บทที่ 8

บทสรุป

งานศึกษาวิจัยนี้ประกอบด้วยสามส่วนหลักที่สำคัญ คือ 1) สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล 2) การวิเคราะห์และประเมินการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม และ 3) อิทธิพลของเถ้าชีวมวลต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล ซึ่งได้บทสรุปของการศึกษา กล่าวโดยสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ

1. กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล รวมถึงสมการทำนายกำลังอัด

1. ค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระของดินเหนียว (Prakash and Sridharan, 2004) มีอิทธิพลโดยตรงต่อปริมาณความชื้น ซึ่งเกี่ยวเนื่องและส่งผลต่อค่าขีดจำกัดเหลว และค่าดัชนีพลาสติก ดังความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

$$FSR = 0.0154(LL) + 0.030$$

และ $$FSR = 0.0153(PI) + 0.586$$

พบว่าดินที่มีอัตราส่วนการบวมตัวอิสระที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติกมีค่าสูงขึ้นและยังส่งผลต่อช่วงของปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ซึ่งมีแนวโน้มที่จะลดลงตามพฤติกรรมการบวมตัวที่สูงขึ้น

2. ตัวแปรหลักที่เป็นตัวแปรควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์คือ อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/Cement Ratio, w_c/C) และระยะเวลาบ่ม อีกทั้งพบว่า

พฤติกรรมการบวมตัวของดินไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ซึ่งสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}}\right\}=\left[\frac{(w_c/C)_{28}}{(w_c/C)_D}\right]^{1.40}(0.103+0.265\ln D)$$

กำหนดอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์, w_c/C เท่ากับ 2.5 ถึง 7.5 (เมื่อปริมาณความชื้นในดินเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินบวมตัวต่ำ และ 0.6 ถึง 1 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินบวมตัวสูง) ในช่วงระยะเวลา 7 ถึง 60 วันเท่านั้น

3. ปัจจัยควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลคือ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณส่วนผสม ระยะเวลาบ่มและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล

4. การศึกษานี้พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์เป็นอัตราส่วนที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุดและประยุกต์ใช้เป็นตัวแปรอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม, w_c/B เมื่อปริมาณส่วนผสมเท่ากับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ใส่ในการผสม, C_i และปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า, C_e เมื่อ C_e คือผลคูณของตัวแปรประสิทธิภาพ (k) กับปริมาณเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ซึ่งเท่ากับ $k.BioF$ และตัวแปรประสิทธิภาพ (k) นี้หมายถึงความสามารถของวัสดุปอซโซลานในการแทนที่เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์

5. หลักการหาตัวแปรประสิทธิภาพ k ด้วยวิธี Multi Linear Regression ซึ่งตัวแปรประสิทธิภาพ k จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่โดยไม่ขึ้นกับปริมาณส่วนผสมเพราะที่อายุบ่มหนึ่งของอัตราส่วนการแทนที่หนึ่ง ๆ เมื่อทำการผสมวัสดุผสมที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จะให้ค่าตัวแปรประสิทธิภาพเพียงค่าเดียวสำหรับวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง ๆ และหลักการของตัวแปรประสิทธิภาพ k นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ ได้

6. สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมีความสัมพันธ์ดังนี้
สำหรับดินที่ครอบคลุมการบวมตัวต่ำถึงสูง (7 – 60 วัน)

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C^*)_D}}{q_{(w_c/C^*)_{28}}}\right\}=\left[\frac{(w_c/C^*)_{28}}{(w_c/C^*)_D}\right]^{1.40}(0.103+0.265\ln D)$$

เมื่อ C^* คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ $C^* = C_i + k.BioF$ และ
สำหรับดินบวมตัวต่ำ (7 – 60 วัน) อัตราการพัฒนาประสิทธิภาพของเถ้าชีวมวลนี้มีค่าเท่ากับ

$$\frac{k_D}{k_{28}} = 0.4284 \ln D - 0.455$$

2. การวิเคราะห์และประเมินการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม

1. กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามแบบระบบเปียกมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 2.3 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิของการบ่มและความแปรปรวนของอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio, w_c/C) ในสนาม เนื่องจากในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่แต่ละสถานีนั้นจะมีปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้คงที่ตลอดสถานีทดสอบ แต่อาจมีการแปรปรวนของปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตลอดความลึกของชั้นดินด้วย

2. สำหรับการก่อสร้างระบบแห้งในสนามพบว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ได้จากการผสมในสนามที่ผสมด้วยเครื่องจักรมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบห้องปฏิบัติการมาก ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 1.3 เท่า และ 0.4 ถึง 0.8 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ที่ระยะบ่ม 3 และ 14 วัน ตามลำดับ

3. จากข้อมูลการกระจายตัวของกำลังอัดแกนเดียวในสนาม พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามของระบบเปียกมีการกระจายข้อมูลของกำลังตลอดความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สูงกว่าการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบแห้งซึ่งให้ผลในทางตรงกันข้ามกันกับกำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของเทคนิค เครื่องมือหรือวิธีของการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการและสภาพการบ่มที่แตกต่างกัน นั้นแสดงให้เห็นเด่นชัดถึงความแปรปรวนของกำลังในห้องปฏิบัติการและในสนาม

4. เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดของการนำเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานสนามจริง งานศึกษาวิจัยนี้จึงแนะนำขั้นตอนในการออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งในระบบเปียกและระบบแห้งและเมื่อทำการตรวจสอบให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือได้

3. อิทธิพลของเถ้าชีวมวลต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล

1. การปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าชีวมวลนั้นจะช่วยเพิ่มพันธะเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคในมวลดินและลดขนาดโพรงในมวลดิน โดยในที่นี้จำแนกประเภทของโพรงเป็นสามประเภท ได้แก่ โพรงอากาศ (>10 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มอนุภาค (0.1-10 ไมครอน) และโพรงขนาดเล็กภายในอนุภาคมวลดิน (<0.1 ไมครอน)

2. ในการปรับปรุงดินซีเมนต์ในโซนแอคทีพ ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง จะมีปริมาตรโพรงขนาดเล็กลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน และเมื่ออายุบ่มมากขึ้น โพรงทั้งหมดและโพรงขนาดใหญ่มีปริมาตรลดลงขณะที่โพรงขนาดเล็กมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ทำให้เกิดพันธะเชื่อมประสานและทำหน้าที่อุดโพรงขนาดใหญ่ในมวลดิน

3. ที่อายุบ่มเพิ่มขึ้น (60 วัน) เมื่อพิจารณาผลการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล พบว่าโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) นั้นมีปริมาตรสูงกว่าดินซีเมนต์ สิ่งนี้แสดงผลสนับสนุนว่าเถ้าชีวมวลซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำทำหน้าที่กระจายกลุ่มอนุภาคของดินซีเมนต์ขนาดใหญ่ที่มีโพรงขนาดใหญ่นั้น ให้เป็นกลุ่มขนาดเล็กลง ปริมาตรโพรงขนาดเล็กของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลจึงมีค่าสูงกว่าดินซีเมนต์

4. อิทธิพลของการกระจายตัวโดยเถ้าชีวมวลนี้จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของดินซีเมนต์ทำให้เพิ่มผิวที่ทำปฏิกิริยากับน้ำและมีผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ดียิ่งขึ้น ดังจะเห็นว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ มีค่าเพิ่มขึ้นและพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับเวลานอกจากจะพิจารณาจากผลการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง แล้วจะสังเกตได้จากปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลงตามเวลา นั้นแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นที่ทำหน้าที่อุดโพรง

5. ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นในดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล เป็นผลมาจากอิทธิพลร่วมของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการกระจายตัว และจากการศึกษาครั้งนี้ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1 เท่าของค่าดัชนีเหลวนั้น ที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลนี้ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ซึ่งให้ค่า $Ca(OH)_2$ ปริมาณที่มากที่สุดเช่นกัน