บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ถนนเป็นสาธารณูปโภคพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศ เป็นสิ่งก่อสร้างที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการคมนาคมและขนส่งของประชาชน เพื่อนำความเจริญจากชุมชนเมืองสู่ท้องถิ่น นอกจากประโยชน์ต่อประเทศชาติและประชาชนดังกล่าวแล้ว ยังมีความจำเป็นต่อระบบเศรษฐกิจ การขยายตลาดแรงงาน การเพิ่มการกระจายรายได้ และพัฒนาท้องถิ่นให้มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยทำให้ประเทศชาติมีความมั่นคงทางเศรษฐกิจและสังคมที่ยั่งยืน

ถนนจึงนับเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อชุมชนมาก ความสำคัญในการพัฒนาและแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อชุมชนและเป็นการบริการชุมชนทางตรงและทางอ้อม เพื่อนำไปสู่การพัฒนาศักยภาพและการแก้ปัญหาของชุมชนในทุกระดับ ตั้งแต่ระดับท้องถิ่นจนถึงระดับประเทศ ถนนที่มีคุณภาพดีย่อมทำให้การคมนาคมมีความคล่องตัว ทำให้เกิดการขยายตัวทางเศรษฐกิจ การท่องเที่ยว ช่วยประหยัดพลังงานน้ำมันซึ่งมีราคาแพงขึ้นทุกวัน และยังช่วยสนับสนุนการขยายตัวของสังคมเมืองสู่สังคมชนบท เกิดการพัฒนาเศรษฐกิจแบบยั่งยืน และลดการเกิดอุบัติเหตุขณะขับขี่ยานพาหนะเนื่องจากถนนไม่มีคุณภาพหรือความชำรุดของถนน

การก่อสร้างถนนนั้น จำเป็นต้องมีการสำรวจดิน เพื่อหาแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพดีเพื่อใช้ในการก่อสร้าง แหล่งวัสดุจึงจำเป็นอย่างยิ่งและเป็นสิ่งสำคัญมาก ถ้าแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพดีอยู่ใกล้เคียงเส้นทางที่ทำการก่อสร้างจะเป็นการประหยัดเงินงบประมาณแผ่นดินมาก เนื่องจากจะช่วยลดต้นทุนจากค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงานไปด้วย ดังนั้นในการสำรวจแหล่งวัสดุจึงพยายามหาแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพดีที่สุดและใกล้ที่สุดมาใช้ในการก่อสร้าง ปัจจุบันการพัฒนาเศรษฐกิจและโครงสร้างพื้นฐานของประเทศชาติได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วมาก โดยเฉพาะการก่อสร้างถนนเพื่อรองรับแผนขยายเศรษฐกิจประเทศและการผลิตล้วนทำให้มีการใช้วัสดุจากธรรมชาติมากขึ้น จนหาวัสดุที่ได้มาตรฐานในการก่อสร้างยากหรือห่างไกลจากแหล่งก่อสร้าง ดินคันทางที่มีคุณภาพดีเหมาะสมจะต้องสามารถรับน้ำหนักได้ดี บดอัดแน่นได้ง่ายและมีความแข็งแรงทนทาน แต่ดินคันทางในบางที่มีคุณภาพวัสดุด้อยกว่ามาตรฐานและรับกำลังได้น้อย (รูปที่ 1.1) ซึ่งจำเป็นจะต้องหาวัสดุจากแหล่งอื่นที่มีคุณภาพสูงกว่ามาทดแทนวัสดุที่ด้อยคุณภาพ การวิจัยนี้จึงเล็งเห็นความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาอย่างจริงจัง และเห็นความสำคัญของวัสดุใน

ธรรมชาติซึ่งเริ่มน้อยลดลง การปรับปรุงคุณภาพดินคันทางที่มีคุณภาพด้อยกว่ามาตรฐานให้สามารถรับกำลังเพิ่มมากขึ้นนั้น เป็นแนวทางหนึ่งในการลดการทำลายแหล่งวัสดุธรรมชาติลงได้ และเพื่อเป็นฐานข้อมูลหรือองค์ความรู้ให้กับวิศวกรและผู้เกี่ยวข้องได้นำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาอ้างอิงได้อย่างถูกต้องและลดต้นทุนในการก่อสร้าง

ลักษณะของดินคันทาง (Subgrade) ที่เป็นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) มีความชื้นสูงและรับกำลังได้น้อยซึ่งมีผลต่อความมั่นคงของถนน โดยเฉพาะในประเด็นของการทรุดตัวและเสถียรภาพความลาดของถนน (รูปที่ 1.2) ซึ่งจะนำไปสู่การซ่อมแซมและอายุการใช้งานน้อยลง (รูปที่ 1.3 และ 1.4) ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีผลต่อการพัฒนาระบบเศรษฐกิจของประเทศ การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินคันทาง ซึ่งมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนให้มีกำลังเพิ่มขึ้น โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ผสมกับดินเหนียวอ่อน โดยใช้พื้นที่กรณีศึกษา คือ บริเวณที่เป็นที่ลุ่มน้ำขัง (Swamp) มีดินเหนียวอ่อนและความชื้นสูง เป็นบริเวณที่มีการก่อสร้างถนนพาดผ่านในจังหวัดสงขลาและจังหวัดสตูล

รูปที่ 1.1 การทรุดตัวของถนนบริเวณคอสะพาน เนื่องจากการก่อสร้างถนนบนชั้นดินอ่อน

รูปที่ 1.2 การวิบัติของถนนแบบเสถียรภาพความลาด เนื่องจากการก่อสร้างถนนบนชั้นดินอ่อน

รูปที่ 1.3 การวิบัติของถนนแบบร่องล้อ ถนนเกิดการทรุดตัวบริเวณที่แนวล้อรถวิ่งผ่านซ้ำๆกัน เนื่องจากการก่อสร้างถนนบนชั้นดินอ่อน

