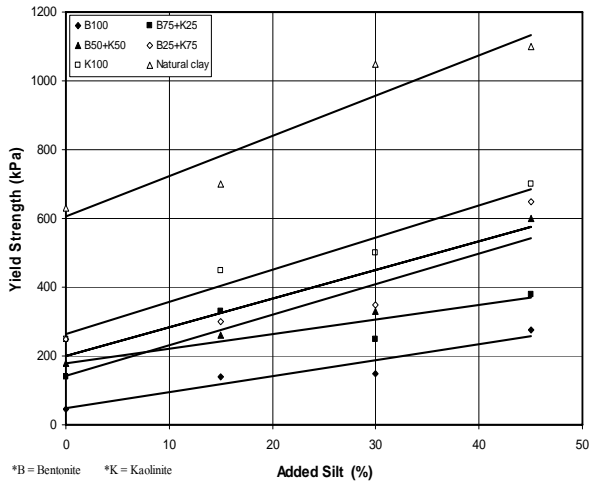
สรุปได้ว่าการลดลงของปริมาณดินเหนียวที่มีคุณสมบัติที่บดน้ำ ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบจากปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นพบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวธรรมชาติที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าลดลงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 18 โดยค่า k ต่ำที่สุดเท่ากับ 8.467×10^{-9} (cm/s) ที่อัตราส่วนผสมดินเหนียวธรรมชาติ 55 % : Silt 45 % : Cement 20 % และค่า k สูงที่สุดเท่ากับ 61.89×10^{-9} (cm/s) ที่อัตราส่วนผสมของดินเหนียวธรรมชาติ 100 % : Silt 0 % : Cement 7.5 % ดินตัวอย่างที่เป็นดินเหนียวธรรมชาติที่อายุการบ่ม 28 วัน มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น สรุปได้ว่าซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วยให้เกิดสารประกอบที่ช่วยยึดเกาะอนุภาคของดินได้ดี ช่วยอุดช่องว่าง แทรกตามอนุภาคดิน ทำให้โครงสร้างดินมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น และเมื่ออายุการบ่มนานขึ้น การเกิดไฮเดรชันก็จะสมบูรณ์ยิ่งขึ้นทำให้ได้สารประกอบเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคทำให้โครงสร้างดินมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น

6. ความสัมพันธ์จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์

การศึกษาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์โดยสามารถสรุปผลการวิจัยในแต่ละด้านดังนี้

6.1 ผลของปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงที่จุดครากของดินผสมทั้งดินเหนียวสังเคราะห์ และดินเหนียวธรรมชาติที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 7.5% ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุการบ่ม 28 วัน และมีการเพิ่มปริมาณของทรายแป้งตั้งแต่ 0%, 15%, 30%, 45% โดยพิจารณาจากรูปที่ 19 ความแข็งแรงที่จุดครากของตัวอย่างดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 7.5 % และอายุการบ่ม 28 วัน มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณทรายแป้งและซีเมนต์ที่สูงขึ้น เปรียบเทียบความแข็งแรงที่จุดครากของดินผสมทั้งดินเหนียว

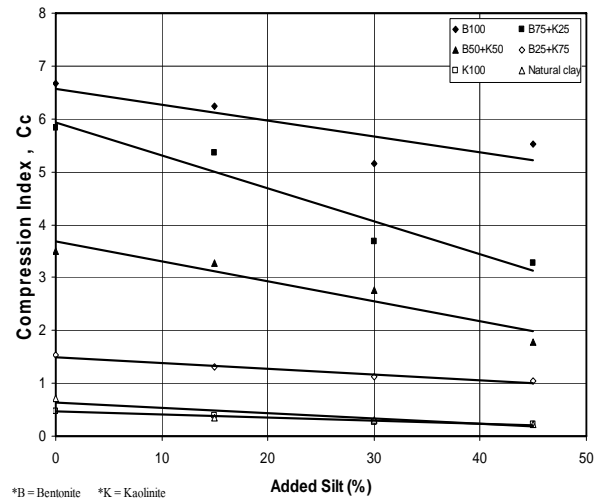


รูปที่ 19 อิทธิพลของทรายแป้งและซีเมนต์ต่อความแข็งแรงที่จุดครากของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 7.5 % และอายุการบ่ม 28 วัน

