ห้องสมุดกลาง สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
รายงานการวิจัย

โครงการ

ปริมาณปูนขาวในดินที่มีผลต่อค่า C.B.R.

(QUANTITY OF LIME IN SOIL WHICH EFFECT TO C.B.R.)

.....เพื่อใช้
.....ประกอบการ
.....โดย.....

นาย มนตรี เกิดมณฑล 31.1206 4H
นาย พีรพงษ์ โพธิ์ดีรี 31.1190 4H

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ อำนวย พาณิชกุลพงศ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา SPECIAL PROJECT ปีการศึกษา 2535

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

007676

หน้าอนุมัติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

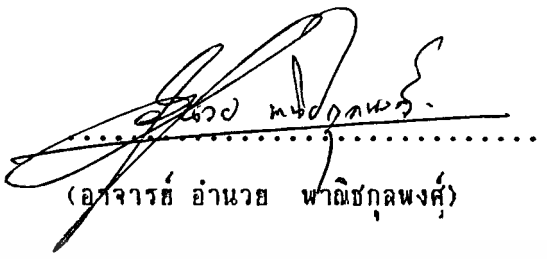
.....

(อาจารย์ สุรัตน์ หวังเจริญ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรรมการวัดผลโครงงาน :

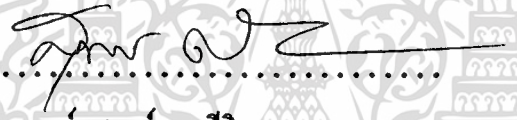


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ อำนวย พาณิชกุลพงศ์)

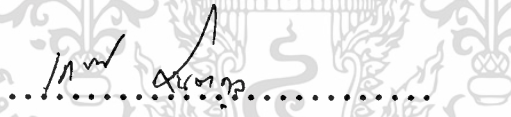
..... กรรมการ

(อาจารย์ สุรัตน์ หวังเจริญ)



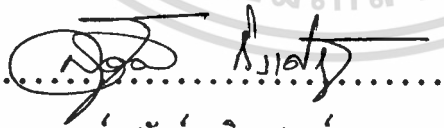
..... กรรมการ

(อาจารย์ สุพจน์ ศรีนิล)



..... กรรมการ

(อาจารย์ เกษม อมันตกุล)



..... กรรมการ

(อาจารย์ สุวัฒน์ กิรเศรษฐ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ศิลป์ชัย จานสุวรรณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

..... กรรมการ

(ผศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ)

..... กรรมการ

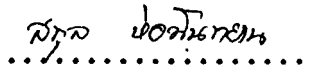
(อาจารย์ วิบูลย์ วุฒิญาณ)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร.แดง เหรียญสุวรรณ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ศักดิ์ชัย สถานุพงศ์)



..... กรรมการ

(อาจารย์ สกุล ห่อวโนทยาน)

..... กรรมการ

(อาจารย์ จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

หัวข้อปริญญานิพนธ์ ปริมาณปูนขาวในดินที่มีผลต่อค่า C.B.R.

(Quantity of Lime in Soil whitch Effect to C.B.R.)

โดย นาย มนตรี เกิดมณฑล 31.1206

นาย พีรพงษ์ โพธิ์คีรี 31.1190

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ อำนวย หาญชัยกุลพงศ์

การออกแบบโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับดิน โดยดินนั้นจะใช้รองรับน้ำหนักของโครงสร้าง ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของดินจึงเป็นสิ่งจำเป็น แต่บางทีเราอาจจะประสบปัญหาเกี่ยวกับสภาพดินในสถานที่ก่อสร้างนั้น มีคุณสมบัติไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อให้ดินมีความเหมาะสมในการใช้งานยิ่งขึ้น

การปรับปรุงคุณสมบัติของดิน (Soil-Stabilization) สามารถทำได้หลายวิธีตามความเหมาะสม เช่น Soil-Lime Stabilization , Soil-Cement Stabilization , Soil-bituminous Stabilization ฯลฯ

ในปริญญานิพนธ์นี้ ได้เลือกศึกษาวิธี Soil-Lime Stabilization โดยใช้ค่า C.B.R. เป็นดัชนี ชี้ถึงคุณสมบัติของดินภายหลังการปรับปรุง ซึ่งการใช้ปูนขาวในการปรับปรุงเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากปูนขาวเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งมีราคาถูก และหาได้ง่ายในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ก็เพราะความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา อ. อำนวย พาณิชกุลพงศ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ บริษัท MAEDA CORPORATION และบริษัทไทยพลาสติก ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องดิน และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ทุกท่าน ที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่เอื้ออำนวยในการใช้ห้องคอมพิวเตอร์ และเบิกอุปกรณ์ต่าง ๆ จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ พี่ ๆ และเพื่อน ๆ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ปรึกษา และให้กำลังใจด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ บุคคลที่ข้าพเจ้ามิอาจจะลืมกล่าวถึงในพระคุณของท่านก็คือ บิดา และมารดา ผู้ซึ่งเปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาเล่าเรียน คอยสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้กำลังใจจนประสบความสำเร็จมาจนกระทั่งบัดนี้

1. นาย มนตรี เกิดมณฑล
2. นาย พีรพงษ์ โพธิ์คีรี

นักศึกษาผู้ประกาศ

(/ /)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
หน้าอนุมัติ	ก
บทคัดย่อ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
- วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
- ขอบเขตของการศึกษา	2
บทที่ 2 บทปริทัศน์	
- ประวัติความเป็นมาของ Lime Stabilization	3
- ปูนขาว (Lime)	4
- ดิน	9
- ปฏิกิริยาดินเหนียวผสมปูนขาว	10
- คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสมปูนขาว	15
บทที่ 3 วัสดุและการทดสอบ	
- วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	26
- การเตรียมตัวอย่างดิน และการทดสอบ	26
- ผลการทดสอบ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การบดอัดดิน

- ทฤษฎีการบดอัดดินที่เกี่ยวข้องกับงานทางวิศวกรรม 36
- มาตราฐานการทดลองบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ 39
- วิธีทำการทดลองแบบ'Standard Proctor 41
- วิธีทำการทดลองแบบ Modified Proctor 42
- การคำนวณ 43
- ผลการทดลอง 43

บทที่ 5 แคลิฟอร์เนีย แบริง เรโช (C.B.R.)

- ทฤษฎีนิยามของเปอร์เซนต์ CBR 44
- มาตราฐานการทดลอง CBR ในห้องปฏิบัติการ 47
- วิธีทำการทดลอง 49
- การคำนวณผลการทดลอง 51

บทที่ 6 บทสรุป

- สรุปผลการทดสอบ 54

ภาคผนวก

- วัตถุประสงค์ของการผสมปูนขาวลงไปในดิน 57
- ส่วนผสมของปูนขาวที่สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ในการพัฒนาคุณภาพของดิน 58
- สมการแสดงปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นของปูนขาวชนิดต่าง ๆ 59
- ความสัมพันธ์ของ % C.B.R. และการใช้งาน 61

บรรณานุกรม 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน มีความสำคัญมาก เพราะต้องนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับดิน โดยดินนั้นอาจใช้รองรับน้ำหนักโครงสร้าง เช่น รองรับน้ำหนักอาคาร , บ้านเรือน , เขื่อน , สนามบิน ฯลฯ หรือทำเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น ทำถนน

แต่ในบางครั้ง เราอาจจะประสบปัญหาเกี่ยวกับสภาพดินในสถานที่ก่อสร้างนั้น ๆ มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้งาน เช่น ดินบริเวณนั้นมีความสามารถในการรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างได้น้อย ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อให้ดินมีความเหมาะสมในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

การปรับปรุงคุณสมบัติของดิน (Soil-Stabilization) สามารถทำได้หลายวิธีตามความเหมาะสม เช่น Soil-Lime Stabilization , Soil-Cement Stabilization , Soil-bituminous Stabilization ฯลฯ

ในปริญญานิพนธ์นี้ ได้เลือกศึกษาวิธี Soil-Lime Stabilization ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่ง ซึ่งน่าสนใจมาก ทั้งนี้เนื่องจากปูนขาวเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งมีราคาถูกและสามารถหาได้ง่ายในประเทศ และผลจากการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม ก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายหลัก คือ

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่าง ๆ ของดิน เมื่อผสมปูนขาว (LIME)

2. เพื่อศึกษาค่า C.B.R. ของดินที่เปลี่ยนแปลง เมื่อผสมปูนขาว

3. เพื่อศึกษาปริมาณปูนขาว (LIME CONTENT) ที่เหมาะสม สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้จำกัดชนิดของดินไว้ชนิดเดียว คือ

- ดินลูกรัง (LATERLITE) ได้จาก บริเวณนิคมอุตสาหกรรม ลาดกระบัง

โดยใช้ปูนขาว (LIME) เพียงชนิดเดียว คือ ปูนขาวที่มีจำหน่ายอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด

ปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้ถูกนำมาพิจารณาเปรียบเทียบ ได้แก่

1. ปริมาณปูนขาว (Lime Content)
2. ปริมาณน้ำที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Moisture Content)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

บทปริทัศน์

ประวัติความเป็นมาของ LIME STABILIZATION

ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์ทำขึ้น เช่น ชาวโรมัน ชาวกรีก และชาวอียิปต์โบราณ ใช้ปูนขาวเป็นตัวประสานในการสร้างอาคาร หรือใช้ในการสร้างถนน โดยใช้ปูนขาวอย่างเดียว หรือใช้ปูนขาวผสมกับ POZZOLANNIC MATERIAL เพื่อทำให้ผิวถนนมั่นคงยิ่งขึ้น

ประเทศแถบเอเชียได้มีการบันทึกว่า ในอดีตนั้นในประเทศจีน และอินเดียได้มีการใช้วิธี LIME STABILIZATION ในการปรับปรุงการก่อสร้างต่าง ๆ เช่น ในจีนได้ใช้ LIME STABILIZATION CLAY-GRAVEL ในการสร้างฐานรากสะพานขนาดใหญ่และห้องใต้ดิน ส่วนในประเทศอินเดียนั้น ใช้ LIME-CLAY-SAND MORTAR ในการสร้างอิฐ เพื่อก่อทำเขื่อนสูง

สำหรับการใช้ปูนขาวในการปรับปรุงดินสมัยใหม่ ซึ่งเริ่มทำเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1945 ที่ TEXAS HIGHWAY DEPARTMENT ได้ทำการทดสอบดินเหนียวผสมปูนขาวโดยวิธี TRIAXIAL และ COMPACTION ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และหลังจากนั้น LIME STABILIZATION ก็เป็นที่ยอมรับของบุคคลทั่วไป มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย จนปัจจุบันพบว่า มีถนนมากมายที่ใช้ดินเหนียวผสมปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น ใช้เป็นวัสดุคัดเลือก หรือใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้ และสาเหตุที่นิยมใช้อีกอย่างคือ เนื่องจากปูนขาวหาได้ง่าย และราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปูนขาว (LIME)

ในทางวิทยาศาสตร์แล้ว ปูนขาว คือออกไซด์ของแคลเซียม (CaO) แต่ในความเป็นจริงแล้วปูนขาวไม่ได้มีเพียง ออกไซด์ของแคลเซียมเท่านั้น แต่ยังประกอบด้วยสารอื่น ๆ อีกมาก ในการจัดประเภทเพื่อกำหนดคุณสมบัติที่แน่นอนของปูนขาว สามารถดูจากรูปแบบทางเคมีต่าง ๆ ของแคลเซียมออกไซด์ของปูนขาวชนิดนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น ไฮเดรท (ส่วนประกอบซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบ) ของแคลเซียมออกไซด์ก็คือ ปูนขาวธรรมดา ที่ทำโดยการนำน้ำมาประกอบกับปูนแท้

ปูนขาวได้มาจากการเผาหินปูน หินปูนที่ใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1) CALCINING CRUSHED LIMESTONE

หินชนิดนี้เมื่อนำมาเผาโดยให้อากาศร้อนผ่านหินขึ้นมา จะเป็นการลดแคลเซียมคาร์บอเนตในหิน กลายเป็นออกไซด์ของแคลเซียม ตามสมการ

$$21\ KCal + CaCO_3 \rightleftharpoons CaO + CO_2$$

แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากหินปูน ชนิดนี้ เรียกว่า CALCIA หรือ HIGH CALCIUM QUICK LIME .