รูปที่ 1.4 การวิบัติของถนนแบบความเค้นดึง ถนนเกิดการแยกตัวแนวกึ่งกลางถนนเกิดจากความเค้นดึงที่เกิดจากการทรุดตัวของถนน เนื่องจากการก่อสร้างถนนบนชั้นดินอ่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เปรียบเทียบกำลังของดินคันทางเดิมกับดินคันทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในพื้นที่จังหวัดสงขลาและจังหวัดสตูล

2. ตรวจโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของดินคันทางที่ปรับปรุง

3. ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติของกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS, q_u) ปริมาณปูนซีเมนต์ อายุการบ่ม และปริมาณความชื้น ของดินคันทางที่ปรับปรุง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เก็บตัวอย่างดินคันทางแบบเสียสภาพที่ระดับความลึก 0.00-3.00 ม. ในพื้นที่จังหวัดสงขลาจังหวัดสตูล

2. ตรวจโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของดินคันทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของดินในพื้นที่จังหวัดสงขลาและจังหวัดสตูล โดยพิจารณาจากผลการตรวจสอบทางห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ คือ การตรวจโครงสร้างจุลภาคโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดินซีเมนต์ (ดินผสมปูนซีเมนต์) ในระดับจุลภาคของเนื้อดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ การตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุที่อยู่ในดินซีเมนต์ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ และการตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) เพื่อศึกษาการก่อตัวแร่จากสารประกอบที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาของ ดิน ปูนซีเมนต์ และน้ำที่อยู่ในดินซีเมนต์ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

3. ทดสอบแรงอัดแกนเดียวแบบไม่คายน้ำของดินคันทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของดินคันทางในพื้นที่จังหวัดสงขลาและสตูล ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

4. วิเคราะห์เชิงสถิติด้วยสหสัมพันธ์ของตัวแปร กำลังอัดแกนเดียว ปริมาณปูนซีเมนต์ อายุการบ่ม และปริมาณความชื้น ในรูปสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Variable Regression)

5. ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ของตัวอย่างที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดเพื่อนำไปวิเคราะห์การทรุดตัว

6. ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมไม่เกินร้อยละ 20 ของน้ำหนักดินแห้ง และอายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เป็นแนวทางการพัฒนากำลังของดินคันทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในพื้นที่จังหวัดสงขลาและจังหวัดสตูล

2. เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบถนนในพื้นที่ที่มีสภาพดินเป็นดินอ่อน

1.5 ทบทวนเอกสาร

1.5.1 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์

การที่ดินซีเมนต์มีความสามารถในการรับกำลังได้เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการผสมดินอ่อนกับปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เกิดจากปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่าง ดิน ปูนซีเมนต์ และน้ำ ซึ่งได้มีผู้ศึกษาจำนวนมากได้อธิบายกระบวนการของการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวไว้ ดังนี้

วิวรรธน์ วงศ์วานศรีสุข (2546) Herzog และ Mitchell (1963) และ Moh (1965) พบว่าเมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Released Hydration Lime กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH ซึ่งมีกลสมบัติเป็นวัตถุประสาน นอกจากนี้ Released Hydration Lime ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าว จะทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำในโพรง (Pore Water) เพิ่มขึ้น อันเป็นผลทำให้วุ้นแขวนลอย (Colloid Gel) หรือ วุ้นซีเมนต์ (Cement Gel) เกิดการเกาะก่อตัวเข้าด้วยกัน (Flocculate) แล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น กระบวนการ Cement Hydration ของมวลดินที่ประกอบด้วยดินเม็ดหยาบการยึดเกาะที่เกิดขึ้นจะคล้ายๆ กับกระบวนการเกิด Cement Hydration ในคอนกรีต แต่แตกต่างกันตรงที่ดินผสมซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์จะไม่เต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน แรงเชื่อมยึดหลักของดินผสมซีเมนต์ที่ประกอบด้วยดินเม็ดหยาบเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้านเชิงกลของ CSH และ CAH ที่ผิวของอนุภาคดิน ส่วนดินเม็ดละเอียดเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์แรงเชื่อมยึดจะประกอบไปด้วย การยึดเกาะกัน เชิงกล และแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับซิลิกา (Silica) และ อะลูมินา (Alumina) ที่ผิวของอนุภาคดิน ทำให้เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ซึ่งเป็นวัสดุประสาน

Moh (1965) และ ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ (2531) ได้อธิบายไว้ว่าปฏิกิริยา Cement Hydration สามารถเขียนออกมาในรูปของสมการ ได้ดังนี้

$$\text{Cement} + H_2O \rightarrow \text{CSH} + \text{CAH} + Ca(OH)_2 \quad (1.1)$$

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{++} + 2(OH)^-$$

$$Ca^{++} + 2(OH)^- + \text{Soil Silica } (SiO_2) \rightarrow \text{CSH} \quad (1.2)$$

$$Ca^{++} + 2(OH)^- + \text{Soil Alumina } (Al_2O_3) \rightarrow \text{CAH} \quad (1.3)$$

จะเห็นได้ว่าผลของปฏิกิริยา Cement Hydration ในดินซีเมนต์จะก่อให้เกิดสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH) และสาร Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งมีกลสมบัติเป็นตัวเกาะยึด ดังแสดงในสมการที่ (1.1) (1.2) และ (1.3)