สังเคราะห์และดินเหนียวธรรมชาติ ที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุการบ่ม 28 วัน และมีการเพิ่มปริมาณของทรายแป้งตั้งแต่ 0%, 15%, 30%, 45% พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าทรายแป้งที่ผสมเพิ่มเข้าไปช่วยในการลดช่องว่างในมวลดินและช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ สอดคล้องเช่นเดียวกับปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นก็ช่วยให้เกิดการยึดเกาะกันในโครงสร้างดินมากยิ่งขึ้นส่งผลให้สามารถรับกำลังแบกทานได้สูงยิ่งขึ้น

6.2 ผลจากประเภทของดินเม็ดละเอียด

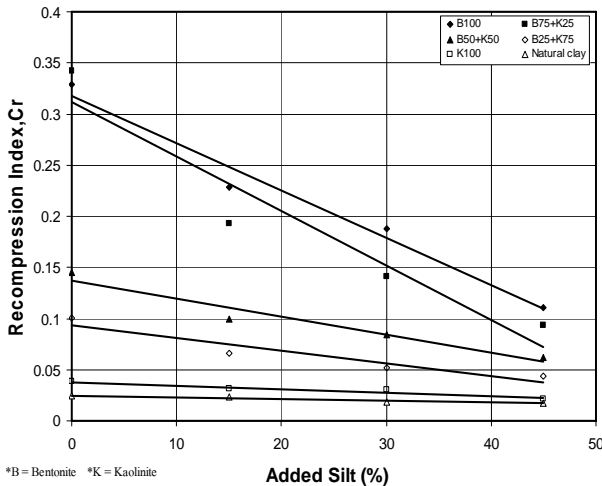
จากการเปรียบเทียบดัชนีการอัดตัวของดินผสมทั้งดินเหนียวสังเคราะห์และดินเหนียวธรรมชาติที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 7.5% ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุการบ่ม 28 วัน และมีการเพิ่มปริมาณของทรายแป้งตั้งแต่ 0%, 15%, 30%, 45% โดยพิจารณาจากรูปที่ 20 พบว่าดัชนีการอัดตัวของตัวอย่างดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 7.5 % และอายุการบ่ม 28 วัน มี



รูปที่ 20 อิทธิพลของประเภทของดินเม็ดละเอียดต่อดัชนีการอัดตัวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 7.5 % และอายุการบ่ม 28 วัน

ค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งที่สูงขึ้น และมีค่าดัชนีการอัดตัวลดลงตามปริมาณดินเหนียวคาโอลิไนท์ที่สูงขึ้น สอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบดัชนีการอัดตัวของดินผสมทั้งดินเหนียวสังเคราะห์และดินเหนียวธรรมชาติที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุการบ่ม 28 วัน และมีการเพิ่มปริมาณของทรายแป้งตั้งแต่ 0%, 15%, 30%, 45% ซึ่งพบว่าดัชนีการอัดตัวของตัวอย่างดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 15 % และอายุการบ่ม 28 วัน มีค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งที่สูงขึ้น และมีค่าดัชนีการอัดตัวลดลงตามปริมาณดินเหนียวคาโอลิไนท์ที่สูงขึ้น

การเปรียบเทียบดัชนีการอัดตัวซ้ำของดินผสมทั้งดินเหนียวสังเคราะห์และดินเหนียวธรรมชาติที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 7.5% ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุการบ่ม 28 วัน และมีการเพิ่มปริมาณของทรายแป้งตั้งแต่ 0%, 15%, 30%, 45% โดยพิจารณาจากรูปที่ 21 พบว่าดัชนีการอัดตัวซ้ำของตัวอย่างดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 7.5 % และอายุการบ่ม 28 วัน มีค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งที่สูงขึ้น และมีค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำลดลงตามปริมาณดินเหนียวคาโอลิไนท์ที่สูงขึ้น

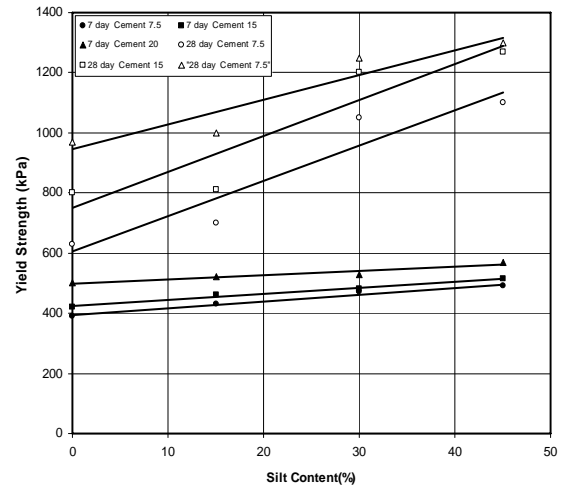


รูปที่ 21 อิทธิพลของประเภทของดินเม็ดละเอียดต่อดัชนีการอัดตัวซ้ำของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 7.5 % และอายุการบ่ม 28 วัน

