บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

พื้นที่ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะบริเวณแถบชายฝั่ง ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา ในประเทศไทย ลุ่มน้ำโขง ในประเทศลาวและกัมพูชา พื้นที่ตอนกลางของประเทศฟิลิปปินส์ และพื้นที่ชายฝั่งทะเล ประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย สิงคโปร์ ฮ่องกง เกาหลี ญี่ปุ่น และไต้หวัน ประสบกับปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่ไม่เหมาะสมกับการก่อสร้างของชั้นดินเหนียวอ่อน พื้นที่เหล่านี้ปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนา ซึ่งมีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ ปริมาณความชื้นสูง และการอัดตัวสูง

เมื่อมีการก่อสร้างโครงสร้างสาธารณูปโภค เช่น ถนน และฐานรากสะพาน เป็นต้น บนชั้นดินดังกล่าว จะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพี ชั้นดินนี้จะเกิดการอัดตัวคายน้ำและก่อให้เกิดการทรุดตัวและการเสียรูปด้านข้างอย่างมากระหว่างและหลังการก่อสร้าง ปัญหาที่มักพบอีกปัญหาหนึ่งคือการวิบัติของดินฐานรากระหว่างและหลังการก่อสร้างอันเกิดจากน้ำหนักที่ไม่ได้คาดคิด เช่น แผ่นดินไหว วิธีการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือการผสมวัสดุเชื่อมประสานในดินที่ระดับลึก ที่เรียกว่าเทคนิคการผสมลึก (Deep mixing technique) วิธีการนี้เป็นการเพิ่มพันธะเชื่อมประสานให้กับดินโดยใช้สารเคมี (ซีเมนต์และปูนขาว เป็นต้น) ความต้านทานการอัดตัวและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นกับอายุบ่ม เทคนิคการปรับปรุงดินนี้เป็นการสร้างเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนเพื่อเปลี่ยนจากชั้นดินเหนียวเป็นชั้นดินผสม (Composite ground)

การปรับปรุงดินอ่อนด้วยวัสดุเชื่อมประสาน (Binder/Cementing agents) นี้เป็นเทคนิคการปรับปรุงดินที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น วัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันคือปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินในปริมาตรที่มากจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้าง เราจำเป็นต้องลดปริมาณซีเมนต์ด้วยการแทนที่ด้วยวัสดุ Pozzolan ที่มีราคาต่ำ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุ Pozzolan ในอัตราส่วนที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยเพิ่มกำลังอัดแล้วยังช่วยเพิ่มความคงทน (Durability) ให้กับดินซีเมนต์ด้วย วัสดุ Pozzolan ที่เป็นที่ยอมรับใน

งานโครงสร้างของประเทศ ได้แก่ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือ (Byproduct) จากการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน และเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ของวัสดุตามธรรมชาติ เช่น เปลือกไม้ ชานอ้อย และ ขี้เถ้าแกลบ เป็นต้น เถ้าลอยประเภทนี้เรียกว่าเถ้าชีวมวล (Biomass ash) การประยุกต์ใช้เถ้าลอยถ่านหินในงานวิศวกรรมเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย (สมนึก ตั้งเติมสิริกุล และคณะ, 2540; ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547; Owens, 1979; Mitsui, et al., 1994 ; Mindess, 1996; Igarashi et al., 1996; Ollivier and Massat, 1996; Jaturapitakkul, 1999; Chindaprasirt et al. 2001; Yang and Su, 2002; Chindaprasirt et al. 2004 และ Thumasujarit and Tangtermsirikul, 2004) จึงทำให้เถ้าลอยถ่านหินมีค่าราคาที่สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ไม่มีราคาในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวร่วมกับซีเมนต์

นอกจากชนิดของเถ้าลอยแล้ว ชนิดของดิน (ระดับการบวมตัว) ก็เป็นอีกตัวแปรหลักที่ควบคุมการพัฒนากำลังอัด Sridrahan and Prakash (1999a and 1999b) แบ่งดินเหนียวออกเป็นสองประเภทหลักๆ คือดินเหนียวบวมตัว (Swelling clay) และดินเหนียวไม่บวมตัว (Non-swelling clay) ซึ่งได้แก่ดินเหนียวเบนโทไนท์ และดินเหนียวคาโอลิไนท์ ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินบวมตัวและไม่บวมตัวที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าชีวมวล พร้อมทั้งสร้างสมการทำนายทั่วไปในการทำนายกำลังอัดแกนเดียว ดินเหนียวที่จะใช้การศึกษานี้จะคลอบคลุมระดับการบวมตัวตั้งแต่ต่ำจนถึงสูง ซึ่งได้แก่ ดินเหนียวคาโอลิไนท์ (ดินเหนียวไม่บวมตัว) ดินเหนียวกรุงเทพ (ดินเหนียวบวมตัวต่ำ) และดินเหนียวเบนโทไนท์ (ดินเหนียวบวมตัวสูง) และเพื่อประโยชน์ของการใช้งาน งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบสมการทำนายกำลังจากผลการทดสอบจริงในสนามและเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการพัฒนากำลังดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาทั้งการเปลี่ยนแปลงเชิงกลและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคซึ่งการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคจะสามารถอธิบายพฤติกรรมด้านกำลังที่เกิดขึ้นให้ชัดเจนยิ่งขึ้นและมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

วัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาตัวแปรควบคุมการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล โดยพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ การบวมตัวอิสระ อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย

เถ้าลอย และอายุบ่ม) และสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล

2. เพื่อตรวจสอบสมการทำนายกำลังและการนำไปใช้งาน ทำการหาความสัมพันธ์ด้านกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ
3. เพื่ออธิบายพฤติกรรมการพัฒนากำลังจากผลทดสอบด้านโครงสร้างจุลภาค ด้วยการถ่ายภาพโดยวิธีส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) การทดสอบวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermogravimetric Analysis, TGA) และการกระจายขนาดช่องว่าง (Pore Size Distribution)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการศึกษาวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. องค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