สมการที่ (1.1) เป็นสมการที่แสดงถึงสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH) และสาร Calcium Aluminate Hydrate (CAH) เกิดจากปฏิกิริยาของ Cement Hydration โดยตรงจึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่าปฏิกิริยาปฐมภูมิ (Primary Reaction) ส่วนสมการที่ (1.2) และสมการที่ (1.3) เป็นสมการที่แสดงว่าสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH) และสาร Calcium Aluminate Hydrate (CAH) เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่างสาร Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) กับสาร Silica และสาร Alumina ในดิน ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่าปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Secondary Reaction)

Pendola, et al. (1969) ได้สรุปถึงการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ว่า เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี ระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และดิน ซึ่งประกอบด้วยกลไก 4 ประการ คือ

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) คือ กระบวนการที่สำคัญที่สุดในขณะที่ปูนซีเมนต์กำลังทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะทำให้เกิดการประสานแน่นระหว่างเม็ดดินและก่อตัวกันเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันมากบ้างน้อยบาง ทำให้เม็ดดินที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายดังกล่าวนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ทำการปรับปรุงคุณภาพแล้วยังแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวจากน้ำ รวมทั้งการเพิ่มความคงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นในบริเวณรอบๆ ด้วย

2. การแลกเปลี่ยนอนุมูลบวก (Cat-ion Exchange) กลสมบัติที่สังเกตได้ประการแรกจากการผสมปูนซีเมนต์กับดินประเภทดินเหนียว (Cohesive Soil) ที่มีความชื้นอยู่ก็คือการลดค่าสภาพพลาสติก (Plasticity) ของดินนั้น ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cat-ion) หรือเกิดจากการรวมตัวกันของแคตไอออนบนผิวของเม็ดดิน ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังจากการผสมซีเมนต์ และถือว่าเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญรองจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration)

3. การเกิดคาร์บอเนต (Carbonation) คือ กระบวนการการประสานแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับปูนขาว (Lime) ที่เกิดจากปฏิกิริยา Hydration เกิดเป็น Calcium Carbonate ทำให้เกิดสารประสานแน่นเพิ่มขึ้น

4. ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) คือ กระบวนการที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวอิสระ (Free Lime) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างการทำปฏิกิริยา Hydration กับ ซิลิกา หรือ อะลูมินา ทำให้เกิดการประสานและเกิดการยึดเกาะในวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ แต่ปฏิกิริยานี้ต้องใช้เวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุเพิ่มขึ้น

Mitchell และ Jack (1966) ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 1.5 โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

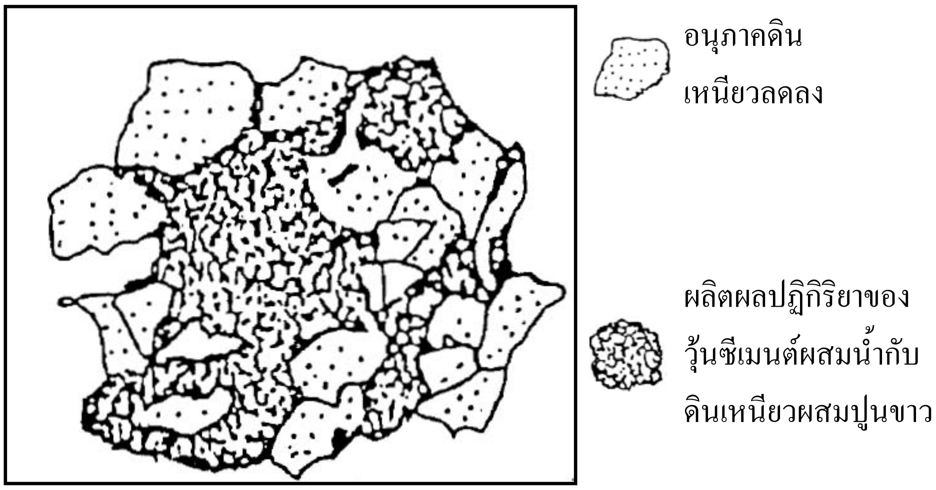
1. ภายใต้การบดอัดเป็นช่วงที่ซีเมนต์ไม่เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ซีเมนต์จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังแสดงในรูปที่ 1.5 (ก)

2. ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา Hydration จะเริ่มเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ซึ่งทำให้เกิด Cement Gel เข้าไปแทรกซึมตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินและปูนขาวปล่อยออกมา (Released Lime) เริ่มทำปฏิกิริยากับดินซิลิกามีพลัง (Active Soil Silica) หรืออะลูมินามีพลัง (Active Soil Alumina) ในสารละลายจะเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของซิลิกาดิน (Soil Silica) หรืออะลูมินาดิน (Soil Alumina) ในดินและผลของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะแผ่กระจายไปตามอนุภาคของดิน ดังแสดงในรูปที่ 1.5 (ข)

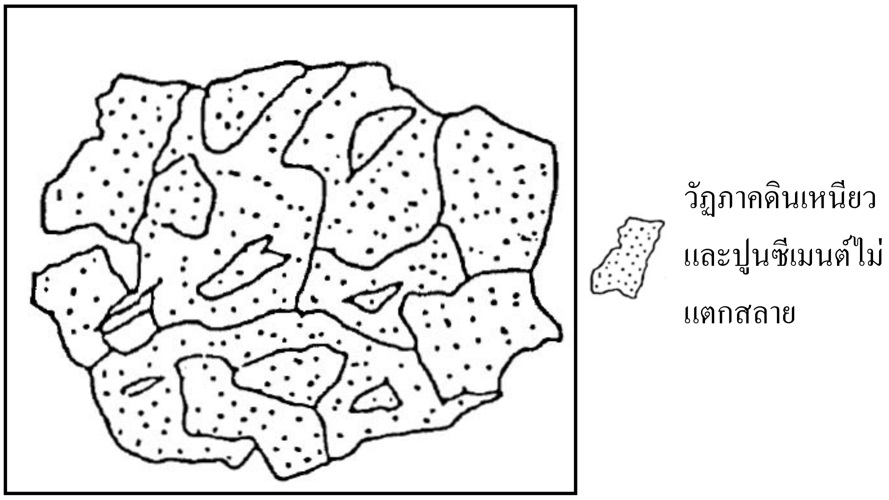
3. ภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของซีเมนต์จะเกิดกระบวนการ Cement Hydration อย่างสมบูรณ์ ผลทำให้ปริมาณ Cement Gel และขอบเขตการแทรกซึมของ Cement Gel แผ่กระจายไปทั่ว ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.5 (ค)

