

แนวทางการเลือกสารเสถียรภาพ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการทางเคมี

ณพล อยู่บรรพต¹

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอแนวทางการเลือกสารเสถียรภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการทางเคมีโดยใช้สารเสถียรภาพทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในเนื้อมวลดิน ผลจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นทำให้ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการเช่น คุณสมบัติด้านกายภาพ ด้านเคมี และคุณสมบัติด้านวิศวกรรม เนื่องด้วยดินแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันทำให้สารเสถียรภาพบางประเภทสามารถใช้ปรับปรุงดินได้ประสิทธิภาพดีกับดินในชนิดหนึ่ง แต่อาจให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างเมื่อใช้กับดิน

อีกชนิดหนึ่ง ดังนั้นการเลือกใช้ประเภทของสารเสถียรภาพเช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และเถ้าลอยให้เหมาะสมกับชนิดของดินจึงมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงดินด้วยวิธีการเสถียรภาพทางเคมี หน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้านการก่อสร้างทางวิศวกรรมปฐพี และนักวิจัยหลายท่านได้เสนอแนะแนวทางการพิจารณาเลือกใช้ประเภทของสารเสถียรภาพให้เหมาะสมสำหรับดินแต่ละชนิดโดยใช้คุณสมบัติด้านวิศวกรรมเป็นเกณฑ์กำหนดเบื้องต้น

คำสำคัญ: การปรับปรุงดิน ดินซีเมนต์ การเสถียรภาพทางเคมี

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ.8620-26 อีเมล: naphol_yoo@hotmail.com



Guideline for Selection of Stabilizing Agents for Soil Improvement by Chemical Stabilization

Naphol Yoobanpot¹

Abstract

The aim of this paper is to provide preliminary guidelines for soil improvement by a chemical stabilization technique which uses stabilizing agent materials for chemical reaction within soil mass. This chemical reactions caused changes in the physical, chemical and engineering properties of the soil. Due to the different properties in each soil, some types of stabilizing agents can be used to improve soil properties with high efficiency, but may provide different results in other soil. The use of appropriate

stabilizing agents, such as cement, lime and fly ash is very important to soil improvement by chemical stabilization technique. The organizations concern with the geotechnical engineering construction field and many researchers have proposed several guidelines for considering the appropriate material type for each soil by using the engineering properties criteria.

Keywords: Soil Improvement, Soil Cement, Chemical Stabilization

¹ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Tel. 0-2555-2000 Ext.8620-26, E-mail: naphol_yoo@hotmail.com

1. บทนำ

การขยายตัวด้านเศรษฐกิจและสังคมในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลมีความเป็นไปอย่างรวดเร็ว โครงสร้างพื้นฐาน ระบบสาธารณูปโภค ตลอดจนโครงข่ายการคมนาคมขนส่งมีการก่อสร้างขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเพื่อรองรับการก้าวสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (ASEAN Economic Community หรือ AEC) ในปี พ.ศ. 2558 ที่จะถึงอันใกล้ แต่เนื่องด้วยตำแหน่งที่ตั้งของกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลตั้งอยู่บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำตอนล่างใกล้กับทะเลแถบอ่าวไทย มีลักษณะเป็นดินตะกอนปากแม่น้ำทับถมและสะสมจากอดีตเป็นเวลานานจนเกิดเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนตัวซึ่งมีคุณสมบัติรับกำลังแบกทานได้ต่ำ และมีปริมาณการทรุดตัวสูงเมื่อน้ำหนักมากทับ ดังนั้นโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น โครงการรถไฟฟ้า โครงการทางด่วน โครงการสะพานข้ามแม่น้ำ หรืออาคารสูง จึงต้องเผชิญกับปัญหาการทรุดตัวของฐานรากองค์อาคารอันเนื่องมาจากคุณสมบัติที่เป็นข้อด้อยของดินเหนียวอ่อน

ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินให้ได้คุณสมบัติตามต้องการจึงเป็นทางเลือกในการบรรเทาปัญหาการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อน โดยทั่วไปแล้วการปรับปรุงคุณภาพดินประกอบไปด้วยหลักพื้นฐานที่สำคัญ 4 ประการได้แก่

1.1 การทำให้แน่นขึ้น (Densification) คือการทำให้เนื้อดินที่มีลักษณะหลวมและเป็นโพรงพรุนมากมีขนาดและปริมาณโพรงพรุนลดลงด้วยการใช้พลังงานบีบอัดเนื้อดินเช่น การบดอัดดินด้วยเครื่องจักรที่มีน้ำหนักมากหรือการใช้แรงสั่นสะเทือนเพื่อทำให้เม็ดดินเคลื่อนตัวเข้ามาชิดกัน เป็นต้น วิธีนี้จะต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูงในการบีบอัดเนื้อดินให้ชิดกันและมีความแน่นขึ้น บางครั้งการใช้พลังงานบดอัดที่สูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและฐานรากของอาคารข้างเคียง