2) DOLOMITE OR DOLOMITIC LIMESTONE A CARBONACEOUS ROCK

หินชนิดนี้ มีสารประกอบส่วนใหญ่อยู่ 2 ตัว คือ แคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมคาร์บอเนต($CaCO_3+MgCO_3$)เพราะฉะนั้นปูนขาวที่ได้จากหินชนิดนี้จึงเรียกว่า DOLOMITIC QUICKLIME ซึ่งมีทั้งออกไซด์และแคลเซียม และออกไซด์ของแมกนีเซียม (CaO + MgO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิในการผลิตปูนขาวขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของหิน แคลเซียมคาร์บอเนต จะสลายที่อุณหภูมิประมาณ 900 C และมักนีเซียมคาร์บอเนต จะสลายที่อุณหภูมิประมาณ550Cถ้าหากว่าอุณหภูมิสูงไป (OVERBURN) ซึ่งจะมีผลทำให้ QUICK LIME ทำปฏิกิริยากับน้ำช้าลง เนื่องจากมีการเพิ่มของผลิตออกไซด์ในปูนขาวที่อุณหภูมิสูงสุด จากการทดลองที่ยืนยันได้พบว่า OVERBURNING มีผลต่อปฏิกิริยาของ DOLOMITIC LIME มากกว่า HIGH CALCIUM LIME แต่ถ้าปรากฏว่าอุณหภูมิในการเผาต่ำเกินไป QUICK LIME ที่ได้จะยังคงมีคาร์บอเนตค้างอยู่ ซึ่งเป็นผลให้การ STABILIZATION ได้ผลไม่ดี จึงพบว่ามักจะหลีกเลี่ยงการใช้ QUICK LIME ประเภทนี้

HYDRATED LIME หมายถึง CALCIUM HYDROXIDE ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยา โดยทันทีของปูนขาวกับน้ำ ตามสมการ

$$CaO + H_2O \rightleftharpoons Ca(OH)_2 + 15.3\ KCal$$

ปฏิกิริยา HYDRATION ของ QUICKLIME โดยทั่วไป จะเกิดจากการเติมน้ำในปริมาณเพียงพอลงไปใน QUICKLIME สำหรับ DOLOMITIC QUICK LIME การทำปฏิกิริยากับน้ำ จะไม่เหมือนกับ HIGH CALCIUM QUICK คือ MAGNESIUM OXIDE (MgO) จำนวนมาก ยังคงเหลืออยู่อย่างอิสระ ดังนั้นผลของปูนขาวชนิดนี้จะเป็น $Ca(OH)_2$ + MgO เรียกว่า NORMAL HYDRATED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 Definition of Types of Lime

ปูนขาวที่ได้จาก Limestone	-CaO	Calicia high-calcium quick lime
	-$Ca(OH)_2$	Hydrated high-calcium lime
ปูนขาวที่ได้จาก Dolomite หรือ dolomitic Limestone		
	CaO + MgO	- dolomitic quick lime
	$Ca(OH)_2$ + MgO	- normal hydrated or monohydrated dolomitic lime
	$Ca(OH)_2$ + $Mg(OH)_2$	- Pressure hydrated or dihydrated dolomitic lime

ปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ดิน ความจริงแล้วสามารถใช้ปูนขาวที่เป็นผลพลอยได้จากขบวนการผลิตต่าง ๆ ได้เช่น ปูนขาวซึ่งเป็นผลผลิตจากการผลิตแก๊สอเซติลีน (ACETELENE) จาก CALCIUM CARBINE เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว ปูนขาวที่ได้เหล่านี้ จะมีราคาถูก แต่มีคุณภาพไม่ค่อยสม่ำเสมอ

แต่สำหรับ PURE CALCIUM และ MAGNESIUM OXIDE คุณสมบัติของปูนขาวเหล่านี้แสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 PROPERTIES OF THEORECTICALLY PURE LIMES

	Quick Lime		Hydrated Lime	
Chemical Name	Calcia or Calcium Oxide	Magnesia of Magnesium Oxide	Calcium Hydroxide	Magnesium Hydroxide
Chemical formula	CaO	MgO	$Ca(OH)_2$	$Mg(OH)_2$
Crystalline form	Cubic	Cubic	Hexagonal	Hexagonal
Melting point	2570 C	2800 C	-	-
Decomposition point	-	-	580 C	345 C
Boiling point	2850 C	3600 C	-	-
Heat of solution at 18 C	+18.33 kg-cal	-	+2.79 kg-cal	-0.0 kg-cal
Molecular weight	56.09	40.32	58.34	
Specific gravity	3.40	3.65	2.34	2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 PROPERTIES OF COMMERCIAL LIMES

(a) Quick Lime

Cgemical Composition	High Calcium, %	Dolomitic, %
CaO	92.25 - 98.00	55.50 - 57.50
MgO	0.30 - 2.50	37.60 - 40.80
CO_2	0.40 - 1.50	0.40 - 1.50
SiO_2	0.20 - 1.50	0.10 - 1.50
Fe_2O_3	0.10 - 0.40	0.05 - 0.40
Al_2O_3	0.10 - 0.50	0.05 - 0.50
H_2O	0.10 - 0.90	0.10 - 0.90
Specific gravity	3.2 - 3.4	3.2 - 3.4
Specific heat at 100 F, Btu per lb	0,19	0.21
Bulk density (pebble lime),pcf	55 - 60	55 - 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) Hydrates

	High Calcium	Monohydrated Dolomitic	Digydrated Dolomitic
Principal chemicl composition	$Ca(OH)_2$	$Ca(OH)_2+MgO$	$Ca(OH)_2+Mg(OH)_2$
Specific gravity	2.3 - 2.4	2.7 - 2.9	2.4 - 2.6
Specific heat at 100 F Btu per lb	0.29	0.29	0.29
Bulk density, pcf	25 - 35	25 - 35	30 - 40

3. ดิน

ความผันแปรในคุณสมบัติเฉพาะของดินแต่ละอย่าง เช่น เกรดเดชั่น (Gradation) จำนวนและชนิดของ Clay Minerals, อินทรีย์สาร, ปริมาณความชื้น และปริมาณเกลือของกำมะถันต่าง ๆ (Sulfates) เหล่านี้มีผลต่อการปรุงกลสมบัติของดินโดยใช้ปูนขาวทั้งสิ้น

เราไม่สามารถจำหนดได้แน่ชัดว่า จำนวนดินเหนียวที่ประกอบอยู่ในดินแต่ละชนิดนั้นอย่างน้อยเท่าไร ที่เหมาะสมที่สุด ที่จะปรุงดินโดยใช้ปูนขาว ส่วนดินพวก Montmorillonite-rich ซึ่งได้พบว่า ประมาณ 15 % ของ 2-Micron Clay ซึ่งเป็นจำนวนต่ำมากที่จะพัฒนาการความแข็งแรงโดยการ Cementation ดินจำพวกดินเหนียว (Clay) และดินตะกอน (Silt) เหมาะสมที่จะปรุงโดยการผสมกับปูนขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้

007676

DAVIDSON, D.T., HILL, O.H., และ REMUS, M.D. (1961) พบว่า ดินเหนียวประเภท Montmorillonite-rich และ Kaolinite ผสมกับปูนขาว ได้ความแข็งแรงดีกว่าดินเหนียว ชนิด Illite และ Chlotite สำหรับ Halloysite-rich เมื่อผสมกับปูนขาวแล้วจะให้ความแข็งแรงต่ำสุด

4. ปฏิกิริยาของดินเหนียวผสมปูนขาว

ปฏิกิริยาทางเคมีหลายชนิดเกิดขึ้น เมื่อผสมปูนขาวลงในดินเหนียวที่มีความชื้นโดยปกติแล้ว ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันในดินผสมปูนขาว ยากที่จะแยก และวิเคราะห์ในปฏิกิริยาแต่ละตัว แต่มักจะเรียกปฏิกิริยานี้ว่า "ปฏิกิริยาขั้นพื้นฐาน" ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดประโยชน์ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ดังนี้

1. ลดค่า PLASTICITY INDEX
2. เพิ่มค่า SHRINKAGE LIMIT
3. ปรับปรุง WORKABILITY
4. ลดศักยภาพของการบวมตัว (SWELL POTENTIAL)

ปฏิกิริยาขั้นพื้นฐาน 4 อย่าง ที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อดินเม็ดละเอียด (FINE-GRAIN) ถูกปรับปรุงด้วยปูนขาวมีดังนี้ คือ

4.1 Cation Exchange

ลำดับขั้นโดยทั่วไปของความสามารถในการแลกประจุของ cations ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดิน ซึ่งกำหนดขึ้นมาโดย Lyotropic Series มีดังนี้ คือ $Na^{+} < K^{+} < Ca^{++} < Mg^{++}$ Cation แต่ละตัวมักจะแทนที่ Cation ที่อยู่ทางซ้ายของตัวเอง (ใน Lyotropic Series) และ Cation 1 Vallency โดยปกติสามารถแทนที่โดย Cation หลาย ๆ Valency การเพิ่มปูนขาวลงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินทำให้เกิด Ca^{++} จำนวนมาก และจะเกิด Cation Exchange ขึ้นโดยที่ Ca^{++} จะไปแทนที่ Cation ที่ไม่เหมือนกัน จากการแลกเปลี่ยนที่ซับซ้อนของดินในบางกรณีของการแลกเปลี่ยนที่ซับซ้อนเกิดขึ้นโดยดินอิ่มตัวด้วย Ca^{++} ก่อนที่จะเพิ่มปูนขาวเข้าไปแล้ว และในกรณีนี้ Cation Exchange จะไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น

HERRIN and MITCHELL (1961) กล่าวว่า เมื่อปูนขาวและดินเหนียวถูกผสมเข้าด้วยกัน และมีการบ่มในระยะเวลาหนึ่ง จะมีปฏิกิริยาที่อาจจะเกิดขึ้นได้ 2 อย่างคือ

1. ปฏิกิริยา Base-Exchange เกิดขึ้นกับ Calcium Cation ที่แข็งแรง Positively Charged ของปูนขาวเข้าไปแทนที่ Weaker Metallic Ions (ได้แก่ Sodium และ Hydrogen) ซึ่งอยู่ที่ผิวของเม็ดดินเหนียว

2. การจับตัวกันแน่นของ Calcium Cation ของปูนขาวที่มีมากขึ้นที่ผิวของเม็ดดินเหนียว แม้ว่า ions ของสารอื่นยังคงอยู่ในเม็ดดินเหนียว Calcium Cation ที่มากกว่าความต้องการอยู่ที่พื้นผิวของเม็ดดินเหนียว ดังจะพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนจำนวนประจุไฟฟ้าบนผิวของเม็ดดินเหนียว

4.2 Flocculation and Agglomeration

การเพิ่มปูนขาวลงไปในดินจำพวกเม็ดละเอียดเป็นผลทำให้เกิด Flocculation และ Agglomeration ของดินเหนียวส่วนน้อย ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นผลในการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อดิน เม็ดดินเหนียวลักษณะ "เกาะรวมกลุ่ม" เข้าด้วยกัน ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น "มวลรวม"

ผลจากปฏิกิริยา Cation Exchange, Flocculation และ Agglomeration ที่มีผลต่อ Plasticity และ Shrinkage ของดินเหนียวผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปูนขาว ซึ่งศึกษาโดย THOMPSON (1967) ได้แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นต้นเหตุเริ่มแรกของการเปลี่ยนแปลงใน plasticity, Shrinkage, Swell และ Workability ของดินผสมปูนขาวโดยทั่วไปแล้ว สำหรับดินเกือบทุกชนิดที่ทำการศึกษา ปูนขาวในอัตราการผสมเล็กน้อย (3-5%) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลง Cation Exchange, Flocculation และ Agglomeration ไม่ได้เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของดินผสมปูนขาว ซึ่งเป็นต้นเหตุในการเพิ่มความแข็งแรงสำหรับดินผสมปูนขาวหลาย ๆ ชนิด

HERRINandMITCHELL (1961) แสดงให้เห็นว่า ภายหลังจากการนำดินผสมปูนขาวแล้วบ่มดินจะร่วมขึ้น และจะมีสภาพคล้ายกับเป็น Silt ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยาที่กล่าวไปแล้วข้างต้น 2 ชนิด อันเป็นผลให้ประจุไฟฟ้าที่ผิวดินเปลี่ยนแปลง เนื่องจาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเหนียว ขึ้นอยู่กับประจุและขนาดของ ions จำนวนที่มากกว่าของ Divalent Calcium ions ซึ่งเข้าไปแทนที่ Univalent ions จะทำหน้าที่ดึงดูดเม็ดดินเข้าด้วยกัน ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อการผสมอยู่ในสภาพหลวม และโดยปกติจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายใน 2 - 3 วัน หลังจากการผสม

4.3 Lime Carbonation

Carbonation จะเกิดขึ้นเมื่อ Calcium Carbonate ($CaCO_3$) เกิดขึ้นเนื่องจากปูนขาว และ Carbondioxide (CO_2) เข้าไปแทนที่ความชื้นในดิน

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Calcium Carbonate จะตกตะกอน และประสานตัวกันอย่างอ่อน ๆ แม้ว่า Carbonation จะทำให้เกิดการประสานตัวกันก็ตาม แต่ก็เป็นปฏิกิริยาที่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควรให้เกิดขึ้น ทั้งนี้เพราะ Carbonation จะไปลด Calcium ที่จะใช้สำหรับปฏิกิริยา Pozzolanic ให้น้อยลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ไม่สมบูรณ์ทำให้อัตราการเพิ่มของความแข็งแรงลดลงไปในที่สุด ดังนั้นควรให้เกิด Carbonation น้อยที่สุดในระหว่างการดำเนินงานก่อสร้าง