การออกแบบงานด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยสารผสมเพิ่ม (Cement Stabilization) ที่ถูกต้องและเหมาะสมจะเกิดขึ้นมิได้ หากปราศจากความรู้และความเข้าใจในพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินผสมสารผสมเพิ่ม ดังนั้น การศึกษานี้จะศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวชนิดต่างๆ ผสมซีเมนต์และเถ้าลอย โดยแปรผันตัวแปรควบคุมได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารเชื่อมประสาน อัตราส่วนการบวมตัว อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม และท้ายสุดจะสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวจากการวิเคราะห์ผลทดสอบทั้งหมด การศึกษานี้จัดเป็นงานวิจัยพื้นฐานเพื่อให้นักวิจัยที่สนใจได้นำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป ในส่วนนี้จะมีประโยชน์ต่อสถาบันวิจัยและมหาวิทยาลัยต่างๆ

2. ด้านเศรษฐศาสตร์

งานศึกษานี้จะแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยนำมาใช้กับงานปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการเลือกใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่สร้างขึ้นมีประโยชน์อย่างมากสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบในการกำหนดปริมาณส่วนผสมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และปริมาณความชื้น วิศวกรผู้ออกแบบสามารถประมาณกำลังของดินซีเมนต์จากผลทดสอบที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อใช้ในการ

ออกแบบในเวลาที่จำกัด นอกจากนี้ และยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ในส่วนนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง เช่น กรมโยธาธิการ และกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย และบริษัทผู้รับจ้าง เป็นต้น

ขอบเขตของงานวิจัย

เพื่อให้การศึกษาวิจัยนี้ลุล่วงตามวัตถุประสงค์ จึงกำหนดขอบเขตการศึกษาวิจัยดังต่อไปนี้

1. วัสดุวิจัย

- เถ้าเชื้อเพลิง เถ้าเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยเพาเวอร์โอเปอร์เลต จำกัด (TPO) ที่ ม.3 ต.เขาหินซ้อน อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา มีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้ารวม 32 เมกะวัตต์ มีระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนแก่หม้อต้มไอน้ำแบบ Fluidized Bed Combustion (FBC) ที่อุณหภูมิการเผาประมาณ 860 องศาเซลเซียส โดยใช้เชื้อเพลิงหลัก เป็นวัสดุจำพวก แกลบ และเปลือกไม้ยูคาลิบตัส เรียกเถ้าเชื้อเพลิง ประเภทนี้ว่า เถ้าชีวมวล ในกระบวนการเผาไหม้ เชื้อเพลิงในเตาเผาจะเกิดฝุ่นเถ้าลอยปะปนไปกับไอร้อน เมื่อกระทบกับอุณหภูมิต่ำอย่างกะทันหัน ทำให้เถ้าที่ใกล้จุดหลอมเหลวเย็นตัวลงรวมตัวกันเป็นอนุภาค แล้วถูกดักจับด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator, EP) และเก็บไว้ในไซโล

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

- ดินเหนียวน้ำกร่อยกรุงเทพฯ (Intertidal Bangkok Clay)

- ดินเบนโทไนท์ และดินคาโอลิไนท์หรือดินขาว

2. ตัวแปรหลักในการศึกษา

- อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio w_c/C) กำหนดที่เท่ากับ 2.5 ถึง 7.5

- ปริมาณความชื้น กำหนดที่ค่าดัชนีเหลว (Liquidity Index, LI) เท่ากับ 0.6 ถึง 2.5

- อายุบ่ม กำหนดที่ระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7 14 28 และ 60 วัน

- อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าชีวมวล กำหนดที่สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

3. รายละเอียดของการทดสอบ

- การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (อ้างอิงASTM D 854) การหาพิกัดอัตเตอร์เบริก์ (อ้างอิงจาก

วิธี Fall cone ตามมาตรฐาน BS: 1377- part II, 1990) การทดสอบหาปริมาณความชื้น (อ้างอิง ASTM 2216) การทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน (อ้างอิงASTM D 422) การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของดิน (อ้างอิงASTM D 2922) การทดสอบ Thermogravimetric Analysis, TGA การถ่ายภาพขยายของอนุภาค (Scanning Electron Microscopy, SEM) การส่องขนาดและการกระจายตัว (Pore Size Distribution) และการทดสอบหาอัตราส่วนการบวมตัว (Free Swelling Ratio) อ้างอิงจาก Prakash and Sridharan (2004)

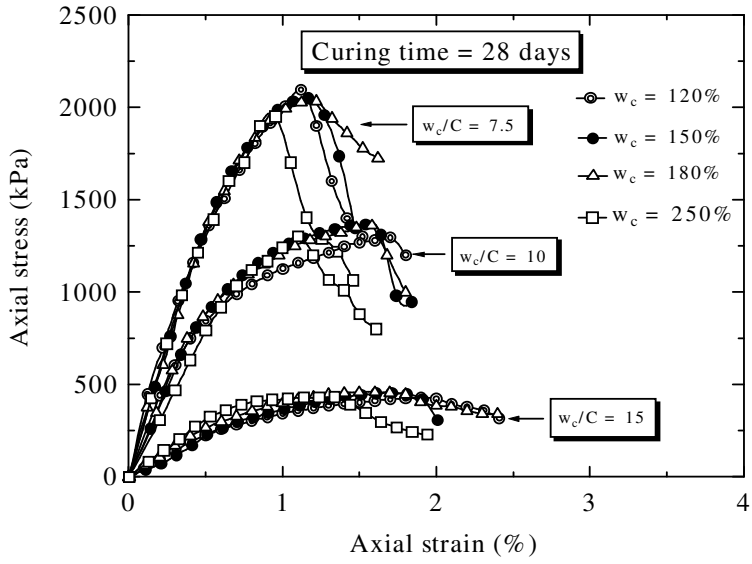
- การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (อ้างอิงASTM D 2216)