1.2 การเสริมแรงให้กับดิน (Reinforcement) คือการเสริมวัสดุเพิ่มเข้าไปในเนื้อดินเพื่อช่วยให้เนื้อดินสามารถรวมตัวกันเป็นลักษณะกลุ่มก้อน หรือเป็นมวลดินขนาดใหญ่ ซึ่งช่วยให้ดินสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้น วัสดุที่

นิยมเสริมแรงให้กับเนื้อดินได้แก่วัสดุสังเคราะห์ที่เรียกว่า Geosynthetics ซึ่งประดิษฐ์คิดค้นขึ้นเพื่อใช้งานทางด้านธรณีโดยเฉพาะ Geosynthetics มีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันหลายประเภท เช่น Geotextiles เป็นวัสดุที่มีเนื้อเหนียวแน่นถักทอประสานกันคล้ายผ้า Geogrids มีลักษณะเป็นแผ่นตารางที่มีช่องขนาดใหญ่ Geomembranes เป็นวัสดุจำพวกยางหรือพลาสติกแผ่นบางกันน้ำที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง เทคนิคการเสริมแรงให้กับดินนี้ต้องใช้วัสดุเครื่องมือและผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านและต้องควบคุมเผื่อระวังไม่ให้วัสดุเสริมแรงฉีกขาดหรือเสื่อมสภาพในช่วงระยะเวลาติดตั้งและระหว่างการใช้งาน

1.3 การระบายน้ำออกจากมวลดิน (Drainage) ดินที่มีน้ำปนอยู่ในเนื้อดินเป็นปริมาณมากนั้น มีผลทำให้ดินอ่อนตัวง่าย และมีความสามารถรับกำลังได้ต่ำ การระบายน้ำออกจากมวลดินจึงช่วยทำให้ดินมีความแข็งแรงขึ้น และมีปริมาณการยุบตัวน้อยลง วิธีการระบายน้ำออกจากมวลดินมีหลายวิธีเช่น การเร่งระบายน้ำโดยใช้น้ำหนักกดทับ (Preloading) การติดตั้งแถบเร่งระบายน้ำแนวตั้ง (Prefabricated Vertical Drains หรือ PVD) การระบายน้ำออกจากมวลดินจะใช้ระยะเวลาการดำเนินการค่อนข้างนานโดยเฉพาะดินเหนียวซึ่งมีความชื้นน้ำที่ต่ำ

1.4 การใช้สารเชื่อมประสาน (Cementation) โดยสารเชื่อมประสานจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาเคมีภายในเนื้อมวลดิน ผลจากปฏิกิริยาเคมีจะทำให้ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปและมีเสถียรภาพดีขึ้น สารเชื่อมประสานหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารเสถียรภาพ (Stabilizing Agents) ที่นิยมใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ หรือปูนขาว เป็นต้น

จากหลักพื้นฐานการปรับปรุงดินทั้ง 4 ข้อที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมที่แตกต่างกัน สำหรับในปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายคือ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการใช้สารเชื่อมประสานหรือสารเสถียรภาพ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางเสถียรภาพทางเคมี ผลลัพธ์ของปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นทำให้โครงสร้างดินและคุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป

ตามต้องการเช่น ความสามารถรับกำลังอัดสูงขึ้น ความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น มีปริมาณการทรุดตัวน้อยลง นอกจากนี้ นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาข้อดีของการปรับปรุงดินด้วยวิธีการใช้สารเสถียรภาพเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงดินด้วยวิธีอื่นๆ พบว่าใช้ระยะเวลาค่อนข้างสั้นเมื่อต้องการเพิ่มกำลังอัดให้ดินเหนียวอ่อน และมีค่าบำรุงรักษาต่ำสำหรับการใช้งานในระยะยาว [1], [2] ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางการเลือกใช้สารเสถียรภาพที่เหมาะสมกับดินแต่ละชนิด สำหรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการเคมี โดยใช้คุณสมบัติด้านวิศวกรรมเป็นเกณฑ์กำหนดเบื้องต้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการเสถียรภาพทางเคมี แบ่งออกเป็นปัจจัยหลักได้ดังนี้ [3], [4]