HERRIN and MITCHEL (1961) พบว่า Carbonation เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญซึ่งก่อให้เกิดการดูดซึมของ Carbondioxide (CO_2) จากอากาศ Carbondioxide ทำ ปฏิกิริยากับ Calcium Hydroxide ในปูนขาวกลายเป็น Calcium Carbonate ในอีกความหมายหนึ่งนี้เป็นวิธีการผลิตปูนขาวในสมัยอดีตวิธีหนึ่ง ไม่เพียงแต่ว่า Carbonate เหล่านี้ทำให้เกิดการเกาะตัวเล็กน้อย แต่ยังไปยับยั้งการเกิด Pozzolanic และทำให้ความแข็งแรงที่ควรจะเพิ่มกลับลดน้อยลง จึงต้องระมัดระวังและป้องกันไม่ให้ปูนขาวก่อตัว Carbonated โดยทำปฏิกิริยากับ Carbondioxide ในอากาศ ปูนขาวควรจะเก็บไว้เป็นพิเศษ ขณะอยู่ในที่เก็บ และในช่วงการขนส่งไปยังที่ใช้งาน และมักพบได้เสมอว่า Carbonation มักจะเกิดมากที่สุดในเขตพื้นที่อุตสาหกรรม ซึ่งมี Carbondioxide อยู่ในอากาศ มากกว่าในเขตพื้นที่ที่อยู่อาศัย

4.4 Pozzolanic Reaction

ปฏิกิริยา Pozzolanic ของดินผสมปูนขาว เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและ Soil Silica หรือ Alumina เพื่อก่อให้เกิดการประสานตัวซึ่งกันและกัน ส่วนหนึ่งของปฏิกิริยา Pozzolanic ก็คือค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ซึ่งค่านี้จะมีค่าสูงขึ้นเป็นผลจากปูนขาว การเพิ่มปูนขาวจำนวนเล็กน้อย (มากกว่า 1% โดยน้ำหนัก) ในดินจะเพิ่มค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ขึ้นจนมีค่าประมาณ 12.3 ซึ่งพบว่า ที่ระดับความเป็นกรดด่าง (pH) ขนาดนี้ ความสามารถละลายได้ของแร่ Silicate และ Aluminosilicate ในดิน ทำให้มีการเพิ่ม Silicate หรือ Aluminae และทำให้เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic เพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปฏิกิริยาPozzolanicจะได้สารประกอบชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่า เป็น Calcium silicate Hydrated (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrated (CAH) ดังสมการ

$$Ca^{++} + 2(OH)^{-} + SiO_2 \longrightarrow CHS$$

$$Ca^{++} + 2(OH)^{-} + Al_2O_3 \longrightarrow CAH$$

ปฏิกิริยา Aluminate โดยพื้นฐานแล้ว จะเกิดขึ้นทันที และจะเกิดที่จุดติดต่อระหว่างขอบและผิวหน้าของดินเดิม สำหรับสารประกอบ Silicate จะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่าแรงยึดเกาะซึ่งเกิดจากสารประกอบ Aluminate จะไม่มีความแข็งแรงเหมือนกับแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ของสารประกอบ Silicate

HERRIN and MITCHELL (1961) เรียกปฏิกิริยา Pozzolanic นี้ว่า "Cementing Action"โดยสรุปว่า ปฏิกิริยาของดินผสมปูนขาวที่สำคัญอีกอันหนึ่งคือการเกิดการเกาะตัวกันระหว่างเม็ดดิน โดยที่ Calcium จะทำปฏิกิริยากับเนื้อดิน ทำให้ส่วนประกอบของดินเปลี่ยนไป โดยปกติ Aluminous และ silicious ในดินจะทำปฏิกิริยากับปูนขาว ทำให้เกิด Calcium Silicate และ Aluminate ซึ่งทำให้เกิดการเกาะกันระหว่างเม็ดดินเหมือนกับ Pozzolans จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของดิน การเกิดปฏิกิริยานี้จะเกิดช้า ๆ และตัวการที่สำคัญต่ออัตราการเกาะตัวของดิน คือจำนวนและประเภทของ Pozzolans ตลอดจนสภาพภูมิอากาศ

จากที่กล่าวมานี้ เป็นสภาพการทำปฏิกิริยาตามความคิด ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น อาจจะเพิ่มขึ้นได้ไม่ถึงที่สุด ถ้าหากมีสารประกอบอื่น ๆ อยู่ในดินนั้นด้วย สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ ปริมาณสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทรีย์, Sulfate, การซึมผ่านตามะรรมชาติของดินตลอดจนสภาพการผุพังของดิน สารอินทรีย์และ Sulfate สามารถลดความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลงโดยจะไปแบ่ง Ca^{++} ions มาจากปฏิกิริยา Pozzolanic ทำให้อัตราการเพิ่มของความแข็งแรงลดลง สารประกอบของเหล็กต่าง ๆ (Fe_2O_3) ที่เคลือบโครงสร้างของดินก็สามารถขัดขวางปฏิกิริยาให้ชะงักลงได้

5. <u>คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสมปูนขาว</u> (Engineering Property of Lime-Soil Mixture)

จากปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานที่เกิดขึ้น ภายหลังจากการนำปูนขาวไปผสมในดินแล้ว เป็นเครื่องแสดงให้เห็นว่า ปูนขาวนั้นย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินอย่างแน่นอน ซึ่งจากข้อมูลค้นคว้าของผู้เชี่ยวชาญหลายท่านก็เป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดี และเราสามารถแบ่งคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสมปูนขาวได้เป็น คุณสมบัติหลัก ๆ คือ

- คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)
- คุณสมบัติทางด้านการรับกำลัง (Properties of Strength)

5.1 <u>คุณสมบัติทางกายภาพ</u> (Physical Properties)

จากการศึกษาที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า การเติมปูนขาวลงไปในดิน จะมีผลอย่างมากที่ทำให้คุณสมบัติทางการภาพของดินเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงเห็นได้ชัด ได้แก่

- อัตราส่วนขนาดคละของเม็ดดิน (Grain Size Distribution)
- ค่าความเหนียวของดิน (Soil Plasticity)
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 อัตราส่วนขนาดคละของเม็ดดิน (Grain Size distribution)

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ สิ่งแรกที่เกิดขึ้นในดินเม็ดละเอียด เมื่อได้มีการเพิ่มปูนขาว จะทำให้เม็ดดินรวมตัวกันเป็นก้อน เป็นผลทำให้เม็ดดินหยาบขึ้น และร่วนขึ้นกว่าเดิม โดยที่เมื่อให้เวลาบ่มกับตัวอย่างดินเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการรวมตัวก็เพิ่มมากขึ้น ดังสามารถเปรียบเทียบจากการทดลอง พบว่ากรณีที่ใช้ดินเหนียวผสมกับปูนขาว 10% เมื่อภายหลังจากบ่อมตัวอย่างเป็นระยะเวลา 14 วัน ดินเหนียวที่ใช้ทดสอบจะเปลี่ยนเป็น Sandy Loam และถ้าบ่มนานถึง 240 วันแล้ว ตัวอย่างดินเหนียวจะกลายเป็น Sand ได้นั้นย้ำให้เห็นว่าดินตัวอย่างจะถูกทำให้เปลี่ยนประเภทของดินไปเมื่อถูกผสมด้วยปูนขาว

MORELAND and HENRY (1961) พบว่า เม็ดดินเหนียวที่ละเอียดจะเป็นเม็ดดินที่สามารถเปลี่ยนขนาดของเม็ดดินโดยปูนขาวได้มากที่สุด โดยสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้มากกว่าวัสดุที่มีเม็ดใหญ่กว่า เช่น ทราย จำนวนของการเกาะตัวจะถูกอิทธิพลจากหลาย ๆ ปัจจัย ปัจจัยที่สำคัญที่สุดก็คือ ชนิดของดิน Plastic Soil มักมีการเกาะตัวที่แน่นกว่า silty หรือ Sandy Soil นอกจากนี้การเกาะตัวจะเกิดขึ้นมาก เมื่อใช้ปูนขาวผสมมากและจะเพิ่มในช่วงระยะเวลาต้น ๆ ของการบ่ม และเป็นไปได้ที่ชนิดของปูนขาวก็เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อจำนวนการเกาะตัว Quick Lime จะได้ผลมากกว่า Hydrated Lime ในบางกรณี

THOMPSON (1966) กล่าวว่า ขนาดคละของดินเหนียว จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับส่วนผสมของปูนขาว ขนาดของดินที่จับตัวกันเป็นผลให้ดินทั้งหมดมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อดินเกิดการทำปฏิกิริยาในช่วงระยะเวลาหนึ่ง มักจะทำให้การจำแนกดินภายหลังการบ่มนั้นได้ประเภทของดินที่แตกต่างไปจากเดิม คือหยาบขึ้น ลักษณะคล้ายกับพวกทราย แต่ถ้าปรากฏว่าการรวมตัว หรือจับต้องของดินไม่สมบูรณ์ แรงต้านทานของน้ำ (Water Resistance) อาจจะทำให้ดินที่กำลังจับตัวนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกออกได้ หลังจากที่ได้นำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลานาน ๆ ไม่ว่าในกรณีใด ๆ ผลของดินเหนียวผสมปูนขาวส่วนใหญ่จะแตกออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ทำให้เป็นการเพิ่มความสามารถในการทำงาน (Workability) ซึ่งสำคัญมาก

5.1.2 ค่าความเหนียวของดิน (Soil Plasticity)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของดินเมื่อผสมปูนขาว ซึ่งเห็นได้ชัดก็คือ การเปลี่ยนแปลงของ Plasticity ของดิน โดยดินจะเปลี่ยนแปลงทั้ง Plastic Limit และ Liquid Limit

ปกติค่า Plastic Limit ของดิน จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของปูนขาวที่ใส่ลงไปในดิน ส่วนค่า Liquid Limit จะลดลงตามอัตราส่วนกับจำนวนปูนขาวแต่ถึงแม้ว่าตามปกติจะลดลงก็ตาม แต่ไม่ได้หมายถึงว่า จะเกิดกับดินทุกชนิด ดังที่พบว่าในดินบางชนิดกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปูนขาวเข้าไปโดยทั่วไปแต่ไม่เสมอไป Liquid Limit จะลดลงมากในดินเหนียวที่มี Plastic สูง และจะเพิ่มขึ้นในดินที่มี Plastic น้อย

โดยไม่คำนึงถึงว่าLiquidLimitจะลดหรือเพิ่ม การเพิ่มของ Plastic Limit จะทำให้ Plasticity Index ของดินเหนียวที่มีค่าความเหนียวสูง มักจะลดลงประมาณ 50-80 % ตามคุณสมบัติของปูนขาวแต่ละชนิด

จำนวน Plasticity Index ที่ลดลงในดินผสมปูนขาวขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย แต่สิ่งแรกสุดก็คือ ชนิดของดิน Plasticity Index ของดินที่มีความเหนียวสูง โดยปกติจะลดลงเป็นจำนวนมาก เพียงแต่ผสมปูนขาวจำนวนเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนดินที่มีความเหนียวต่ำนั้นจะให้ผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตัวอย่างเช่น Plasticity Index ของดิน ที่มีความเหนียวต่ำจะลดลงจาก 5 เป็น 2 โดยใช้ปูนขาว 5% และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนของปูนขาวมีอิทธิพลต่อจำนวนของการลดลงของ Plasticity Index ถ้าจำนวนปูนขาวเพิ่มขึ้น Plasticity Index ของดินจะลดลง

THOMPSON (1961) กล่าวว่า ค่า Plasticity Index ของดินจะลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการผสมปูนขาวลงไปในดิน จำนวนการลดลงของค่า Plasticity Index นั้นส่วนมากขึ้นอยู่กับความเหนียวในตอนแรกของดินเดิม ในดินเดิมที่มีค่าความเหนียวสูงนั้น การเติมปูนขาวลงไปจะเป็นผลทำให้สามารถลดค่า Plasticity Index ได้ประมาณ 50-80 % แต่ถ้าดินเดิมมีค่าความเหนียวต่ำก็เป็นผลให้การลดลงของ Plasticity Index ต่ำหรือช้าลงไปด้วย ส่วนค่า Plastic Limit ตามปกติจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปูนขาวลงไปในดิน ส่วนจำนวนการเพิ่มของ Plastic Limit ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนขาวที่ใส่เพิ่มลงไป อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ปูนขาวลงไปจำนวนหนึ่งที่แน่นอนแล้ว ค่า Plastic Limit ที่เพิ่มขึ้นนั้น ก็ไม่นับว่ามีความสำคัญเท่าไรนัก ส่วนค่า Liquid Limit นั้น ปกติมักจะลดลงได้เมื่อเพิ่มปูนขาวลงไปในดิน แต่อย่างไรก็ตาม ในดินบางชนิดที่มีค่าความเหนียวต่ำ อาจจะทำให้ค่า Liquid Limit เพิ่มขึ้นได้เหมือนกัน การเปลี่ยนแปลงความเหนียวที่เกิดขึ้นจะเร็วมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับปูนขาวที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่สำคัญจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว