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผสมซีเมนต์และปูนขาวเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินเริ่มต้นตั้งแต่ในช่วงคริสตกาล Swedish Geotechnical Institute และศาสตราจารย์ Bengt Broms ได้ประยุกต์ใช้เสาเข็มปูนขาวในงานฐานรากและงานโครงสร้าง (Broms and Boman, 1975) การใช้เทคนิคนี้ในประเทศญี่ปุ่นเริ่มต้นในปลายปี ค.ศ. 1970 (Okumura and Terashi, 1975; Terashi et al., 1979; Kawasaki et al., 1981; และ Suzuki, 1982) รายงานความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรมได้ถูกบันทึกโดย DJM Research Group (1984), Chida (1982) และ Miura et al. (1986) ในปี ค.ศ. 1980 และ 1982 หลังจากการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่นานนัก นักวิจัยและวิศวกรหลายท่านได้สร้างทฤษฎี วิธีการวิเคราะห์ วิธีการออกแบบ การศึกษาของ Horpibulsuk et al (2004b) สรุปว่าพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวอะริเอเคะผสมซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นสูง (LI= 2.0) มีตัวแปรควบคุมลักษณะทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์คือโครงสร้างดิน ซึ่งได้แก่พันธะเชื่อมประสาน (Cementation) และแฟบริค (Fabric) แฟบริคถูกนิยามว่าเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของกลุ่มดิน (ตามคำนิยามของ Mitchell, 1993) Horpibulsuk et al., 2004b ได้นำเสนอตัวแปรหลักที่เป็นตัวควบคุมคุณสมบัติด้านกำลัง เรียกว่า อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio w_c/C) กล่าวคือปริมาณความชื้นในดินจะควบคุมโครงสร้างดิน และปริมาณซีเมนต์จะเป็นตัวแปรควบคุมระดับของพันธะเชื่อมประสาน และพบว่าดินที่มีอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์ที่ต่ำจะส่งผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นและพวกเขายังค้นพบอีกว่าที่อัตราส่วนของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เดียวกันจะส่งผลให้ดินซีเมนต์มีกำลังที่เท่ากัน นั้นแสดงให้เห็นชัดเจนว่าตัวแปรหลักที่เป็นตัวควบคุมคุณสมบัติดินด้านกำลังคืออัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์ดังในภาพที่ 1.1 ดังนั้นจะ

เห็นว่าการศึกษาส่วนใหญ่เน้นถึงผลของกำลังของดินที่เพิ่มขึ้นโดยรวม เพื่อทำการขยายผลการศึกษาของ Horpibulsuk et al (2004b) เราจึงควรทำการวิจัยและศึกษาถึงโครงสร้างทางจุลภาค ความเข้าใจโครงสร้างจุลภาคจะนำมาซึ่งงานวิจัยประยุกต์ ตัวอย่างเช่น วิธีการทำนายพฤติกรรมทางวิศวกรรม (การอัดตัวคายน้ำและกำลังอัด) ของดินซีเมนต์ ที่เสนอโดย Horpibulsuk et al., 2003; Lorezo and Bergado, 2004; และ Horpibulsuk et al., 2005 และ 2006 เป็นต้น

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดินซีเมนต์ที่อายุบ่มต่างๆ โดยอาศัยภาพถ่ายจุลภาคของดินซีเมนต์ได้ถูกริเริ่มในประเทศไทยโดย Nontananandh et al. (2005) จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ของซีเมนต์ทำให้โครงสร้างดินแน่นขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำลดลงและกำลังอัดสูงขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นสุขสันติ์ หอพิบูลสุขและคณะ (2549) และ Horpibulsuk et al. (2006b) ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอยในเชิงปริมาณและคุณภาพ (Qualitative and quantitative study) โดยทำการทดสอบการกระจายขนาดช่องว่างด้วยปรอท (Mercury intrusion porosimeter test) และการส่องกวาด (Scanning electron microscope) ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน 5 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุบ่มในช่วง 7 ถึง 90 วัน



ภาพที่ 1.1 ความเค้น – ความเครียดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ (Horpibulsuk et al., 2004b)

จากผลทดสอบทั้งหมดพวกเขาได้อธิบายว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยแปรผันตามโครงสร้างจุลภาค แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาของพวกเขายังขาดความสมบูรณ์ ที่จะอธิบายผลทางด้านความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานในรูปของผลิตภัณฑ์ทางเคมี (CSH) อีกทั้งยังขาดการพิจารณาตัวแปรควบคุมอีกหลายตัว ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และการบวมตัวอิสระของดิน เป็นต้น ซึ่งตัวแปรที่กล่าวมามีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์

อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio w_c/C): คือ อัตราส่วนร้อยละของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ เมื่อปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ (C) คือ อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของซีเมนต์ต่อดินแห้ง

ปริมาณความชื้น : ปริมาณความชื้นนอกจากจะเป็นตัวควบคุมโครงสร้างดิน แล้วยังมีอิทธิพลต่อปฏิกริยาไฮเดรชั่นด้วย

ปริมาณซีเมนต์ : ปริมาณซีเมนต์นอกจากจะเป็นตัวแปรควบคุมระดับของพันธะเชื่อมประสานแล้วยังมีอิทธิพลต่อปฏิกริยาไฮเดรชั่นด้วย

อายุบ่ม : เนื่องจากในดินเหนียวมีปริมาณซิลิกา (Si) อยู่สูง ดังนั้นกำลังอัดของดินซีเมนต์จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแม้ว่าอายุบ่มจะเกินกว่า 28 วัน (Horpibulsuk et al., 2003) อายุบ่มในการศึกษาจึงควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 60 วัน

อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ : อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรม ปริมาณวัสดุแทนที่ที่มากเกินไป (ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ) ส่งผลให้ได้ CSH น้อยและปริมาณ $Ca(OH)_2$ มีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา Pozzolan ในทางตรงกันข้าม ปริมาณวัสดุแทนที่ที่น้อยเกินไป (ปริมาณปูนซีเมนต์สูง) ส่งผลให้ปริมาณของซิลิกาในวัสดุแทนที่มีไม่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยา Pozzolan

เถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930เป็นต้นมา ในช่วงปี ค.ศ. 1930 – 1939 สหรัฐอเมริกาได้เริ่มมีการศึกษาถึงใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยในปี ค.ศ 1937 Davis และคณะจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในคอนกรีต ในปี ค.ศ. 1948 ได้มีการนำเถ้าลอยไปใช้ในงานก่อสร้างเขื่อน Hungry Horse ต่อมาในช่วง ปี ค.ศ. 1970 – 1979 (เกิดวิกฤติการณ์น้ำมัน) ได้มีการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น ทำให้ปริมาณเถ้าลอยมีปริมาณมากขึ้น และเกิดการวิจัยค้นคว้ากันอย่างกว้างขวางเพื่อทำความเข้าใจถึงปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอย (Fly ash) มาใช้กันอย่างแพร่หลายในการผสมคอนกรีตใน

รูปแบบของการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนหรือผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์ เพื่อลดต้นทุนของคอนกรีตและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าลอยทิ้งหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นและเหมาะสมสำหรับการใช้งานบางสภาวะ นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะมาผสมในดินสำหรับงานถนน เช่น อนิรุทธ์ (2530) สมชัย (2535) และ Rhee, Yong-Heun (1982) พวกเขาพบว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (ในช่วง 0-15%) และระยะเวลาของการบ่ม ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า Liquid Limit และ Plasticity Index มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย และต่อมา วินัยและคณะ (2542) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในดินลูกรังและอายุการบ่มต่อค่า CBR และสรุปว่า ค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังมีค่าแปรผันตามอายุบ่ม ส่วนค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ: คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรรมของดินเหนียว อันได้แก่ ขีดจำกัดเหลว การอัดตัว และกำลังต้านทานแรงเฉือน ล้วนแล้วแต่แปรผันตามอัตราส่วนการบวมตัวของดิน ซึ่งมีอิทธิพลเนื่องจากแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่าง เป็นต้น ในปัจจุบันเรามีวิธีวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียวที่ใช้กันได้แก่ X-ray diffraction analysis, Differential thermal analysis, และ Electron microscopy การทดสอบเหล่านี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและซับซ้อน เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์แร่ดินเหนียว Prakash and Sridharan (2004) ได้เสนอมาตรฐานการทดสอบ โดยใช้ตัวแปรที่เรียกว่าอัตราการบวมตัวอิสระ (Free swell ratio, *FSR*) และมีนิยามดังนี้

$$FSR = \frac{V_d}{V_k} \tag{1.1}$$

เมื่อ V_d และ V_k คือปริมาตรของดินขนาดเล็กกว่า 425 mm จำนวน 10 กรัม ที่ตกตะกอนในน้ำกลั่น (Distilled water) และในสารละลายคาร์บอนเตตระคอร์ไรด์ (Carbon tetra chloride, CCl_4) ตามลำดับ ในเวลา 24 ชั่วโมง ชนิดของแร่ดินเหนียวสามารถบ่งบอกโดยอัตราส่วนบวมตัวอิสระดังแสดงในตารางที่ 1.1

จากวัตถุประสงค์หลักประการหนึ่งในการการศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน คือการสร้างความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงทางด้านกำลังอัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรควบคุม (เช่น อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณวัสดุเชื่อม

ประสาน อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ อายุบ่มและค่าการบวมตัวของดินเหนียว) อันจะนำมาซึ่งการปรับปรุงดินที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1.1

การจำแนกชนิดของดินโดยอาศัยอัตราส่วนบวมตัวอิสระ (Prakash and Sridharan, 2004)

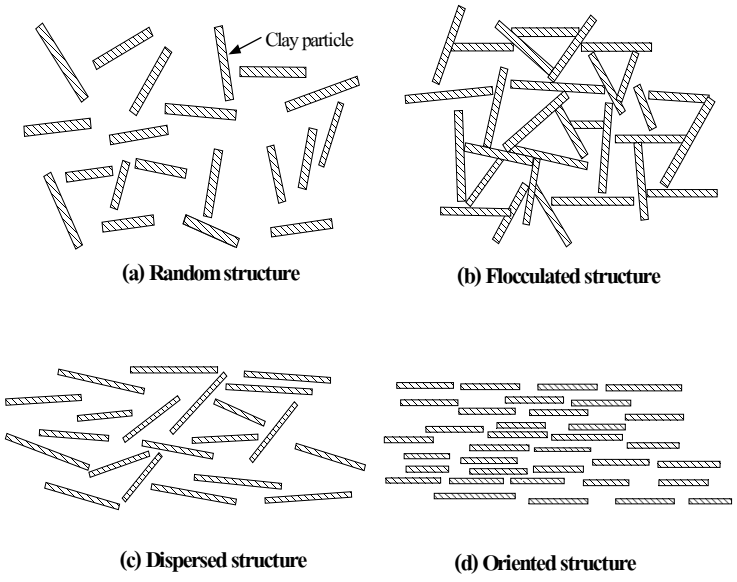
FSR	การบวมตัวของดิน	แร่ดินเหนียว
≤1.0	ไม่มีการบวมตัว	คาโอลิไนท์
1.0-1.5	ต่ำมาก	คาโอลิไนท์และมอนท์มอริโอไนท์
1.5-2.0	ปานกลาง	มอนท์มอริโอไนท์
2.0-4.0	สูง	มอนท์มอริโอไนท์
>4.0	สูงมาก	มอนท์มอริโอไนท์

นอกจากความเข้าใจทางด้านวิศวกรรมแล้ว ความเข้าใจในด้านโครงสร้างจุลภาคและผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมก็เป็นสิ่งสำคัญ ความเข้าใจดังกล่าวจะนำมาซึ่งความรู้พื้นฐานในการปรับปรุงวัสดุ Pozzolan ให้มีคุณภาพดีขึ้น

แบบจำลองของโครงสร้างดินในเบื้องต้น แสดงในภาพที่ 1.2 โดย Yong and Warkentin (1966,1975) โครงสร้างดินจะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแรงผลักที่มีมากกว่าแรงดูดระหว่างอนุภาคของดิน ซึ่งจะเป็นรูปร่างของดินที่ดูดซึมน้ำ หรืออยู่ในสภาวะของดินปั้นใหม่(Remolded) โครงสร้างการจับตัวกันเป็นกลุ่ม (Flocculation) ของเม็ดดินเป็นรูปร่างที่เกิดจากความเข้มข้นของเกลือ เช่นดินในทะเล แรงดูดส่วนใหญ่จะมีอิทธิพลระหว่างเม็ดดิน โครงสร้างดินจะมีการกระจายตัวเมื่อดินเหนียวอิ่มตัว หรือในกรณีที่ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำเพียงเล็กน้อย ในกรณีที่ดินเหนียวเกิดการอัดตัวคายน้ำมากๆ โครงสร้างของดินจะเรียงตัวในทิศทางที่ขนานไปทางเดียวกัน ซึ่งการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของดินสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ การยึดเกาะกันแบบหน้าต่อหน้า, แบบด้านหน้ากับด้านข้าง, และแบบด้านข้างกับด้านข้าง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเบื้องต้นไม่ใช่สิ่งเดียวที่ใช้ในการพิจารณาโครงสร้างดิน เพราะว่าดินตามธรรมชาติจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ แร่ดินเหนียว, ดินตะกอน, ทราย, และยังมีผลเนื่องจากผลกระทบทางเคมีที่มีอิทธิพลกับความเข้มข้นของไฟฟ้าในโพรง, อัตราการตกตะกอน, และตัวแปรอื่นๆ