เช่นเดียวกัน ซึ่งพบว่าดัชนีการอัดตัวซ้ำของตัวอย่างดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 15 % และอายุการบ่ม 28 วัน มีค่าลดลงตามปริมาณทรายแป้งที่สูงขึ้น และมีค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำลดลงตามปริมาณดินเหนียวคาโอลิไนท์ที่สูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณดินเหนียวคาโอลิไนท์ส่งผลให้ กำลังรับหน่วยแรงอัดมีค่าสูงขึ้น ดัชนีการอัดตัวซ้ำมีค่าลดลง สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การอัดตัวของปริมาตรมีค่าลดลง และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าสูงขึ้น จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าดินเหนียวคาโอลิไนท์มีความแข็งแรงมากที่สุด ดินเบนโทไนต์มีความแข็งแรงต่ำที่สุด และจะลดหลั่นกันไปตามอัตราผสมของดินสองชนิดนี้ ส่วนดินเหนียวธรรมชาติที่เก็บจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือมีความแข็งแรงรองจากดินเหนียวคาโอลิไนท์

6.3 ผลจากอายุการบ่ม

เปรียบเทียบกำลังรับหน่วยแรงอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่เป็นดินเหนียวธรรมชาติมีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 7.5% และ 15 % ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วันและมีการเพิ่มปริมาณของทรายแป้ง



รูปที่ 22 อิทธิพลของอายุการบ่มต่อความแข็งแรงที่จุดครากของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่ ปริมาณซีเมนต์ 7.5% , 15% และ 20%

ตั้งแต่ 0%, 15%, 30%, 45% โดยพิจารณาจากรูปที่ 22 ความแข็งแรงที่จุดครากของตัวอย่างดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่ ปริมาณซีเมนต์ 7.5 % และ 15 % มีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่มที่สูงขึ้นจากผลการวิจัยสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอายุการบ่มส่งผลให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับเม็ดดินได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นเป็นผลให้โครงสร้างของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ มีความแข็งแรงมากขึ้นสามารถรับกำลังได้สูงยิ่งขึ้น

7. สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์คือ ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit), ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit) และดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) พบว่าค่าขีดจำกัดเหลว , ขีดจำกัดพลาสติก และดัชนีพลาสติก มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณทรายแป้งในตัวอย่างดินผสม จากการทดสอบในครั้งนี้พบว่าตัวอย่างดินที่มีอัตราส่วนดินสังเคราะห์ 100 % : ทรายแป้ง 0 % มีค่าขีดจำกัดเหลวสูงสุดเท่ากับ 51.85 % ส่วนค่าขีดจำกัดกีดเหลวต่ำสุดเป็นตัวอย่างดินผสมที่อัตราส่วนดินผสมดินสังเคราะห์ 55 %: ทรายแป้ง 45% มีค่าเท่ากับ 34.90 %

ผลจากการทดสอบคุณสมบัติการอัดตัวภายนี้พบว่ากำลังรับหน่วยแรงอัดมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณทรายแฉ่งที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้สรุปได้ว่าทรายแฉ่งที่ผสมเพิ่มเข้าไปในตัวอย่างดินผสมเข้าไปทำให้เกิดขนาดผลที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อโครงสร้างของตัวอย่างดินผสมทำให้เกิดความแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักกดทับได้สูงขึ้น ผลจากการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้โครงสร้างของดินผสมมีความแข็งแรงขึ้นเช่นเดียวกับปริมาณทรายแฉ่งที่เพิ่มขึ้นสรุปได้ว่าซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มเข้าไปในตัวอย่างดินผสมได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดสารประกอบ ที่ช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติการเชื่อมยึดกันระหว่างอนุภาคเม็ดดินซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับกำลังของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์

เมื่อพิจารณาความแข็งแรงที่จุดครากของตัวอย่างดินผสมที่อายุการบ่ม 7 วันเปรียบเทียบกับความแข็งแรงที่จุดครากของตัวอย่างดินผสมที่อายุการบ่ม 28 วันพบว่า ความแข็งแรงที่จุดครากมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม สรุปได้ว่า เมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดสารประกอบที่ช่วยในการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของเม็ดดินในช่วงที่อายุการบ่มน้อยการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะยังไม่ส่งผลเต็มที่ แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มยาวนานขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังของตัวอย่างดินผสมมีค่าสูงขึ้น