HERRIN (1961) กล่าวว่า ระยะเวลาที่ปูนขาวทำปฏิกิริยากับดิน และชนิดของปูนขาวก็มีผลต่อค่า Plasticity Index ขนาดการลดลงปกติ จะเกิดขึ้นใน 2 - 3 ชม. แรกหลังจากการผสม และใน 2 - 3 วันต่อมา จะมีการเปลี่ยนแปลงเกือบทั้งหมดของ Plasticity ของดิน แต่ในบางครั้งการลดลงของ Plasticity Indexจะเปลี่ยนแปลง เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้น แต่ก็เล็กน้อยเมื่อเทียบกับ 2 - 3 วันแรก ถึงแม้ว่าข้อมูลเล็กน้อยนี้ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยแสดงให้เห็นว่าการลดลงจาก Plasticity Index มีผลบางส่วนมาจากชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของปูนขาวที่ใช้ คือ Quick Lime ปกติจะลด Plasticity Index ลงเร็วกว่า Hydrated Lime

5.1.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change)

ปูนขาวมักจะไปลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เกิดขึ้นในดิน เมื่อมีปูนขาวในดินมากขึ้น ๆ Shrinkage Limit เพิ่มขึ้น และ Shrinkage Rate กลับลดลง Shrinkage Limit กับ Plasticity Index ของดิน แสดงให้เห็นว่า มีความสัมพันธ์กัน Plasticity Index มักจะต่ำลง เมื่อมีปูนขาวเพิ่มขึ้น แต่ Shrinkage Limit จะเพิ่มขึ้น และเมื่อ Plasticity Index เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย Shrinkage Limit ก็เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเช่นกัน ปูนขาวเป็นสารที่มีผลต่อการบวมตัวของดิน การเพิ่มจำนวนปูนขาวจะทำให้เกิดการลดของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลง จนถึงปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม (Optimum Lime Content) ถ้าเราต้องการให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลงก็ทำได้ โดยการเพิ่มปูนขาวลงไปในปริมาณมากกว่าค่าที่เหมาะสมเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ปูนขาวมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดลงของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change)

THOMPSON (1966) กล่าวว่า ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินนั้น ปริมาตรของน้ำที่เพิ่มขึ้นจะถูกลดลงด้วยปูนขาวที่เติม เป็นผลให้แรงดันถูกลดลงไปด้วย ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถปรับปรุงได้โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนขาวที่เพิ่มขึ้นในจำนวนเปอร์เซนต์ที่สูง

5.2 คุณสมบัติทางด้านการรับกำลัง (Properties of Strength)

จากการทดสอบความแข็งแรงของดินผสมปูนขาว สามารถทดสอบได้หลายวิธี เช่น Unconfined Compressive Strength, California Bearing Ratio, HVEEM Stabilometer Extrustion Triaxial และ Proctor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Penetration Needle ซึ่งในการทดสอบเหล่านี้ Unconfined Compressive Strengthนับว่าเหมาะสมที่สุดและผลที่ได้จากการทดสอบต่างๆเหล่านี้ โดยทั่วไปจะให้ผลคล้ายคลึงกันนั้น คือ ถ้า Unconfined Compressive Strength แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การทดสอบ CBR. ก็จะให้ผลที่แข็งแรงขึ้นเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าของความแข็งแรงจะเปลี่ยนไปตามวิธีการทดสอบต่าง ๆ เมื่อการทดสอบหนึ่งแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงไปกี่เปอร์เซนต์ การทดสอบวิธีอื่นสำหรับดินชนิดเดียวกันและสภาพเดียวกันนั้น อาจเปลี่ยนแปลงมากกว่าหรือน้อยกว่าเปอร์เซนต์ที่เปลี่ยนแปลงจากการทดสอบแบบแรกได้

ปัจจัยส่วนใหญ่ที่มีผลต่อความแข็งแรงของดินผสมปูนขาว ได้แก่ ปริมาณปูนขาว, ชนิดของปูนขาว, ความแน่น และระยะเวลาตลอดจนลักษระของการบ่ม ปัจจัยทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งเราอาจแยกพิจารณาได้เป็น

5.2.1 ปริมาณปูนขาว (Lime Content) ซึ่งโดยทั่วไปความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณปูนขาวในดินเพิ่มมากขึ้น จนถึงระดับหนึ่งก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งก็ประมาณ 8 % สำหรับดินเหนียว ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2

5.2.2 ชนิดของปูนขาว (Lime Type) ซึ่งชนิดของปูนขาวที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของดินผสมปูนขาว สามารถแสดงได้โดยการอ้างอิงกับผลการทดลองที่มีผู้ทำไว้ว่า "Dolomitic Lime" ให้ความแข็งแรงที่สูงกว่าในดินผสมปูนขาวมากกว่า High-Calcium Limeสำหรับดินชนิดเดียวกัน และภายใต้สภาพเดียวกันปูนขาว 2 ชนิด จะให้ความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกันในขณะปูนขาวปริมาณต่ำ แต่เมื่อปริมาณปูนขาวสูงขึ้น Dolomitic Lime จะเพิ่มความแข็งแรงขณะที่ High-Calcium Lime จะยังคงมีความแข็งแรงเท่าเดิม หรือลดลงเล็กน้อย และ Quick Lime จะให้ผลได้มากกว่า Hydrated Lime แต่ Hydrated Dolomitic Lime,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Monohydrated Lime ให้ความแข็งแรงมากกว่า Dihydrated Dolomitic Lime"

5.2.3 ชนิดของดิน (Type of Soils) ความแข็งแรง จะเพิ่มขึ้นก็อาศัย Pozzolans ในดิน เมื่อดินมี Pozzolans ที่ต้องการจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับปูนขาว ทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวดีขึ้น แต่ถ้าดินมีจำนวน Pozzolans น้อยหรือไม่มีเลย ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในปัจจุบันการวิเคราะห์ทางเคมีไม่สามารถหาจำนวน และประเภทของ Pozzolans ที่ได้จากเม็ดดินที่เหมาะสม สำหรับการทำปฏิกิริยากับปูนขาว เนื่องจากจำนวนที่ต้องการจะเปลี่ยนไปตามดินแต่ละชนิด ในดินแต่ละชนิดสามารถหาค่าได้โดยการทดสอบทางกายภาพบางวิธี เพื่อที่จะหาว่าดินนั้นเหมาะหรือไม่ที่จะปรับปรุงด้วยปูนขาว

ตามปกติ ดินเหนียวจะทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้มากกว่าดินชนิดอื่น ๆ และโดยทั่วไปจะเพิ่มความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวให้แก่ดิน ในหลาย ๆ กรณีดินเหนียวจำนวนเล็กน้อยเท่านั้นที่ต้องการสำหรับทำปฏิกิริยากับปูนขาว ความแข็งแรงของ silt, ทรายบางชนิด Caliche, Sandy Clays, Plastic Pit-Run Gravels จะเพิ่มได้มากเท่ากับดินเหนียวโดยการปรับปรุงด้วยการเพิ่มปูนขาว และทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น แต่เปอร์เซนต์การเพิ่มอาจจะไม่มากนัก การปรับปรุงทำได้โดยให้วัสดุเหล่านั้นมีจำนวนเหนียวอยู่บ้างสำหรับทำปฏิกิริยากับปูนขาว ปูนขาวผสมกับ Pit-Run Gravels เป็นไปได้ที่จะให้ความแข็งแรงมากกว่าปูนขาวผสมกับดินเหนียว

5.2.4 ระยะเวลาของการบ่ม (Time of Curing) การปรับปรุงคุณภาพดินโดยปูนขาว จะเพิ่มความแข็งแรงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มเช่นเดียวกับพวก Portland Cement Concrete ความแข็งแรงนี้มักจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง

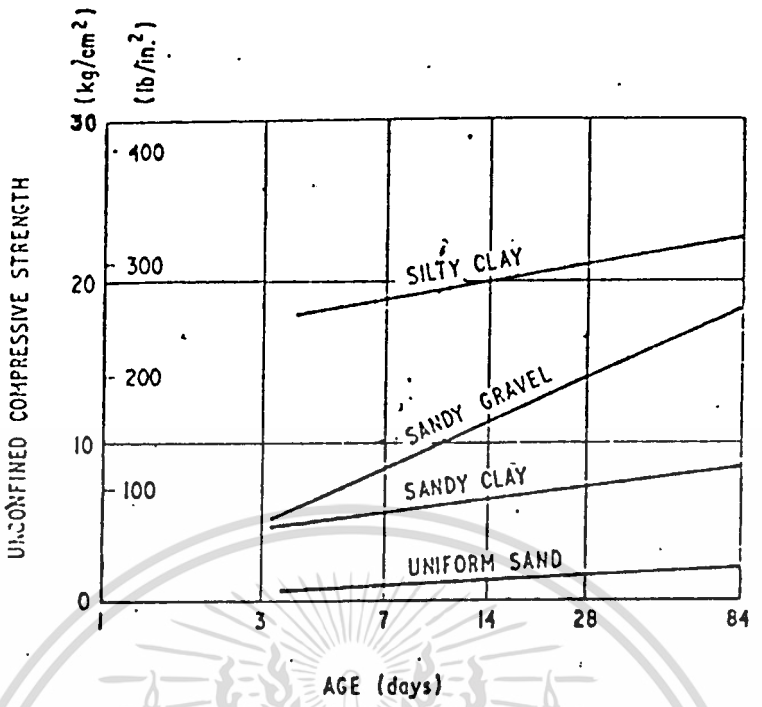
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรก ๆ ของการบ่ม แต่เมื่อการบ่มเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปเรื่อย ๆ จะพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงจะลดลงและน้อยลงเรื่อย ๆ เช่นกัน ภายหลังจากที่พิจารณาระยะเวลาการบ่มแล้ว ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวยังคงปรากฏว่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก จากที่มีผู้เชี่ยวชาญทำการทดสอบแล้ว สรุปว่า ดินผสมปูนขาวจะเพิ่มความแข็งแรงหลังจาก 4 ปี ของการบ่มภายใต้การควบคุมในห้องปฏิบัติการ ถึงแม้ว่าความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวอาจจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม แต่นั้นก็ไม่ได้หมายความว่าความสัมพันธ์เหล่านี้จะยังคงแน่นอนอยู่เสมอ เมื่อการผสมนี้ถูกบ่มในภาคสนามภายใต้สภาวะอากาศปกติจากการทดลองหนึ่ง Cores Cut จากถนนดินผสมปูนขาว หลังจากการบ่ม 7 ปี จะให้ความแข็งแรงโดยประมาณเท่ากับที่หาได้เมื่อถนนนี้มีอายุ 2 ปี เท่านั้น

ดินผสมปูนขาว จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในอัตราที่ไม่เท่ากัน ใน Portland Cement Concrete การเพิ่มความแข็งแรงในดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยปูนขาวจะช้า และแบ่งเป็นชั้น ๆ ภายใต้สภาพการบ่มในสนามตามปกติ จากช่วงเวลาระหว่าง 4 - 6 เดือน ของการบ่มเป็นช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมในสนามสำหรับดินผสมปูนขาว เพื่อให้ได้ความแข็งแรงส่วนใหญ่ (Major Portion) ในห้องปฏิบัติการ อัตราการเพิ่มของความแข็งแรงของดินผสมปูนขาว สามารถเพิ่มได้อย่างเต็มที่โดยการใช้ Favarable Methods ของการบ่ม เช่น การเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นขณะบ่ม ภายใต้การควบคุมสภาพการบ่มในห้องปฏิบัติการความแข็งแรงที่ได้จากการบ่ม 2 สัปดาห์ จะเท่ากับความแข็งแรงที่ได้จากการบ่มในสนามภายใต้สภาพปกติถึง 3 เดือน

ข้อยืนยันว่า อายุของการบ่มเป็นผลทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มนั้น จะเห็นได้จากการทดลองของ METCALF, J.B. (1959) ซึ่งได้ผลตามรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 effect of Age on Strength of Various Soils Stabilized with 5 percent Hydrated Lime

5.2.5 <u>ชนิดของการบ่ม</u> (Type of Curing) หลาย ๆ วิธีได้ถูกนำมาทดลองใช้เพื่อบ่มดินผสมปูนขาวในช่วงเริ่มแรก วิธีการบ่มนั้นจะแตกต่างกัน แต่มักจะนิยมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