จากที่กล่าวมา 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 จะไม่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติแต่จะไปเกิดพร้อมกับขั้นตอนที่ 2 ทีเดียว เพราะว่าซีเมนต์เมื่อผสมน้ำความชื้นในมวลดินหรืออากาศก็จะทำปฏิกิริยา Cement Hydration อย่างรวดเร็ว

(ก) สถานะช่วงการบดอัด



(ข) สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น



(ค) สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว

รูปที่ 1.5 โครงสร้างการเกิดของดินซีเมนต์ (Mitchell และ Jack (1966))

1.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มความมั่นคงของดินได้ถูกนำมาใช้มาก ทั้งงานในแนวราบและแนวลึกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดการการทรุดตัวของดิน ปูนซีเมนต์ได้มีการใช้กันมากเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน วิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาโดยประมาณตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 เป็นต้นมาทั้งในประเทศสวีเดนและประเทศญี่ปุ่น ปูนซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในงานถนนด้วยเพื่อเพิ่มการรับแรงแบกทาน (Soil Bearing Capacity) ของดินในชั้นคันทาง (Subgrade) หรือเพิ่มลดความหนาของชั้นพื้นทาง (Base Course) ต่อมาได้มีการใช้งานมากขึ้นสำหรับงานเชิงลึก และได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Mitchell (1976) พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวโดยทั่วไปกราฟจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเทียบกับปริมาณร้อยละของปูนซีเมนต์ สำหรับขนาดเม็ดหยาบของดินทรายแป้งและดินเหนียวจะเพิ่มขึ้น ค่าปัจจัยของความแข็งแรงอื่น เช่น การยึดเกาะกัน (Cohesion) และมุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) จะเพิ่ม ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์และเวลา ซึ่งจะแตกต่างกับปริมาณร้อยละของปูนขาวจะเป็นกราฟเส้นโค้ง Mitchell (1976) ได้สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u ปริมาณปูนซีเมนต์และเวลาการบ่มของดินซีเมนต์ ดังนี้

$$q_u(t) = q_u(t_0) + K \cdot \log \frac{t}{t_0} \tag{1.4}$$

เมื่อ $q_u(t)$ = กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม t วัน, kPa

$q_u(t_0)$ = กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม t_0 วัน, kPa

K = $480C$ สำหรับดินทราย

= $70C$ สำหรับดินเหนียว

C = ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักดิน

นอกจากนี้ Mitchell (1976) ยังพบว่าหน่วยแรงดัด (Bending Stress) จะมีค่าประมาณร้อยละ 20-30 ของกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u) การเพิ่มปูนซีเมนต์ปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ชั้นรองพื้นทางของดินจะขยายตัวทำให้การหดตัว (Shrinkage) และการบวมตัว (Swell) ลดลง โดยทั่วไปต่ำกว่าร้อยละ 1

เกษม เพชรเกตุ และ วรกร สุขมงคล (2527) ได้ศึกษาสมบัติกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ โดยทำการศึกษาผลกระทบของขนาดและอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างดินซีเมนต์ โดยที่กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.00, 1.50 และ 1.80 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.00 ร้อยละ 6, 3 และ 1 ตามลำดับ

ทรงพล บุญมาดี (2529)ได้ทดลองนำดินลูกรังผสมซีเมนต์ ไปทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ CBR และค่า E_i กับ CBR โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 1, 3, 5, 7 ส่วนเวลาการบ่มใช้เวลา 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งสรุปผลได้ว่าปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 3 ขึ้นไป จะมีผลทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดและเมื่ออายุการบ่มมากขึ้นปฏิกิริยาเคมีกับอนุภาคดินจะมีผลต่อกำลังอัดสูงด้วย

สุเชษฐ์ เอี่ยมเชย (2531) ทำการศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของดินซีเมนต์ โดยปรับปรุงสมบัติของดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อจะมาใช้แทนหินคลุก โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ร้อยละ 3, 4, 6 และ 7 ของน้ำหนักดินผึ่งแห้ง พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) และ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้นสูงมากในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

Ruenkrairergsa (1982) รายงานว่ากรมทางหลวงได้ใช้มาตรฐานของ British Road Research Laboratory ในการกำหนดค่ากำลังอัดเท่ากับ 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แต่ได้ดัดแปลงโดยการบ่มตัวอย่าง 7 วัน แล้วนำมาแช่น้ำ 1 วัน ก่อนนำไปทดสอบกำลังอัด การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังอัดแปลงมาจากวิธีของสมาคมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อเมริกา และจากประสบการณ์ในการก่อสร้างถนนโดยใช้ดินลูกรังผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยในช่วงเวลาประมาณ 30 ปีที่ผ่านมาซึ่งมีระยะทางยาวประมาณ 1400 กม. โดยพบว่าสำหรับค่ากำลังอัด 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะใช้ปริมาณซีเมนต์ประมาณร้อยละ 3 ถึง 5 ของน้ำหนักดินก็เพียงพอ สำหรับดินลูกรังที่มี PI สูงกว่านี้สามารถแก้ไขได้โดยผสมปูนขาวร้อยละ 2 ลงไปเพื่อลดค่า Plasticity Index ก่อนที่จะผสมซีเมนต์ ค่ากำลังอัดที่ได้จากข้อมูลงานก่อสร้างถนนซีเมนต์ในระยะสั้น จะมีค่า 250-400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ได้แสดงในตารางที่ 1.1 และ 1.2

ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ (Ruenkrairergsa (1982))

สถาบัน	ข้อกำหนดการออกแบบ
กรมทางหลวง ประเทศไทย	รับกำลังอัดเมื่ออายุ 7 วันไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด	CBR ไม่น้อยกว่า 120
British Road Research Laboratory	รับกำลังอัดเมื่ออายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
กรมทางหลวง ประเทศกานา	CBR ไม่น้อยกว่า 200
ประเทศอัฟริกา ส่วนมาก	CBR ไม่น้อยกว่า 180
National Association of Australia State Road Authorities (NAASRA) ประเทศออสเตรเลีย	1. รับกำลังอัดเมื่ออายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 150 – 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 2. CBR เมื่อบ่ม 7 วัน และแช่น้ำ 4 วัน ไม่น้อยกว่า 120

ตารางที่ 1.2 มาตรฐานสำหรับงานดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง ประเทศไทย

ชนิดของการใช้งาน	ค่า UCS เมื่ออายุบ่ม 7 วัน
พื้นทางหินคลุกผสมปูนซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (24.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
พื้นทางดินซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
รองพื้นทางดินซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (7.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
คันทางดินซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 85 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (6.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาค่าความแข็งแรงของดินแกรนิตผสมปูนซีเมนต์โดยมีการแบ่งตามการจำแนกดิน คือ กลุ่ม A-1 ถึง กลุ่ม A-7 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ค่า UCS ของดินแกรนิต ซึ่งปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมปูนซีเมนต์ (Ruenkrairergsa (1982))

AASHTO Soil Group	UCS at 3, 4 and 5 % Cement, Curing for 1, 7 and 28 days×100 kN/m^2 (100 kN/m^2 = 14.50 lb/in^2)								
	3 % Cement			4 % Cement			5 % Cement		
	1 Day	7 Days	28 Days	1 Day	7 Days	28 Days	1 Day	7 Days	28 Days
A–1-b	11-16	17-26	22-31	17-24	24-33	28-40	20-28	28-35	36-45
A-2-4	10-15	15-26	18-32	15-24	20-31	24-37	20-27	26-39	31-46
A-4, A-5	8-16	15-25	18-30	13-20	22-29	27-35	18-23	27-32	33-39
A-6, A-7	6-13	10-19	12-24	9-15	13-23	19-28	11-20	17-28	25-34

การนำความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของ Proctor มาใช้กับดินซีเมนต์แล้วพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นของดินนั้นไม่ได้ให้ความหนาแน่นสูงสุดเพียงอย่างเดียวแต่ความชื้นดังกล่าวยังก่อให้เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ด้วยสำหรับดินซีเมนต์ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดไม่จำเป็นที่ต้องให้ค่า Maximum Strength หรือ Maximum Durability เสมอไป ยกตัวอย่าง เช่น ดินตะกอนและดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ความคงทนต่อเย็นแข็งตัวและละลาย (Freeze-Thaw Durability) จะมีค่าสูงสุดเมื่อบดอัดที่ได้ความชื้นที่ OMC หรือเหนือ OMC เล็กน้อย แต่ถ้าบดอัดที่ความชื้นต่ำกว่า OMC จะมีผลทำให้ Durability มากขึ้นเช่นกัน กำลังสูงสุดของดินทรายอยู่ที่ผสมปูนซีเมนต์จะอยู่ที่ความชื้นใต้ OMC ประมาณร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 6 ส่วนดินเหนียวจะอยู่ที่ความชื้นเหนือ OMC เล็กน้อย

และยังพบว่า ดินเกือบทุกชนิดสามารถนำมาทำดินซีเมนต์ โดยดินที่เม็ดหยาบจะผสมและบดอัดได้ดีกว่าดินเม็ดละเอียดและยังประหยัดกว่า เพราะจะใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่าเนื่องจากดินเม็ดละเอียดมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่าดินเม็ดหยาบ

อุดม มาศสุวรรณ และ โรจนกร เลิศปิยะนันทกูร (2536) ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของดินปรับปรุงคุณภาพ โดยทำการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนของโครงการปรับปรุงถนนเลียบชายฝั่งทะเล ถนนบางบนชายทะเล โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์อัตราส่วน

200,300 และ 400 กก./ม.^{3} ของดินเหนียว โดยพบว่าดินที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติแล้วมีกำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นประมาณ 213 เท่า และมีค่าหน่วยแรงดัดประมาณร้อยละ 33-45 ของค่ากำลังอัดแกนเดียว

พินิต ตั้งบุญเติม และ เกษม เพชรเกตุ (2536) พบว่ามีชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Bangkok Clay) ตกตะกอนหนาดินเหล่านี้มีกำลังต่ำและมีการทรุดตัวสูง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการก่อสร้างมาก ไม่ว่าจะเป็นงานอาคาร ถนน ทางด่วน ท่าอากาศยาน งานขุด ฯลฯ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะทำให้มีค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (Undrained Shear Strength) สูงขึ้นตามอายุและอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ ในการศึกษาครั้งนี้ดินเหนียวอ่อนมีค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (S_u) อยู่ระหว่าง 0.30-1.50 ตัน/ม.^{2} ค่า $E_{50} = 75\ S_u$ เมื่อทำการผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 200 กก./ม.^{3} ของดินเปียกแล้ว ได้พบว่าดินผสมซีเมนต์มีค่า S_u ประมาณ 20 ตัน/ม.^{2} และ $E_{50} = 100\ S_u$