2.1 ชนิดของแร่ธาตุและองค์ประกอบของดิน ตามธรรมชาติของดินแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น ความละเอียดของเนื้อดิน องค์ประกอบแร่ธาตุในดิน ความสม่ำเสมอของขนาดเม็ดดิน เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน ซึ่งส่งผลต่อเนื่องกับประสิทธิภาพการเสถียรภาพทางเคมี เนื่องจากดินแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อประเภทของสารเสถียรภาพทางเคมีที่แตกต่างกัน

2.2 ชนิดของสารเสถียรภาพ สารเสถียรภาพที่ใช้จะมีผลอย่างมากในการปรับเสถียรภาพทางเคมีซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติการพัฒนากำลังของดินทั้งในด้านทางกายภาพ และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน โดยหลักการทั่วไปแล้วสารเสถียรภาพชนิดเดียวกันจะให้กำลังที่มากกว่าในปริมาณที่มากกว่า เมื่อกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องมีค่าคงที่

2.3 ปริมาณน้ำ น้ำเป็นตัวแปรที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี เนื่องจากปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ส่งผลให้การพัฒนากำลังของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแล้วมีประสิทธิภาพสูงสุดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ปริมาณน้ำในดินแต่ละชนิดยังมีความแตกต่างกันตามชนิดและคุณลักษณะของดิน

2.4 ปัจจัยภายนอกอื่นๆ เช่น ระยะเวลาที่ใช้ผสม วิธีการผสม อายุการบ่ม สภาพฝนตกขณะทำงาน คุณภาพของเครื่องมือและอุปกรณ์ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปรับปรุงดินทางเคมีทั้งสิ้น

3. ชนิดของสารเสถียรภาพ

ดินแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน การเลือกใช้สารเสถียรภาพที่เหมาะสมจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินเป็นอย่างมาก ดังนี้

3.1 ปูนซีเมนต์ เป็นสารเสถียรภาพที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย มีราคาถูก สามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่ต้องนำมาแปรสภาพก่อนใช้งาน และมีประสิทธิภาพสูง ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์ดิน และน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ และทางวิศวกรรมอย่างชัดเจน มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีค่าความทึบน้ำสูงขึ้น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นี้เรียกว่า ดินซีเมนต์ โดยดินซีเมนต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมโยธาได้หลายประเภท เช่น เสาค้ำดินซีเมนต์ในงานฐานราก งานกำแพงกันดิน หรือใช้ในงานก่อสร้างถนน เป็นต้น [5] นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษา ทดสอบ วิจัย การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ในดินที่มีลักษณะแตกต่างกัน พบว่าดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ได้ และได้แนะนำลักษณะของดินที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์เมื่อใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเป็นเกณฑ์กำหนดเบื้องต้น ดังสรุปแสดงตามตารางที่ 1 [6]-[9]

3.2 ปูนขาว เป็นสารเสถียรภาพที่นิยมใช้อีกชนิดหนึ่งในปฏิกิริยาเคมีของปูนขาวนอกจากจะช่วยพัฒนากำลังแล้วยังทำให้ดินลดปริมาณการขยายตัว (Expansive Soil) และลดการบวมตัวของดิน (Swell)

ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องช้าๆ และเมื่อผสมในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว ดินยังมีคุณสมบัติคงสภาพยืดหยุ่นได้แต่หากเติมปริมาณปูนขาวที่มากเกินไปจะทำให้ดินมีความเปราะเพิ่มขึ้นและมีค่าความที่บ้น้ำลดลง นักวิจัยหลายท่านได้แนะนำคุณสมบัติของดินที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวว่า เหมาะสำหรับดินที่มีเนื้อละเอียดปานกลาง มีขนาดสัดส่วนคละที่ดี มีค่า PI มากกว่า 10 [10], [11] สอดคล้องกับข้อแนะนำของ National Lime Association ซึ่งกล่าวว่าดินที่มีค่า PI มากกว่า 12 สามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนขาวได้เป็นอย่างดี [12]

ตารางที่ 1 ข้อแนะนำการพิจารณาเลือกใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพกับดินชนิดต่าง ๆ [6]-[9]

ดินเม็ดละเอียด
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 50%
- Plasticity Index หรือ PI น้อยกว่า 20
- Liquid Limit หรือ L.L. น้อยกว่า 40
ดินปนทราย
- มีขนาดสัดส่วนคละค่อนข้างดี
- PI น้อยกว่า 30
- กรณีเป็นทราย ควรอยู่ในสภาพหลวมมากถึงหลวม
ดินปนกรวด
- ค้างตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่า 45%
- ค้างตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 35%
- PI น้อยกว่า 20