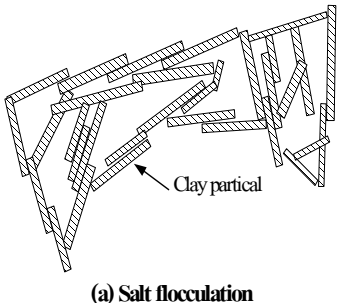
Lambe (1958) แสดงให้เห็นอนุภาคของเม็ดดินที่ถูกจำกัด โดยการพิจารณาจากการตกตะกอนของดินที่เกิดจากผลกระทบของไฟฟ้าเคมี แสดงในภาพที่ 1.3 ความแตกต่างของการจับ

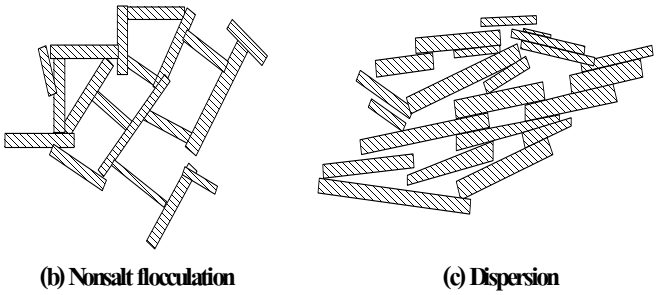
ตัวกันเป็นก้อนจะขึ้นอยู่กับแรงทางไฟฟ้าระหว่างดินและน้ำในอนุภาคของเม็ดดิน ชนิดของเกลือที่จับตัวกันเป็นก้อนจะเกิดกับดินที่ตกตะกอนทับถมในทะเล และชนิดที่ไม่มีกลุ่มก้อนเกลือจะเป็นดินที่ตกตะกอนในน้ำจืด



ภาพที่ 1.2 ชนิดของโครงสร้างดินเหนียว (Yong and Warkentin, 1966, 1975)

O'Brien (1970) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างดิน คาร์โอลิไนล์(Kaolinite) และ อีไลท์(Illite) ที่แช่อยู่ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือ (*NaCl = 1 g/l*) โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope พบว่าการจับตัวกันเป็นกลุ่มของดินเหนียว 2 ชนิด ที่อยู่ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นต่างกัน การจัดเรียงตัวของดินคาร์โอลิไนล์ที่อยู่ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือ จะจับเรียงตัวกันแบบหน้าต่อหน้าและเรียงทับซ้อนกันเป็นชั้นๆ ในส่วนของดินอีไลท์ที่อยู่ในน้ำกลั่นจะมีการเรียงตัวแบบหน้าต่อหน้า อย่างไรก็ตามในน้ำเกลือจะมีการจับเรียงตัวกันเป็นกลุ่มแบบด้านหน้ากับด้านข้างมากกว่าน้ำกลั่น และจะมีการจัดเรียงตัวแบบหน้าต่อหน้าเป็นชั้นๆ เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน

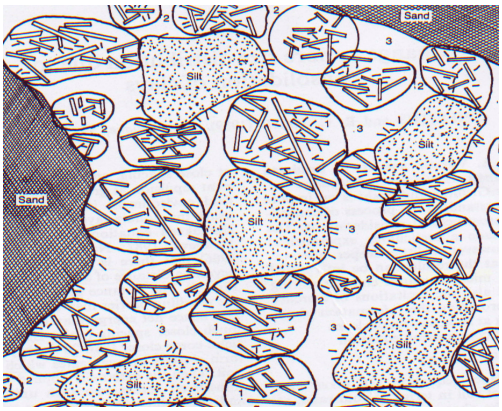




ภาพที่ 1.3 โครงสร้างดินที่ตะกอนที่เกิดจากผลกระทบของไฟฟ้าเคมี (Lambe, 1958)

ความสัมพันธ์โดยทั่วไปของอนุภาคดินจะไม่อยู่ในอนุภาคเดี่ยว และโพรงที่ปิดล้อมไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดินและกลุ่มของโครงสร้างดินจะถูกสร้างขึ้นโดยกลุ่มของอนุภาคดิน ซึ่งกลุ่มของโครงสร้างดินนี้จะถูกเรียกว่า โดเมน(domain), คลาสเตอร์(cluster), เพด(ped), แอกกรีเกท (aggregate), อะเซมเบลจ(assemblage) เป็นต้น

Nagaraj et al. (1990) สรุปผลการทดลองของ Griffith and Joshi (1989) และแสดงแบบจำลองโครงสร้างของเม็ดดินละเอียดโดยอาศัยทฤษฎีกลุ่มก้อนดิน (Cluster theory) ดังแสดงในภาพที่ 1.4 และ 1.5 ซึ่งขนาดของช่องว่างมีด้วยกัน 3 ระดับ คือ

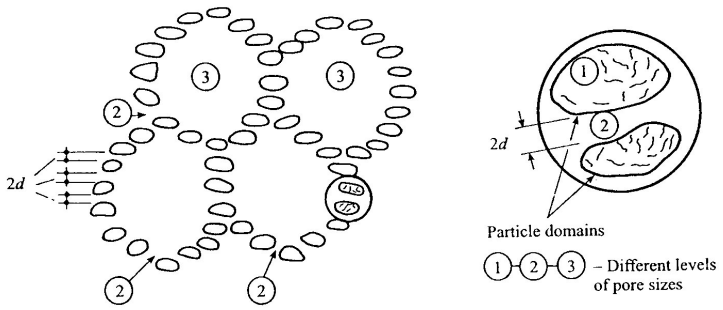


ภาพที่ 1.4 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน (Nagaraj et al., 1990)