Bell (1993) กล่าวว่า สำหรับดินทีมีสารจำพวกอินทรีย์วัตถุ (Organic Material) และทรายแป้ง (Silt) ผสมอยู่ในปริมาณมากเกินไปนั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน เนื่องจากอินทรียวัตถุและทรายแป้งสามารถดูดซับไอออนแคลเซียม (Calcium Ion) ที่มีอยู่ในดินทำให้เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration น้อยลงผล คือ ดินซีเมนต์ที่ได้จะรับกำลังได้ต่ำ และดินที่นำมาใช้ทำดินซีเมนต์ไม่ควรมีส่วนผสมของอินทรีย์วัตถุเกินร้อยละ 2 อย่างไรก็ตามการเติมสารจำพวก Calcium Chloride หรือ Hydrated Lime ลงไป จะช่วยลดการดูดซับไอออนแคลเซียมของดินอินทรีย์ (Organic Soil) ลงได้ และการผสมยิปซัม (Gypsum) ลงไปในดินอินทรีย์ประมาณร้อยละ 10 จะทำให้ดินซีเมนต์ที่ได้มีกำลังสูงกว่าการใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

เกษม เพชรเกตุ และโกศล ไกรพัฒนพงศ์ (2544) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์ อินทรียวัตถุ และค่าความเป็นกรด ต่อกลสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์แบบเปียก ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณอินทรีย์วัตถุจะมีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ คือ ถ้าหากปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่ามากจะทำให้ค่ากำลังของดินซีเมนต์ต่ำสำหรับการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่มน้อย ถ้าหากต้องการเพิ่มกำลังของดินซีเมนต์จะต้องเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์ให้มากขึ้นหรือเพิ่มอายุบ่มที่มากขึ้น เช่นเดียวกันกับค่าความเป็นกรดของดิน ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ คือ ดินที่ค่าความเป็นกรดสูง (pH ต่ำ) จะส่งผลทำให้ค่า

กำลังอัดของดินซีเมนต์ต่ำ ถ้าหากใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่มน้อย และค่ากำลังอัดจะสูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดลดลง สำหรับดินที่ค่าความเป็นกรดสูงจะต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่มที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่สูงขึ้น

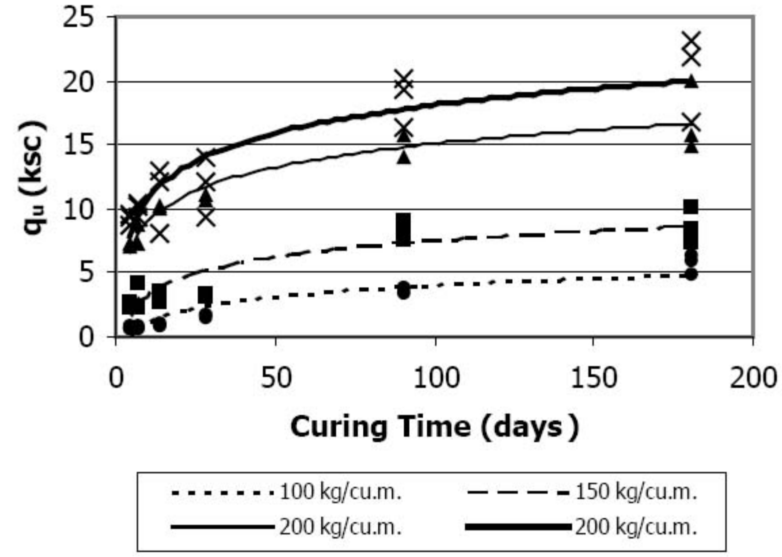
ณรงค์ชัย ภัทรสัจจธรรม (2544) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพดินพรุโดยใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งทำการศึกษาสมบัติของดินพรุโต๊ะแดงทางด้านกายภาพ ด้านวิศวกรรม และด้านเคมีของดินพรุธรรมชาติ โดยนำดินพรุของถนนสายนราธิวาส-ตากใบ และถนนสายตากใบ-สุไหงโกลก ที่ความลึก 3, 6 และ 10 ม. มาทำการศึกษาหาสมบัติต่างๆ และนำไปผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 100, 125, 150, 200 และ 250 กก. ต่อน้ำหนักดินเปียก 1 ม.^{3} ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) เพื่อหาค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E_{50})

ผลการทดสอบดินพรุตามธรรมชาติจะพบว่า ดินพรุที่ความลึก 3, 6 และ 10 ม. ของถนนสายนราธิวาส-ตากใบ มีค่า S_u โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.07, 0.04, และ 0.03 กก./ซม.^{2} มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ เท่ากับร้อยละ 24.7, 15.8 และ 12.9 ตามลำดับ และถนนสายตากใบ-สุไหงโกลก มีค่า S_u โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.11, 0.06, และ 0.07 กก./ซม.^{2} มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ เท่ากับร้อยละ 7.9, 11.3 และ 14.2 ตามลำดับ ดินพรุที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุและสภาพความเป็นกรดที่อยู่ในดินจะมีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ ดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่มากจะต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่น้อย จากเกณฑ์ของการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงกำหนดให้ค่า S_u ที่อายุบ่ม 28 วัน ต้องมากกว่า 3 กก./ซม.^{2} จากการศึกษาพบว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินพรุโต๊ะแดงสำหรับทำเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากับ 250 กก./ม.^{3}