3.3 เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าถ่านหินที่เกิดจากการเผาถ่านหินในการให้ความร้อนทางกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า การหลอมละลายโลหะ เป็นต้น เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) คือ วัสดุที่มีสารซิลิกา หรืออะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก มีสมบัติการเชื่อมประสานเล็กน้อยหรืออาจไม่มีเลย มาตรฐาน ASTM C618 (1991) ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ (Class)

ตามองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงตามตารางที่ 2 [13] เถ้าลอยมักนิยมนำมาใช้รวมกันกับสารเสถียรภาพชนิดอื่นเช่น ปูนซีเมนต์ หรือปูนขาว เพื่อช่วยการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาว (Long Term Pozzolan Reaction) [14]-[16] นอกจากนี้อนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียดในระดับไมครอนหรือมากกว่าของเถ้าลอยยังสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีสมบัติในการเชื่อมประสาน และรูปร่างลักษณะค่อนข้างกลมยังช่วยลดปริมาณช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้ดินมีคุณสมบัติที่บ้น้ำเพิ่มมากขึ้น นักวิจัยหลายท่านแนะนำว่าเถ้าลอยสามารถนำมาใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์หรือปูนขาวในสัดส่วนที่มากถึง 30-35% โดยน้ำหนักได้ [17],[18]

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (1991) [13]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ (Class)		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70	70	50
SO_3 ไม่เกินร้อยละ	4	5	5
ปริมาณความชื้น ไม่เกินร้อยละ	3	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10	6	6

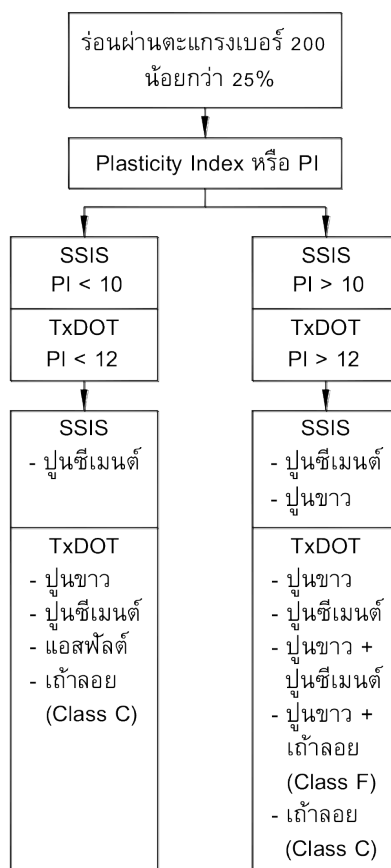
4. การปรับปรุงเสถียรภาพสำหรับงานก่อสร้างถนน

การก่อสร้างถนนบนดินอ่อนมักเกิดปัญหาการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันตลอดแนวสายทาง การปรับปรุงด้วยสารเสถียรภาพจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ตั้งแต่ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุรองรับพื้นทาง (Base Material) จนถึงปรับปรุงดินชั้นทาง (Subgrade Soil) เนื่องด้วยการก่อสร้างถนนสายหลักเป็นโครงการขนาดใหญ่ มีระยะเวลาก่อสร้างยาวนานและมีมูลค่าก่อสร้างค่อนข้างสูง หากมีการเลือกใช้สารเสถียรภาพให้เหมาะสมจะช่วยลดระยะเวลาและงบประมาณการก่อสร้างได้

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงเสถียรภาพสำหรับงานก่อสร้างถนนนี้ได้ดำเนินการกันมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีต ในปี ค.ศ.1970 กองทัพอากาศแห่งสหรัฐอเมริกาได้ทำการวิจัยร่วมมือกับมหาวิทยาลัย Texas A&M เสนอแนะแนวทางการพิจารณาเลือกใช้สารเสถียรภาพที่เหมาะสมกับการก่อสร้างถนนสำหรับรองรับการขึ้นลงของเครื่องบิน โดยได้เสนอแนะแนวทางดังกล่าวในรูปตรรกะชี้วัดการเสถียรภาพของดิน (Soil Stabilization Index System หรือ SSIS) ซึ่งใช้หลักการเลือกใช้สารเสถียรภาพตามความละเอียดของเม็ดดิน [19] ต่อมากรมการขนส่งแห่งรัฐเท็กซัส (Texas Department of Transportation หรือ TxDOT) ได้เสนอแนวทางการพิจารณาเลือกใช้สารเสถียรภาพสำหรับงานก่อสร้างถนนขึ้น โดยใช้เกณฑ์จำแนกขนาดของเม็ดดินเมื่อร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งปัจจุบันเป็นวิธีได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย [20] และได้เปรียบเทียบข้อแนะนำจากทั้งสองหน่วยงานมีดังนี้