จากการพิจารณา ดัชนีการอัดตัว และดัชนีอัดตัวพบว่าดัชนีการอัดตัวมีค่าลดลงตามปริมาณทรายแฉ่งและปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดัชนีการอัดตัวมีค่าสูงอยู่ในช่วง 0.720 - 0.560 ดัชนีการบวมตัวมีค่าอยู่ในช่วง 0.024- 0.022 ดัชนีการอัดตัวมีค่าลดลงนี้แสดงให้เห็นได้ว่า ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยลง แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของดินอันเนื่องมาจากการผสมทรายแฉ่ง และซีเมนต์ในตัวอย่างดินผสม

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของดินเหนียวธรรมชาติที่เก็บจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งเป็นตัวแทนของดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดินสังเคราะห์คาโอไลน์ท์ อาจ

กล่าวได้ว่าดินเหนียวกรุงเทพฯเป็นดินที่ประกอบด้วยดินเหนียวคาโอไลน์ท์เป็นส่วนใหญ่ ทำให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมค่อนข้างดี นอกจากนี้จากผลการวิจัยพบว่าปริมาณทรายแฉ่งที่พบปะปนอยู่ในดินเหนียวตามธรรมชาติส่งผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นหากเลือกที่จะปรับปรุงดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์ในทางลึกเพื่อใช้ประโยชน์เป็นฐานรากคันทาง หรือรองรับทางวิ่งของสนามบิน จึงควรเจาะสำรวจดินและวิเคราะห์หาปริมาณของทรายแฉ่งที่ปะปนตามธรรมชาติ เพื่อการกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมได้ถูกต้องประหยัดและพอเพียง

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ผู้สนับสนุนเงินทุนการวิจัยภายใต้สัญญาเลขที่ MRG4980193 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผู้เอื้อเฟื้อสถานที่ นายสูงศักดิ์ ศรีสุวรรณ มหาบัณฑิต ภาควิชาครุศาสตร์โยธา ผู้ทำหน้าที่ช่วยวิจัยทำให้งานวิจัยเรื่องนี้ลุล่วงลงได้

9. เอกสารอ้างอิง

- Bergado, D.T., Ruenkraiergsa, T., Taesira, Y and Balasubramaniam, A.S. (1990). Deep soil mixing to reduce embankment settlement. Ground Improvement Journal. Vol.3, No.3, pp.1-18
- Brom, B.B. (1984). Stabilization of soft clay with lime columns. Proceedings of the Seminar on Soil Improvement and Construction Techniques in Soft Ground, Nanyang Technological Institute, Singapore.
- Brom, B.B. (1986). Stabilization of soft clay with lime and cement columns in Southeast Asia. Applied Research Project RP10/83, Nanyang Technology Institute, Singapore.
- Kamon, M and Bergado, D.T. (1991). Ground Improvement Technique. Proceedings of the 9th

- Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, Vol.2, pp.526-546
- Miura,N., Shen,S., Koda, and Nakamura, R.(1997).
A new design approach for composite soft-ground improved by soil-cement. Short Course on Soft Ground Improvement. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Miura, N., Horpibulsuk, S and Nagaraj, T.S.,(2001).
Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. Soils and Foundations, Vol.41, No.5, pp.33-45.
- Petchgate,K., Modmoltin,C.and Voottipruex,P.(2003).
Performance of jet mixing for ground Improvement. Proceedings of the International Symposium 2003 on Soil/Ground Improvement and Geosynthetics in Waste Containment and Erosion Control Applications, 2-3 December 2003. Asian Institute of Technology, Thailand, pp.295-300.
- Probala,A (1998). State of the art in deep mixing technology. Part 1:Basic Concepts and overview. Ground Improvement, Vol.2, pp.81-82
- Uddin,K., Balasubramaniam, A.S. and Bergado, D.T.(1997). Engineering behavior of cement-treated Bangkok soft clay. Geotechnical Engineering, Vol.28, No.1, pp.89-119.
- Waranabe,Y., Tsuchida,T., Furuno,T., and Yuasa, H.(2000).Mechanical characteristics of a cement treated dredge soil utilized for waste reclamation landfill. Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Nakase and Tsuchida (eds), Balkema, Rotterdam.