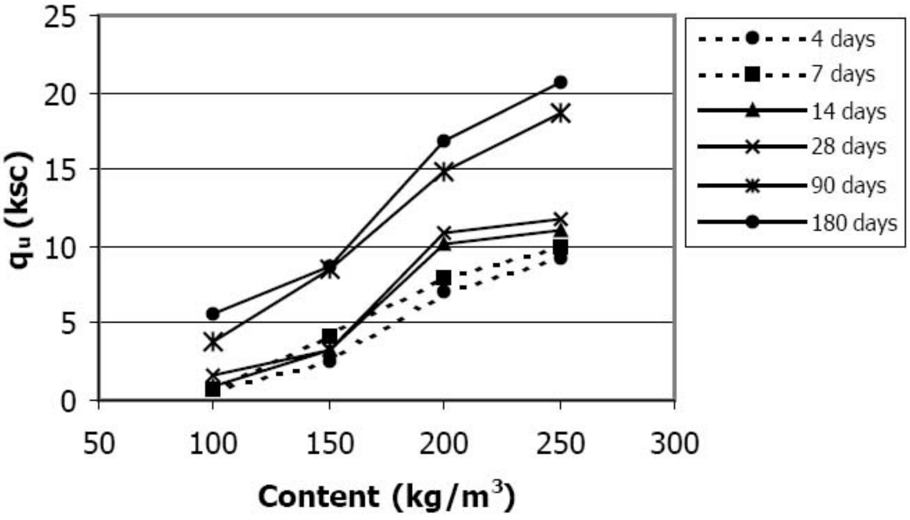
โชดก สันติสวัสดิ์ และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนซีเมนต์สำหรับงานพื้นทาง (กรณีศึกษา ถนนสาย 3117 บริเวณคลองด่าน-บางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ) ที่มีปัญหาในด้านการทรุดตัวของชั้นดินที่รองรับโครงสร้างถนน ให้มีความสามารถในด้านกำลังของดินสูงขึ้น ซึ่งลักษณะของดินในบริเวณดังกล่าวมีสมบัติในด้านกำลังต่ำ และได้มีผู้เคยทำการวิจัยในเรื่องการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มาทำการปรับปรุงสมบัติของดินแต่ค่าที่ได้มายังน้อยเกินไปจึงเป็นที่มาถึงการทำวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งในการทำการวิจัยในครั้งนี้ได้ทดลองเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์เข้าไปให้มากกว่าเดิม ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6 , 8 และ 10 ตามลำดับ (เทียบกับน้ำหนักดินตามธรรมชาติ) โดยควบคุมปริมาณ Moisture Content ให้ใกล้เคียงกัน คลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 ผลการวิจัย

พบว่า ค่า UCS ของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ และ อายุการบ่มที่มากขึ้นตามลำดับ โดยค่ากำลังสูงสุดของดินซีเมนต์ทั้งสองชนิดจะมีค่ามากที่สุดที่อายุการบ่มที่ 7 วัน และค่ากำลังอัดแกนเดียว(UCS) ของ ดินซีเมนต์ประเภทที่ 1 จะเริ่มเพิ่มขึ้นน้อยลงหลังจาก 7 วันไปแล้ว แต่ในส่วนของค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะเริ่มเพิ่มขึ้นน้อยลงหลัง จาก 7 วันไปจนถึง 14 วันและค่าจะเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งใน ช่วง 28 วัน ได้ผลดังนี้ ดินที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 6, 8 และ 10 จะได้ค่า UCS เท่ากับ 16.79, 24.88 และ 35.17 ตัน/ม.^{2} ตามลำดับ และดินที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 6, 8 และ 10 จะได้ค่า UCS เท่ากับ 28.93, 46.04 และ 51.14 ตัน/ม.^{2} ตามลำดับ ในส่วนของค่าการทรุดตัวของดินหลังการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) พบว่าการทรุดตัวของดินซีเมนต์น้อยมาก อันเนื่องมาจากการใส่ปูนซีเมนต์ลงไปทำให้สมบัติของดินในด้านกำลังดีขึ้น

ศุภกิจ นนทนานันท์ และ กมล อมรฟ้า (2545) เป็นการศึกษาถึงผลของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว ดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) มีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 93.5 มีค่าความเป็นพลาสติกร้อยละ 60.2 ค่ากำลังอยู่ในช่วง 0.08-0.21 กก./ซม.^{2} นำดินตัวอย่างมาผสมปูนซีเมนต์และปูนขาว ที่ปริมาณ 100, 150, 200 และ 250 กก./ม.^{3} โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัตถุประสานเท่ากับ 0.8 จากนั้นทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว ที่อายุการบ่ม 4, 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าดินผสมปูนซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในระยะแรกตั้งแต่ผสมจนถึง 28 วัน และหลังจากนั้นกำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในระยะยาว (รูปที่ 1.6) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังเพิ่มขึ้นด้วย (รูปที่ 1.7) ผลจากการทดสอบการทรุดตัวพบว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติทางวิศวกรรม เช่นค่า C_v, k, C_r และ C_c ลดลง ในขณะที่ค่า P_c เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่า UCS (ศุภกิจ นนทนานันท์ และ กมล อมรฟ้า, 2545)



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับค่า UCS (ศุภกิจ นนทนานันท์ และ กมล อมรฟ้า, 2545)

เชิดชนินทร์ หมดมลทิน และคณะ (2548ก) ได้นำเสนออิทธิพลของแร่ดินต่อดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของเบนโทไนต์ และเคโอลิไนต์ในดินเหนียวกรุงเทพ ด้วยวิธีการผสมเคโอลิไนต์ และเบนโทไนต์เข้ากับดินเหนียวกรุงเทพ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาอิทธิพลของไดอะตอมและไพไรต์ในดินเหนียวกรุงเทพต่อการต่อการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวของเบนโทไนต์สูงกว่าเคโอลิไนต์ ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน และเมื่อทำการผสมเคโอลิไนต์เข้ากับเบนโทไนต์ พบว่า