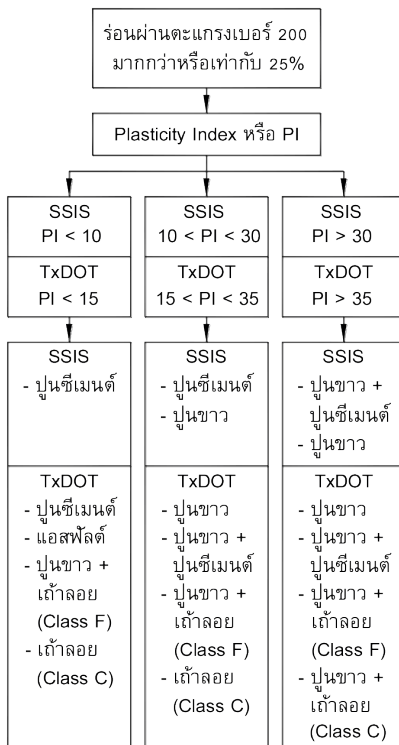
4.1 หลังจากทำการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วพบว่าเม็ดดินผ่านตะแกรงน้อยกว่า 25% แสดงว่าเม็ดดินมีขนาดปานกลางถึงค่อนข้างใหญ่ ดินจึงมีแนวโน้มเป็นกรวดหรือทราย ทั้ง SSIS และ TxDOT แนะนำให้นำมาใช้เป็นวัสดุรองรับพื้นทาง (Base material) เมื่อพิจารณาค่า Plasticity Index หรือ PI ของดินพบว่า SSIS แนะนำให้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพเมื่อค่า PI น้อยกว่า 10 และ TxDOT เสนอให้ใช้ปูนขาว ปูนซีเมนต์ แอสฟัลต์ หรือเถ้าลอย Class C อย่างใดอย่างหนึ่งได้เมื่อค่า PI น้อยกว่า 12

สำหรับกรณีที่ค่า PI ของดินมีค่าสูงกว่าตามที่กล่าวมาข้างต้นนั้น SSIS แนะนำให้ใช้ปูนซีเมนต์หรือปูนขาวเป็นสารเสถียรภาพเมื่อค่า PI มากกว่า 10 และ TxDOT เสนอว่าถ้าค่า PI มากกว่า 12 ให้ใช้ปูนขาว ปูนซีเมนต์ หรือเถ้าลอย Class C อย่างใดอย่างหนึ่งได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ปูนขาวผสมกับปูนซีเมนต์ หรือปูนขาวผสมเถ้าลอย Class F เป็นสารเสถียรภาพได้อีกทางหนึ่ง ดังแสดงการเปรียบเทียบข้อแนะนำจากทั้งสองหน่วยงานตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 การพิจารณาเลือกใช้สารเสถียรภาพของวัสดุรองรับพื้นทาง (Base Material) ที่แนะนำโดย SSIS [19] และ TxDOT [20]

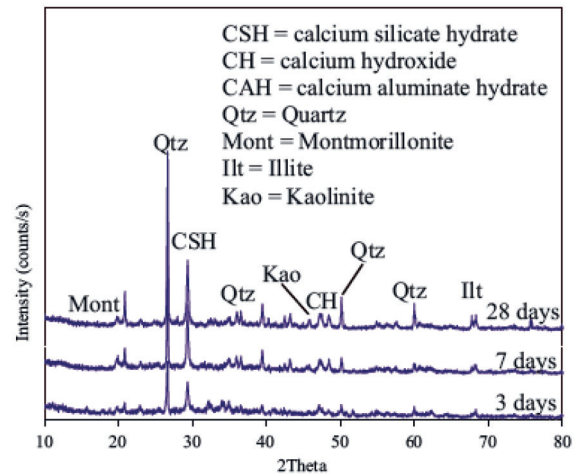
4.2 หลังจากทำการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วพบว่าเม็ดดินผ่านตะแกรงมากกว่าหรือเท่ากับ 25% แสดงว่าเม็ดดินมีขนาดเล็กถึงค่อนข้างเล็ก ดินจึงมีแนวโน้มเป็นทรายละเอียด หรือตะกอนทรายปนดินเหนียว หรือดินเหนียว ทั้ง SSIS และ TxDOT แนะนำให้นำมาใช้เป็นดินชั้นทาง (Subgrade Soil) โดยเมื่อพิจารณาค่า Plasticity Index หรือ PI ของดินพบว่า SSIS แนะนำให้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพเมื่อค่า PI น้อยกว่า 10 และ TxDOT เสนอให้ใช้ปูนซีเมนต์ หรือแอสฟัลต์ หรือเถ้าลอย Class C อย่างใดอย่างหนึ่งได้เมื่อค่า PI น้อยกว่า 15 และยังเสนอให้ใช้ปูนขาวผสมกับเถ้าลอย Class F ได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2 การพิจารณาเลือกใช้สารเสถียรภาพของดินชั้นทาง (Subgrade Soil) ที่แนะนำโดย SSIS [19] และ TxDOT [20]