ก) ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวในก้อนดิน (Cluster) มีขนาดน้อยกว่า 20Å

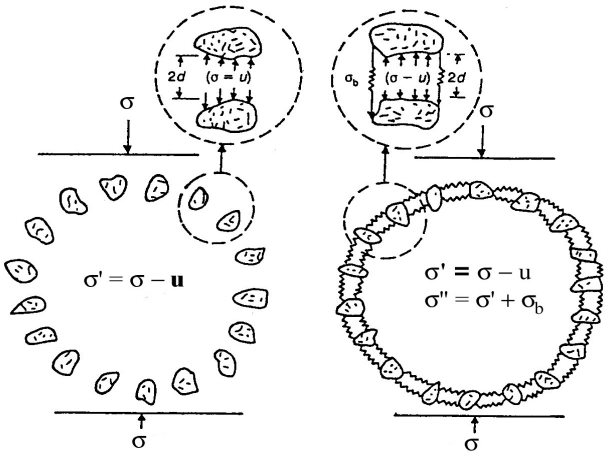
ข) ช่องว่างระหว่างก้อนดินสองก้อน มีขนาดอยู่ระหว่าง 20 Å ถึง 200 Å

ค) ช่องว่างขนาดใหญ่ภายในกลุ่มของก้อนดิน มีขนาดใหญ่กว่า 200 Å



ภาพที่ 1.5 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990)

Nagaraj et al. (1990) และ Horpibulsuk (2003) ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ แสดงดังภาพที่ 1.6 ภาพที่ 1.6 ก) เป็นโครงสร้างของดินที่ปราศจากพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) เมื่อผสมซีเมนต์กับดิน พันธะเชื่อมประสานจะเชื่อมแฟบริคเข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 1.6 ข)



ก) ข)

ภาพที่ 1.6 โครงสร้างของดินเหนียว ก) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990) ข) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Horpibulsuk et al., 2003)

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างดิน แสดงในตารางที่ 1.2 เสนอโดย Kamon (1979) การกระจายตัวของขนาดโพรงของดิน สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter

ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มีประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างดินกับพฤติกรรมทางกลศาสตร์ ตัวอย่างที่ใช้สำหรับหาขนาดการกระจายตัวของขนาดโพรง โดยทั่วไปจะต้องทำการ Freez – Dry ก่อน เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยที่สุดโดยทำให้น้ำในโพรงหายไป หลักการในการวัดการกระจายตัวของขนาดโพรงจะอยู่บนพื้นฐานของสมการที่เสนอโดย Washburn (1921) ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงสามารถคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการอัดปรอท กับพื้นที่ผิวเมื่อปรอทเข้าไปแทรกอยู่ในโพรงของดิน

การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอายุบ่มและปริมาณวัสดุเชื่อมประสานได้รับการศึกษาโดย Kamon and Nontananandh, 1990; Al-Rawas, 2002; และ Nontananandh, et al., 2005 การศึกษานี้ทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ทางเคมีเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอายุบ่มและปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาเฉพาะวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่ง (ปูนซีเมนต์หรือปูนขาว) หรือวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากการผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุ Pozzolan (Blended cement) ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ค่าหนึ่ง ที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง และภายใต้พลังงานการขึ้นรูปของตัวอย่าง (Specimen) ค่าหนึ่ง จึงไม่สามารถอธิบายอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่อความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานได้

ตารางที่ 1.2

เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979)

	Electro microscope		X-ray defflaction	Polarization microscope	Porosimeter	**อื่น ๆ**
	Scanning type	Transmission type				
หลักการ	จากการสังเกตโดยใช้ Electronic line		ใช้การหักเหของรังสี X-ray	ใช้การสั่นเนื่องจากการแผ่รังสี	ใช้การแทนที่ของปรอท	คลื่นเสียง, การนำไฟฟ้า, การนำความร้อน, คุณสมบัติของแม่เหล็ก

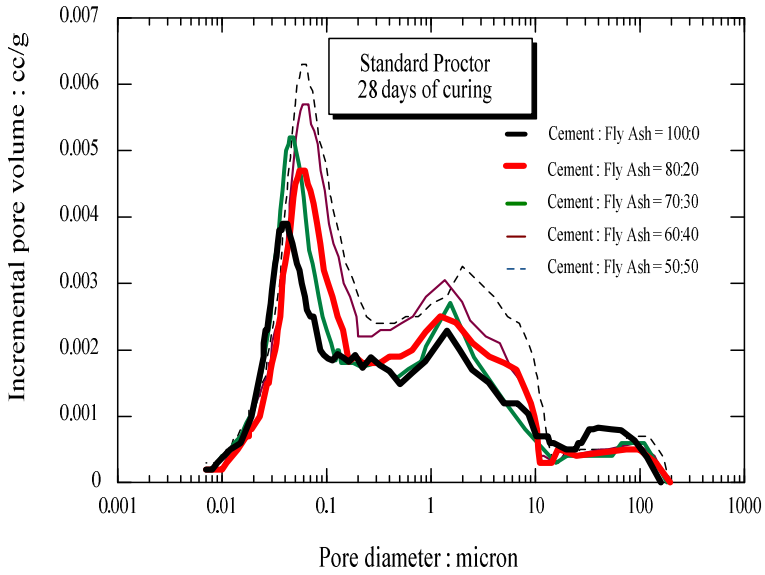
ตารางที่ 1.2 (ต่อ)

	Electro microscope		X-ray defflaction	Polarization microscope	Porosimeter	**อื่น ๆ**
	Scanning type	Transmission type				
พิจารณารูปร่างของอนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถทำได้	พิจารณาขนาดตะกอนของอนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
การสังเกตอนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถทำได้	พิจารณาขนาดตะกอนของอนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
พิจารณาการจัดเรียงของโครงสร้างดิน	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
พิจารณาโพรงช่องว่าง	โพรงภายในและภายนอกอนุภาคดิน	โพรงภายใน และภายนอกอนุภาคดิน	ไม่สามารถทำได้	โพรงภายนอกอนุภาคดิน	พิจารณาการกระจายตัวของขนาดโพรง	สามารถทำได้บางส่วน