กำลังของเบนโทไนต์ผสมปูนซีเมนต์มีค่าลดลงเมื่อผสมเคโอลิไนต์ ค่าพิกัดเหลวของดินเหนียวกรุงเทพเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้น และในทางกลับกันค่าพิกัดเหลวของดินเหนียวกรุงเทพมีค่าคงที่และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณเคโอลิไนต์เพิ่มขึ้น ดินเหนียวกรุงเทพผสมเบนโทไนต์ให้กำลังที่สูงกว่าดินเหนียวกรุงเทพผสมเคโอลิไนต์ การผสมเคโอลิไนต์ลงในดินเหนียวกรุงเทพทำให้กำลังลดลง แต่การผสมเบนโทไนต์ลงในดินเหนียวกรุงเทพทำให้กำลังเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในช่วงแรกและลดลงเมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของกำลังในช่วงแรกเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินเนื่องจากการเพิ่มของเบนโทไนต์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพิกัดเหลวทำให้ช่องว่างในดินลดลง ส่วนการลดลงของกำลังในช่วงที่มีปริมาณเบนโทไนต์และเคโอลิไนต์มากเนื่องจากความเข้มข้นของเกลือในดินลดลงส่งผลให้ปฏิกิริยาทางเคมีลดลง ไดอะตอมมีอิทธิพลทำให้กำลังของดินเหนียวกรุงเทพเพิ่มขึ้น แต่ไพไรต์มีผลทำให้กำลังของดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ลดลง

เชิดชนินทร์ หมดมลทิน และคณะ (2548ข) ได้นำเสนออิทธิพลของเกลือต่อดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่างดิน 3 ชนิด คือ ดินเหนียวกรุงเทพ เบนโทไนต์ และ เคโอลิไนต์ การศึกษาทำการทดสอบ 2 วิธี วิธีที่ 1 ทำดินเหนียวให้เป็นประจุชนิดเดียวด้วยความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมและแคลเซียม วิธีที่ 2 ผสมดินด้วยโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ที่ปริมาณต่างๆ จากนั้นนำตัวอย่างดินทั้งหมดไปผสมกับปูนซีเมนต์ ทำการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ผสมทั้งหมดเมื่ออายุการบ่ม 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ดินเหนียวชนิดประจุเดียวกับดินเหนียวผสมสารประกอบคลอไรด์ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีประจุชนิดเดียวชนิดโซเดียม มีค่าสูงกว่าชนิดแคลเซียมเนื่องจากแรงยึดเกาะของดินเหนียวชนิดโซเดียมต่ำกว่า ทำให้ปฏิกิริยาของดินกับปูนซีเมนต์ทำได้ดีกว่า แต่ดินเหนียวที่ผสมแคลเซียมคลอไรด์มีกำลังอัดที่ดีกว่าโซเดียมคลอไรด์ เนื่องจากสารประกอบที่ผสมเพิ่มไม่ได้ยึดเกาะกับดินเหนียวแคลเซียมให้การยึดเกาะกับซีเมนต์ได้ดีกว่าโซเดียม การเติมสารประกอบคลอไรด์เข้าไปมีผลในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีมากกว่าการให้กำลังเพิ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของเกลือของดินทั้งสองวิธีมีผลทำให้กำลังของดินผสมซีเมนต์สูงขึ้นด้วย

Nontananandh, et al. (2005A) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับสมบัติเชิงกลทางด้านวิศวกรรม เช่น กำลังอัดแกนเดียว และ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) ที่ทำการปรับปรุง

คุณภาพแล้ว โดยก่อนทำการปรับปรุงดินมีค่ากำลังอัดแกนเดียวระหว่าง 0.07-0.10 กก./ซม.^{2} และค่า ส.ป.ส. การซึมผ่าน เท่ากับ 6.71×10^{-6} ซม./วินาที โดยใช้ดินตัวอย่างจากคลองลัดโพธิ์ จังหวัดสมุทรปราการ ที่ระดับความลึก 3.00 ม. โดยเป็นดินแบบ Clay with High Plasticity (CH) มีค่าความชื้นร้อยละ 63.53 ทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 200 กก./ม.^{3} ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.80 จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน แล้วทำการศึกษาค่าค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่า ส.ป.ส. การซึมผ่าน และดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในดินซีเมนต์โดยใช้การตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี SEM (Scanning Electron Microscope) โดยเฉพาะปฏิกิริยาหลัก เช่น Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ แอตรินไจต์ (Ettringite) ซึ่งจะทำหน้าที่ประสานระหว่างช่องว่างของดินทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งจากการทดสอบสรุปผลได้ว่าปฏิกิริยาหลัก CSH และ แอตรินไจต์ มีการพัฒนาขึ้นจนทำให้ดินซีเมนต์มีความแน่นและแข็งแรงขึ้นและยังลดค่า ส.ป.ส. การซึมผ่าน ลงได้เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น

Nontananandh, et al. (2005B) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วยซีเมนต์ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย งานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการศึกษาเฉพาะสมบัติเชิงกลทางวิศวกรรมของดินที่ปรับปรุงแล้ว ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้จะเน้นการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยา Hydration เป็นหลัก ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้กำลังของดินซีเมนต์มีการพัฒนาขึ้น การศึกษาจะใช้การตรวจองค์ประกอบแร่ด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ โดยใช้ตัวอย่างดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 200 กก./ม.^{3} ศึกษาค่ากำลังจากค่า UCS ที่อายุตัวอย่าง 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน การตรวจองค์ประกอบแร่ด้วยวิธี XRD กระทำหลังจากการทดสอบ UCS ทำการศึกษาปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น เช่น CSH และ แอตรินไจต์ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า CSH และ แอตรินไจต์ มีการพัฒนาสูงขึ้นตามกำลังของดินซีเมนต์เมื่อเวลาการบ่มเพิ่มนานขึ้น