สำหรับกรณีที่มีค่า PI มีค่ามากกว่า 10 แต่น้อยกว่า 30 นั้น SSIS เสนอให้ใช้ปูนซีเมนต์หรือปูนขาวเป็นสารเสถียรภาพ ในขณะที่ TxDOT แนะนำให้ใช้ปูนขาวเป็นสารเสถียรภาพหลัก โดยสามารถใช้ผสมกับปูนซีเมนต์หรือเถ้าลอย Class F ได้ เมื่อ PI มีค่ามากกว่า 15 แต่น้อยกว่า 35 และยังสามารถใช้เถ้าลอย Class C เพียงอย่างเดียวได้

นอกจากนี้หาก PI มีค่ามากกว่า 30 SSIS แนะนำให้ใช้ปูนขาวเป็นสารเสถียรภาพหลัก หรือใช้ปูนขาวผสมกับปูนซีเมนต์ สอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ TxDOT ที่เสนอว่าถ้า PI มีค่ามากกว่า 35 แนะนำให้ใช้ปูนขาวเป็นสารเสถียรภาพหลัก โดยสามารถใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เถ้าลอย Class F หรือเถ้าลอย Class C ได้ดังแสดงการเปรียบเทียบข้อแนะนำจากทั้งสองหน่วยงานตามรูปที่ 2 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาข้อแนะนำจากทั้งสองหน่วยงานพบว่าใน



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในดินซีเมนต์ด้วยวิธี XRD [21]

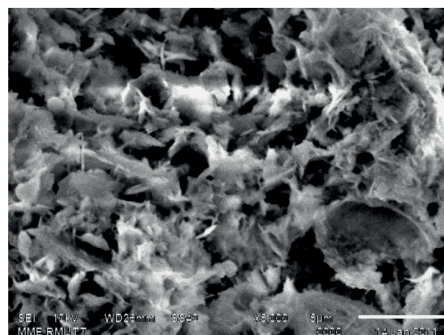
กรณีที่ PI มีค่าค่อนข้างสูง จะแนะนำให้ใช้ปูนขาวเป็นสารเสถียรภาพหลัก เนื่องจากดินที่มีค่า PI สูงจะมีปริมาณองค์ประกอบที่เป็นดินเหนียว (Clay Content) ค่อนข้างมาก มีปริมาณการทรุดตัวสูง และมีแนวโน้มเกิดการบวมตัวได้ง่าย จึงต้องใช้ปูนขาวซึ่งมีคุณสมบัติช่วยพัฒนากาลังลดปริมาณการกระจายตัว และลดการบวมตัวของดินมาประยุกต์ใช้

5. แนวทางการศึกษาวิจัยเชิงลึกในอนาคต

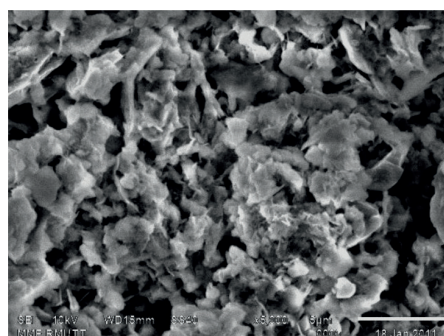
ในอดีตการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงดินด้วยวิธีการทางเคมีนั้น จะกระทำโดยทดลองผสมสารเสถียรภาพในชนิดและสัดส่วนที่แตกต่างกัน แล้วทำการผสมเข้ากับดินชนิดต่างๆ ที่ต้องการปรับปรุง (Trial Mix) จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของดินทั้งด้านกายภาพและทางด้านวิศวกรรมด้านเช่น ความสามารถในการรับกำลังอัด ความสามารถในการรับกำลังแบกทาน หรือค่าการซึมน้ำ เป็นต้น จากผลการทดสอบจึงนำมาสรุปหาสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ทำให้ดินมีค่าคุณสมบัติตามที่ต้องการ ในปัจจุบันนี้การพัฒนาเทคโนโลยีตลอดจนอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ มีการพัฒนาเป็นไปอย่างรวดเร็วและเจริญก้าวหน้าสามารถวิเคราะห์วัสดุต่าง ๆ จนถึงระดับนาโนเมตรได้