ก) บ่มที่สภาพความชื้นต่าง ๆ กัน หรือให้สัมพันธ์กับความชื้น

ข) บ่มที่อุณหภูมิปกติ

วิธีการบ่มเหล่านี้ได้ถูกนำไปใช้โดยกลุ่มต่าง ๆ แต่ก็ไม่มีวิธีการใดเลยที่เป็นที่ยอมรับกันว่าเป็นวิธีที่มีมาตรฐานสำหรับการบ่มดินผสมปูนขาว

ผลของอุณหภูมิกับอัตราการเพิ่มของความแข็งแรงในดินผสมปูนขาว จะมีความสัมพันธ์กันโดยตรง โดยกำหนดที่อุณหภูมิขณะที่วัสดุผสมถูกบ่มเป็นหลัก แต่ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิบ่มต่ำ การเพิ่มของความแข็งแรงจะต่ำมาก แต่ถ้าอยู่ในสภาพอากาศปกติ (ประมาณ 70 F) อัตราการเพิ่มจะสูงขึ้น และถ้าบ่มที่อุณหภูมิสูง 140 F ดินผสมปูนขาวนี้ จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากประมาณว่าใช้เวลาบ่มเพียง 3 - 4 วัน จะเท่ากับดินผสมปูนขาวที่บ่มและอุณหภูมิ 70 F ประมาณ 10 วัน

ส่วนทางด้านความชื้นนั้น ความชื้นในอากาศระหว่างการบ่มดินผสมปูนขาวได้แสดงผลบางอย่างต่อความแข็งแรงที่ได้รับ แต่ไม่สามารถที่จะกำหนดขอบเขตของผลที่จะได้รับได้อย่างแน่นอน ซึ่งในบางครั้งการบ่มที่มีความชื้นต่ำกลับทำให้ความแข็งแรงสูงกว่า ตัวอย่างที่บ่มในอากาศที่มีความชื้นสูง ดังนั้นจึงมีการสรุปโดยทั่ว ๆ ไปว่า ผลของความชื้นจากที่ได้จากการทดสอบ จะไม่มีผลต่อความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวมากเหมือนกับอุณหภูมิขณะการบ่ม

5.2.6 <u>การผสมปูนขาวกับดิน</u> (Lime Mixture) การผสมปูนขาวให้เข้ากับดินนั้น สามารถทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวเพิ่มขึ้นได้ ถ้ามีการผสมถูกวิธี ซึ่งการผสมที่ใช้กันมี 2 แบบ คือ

ก) Slurry Mixture หมายถึง การคลุกปูนกับดิน โดยการทำการละลายปูนกับน้ำ ให้เป็นน้ำข้น ๆ ก่อน แล้ว Spray สารละลายลงบนดิน สารละลายเมื่อ Spray ลงไปแล้ว ควรมีปริมาณน้ำ เท่ากับ OMC ของดินนั้น ๆ

ข) Powder Mixture หมายถึง การคลุกปูนกับดิน โดยผสม Air-Dired Soil กับปูนขาว การผสมนี้ทั้งดินและปูนขาวจะแห้ง เมื่อผสมเข้ากันแล้ว จึงเพิ่มน้ำเท่ากับ OMC

ผลของการทดสอบความแข็งแรงทำโดย DAVIDSON, NOGUERA และ SHEELER (พ.ศ.2502) พบว่า ค่า Unconfined Compressive Strength ของการผสมปูนขาวกับดิน Kansan Till แบบ Slurry Mixture และแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Powder Mixture โดยใช้เวลาบ่มเท่ากัน พบว่า Quick Lime Slurry จะให้ความแข็งแรงสูงกว่า Quick Lime Powder

5.2.7 การล่าช้าในการบดอัด (Delay of Compaction) การกำหนดระยะเวลาในการบดอัดดินผสมปูนขาวให้ถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะมีผลถึงกำลังของดินด้วย

UPPAL (1971) ได้ทดสอบถึงผลของการล่าช้าในการบดอัดที่มีต่อค่า Compressive Strength และ CBR โดยการปรับปรุง Silty Loam Soil ด้วย Calcitic ร้อยละ 1 - 5 ระยะเวลาในการล่าช้าตั้งแต่ 2 -96 ชม. และระยะเวลาในการบ่มตั้งแต่ 10 - 40 วัน โดยตัวอย่างที่ทดสอบบดอัดที่ความแน่นร้อยละ 95 ผลของการทดสอบ พบว่า กำลังจะลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 และพบว่า การล่าช้าในการบดอัดเป็นเวลา 2 ชม. ค่ากำลังที่ลดลงมีค่าน้อยมาก

สำหรับการล่าช้าในการบดอัดเป็นเวลา 48 ชม. ของดินผสมปูนขาว พบว่า ค่า CBR จะลดลง เมื่อเทียบกับที่ทำการบดอัดที่หลังจากการผสม การลดลงของ CBR เนื่องจากการล่าช้าที่เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ที่ใช้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 สำหรับการล่าช้าในการบดอัดเป็นเวลา 48 ชม. ค่า CBR ที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 54 ถึง 70 โดยใช้ปริมาณปูนขาวในการผสมเท่ากับร้อยละ 2 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 10 ถึง 40 วัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทำพื้นทางได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนขาว (Lime) เป็นปูนขาวชนิดที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป ประมาณ 40 kg

2. ดิน เป็นดินที่นำมาจากสถานที่ดังกล่าว คือ ดินลูกรัง (Laterlite) ประมาณ 3 ถุงปุ๋ย

3.2 การเตรียมตัวอย่างดิน และการทดสอบ

นำดินตัวอย่าง มาตาก หรือผึ่งให้แห้ง แล้วทำการบดให้ละเอียด แล้วจึงนำดินตัวอย่างไปทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. นำดินตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4 หรือ เบอร์ 3/8" แล้วผสมปูนขาวในอัตราส่วน 2 , 4 , 6 , 8 , 10 และ 12 เปอร์เซนต์ ต่อน้ำหนักดินแห้ง สำหรับดินลูกรัง ตามลำดับ แล้วทำการทดสอบหาคุณสมบัติต่าง ๆ ตามลำดับขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1.1 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดิน(Test for Moisture-Density Relations of Soil) ทดสอบตามมาตราฐาน ASTM 1557-70 โดยใช้วิธี Modified Proctor เพื่อหาปริมาณน้ำบรรจุพอเหมาะที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Moisture Content) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ที่แต่ละเปอร์เซนต์ของปูนขาวที่ผสมลงในดิน

1.2 ทดสอบหาค่า C.B.R.(California Bearing Ratio) ที่แต่ละเปอร์เซนต์ของปูนขาวที่ผสมลงในดิน โดยวิธี Modified Proctor ค่า % C.B.R. โดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้าผลปรากฏออกมาว่า %C.B.R.ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้วสูงกว่าที่ความลึก 0.1 นิ้ว การทดลองควรจะต้องกระทำซ้ำอีกครั้ง ซึ่งถ้าค่า %C.B.R. ที่ได้มายังเป็นไปในรูปเดิม ก็ให้ใช้ค่า % C.B.R. ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว

หมายเหตุ วิธีการทำทดลองโดยวิธี Modified Proctor จะกล่าวในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำปูนขาวที่ใช้ในการก่อสร้าง ที่เก็บไว้ในที่แห้ง เพื่อป้องกันความชื้น มาผสมในอัตราส่วน 2 , 4 , 6 , 8 , 10 และ 12 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

3.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

1. ค่า C.B.R. (California Bearing Ratio) แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และปริมาณปูนขาวที่ผสมลงในดินลูกรัง มีความสัมพันธ์กันดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และกราฟรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า ค่า CBR จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น

2. ค่า C.B.R. (California Bearing Ratio) แบบแช่น้ำ (Soaked) และปริมาณปูนขาวที่ผสมลงในดินลูกรัง มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในตารางที่ 3.1 และกราฟรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า ค่า C.B.R. จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น

3. เมื่อพิจารณาค่า C.B.R. แบบแช่น้ำ (Soaked) และแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) พร้อมกัน พบว่าค่า C.B.R. แบบแช่น้ำของดินลูกรัง เมื่อยังไม่ได้ผสมปูนขาวจะมีค่าน้อยกว่าค่า C.B.R. แบบไม่แช่น้ำ แต่เมื่อผสมปูนขาวลงไป ค่า C.B.R. แบบแช่น้ำจะมีค่ามากกว่า ค่า C.B.R. แบบไม่แช่น้ำ แต่ในด้านการใช้งานจะนำค่า C.B.R. ค่าที่น้อยกว่ามาใช้ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัย

การวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าของการใช้ปูนขาวผสมในดินลูกรัง

ปูนขาว 1 ถุง หนัก 5 กิโลกรัม ราคา 8 บาท*

ราคากิโลกรัมละ 1.6 บาท

ดินลูกรังที่ใช้ในการทดลองมีความหนาแน่นแห้ง 2.312 g/cm^3

ดินลูกรัง 1 m^3 มีน้ำหนัก $= \frac{2.312 \times (100)^3}{1000} = 2312$ kg.

ปูนขาว 2 % โดยน้ำหนัก $= 0.02 \times 2312 = 46.24$ kg.

ปูนขาว 4 % โดยน้ำหนัก $= 0.04 \times 2312 = 92.48$ kg.

ปูนขาว 6 % โดยน้ำหนัก $= 0.06 \times 2312 = 138.72$ kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปูนขาว 8 % โดยน้ำหนัก = 0.08 x 2312 = 184.96 kg.

ปูนขาว 10 % โดยน้ำหนัก = 0.10 x 2312 = 231.20 kg.

ปูนขาว 12 % โดยน้ำหนัก = 0.12 x 2312 = 277.44 kg.

46.24 kg. คิดเป็นราคาปูนขาว = 73.984 บาท

92.48 kg. คิดเป็นราคาปูนขาว = 147.968 บาท

138.72 kg. คิดเป็นราคาปูนขาว = 221.952 บาท

184.96 kg. คิดเป็นราคาปูนขาว = 295.936 บาท

231.20 kg. คิดเป็นราคาปูนขาว = 369.920 บาท

277.44 kg. คิดเป็นราคาปูนขาว = 443.904 บาท

ค่าที่หาได้สามารถเขียนเป็นดังตารางที่ 3.2 และกราฟรูปที่ 3.4 สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ผสมปูนขาว 2 % ราคาปูนขาว/ค่า C.B.R. = $\frac{73.984}{32.4-20.4}$ = 6.16 บาท/%C.B.R.

ผสมปูนขาว 4 % ราคาปูนขาว/ค่า C.B.R. = $\frac{147.968}{46.1-20.4}$ = 5.75 บาท/%C.B.R.

ผสมปูนขาว 6 % ราคาปูนขาว/ค่า C.B.R. = $\frac{221.952}{54.3-20.4}$ = 6.55 บาท/%C.B.R.

ผสมปูนขาว 8 % ราคาปูนขาว/ค่า C.B.R. = $\frac{295.936}{62.6-20.4}$ = 7.01 บาท/%C.B.R.

ผสมปูนขาว 10 % ราคาปูนขาว/ค่า C.B.R. = $\frac{396.920}{71.1-20.4}$ = 7.83 บาท/%C.B.R.

ผสมปูนขาว 12 % ราคาปูนขาว/ค่า C.B.R. = $\frac{443.904}{81.2-20.4}$ = 7.30 บาท/%C.B.R.