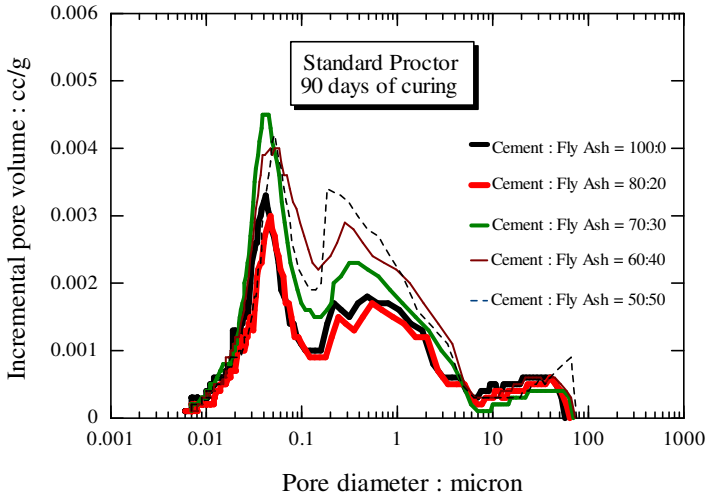
นอกจากนี้ การศึกษานี้เป็นงานภาพถ่ายจุลภาคและการทดสอบ X-ray diffraction โดยปราศจากการทดสอบการกระจายขนาดช่องว่าง ทำให้ไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของแฟบริคได้

เพื่อให้เกิดความกระจ่างเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงแฟบริค สุขสันติ์ หอพิบูลสุขและคณะ (2549) และ Horpibulsuk et al., (2006a) ได้ทดสอบการกระจายขนาดช่องว่างด้วยปรอทและถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ด้วยปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน 5 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน โดยแปรผันอายุบ่มและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ และกล่าวว่าลักษณะการกระจายช่องว่างของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสานที่ปริมาณความชื้นต่ำมีจุดยอดที่เห็นได้ชัด 2 ช่วง คือในช่วง 10-0.1 และ 0.1-0.01 ไมครอน ซึ่งเป็นช่องว่างที่อยู่ระหว่างก้อนดิน (Inter-aggregate pore) ขนาดเล็กและใหญ่ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1.7 และ 1.8 จุดยอดที่เห็นได้ชัดนี้บ่งบอกว่าช่องว่างระหว่างก้อนดิน (Inter-aggregate pore) ทั้งสองขนาดเป็นช่องว่างที่มีปริมาณมากที่สุด ช่องว่างที่

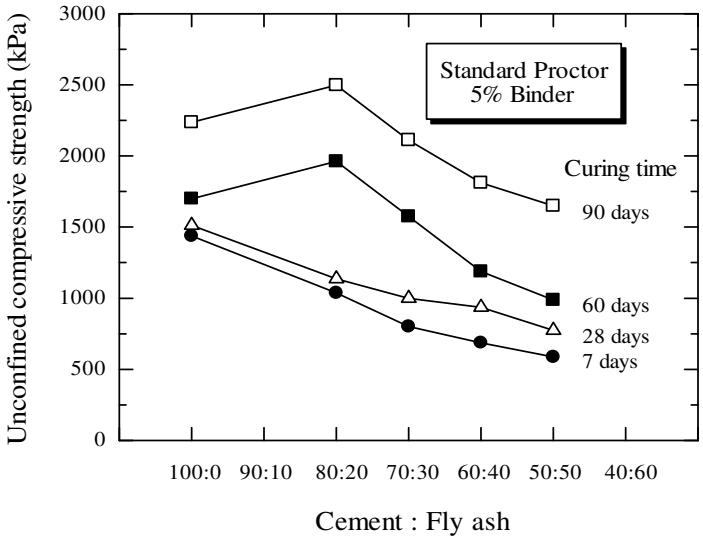
มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน เป็นช่องว่างอากาศ ซึ่งจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation) ช่องว่างที่มีขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน คือช่องว่างภายในก้อนดิน (Intra-aggregate pore) จากภาพที่ 1.7 และ 1.8 ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ค่าหนึ่ง จุดยอดทั้งสองช่วง (ช่วงขนาดช่องว่าง 10-0.01 ไมครอน) มีค่าลดลงตามอายุบ่ม สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เคมีมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มและทำการอุดช่องว่าง ส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย มีค่าเพิ่มขึ้น ที่อายุบ่ม 28 วัน จุดยอดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วน 100:0 มีค่าต่ำที่สุด ขณะที่ ที่อายุบ่ม 90 วัน จุดยอดของดินซีเมนต์ที่อัตราส่วน 80:20 มีค่าต่ำที่สุด ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับค่ากำลังอัดที่ว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังอัดที่อัตราส่วน 100:0 มีค่าสูงที่สุด และที่อายุบ่ม 90 วัน กำลังอัดที่อัตราส่วน 80:20 มีค่าสูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 1.9



ภาพที่ 1.7 ลักษณะการกระจายช่องว่างของดินซีเมนต์-เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ภายใต้อายุบ่ม 28 วัน (สุขสันติ์ หอพิบูลสุขและคณะ, 2549)



ภาพที่1.8 ลักษณะการกระจายช่องว่างของดินซีเมนต์-เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ภายใต้อายุบ่ม 90 วัน (สุขสันติ์ หอพิบูลสุขและคณะ, 2549)



ภาพที่ 1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนซีเมนต์-เถ้าลอย (สุขสันติ์ หอพิบูลสุขและคณะ, 2549)

นอกจากนี้ สุขสันติ์ หอพิบูลสุขและคณะ (2549) ยังได้กล่าวถึงขบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคตั้งแต่เริ่มผสมดินเข้ากับซีเมนต์และเถ้าลอย เมื่อผสมดินเข้ากับซีเมนต์และเถ้า