การศึกษาในด้านวิศวกรรมปฐพีและการปรับปรุงดินด้วยวิธีการทางเคมี จึงได้นำเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ในเชิงลึกมาประยุกต์ใช้เช่น การใช้เทคนิควิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction หรือ XRD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive Method) ช่วยสามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ทำให้ทราบถึงประเภทและปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในสารผลิตภัณฑ์ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ตามช่วงอายุการบ่มต่างๆ ดังแสดงตัวอย่างตามรูปที่ 3 [21] นอกจากนี้การตรวจสอบโครงสร้างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ที่มีกำลังขยายสูงสามารถทำการถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มอันเนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีได้ ดังแสดงตัวอย่างตามรูปที่ 4 [21]

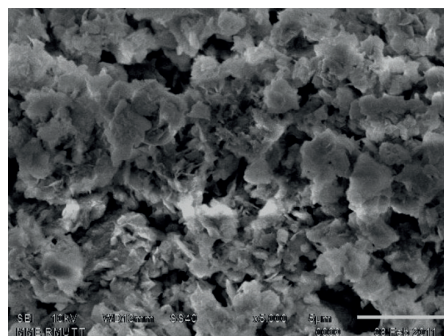
จากการวิเคราะห์เชิงลึกและตรวจสอบร่วมกันด้วยวิธี XRD และ SEM นี้ พบว่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว (ดินซีเมนต์) มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำในเนื้อดิน โดยผลลัพธ์จากปฏิกิริยาเคมีจะเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์หลักประเภท Calcium Silicate Hydrate หรือ CSH ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้เกิดความเชื่อมประสานและการแข็งตัวของดินซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อ CSH มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดสูงขึ้นและ CSH จะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่มจึงส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่มเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณการเกิดของ CSH นี้ได้แก่อัตราส่วนเชิงโมเลกุลของปริมาณสารประกอบระหว่างซีเมนต์ต่อน้ำในเนื้อดินต้องมีค่าเหมาะสมในช่วงค่าหนึ่งๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากเทคนิคการวิเคราะห์ในเชิงลึก ดังนั้นการวิเคราะห์ในเชิงลึกจึงสามารถบอกได้ว่าปริมาณ



ก. อายุการบ่ม 3 วัน



ข. อายุการบ่ม 7 วัน



ค. อายุการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่ม เมื่อถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง SEM [21]

ที่เหมาะสมของสารเสถียรภาพ (ปูนซีเมนต์) ที่ใช้สำหรับดินชนิดนั้นๆ มีปริมาณเป็นเท่าไร ส่งผลให้เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากไม่ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์ที่มากจนเกินความจำเป็น นอกจากนี้การทราบถึงปริมาณ

สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นยังช่วยทำให้การคาดคะเนกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ มีความใกล้เคียงมากขึ้น ทำให้การก่อสร้างเป็นไปตามขั้นตอนที่วางแผนงานไว้ และส่งผลให้การเบิกจ่ายงบประมาณมีความสอดคล้องกับขั้นตอนการก่อสร้าง ทั้งนี้นักวิจัยได้แนะนำเทคนิคการเก็บตัวอย่างสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เชิงลึกโดยยกตัวอย่างกรณีของเสาเข็มดินซีเมนต์ว่าควรทำการเก็บตัวอย่างอย่างน้อยจำนวน 3 ตัวอย่างต่อปริมาณดินซีเมนต์ทุกๆ 50-60 ลูกบาศก์เมตร และเก็บจากเสาเข็มดินซีเมนต์ต้นเดียวกันที่ระยะใกล้หัวเสา กลางเสา และใกล้กับฐานเสา โดยเลือกตำแหน่งที่มีลักษณะของการผสมกันระหว่างดินและซีเมนต์ค่อนข้างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน [22], [23]