จะเห็นว่า เมื่อผสมปูนขาวลงไป 4 %ในดินลูกรัง จะทำให้ ราคาปูนขาว/%C.B.R. จะมีค่าน้อยที่สุด ทำให้มีความคุ้มค่ามากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าในการใช้ดินลูกรังแทนหินคลุกในงานถนน

หินคลุกในงานถนนจะใช้ในการทำวัสดุชั้นพื้นทาง ซึ่งมีค่า C.B.R. >= 80 % ถ้าเราจะนำดินลูกรังมาปรับปรุงคุณภาพให้ใช้แทนหินคลุกได้ในงานถนน ก็จะต้องทำให้ดินลูกรังมีค่า C.B.R. >= 80 % เมื่อดูจากตารางที่ 3.1 แล้ว ก็จะพิจารณาที่ 12 % ให้ค่า C.B.R. 81.2 % ซึ่งถ้าจะปรับปรุงด้วยปูนขาวแล้วก็จะต้องใช้ปูนขาวในราคา 443.904 บาทต่อดิน 1 ลูกบาศ์กเมตร ในขณะที่หินคลุกนั้นราคา ลูกบาศ์กเมตรละ 225 บาท* ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ไม่เหมาะสมในการนำดินลูกรังมาปรับปรุงเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง เนื่องจากราคาแพงกว่าในการใช้หินคลุกมากเกือบ 2 เท่าตัว

4. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด(Maximum Dry Density) และปริมาณปูนขาวในดินลูกรัง ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า ค่า Maximum Dry Density จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงระหว่าง 2.221-2.324 g/cc โดยมีการขึ้นลงที่ไม่แน่นอน

5. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำบรรจุพอเหมาะ (Optimum Moisture Content) และปริมาณปูนขาวในดิน ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และกราฟรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า ค่า Optimum Moisture Content จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อผสมปูนขาวมากขึ้น

6. ค่าเปอร์เซนต์การบวมตัว (% Swell) และปริมาณปูนขาวที่ลงในดินลูกรัง มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในตารางที่ 3.1 และกราฟรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า เปอร์เซนต์การบวมตัวจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อปริมาณปูนขาวในดินลูกรังเพิ่มขึ้น

*ที่มา : ราคาวัสดุก่อสร้างในส่วนกลาง กองระดับราคา กระทรวงพานิชย์ ฉบับกรกฎาคม 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า Max.γ_d , Optimum Moisture Content , C.B.R. และ Percent Swell ของดินลูกรัง

% ปูนขาว โดย น.น.	Max.γ_d (g/cc)	optimum moisture content(%)	%C.B.R. แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)	%C.B.R. แบบแช่น้ำ (Soaked)	% SWELL
0	2.312	8.10	27.3	20.4	0.90
2	2.324	8.65	32.4	36.1	0.85
4	2.266	8.85	46.1	51.3	0.75
6	2.221	9.15	54.3	60.3	0.62
8	2.248	9.30	62.6	69.1	0.51
10	2.284	9.50	71.1	80.4	0.42
12	2.294	9.60	81.2	98.1	0.30

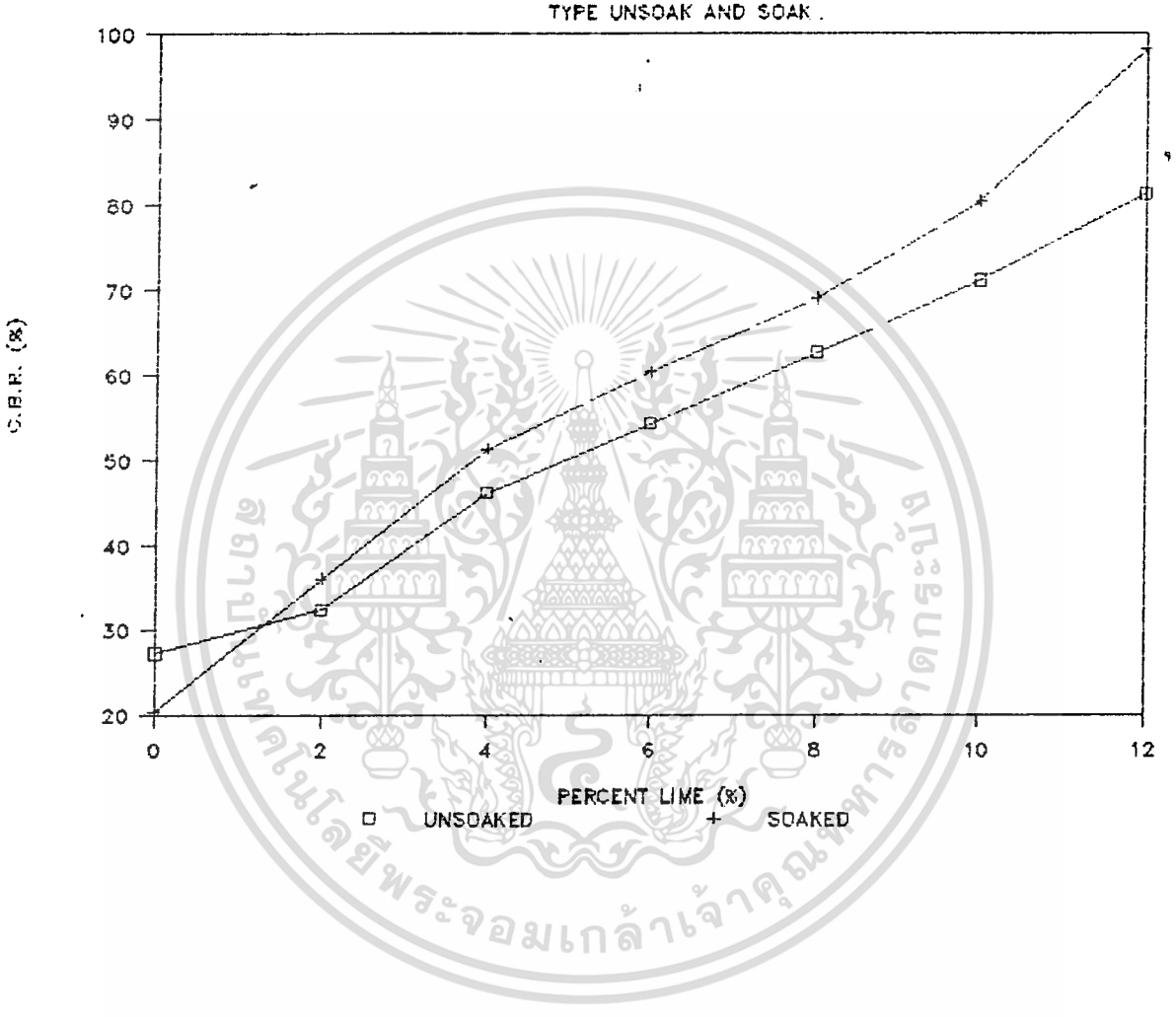
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า C.B.R. และราคา/ลูกบาศ์กเมตร ของดินลูกรัง

% ปูนขาว โดย น.น.	ราคา (บาท/ลบ.ม.)	C.B.R. (%)
0	0.000	20.4
2	73.984	32.4
4	147.968	46.1
6	221.952	54.3
8	295.936	62.6
10	369.920	71.1
12	443.904	81.2

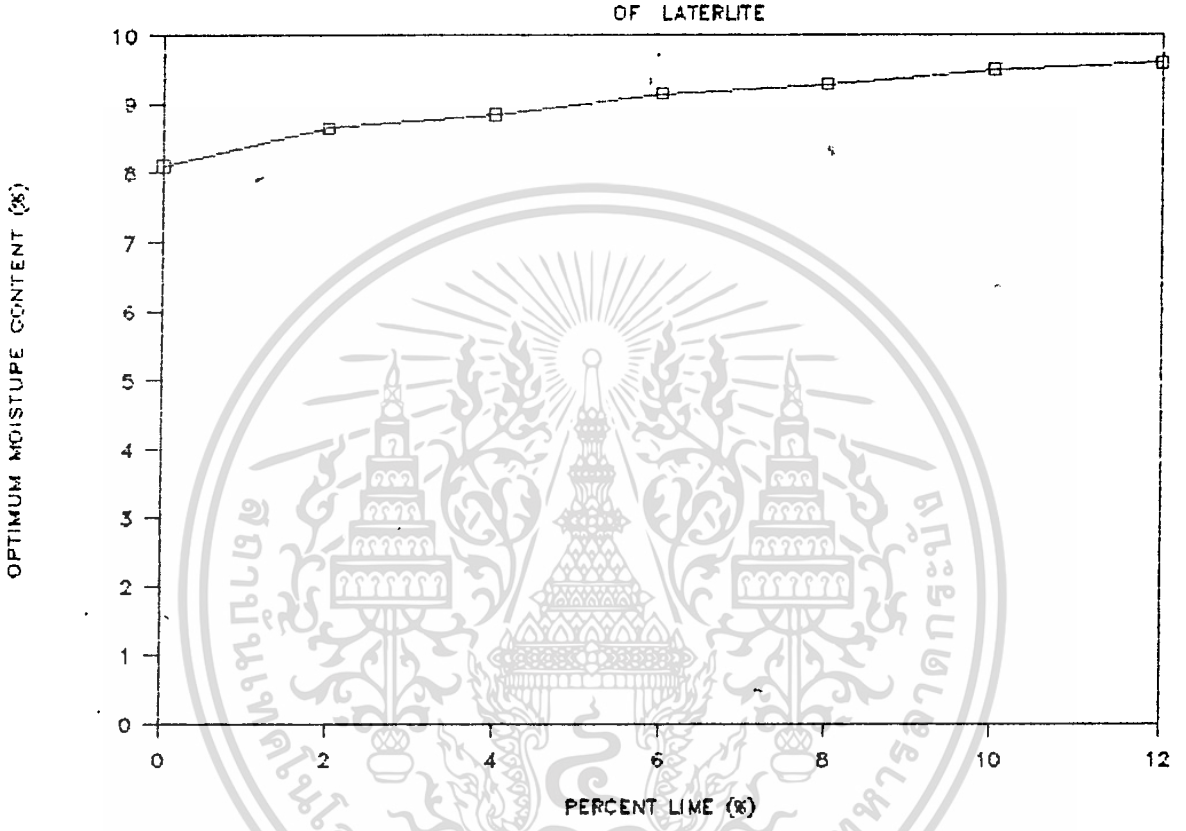
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3.1 C.B.R. OF LATERLITE+LIME



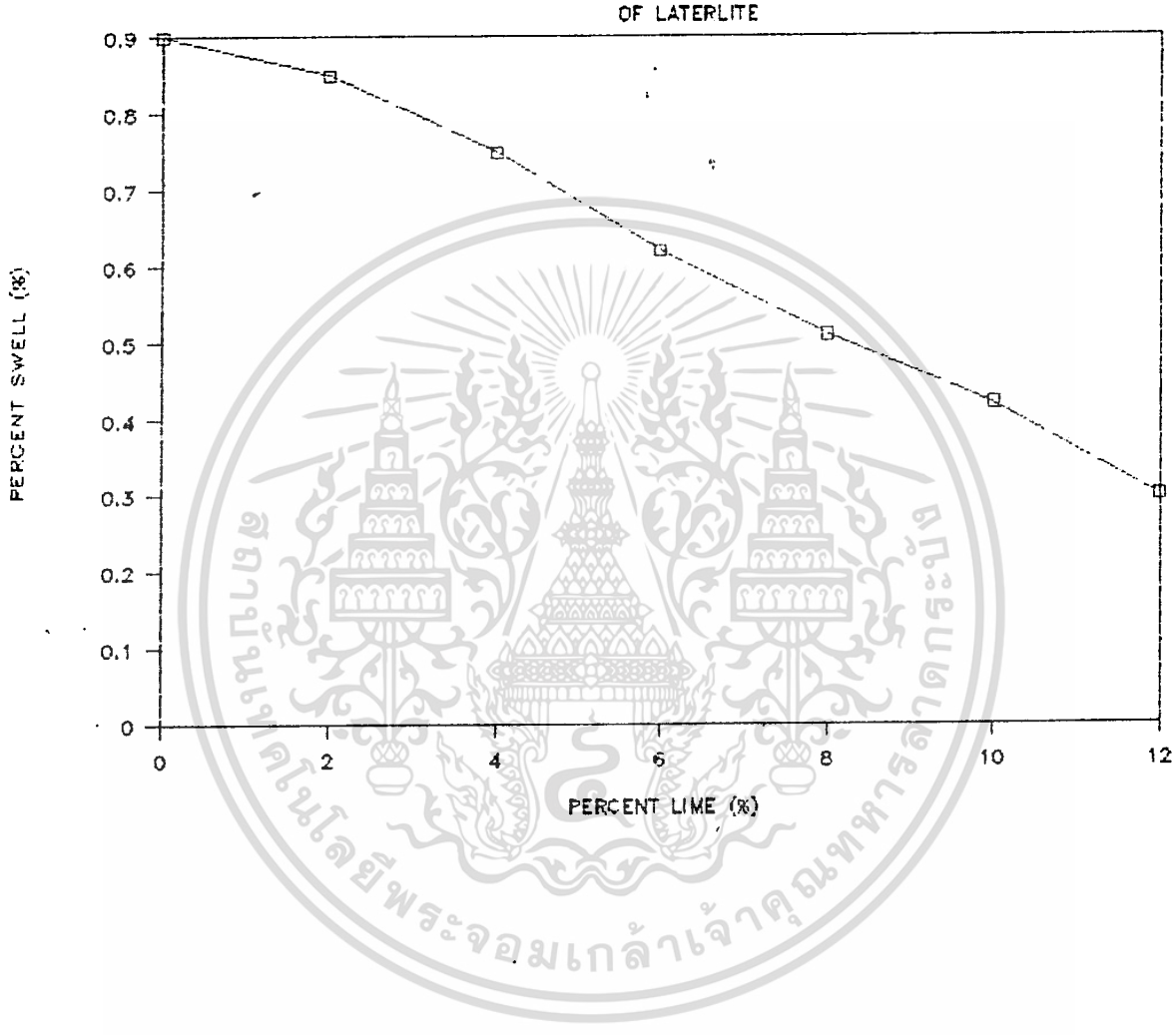
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3.2 OPTIMUM MOISTURE CONTENT OF LATERLITE