ลอย ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจะถูกห่อหุ้มด้วยดิน เนื่องจากดินมีอนุภาคที่เล็กกว่าและมีปริมาณที่มากกว่ามาก เมื่อดินซีเมนต์เถ้าลอยนี้ถูกบดอัดจะเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอย (Aggregate) แรงดึงดูดที่เกิดขึ้นภายในก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอยเกิดจากแรงบดอัดและแรงดึงดูดระหว่างแผ่นดินเหนียว ในขณะเดียวกัน เมื่อซีเมนต์สัมผัสกับน้ำในดินจะเกิดเป็นซีเมนต์เจล (Cement gel) รอบและภายในก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอย ซีเมนต์เจลที่อยู่รอบก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอยจะมีขนาดระหว่าง 10 ถึง 0.01 ไมครอน (Inter-aggregate pore) ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดคาพิวลารีระหว่างดินและซีเมนต์เจล ช่องว่างอากาศจะถูกล้อมรอบด้วยซีเมนต์เจล ซีเมนต์เจลแทบจะไม่สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างอากาศได้ เมื่ออายุบ่มมากขึ้น ซีเมนต์เจลจะเกิดการแข็งตัวและกลายเป็นของแข็งแทนที่ช่องว่าง ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณซีเมนต์และเถ้าลอยปนอยู่ในก้อนดิน (clusters) แต่กลับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่างในก้อนดิน อาจเนื่องจากซีเมนต์และเถ้าลอยที่ผสมกับก้อนดินเป็นส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ (Unhydrated) หรืออาจเกิดจากน้ำในก้อนดินมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้เอง ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอายุบ่มและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ก็ตาม แต่แทบจะไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงของปริมาณช่องว่างในก้อนดิน (ขนาด <0.01 ไมครอน) และช่องว่างอากาศ (ขนาด >10 ไมครอน) ดังแสดงในภาพที่ 1.7 และ 1.8

Stephen Guggenheim and A.F. Koster van Groos (2001) ใช้ Thermalgravimetry Analysis, TGA ทำการทดสอบดินเหนียวจำนวน 8 ตัวอย่าง ซึ่งใช้เครื่องมือทั้งหมด 3 ชุด ผลปรากฏว่า ผลการทดสอบจะแตกต่างกันไปตามเครื่องมือ และขั้นตอนวิธีการทดสอบ ซึ่งเงื่อนไขที่ทำให้ผลทดสอบมีความแตกต่างกันคือ การเก็บรักษาตัวอย่าง, เทคนิคของการถ่ายเทไนโตรเจน, และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถึงแม้นว่าการปรับปรุงดินซีเมนต์โดยใช้เถ้าลอยมาทดแทนปริมาณซีเมนต์ยังมีไม่มากนัก แต่ในงานคอนกรีตการนำเถ้าลอยมาทดแทนปริมาณซีเมนต์ได้มีการศึกษาพบว่าคอนกรีตจะมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากรูปร่างของเถ้าลอยมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็กกว่าซีเมนต์ จึงเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ และยังช่วยทำให้คอนกรีตง่ายต่อการเท การทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยเมื่อนำไปผสมในคอนกรีตจะมีลักษณะคล้ายกับ การทำปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ซึ่งต้องอาศัยแร่ดินเหนียวในการทำปฏิกิริยาอันดับที่สอง โดยที่ Silica และ Alumina ซึ่งเป็นธาตุหลักที่มีอยู่ในเถ้าลอยจะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซโลนิกกับสารประกอบ $CaOH_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน ซึ่งการทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในงานดินจะช่วย

ให้การทำปฏิกิริยาอันดับที่สองเกิดเพิ่มมากขึ้นโดยไม่ต้องอาศัย Silica และ Alumina จากแร่ดินเหนียวแต่เพียงอย่างเดียว

Sanupong Boonyong (2004) ใช้ X – ray diffraction ทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของ Marine Clay ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าลอย พบว่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นสามารถชี้ให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยา Hydration และ Pozzolonic ที่เกิดขึ้นภายในมวลดินโดยใช้เครื่อง X – ray diffraction ซึ่งการพัฒนากำลังอัดจะบอกถึงชนิดและปริมาณของผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยา Hydration และการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมีความหมายรวมถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณ CSH ที่ได้จากปฏิกิริยา Hydration การเพิ่มเถ้าลอยลงไปผสมในปริมาณที่มาก จะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยา Hydration ให้ดีขึ้น และช่วยเพิ่มกำลังอัดในระยะยาว

เอกสิทธิ์ และวิศว (2542) แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์มีส่วนอย่างมากในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซโซนิกของซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอย การศึกษาวิจัยเพื่อให้รู้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยการทดสอบโดยวิธี Thermalgravimetry Analysis, TGA สามารถคำนวณหาปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นโดยการคำนวณมวลโมเลกุลของสมการเคมีเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดและคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตามขอบข่ายคอนกรีตสมรรถนะสูง ได้ศึกษาเปรียบเทียบกับปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นและที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในคุณสมบัติในสภาพไหล และสภาพแข็งตัว

Kamruzzaman et al. (2006) ได้ศึกษาดินสมุทรสิงคโปร์ ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีแร่ดินเหนียวอิวไลท์และแร่ดินเหนียวคาโอลิกไนท์ปน พวกเขาพบว่าการผสมปูนซีเมนต์เข้าไปมีผลให้ดินเหนียวมีแร่คาโอลิกไนท์ลดลงและหมดไปเมื่อผสมปริมาณปูนซีเมนต์เข้าไปเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณแร่อิวไลท์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม และยังพบอีกว่าโครงสร้างดินมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบ Flocculation มากขึ้นตามอายุบ่มและมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินกระจายอยู่มาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำในการผสมด้วยอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1 แต่อย่างไรก็ตามพวกเขายังไม่ได้อธิบายถึงแร่ประกอบดินเหนียวมีผลต่ออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์และการพัฒนากำลังของดินปรับปรุง

ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสานดังได้กล่าวแล้วข้างต้น แต่ก็ยังไม่ปรากฏงานวิจัยใดทำการศึกษาครอบคลุมตัวแปรควบคุม (อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในช่วงปริมาณความชื้นสูง

ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน อายุบ่ม อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์) และครอบคลุมการทดสอบทางด้านโครงสร้างจุลภาค (การกระจายขนาดช่องว่าง การส่องภาพจุลภาคและการทดสอบ Thermogravimetric Analysis) ที่ปริมาณความชื้นสูงได้ทั้งหมด งานวิจัยนี้จะใช้ความรู้ทั้งหมดที่ได้ทบทวนในส่วนนี้เป็นความรู้พื้นฐานในการทำการทดสอบ วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