6. สรุป

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการทางเคมีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ด้วยเหตุผลที่สามารถเพิ่มความสามารถการรับกำลังของดินได้รวดเร็ว ในระยะเวลาอันสั้น สะดวกต่อการวางแผนงานและดำเนินการก่อสร้าง สามารถนำไปประยุกต์ใช้การงานก่อสร้างด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องได้หลายประเภทเช่น งานถนน งานอุโมงค์ งานฐานรากอาคาร เป็นต้น สิ่งสำคัญที่ควรตระหนักคือ การเลือกใช้สารเสถียรภาพให้มีความเหมาะสมกับดินในแต่ละชนิด ซึ่งจะช่วยให้เกิดประโยชน์ในด้านการปรับปรุงคุณภาพดินให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดแล้วยังช่วยลดระยะเวลาและประหยัดงบประมาณการก่อสร้างได้นอกจากนี้ความก้าวหน้าสมัยของวิทยาการในปัจจุบันยังช่วยให้การวิเคราะห์ด้านเคมีมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้นส่งผลให้การศึกษาในด้านการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมีสามารถคาดคะเนคุณสมบัติของดินด้านวิศวกรรมได้ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นเช่นเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] R.H. Karol, *Chemical grouting and soil stabilization*, Taylor & Francis, 2005.

- [2] J. P. Guyer, *Soil stabilization for pavement*, Taylor & Francis, 2011.
- [3] M.R. Hausmann, *Engineering Principles of Ground Modification*, McGraw-Hill, 1990.
- [4] M.A. Patel and H. S. Patel, "A Review on Effect of Stabilizing Agents of Weak Soil," *Civil and Environmental Research*, ISSN 2222-1719, vol.2, no.6, 2012.
- [5] M. Topolnicki, *In situ soil mixing, Ground Improvement 2nd edition*, 2004, pp. 331-423.
- [6] F. Sariosseiri and B. Muhunthan, "Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils," *Engineering Geology*, no. 104, pp.119-125, 2009.
- [7] M.S. Pakbaz and R. Alipour, "Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay," *Applied Clay Science*, no.67-68, pp.1-4, 2012.
- [8] Y. Millogo, M. Hajjaji, R. Ouedraogo, and M. Gomina, "Cement-lateritic gravels mixtures: Microstructure and strength characteristics," *Construction and Building Materials*, no.22, pp.2078-2086, 2008.
- [9] S.K. Lim, C.S. Tan, K.P. Chen, M.L. Lee, and W.P. Lee, "Effect of different sand grading on strength properties of cement grout," *Construction and Building Materials*, no.38, pp.348-355, 2013.
- [10] B.L. Runigo, V. Ferber, Y.J. Cui, O. Cuisinier, and D. Deneele, "Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions," *Engineering Geology*, no.118, pp.20-28, 2011.
- [11] G. Stoltz, O. Cuisinier, F. Masrouri, and U. de, "Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil,"



- Applied Clay Science*, no.61, pp.44–51, 2012.
- [12] National Lime Association, *Lime-Treated Soil Construction Manual: Lime Stabilization & Lime Modification*, Bulletin 326, 2004.
- [13] American Society for Testing and Materials, “Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete,” Annual Book of ASTM Standards, vol.04.02., ASTM C618-91, 1991.
- [14] S.P. Singh, D.P. Tripathy, and P.G. Ranjith, “Performance evaluation of cement stabilized fly ash-GBFS mixes as a highway construction material,” *Waste Management*, no.28, pp.1331-1337, 2008.
- [15] A. Sezer, G. Inan, H.R.Yilmaz, and K. Ramyar, “Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay,” *Building and Environment*, no.41, pp.150-155, 2006.
- [16] S. Kolias, V.K. Rigopoulou, and A. Karahalios, “Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement,” *Cement & Concrete Composites*, no.27, pp.301-313, 2005.
- [17] X. Fu, Z. Wang, W. Taoa, C. Yanga, W. Hou, Y. Dong, and X. Wu, “Studies on blended cement with a large amount of fly ash,” *Cement and Concrete Research*, no.32, pp.1153-1159, 2002.
- [18] S. Donatello, A. Palomo, and A. Fernández-Jiménez, “Durability of very high volume fly ash cement pastes and mortars in aggressive solutions,” *Cement & Concrete Composites*, no.38, pp.12-20, 2013.
- [19] J.A. Epps, W.A. Dunlap, and B.M. Gallaway, “Basis for the Development of a Soil Stabilization Index System,” *U. S. Air Force*, no.F29601-90-C-008, Air Force Weapons Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas, 1970.
- [20] Texas Department of Transportation, *Guidelines for Modification and Stabilization of Soils and Base for Use in Pavement Structures*, Construction Division, 2005.
- [21] S. Nontananandh and N. Yoobanpot, “Stabilization of Soft Clay Using Waste-Based Cement,” *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, no.46, pp.127-134, 2012.
- [22] R. Pusch and R.N. Yong, *Microstructure of smectite clay and engineering performance*, Taylor & Francis, 2006.
- [23] P.C. AitCin, *Binders for durable and sustainable concrete*, Taylor & Francis, 2007.