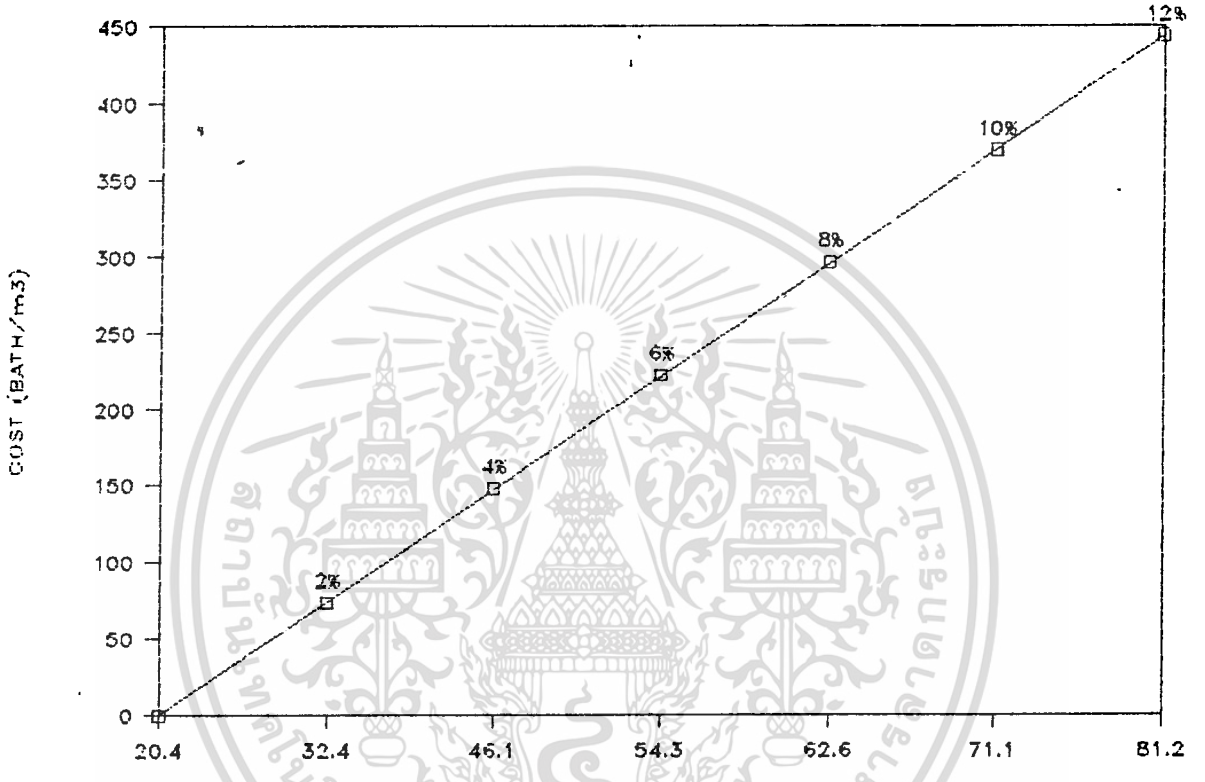
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3.3 PERCENT SWELL OF LATERLITE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3.4 COST AND C.B.R.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การบดอัดดิน

(COMPACTION)

บทนำ

ในสมัยก่อนเมื่อการก่อสร้างยังไม่ได้พัฒนามาก การประดิษฐ์เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัดดินยังมีไม่มาก งานก่อสร้างที่เกี่ยวกับงานดิน เช่น ถนน ทางรถไฟ หลังจากการขุดถมแล้วก็ต้องปล่อยทิ้งไว้ 3 ถึง 5 ปี เพื่อรอให้มีการทรุดตัวแน่นก่อนที่จะมีการวางไม้หมอนรางรถไฟ หรือลงผิวจราจร

การบดอัดดินเป็นการะบวนการที่ใช้แรงหรือน้ำหนักจากเครื่องมือกล กระทำให้เม็ดดินเบียดตัวชิดกัน เพิ่มความแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว ลดการซึมผ่านของน้ำ(permeability) ของดิน เครื่องมือกลที่ใช้ในการบดอัด เช่น รถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง รถบดตีนแกะ(Sheep Foot Rollers) รถบดชนิดสั่นกระแทก (Vibrating Roller) เป็นต้น การจะเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดขึ้นอยู่กับประเภทของดิน หรือวัสดุที่จะบดอัด

ทฤษฎี

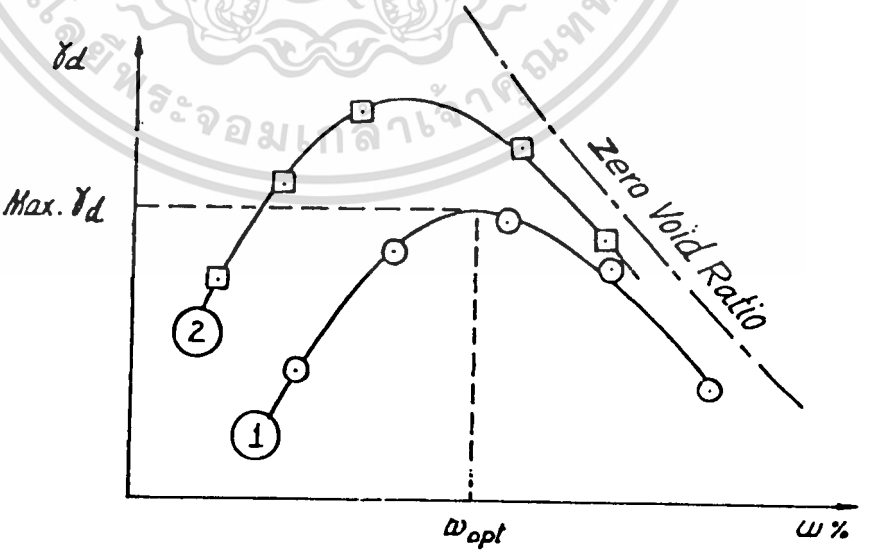
วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งานจะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้าน้ำมีอยู่มากเกินไปน้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบ ๆ มวลดิน ทำให้อนุของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกันหรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว RR. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความชื้นกับความแน่น(Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้าง โดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน(Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน(Runway) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบัน ยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน(Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูงรับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor Test)

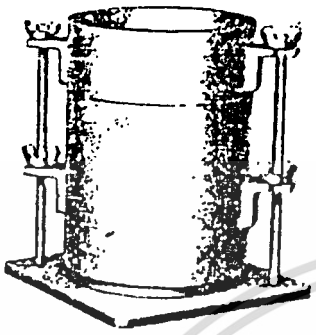
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบ Standard Proctor และ Modified Proctor

Test	Mold size	Wt. of hammer (lb.)	No. of layer'	height of drop (in)	No. Of blow per layer	energy/vol. ft - lb/ft^3
Standard Proctor	ϕ4.0"×4.6"	5.5	3	I2	25	12,400
	ϕ6.0"×5.0"	5.5	3	12	56	12,400
Modified Proctor	ϕ6.0"×5.0"	10	5	18	56	56,000
	ϕ4.0"×4.6"	10	5	18	25	56,300

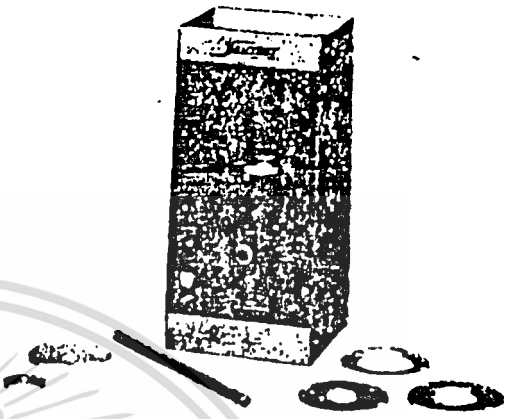


รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และเปอร์เซนต์ความชื้น(Percent water content)ของ Standard Proctor (1) และ Modified Proctor

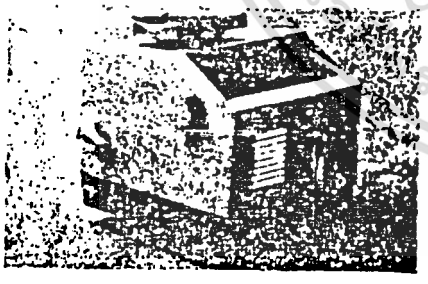
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MOLD

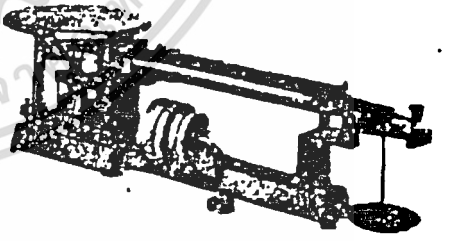


SAMPLE EJECTOR



PRECISION BALANCE

HAMMER



BALANCE

รูปที่ 4.2 เครื่องมือใช้ในการทดลองการบดอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำการบดอัดดินในห้องทดลอง ซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐาน ในการควบคุมการบดอัดในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาผึ่งให้แห้ง แล้วค่อย ๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาตรที่พอเหมาะ แล้วเริ่มทำการบดอัดใน Mold(แบบที่ใช้บดอัด) โดยวิธีการที่จะพูดถึงรายละเอียดภายหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่น ในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาตรน้ำขึ้นเรื่อยๆ อย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดแต่ละครั้ง ก็จะหาความสัมพันธ์ของ ความหนาแน่นของดินแห้งกับความชื้น จะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า "ความหนาแน่นสูงสุด" (Maximum Dry Density) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า "ความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด"(Optimum Water Content) ดังแสงในรูปที่ 1 (1)

ถ้าเอาพลังงานในการบดอัดสูงขึ้นในดินชนิดเดียวกัน เส้นกราฟการบดอัด จะขยับสูงขึ้น ดังเช่นในรูปที่ 1 (2) จะสามารถสังเกตุลักษณะพิเศษสองประการ คือค่า γ_d ของ Modified Proctor จะสูงกว่า γ_d ของ Standard Proctor และค่าเปอร์เซนต์ความชื้นที่จุด γ_d สูงสุด ซึ่งเรียกว่าความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content) ก็จะลดลงด้วยขณะที่ γ_d เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะพิเศษนี้เป็นคุณสมบัติของดินโดยทั่วไปเมื่อได้รับการบดอัด

การทดลองบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องทดลอง

1. mold ϕ4" x 4.6" with collar 2.5 in high
   (Standard Proctor)
   mold ϕ6" x 5.0" with collar 2.5 in high
   (Modified Proctor)
2. hammer ϕ2" Weight 5.5 lb. (Standard Proctor)
   hammer ϕ2" Weight 10.0 lb. (Modified Proctor)
3. ตะแกรงร่อน เบอร์ 4 (Standard Proctor)
   ตะแกรงร่อน เบอร์ 3/4 นิ้ว (Modified Proctor)
4. ฆ้อนยาง, แปรงอ่อนใช้ปัดดิน
5. ช้อนตักดิน
6. บรรทัดเหล็กปาดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ถาดผสมดิน

8. ตาชั่ง ชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม

9. ตาชั่ง ชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม

10. เตาอบดินอุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส

11. กระป๋องใส่ตัวอย่างดิน

12. เครื่องดันตัวอย่างดินออกจาก Mold (jack)

13. กระบอกตวงน้ำ มีขีดแบ่งปริมาตร

การเตรียมตัวอย่างดิน

เพื่อให้ขนาดของ เม็ดดินและขนาดของ mold ที่ใช้ทดลองมีส่วนสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม ดินตัวอย่างที่จะใช้จำเป็นต้องร่อนผ่านตะแกรงตามขนาดดังนี้

Standard Proctor test ดินตัวอย่างจะต้องตากให้แห้งในห้องปฏิบัติการ หรืออบที่อุณหภูมิไม่เกิน 140 องศาฟาเรนไฮต์ แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

Modified Proctor test ดินตัวอย่างจะต้องตากให้แห้งในห้องปฏิบัติการหรืออบที่อุณหภูมิไม่เกิน 140 องศาฟาเรนไฮต์ แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" ดินที่มีขนาดโตกว่าเบอร์ 3/4" จะต้องทิ้งไปและดินที่ทิ้งไปนี้จะต้องชดเชยด้วยดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ด้วยจำนวนน้ำหนักเท่ากัน วิธีที่สะดวกในการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำ Modified Proctor test ก็โดยการแบ่งตัวอย่างดินออกเป็นกอง ๆ โดยวิธี Quartering แต่ละกองให้มีน้ำหนักประมาณ 6 กก. ร่อนดินกองแรกผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" และชั่งน้ำหนักดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/4" และร่อนดินอีกกองหนึ่งใช้ตะแกรงเบอร์ 3/4" และเบอร์ 4 ชั่งดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ให้มีน้ำหนักเท่ากับดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/4" ที่จดไว้นำไปผสมกับดินกองแรกเพื่อทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทำการทดลอง Standard Proctor ใช้ mold ϕ4" x 4.6"

1.วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของmold พร้อมทั้งคำนวณหาปริมาตรของ mold

2.ชั่งน้ำหนักของ mold ให้ได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

3.ชั่งน้ำหนักดินตัวอย่างที่เตรียมไว้มาอย่างน้อย 4 กก. ผสมน้ำลงไป 3-4 % คลุกเคล้ากันให้ทั่วจนได้ความชื้นของดินสม่ำเสมอกันตลอด

4.ตักดินใส่ใน mold ที่ประกอบ collar และ base plate แล้วกะแบ่งปริมาตรของดินที่ใส่ให้ได้จำนวน 3 ชั้นเท่า ๆ กัน เมื่อ compact เสร็จแล้ว ชั้นสุดท้ายให้เหลือพ้นส่วนบนของ mold เล็กน้อย ประมาณ 1-2 ซม.

5.ใช้ hammer ขนาด 5.5 lb. compact ดินใน mold ในแต่ละชั้น ๆ ละ 25 ครั้ง และต้องพยายาม compact ให้ได้ความแน่นของดินในแต่ละชั้นสม่ำเสมอเท่ากันโดยตลอด ขณะ compact ตัว mold จะต้องวางบนพื้นคอนกรีตที่เรียบและแข็ง

6.เมื่อ compact ครบจำนวนครั้งแล้วถอด collar ของ mold ออกใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินปาก mold ออกและอุดแต่งผิวดินให้เรียบเสมอปาก mold ใช้แปรงปัดทำความสะอาดดินที่ค้างอยู่นอก mold แล้วถอด base plate ออกนำไปชั่งหาน้ำหนักดินใน mold ให้ได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

7.ดันแท่งตัวอย่างดินออกจาก mold แล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง เก็บดินตัวอย่างตามแนวผ่านี้อย่างน้อย 100 กรัม ไปชั่งน้ำหนักและเข้าอบในเตาอบ เพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นต่อไป

8.เอาตัวอย่างดินที่เหลือมาทุบย่อยให้ร่วนและผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แล้วผสมน้ำเพิ่มอีกประมาณ 3 % คลุกเคล้ากันให้ทั่วสม่ำเสมอแล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4 ถึงข้อ 7 อีก จนกระทั่งน้ำหนักดินใน mold ที่ชั่งได้ครั้งสุดท้ายลดลง และอย่างน้อยควรจะเปลี่ยนหรือเพิ่มปริมาณน้ำถึง 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทำการทดลอง Modified Proctor ใช้ mold ϕ6 " x 5"

1.วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของ mold พร้อมทั้งคำนวณหาปริมาตรของ mold

2.ชั่งน้ำหนักของ mold ให้ได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

3.ชั่งน้ำหนักดินตัวอย่างที่เตรียมไว้มาอย่างน้อย 7 กก. ผสมน้ำลงไป 3-4 % คลุกเคล้ากันให้ทั่วจนได้ความชื้นของดินสม่ำเสมอกันตลอด

4.ตักดินใส่ใน mold ที่ประกอบcollar ,base plate และ spacer disc เรียบร้อยแล้วกะแบ่งปริมาตรของดินที่ใส่ให้ได้จำนวน 5 ชั้นเท่า ๆ กัน เมื่อ compact เสร็จแล้ว ชั้นสุดท้ายให้เหลือพ้นส่วนบนของ mold เล็กน้อย ประมาณ 1 ซม.

5.ใช้ hammer ขนาด 10 lb. compact ดินใน mold ในแต่ละชั้นให้ได้ชั้นละ 56 ครั้ง และต้องพยายาม compact ให้ได้ความแน่นของดินในแต่ละชั้นสม่ำเสมอเท่ากันโดยตลอด ขณะ compact ตัว mold จะต้องวางบนพื้นคอนกรีตที่เรียบและแข็ง

6.เมื่อ compact ครบจำนวนครั้งแล้วถอด collar ของ mold ออกใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินปาก mold ออกและอุดแต่งผิวดินให้เรียบเสมอปาก mold ใช้แปรงปัดทำความสะอาดดินที่ค้างอยู่นอก mold ถอด base plate ออก นำ mold ไปชั่งน้ำหนักให้ได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

7.ดันแท่งตัวอย่างดินออกจาก mold แล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง เก็บดินตัวอย่างตามแนวผ่านี้อย่างน้อย 500 กรัม ไปชั่งน้ำหนักและเข้าอบในเตาอบ เพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นต่อไป

8.เอาตัวอย่างดินที่เหลือมาทุบย่อยให้ร่วนและผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" แล้วผสมน้ำเพิ่มอีกประมาณ 3 % คลุกเคล้ากันให้ทั่วสม่ำเสมอแล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4 ถึงข้อ 7 อีก จนกระทั่งน้ำหนักดินใน mold ที่ชั่งได้ครั้งสุดท้ายลดลง และอย่างน้อยควรจะเปลี่ยนหรือเพิ่มปริมาณน้ำถึง 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

1. Wet density ของดิน = $\frac{\text{Wet Weight}}{\text{volume of mold}}$ lb./cu.ft.

2. dry density (γ_d) = $\frac{W}{V(1 + w)}$ lb./cu.ft.

W = น้ำหนักดิน (Wet weight) ใน mold

V = ปริมาตรของ mold

w = เปอร์เซ็นต์ความชื้นของดิน (water content)

ผลการทดลอง

1. หาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (water content) และ dry density โดยการนำค่า dry density มา plot ในแกนตั้ง และ water content (%) plot ในแกนนอน
2. หาค่า optimum moisture content จาก curve ในข้อ 1
3. หาค่า Max. γ_d จาก curve ในข้อ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

แคลิฟอร์เนีย แบริง เรโช

(CALIFORNIA BEARING RATIO : CBR)

บทนำ

ในปี ค.ศ. 1929 California Division of Highway ได้กำหนดวิธีทดสอบจำแนกคุณสมบัติของดิน เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการก่อสร้างถนน และในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 จำเป็นต้องพัฒนาการสร้างสนามบิน เพื่อรับกับเครื่องบินรบ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกอาวุธยุทธภัณฑ์หนักเพิ่มขึ้นมาก หน่วยทหารช่างของสหรัฐอเมริกาได้นำวิธีการทดสอบคุณสมบัติแบบ CBR. มาใช้ในการออกแบบและก่อสร้างทางวิ่งของสนามบิน และวิธีการดังกล่าวก็เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันโดยทั่วไป

ทฤษฎี

CBR. test เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเฉือน (Shearing resistance) ของดินที่บดอัดจนแน่นดีแล้ว (ส่วนมากจะทดสอบที่ optimum moisture content) โดยการใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่า Unit load มาตราฐานที่ได้จากการทดลองกด piston ขนาดเดียวกันนี้บนหินที่ compact แน่นที่ความลึกของ penetrationเท่ากัน ค่าที่ได้นี้เรียกว่า"เปอร์เซนต์ CBR." เทียบอัตราส่วนเป็นเปอร์เซนต์ของ standard unit load เขียนเป็นสมการของอัตราส่วนได้ดังนี้

$$CBR. = \frac{\text{test unit load}}{\text{standard unit load}} \times 100\ \%$$

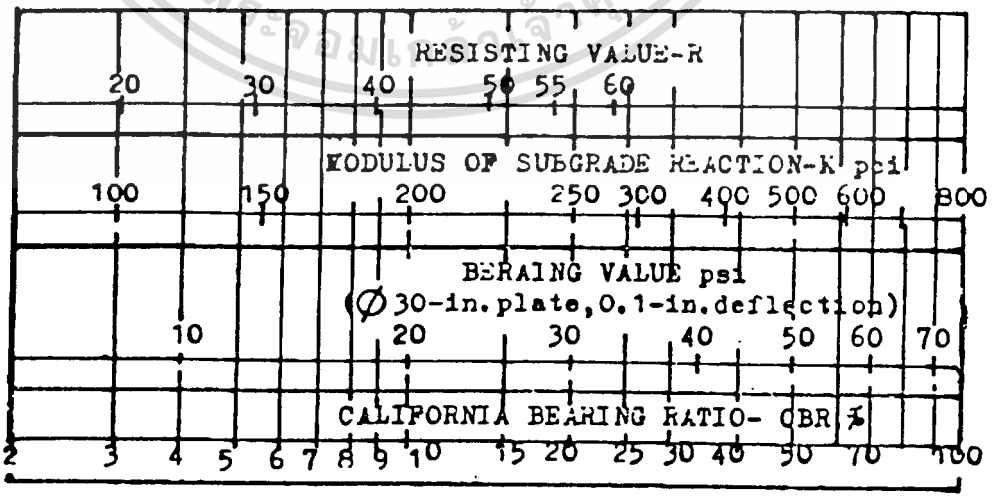
ค่า standard unit load ซึ่งได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตัน (piston) มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว บนหินคลุกมาตรฐานบดอัดแน่นขนาดต่าง ๆ กันหลายขนาดมีค่ามาตราฐานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Penetration (in)	Unit load (Psi)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

ค่า % CBR. โดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้าผลปรากฏออกมาว่า % CBR. ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้ว สูงกว่าที่ความลึก 0.1 นิ้ว การทดลองควรจะต้องกระทำซ้ำอีกครั้ง ซึ่งถ้าค่า % CBR. ที่ได้มายังเป็นไปในรูปเดิมก็ให้ใช้ค่า %CBR ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว

ค่า CBR. นำมาใช้ประโยชน์ ในการออกแบบความหนาของถนนลาดยาง (flexible pavement) โดยการกำหนดความหนาจาก design charts หรืออาจใช้ช่วยในการกำหนดค่า Subgrade Modulus (K) ของดินจากตารางเปรียบเทียบเพื่อช่วยในการออกแบบถนนคอนกรีตได้อีกด้วย



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CBR., K, R และ Bearing Value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่า CBR ของดินแต่ละชนิดยังสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินอย่างคร่าว ๆ ว่าเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างถนนในชั้นดินถม ชั้นรองพื้นทาง (subbase) หรือชั้นพื้นทาง (base) ดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ของ % CBR และการใช้งาน

% CBR	คุณสมบัติเหมาะสมทางวิศวกรรม	การใช้งาน
0 - 3	very poor	subgrade
3 - 7	poor to fair	subgrade
7 - 20	fair	subbase
20 - 50	good	subbase,base
50 - 80	very good	base
> 80	excellent	base

การทดลอง CBR ทำได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามจากตัวอย่างดินที่บดอัดแน่นตามวิธีการของ Standard หรือ Modified Proctor ดินตัวอย่างที่เตรียมสำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องเตรียมขึ้น 2 ชุด ชุดหนึ่งใช้กดทดลองหาค่า penetration ทันทีหลังจากเตรียมตัวอย่างเสร็จ อีกชุดหนึ่งจะต้องแช่น้ำไว้ 96 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอมน้ำจนอิ่มตัว และเพื่อจุดประสงค์จะวัดหาอัตราการบวมตัวของดินด้วย ในระหว่างที่ทำการแช่น้ำอยู่จะต้องมีน้ำหนักวางกดทับดินตัวอย่าง(Surcharge) ไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์ หรือเท่ากับน้ำหนักของพื้นทางและผิวจราจร เหตุผลที่ทำเช่นนี้ก็เพื่อจะหาค่า CBR ที่ควรจะเกิดขึ้นจริง ๆ ในสนาม กล่าวคือในหน้าฝนระดับน้ำใต้ดินจะสูงจนทำให้ดินที่รองรับถนนอยู่อิ่มตัวและอัตราการบวมตัวของดินที่จะมาใช้ในการก่อสร้างจะเป็นค่าหนึ่งซึ่งสามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติ และความเหมาะสมในการใช้งานของวัสดุนั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง CBR. ในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.

1. แบบ (mold) สำหรับเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 7 นิ้ว พร้อม collar สูง 2.5 นิ้ว และ base plate สำหรับยึด Mold และ collar

2. Spacer Disc สูง 2.5 นิ้ว

3. Hammer หนัก 10 lb.

4. Swelling Plate พร้อมขายึดมีเกลียวปรับความสูงต่ำได้

5. สามขา (Tripod) สำหรับยึด Dial indicator เพื่อวัดอัตราการบวมของดินเมื่อแช่น้ำ

6. Dial indicator วัดได้ 1 นิ้ว อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว

7. น้ำหนักถ่วงทับ (Surcharge Weight) หนักแผ่นละ 5 ปอนด์

8. Penetration piston เนื้อที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว

9. Loading device แบบ Hydraulic jack หรือ Screw jack มีอุปกรณ์วัดแรงได้ 10,000 ปอนด์

10. ถังน้ำแช่ดินพร้อม mold

11. ตะแกรงร่อนดินเบอร์ 4 และ 3/4 นิ้ว

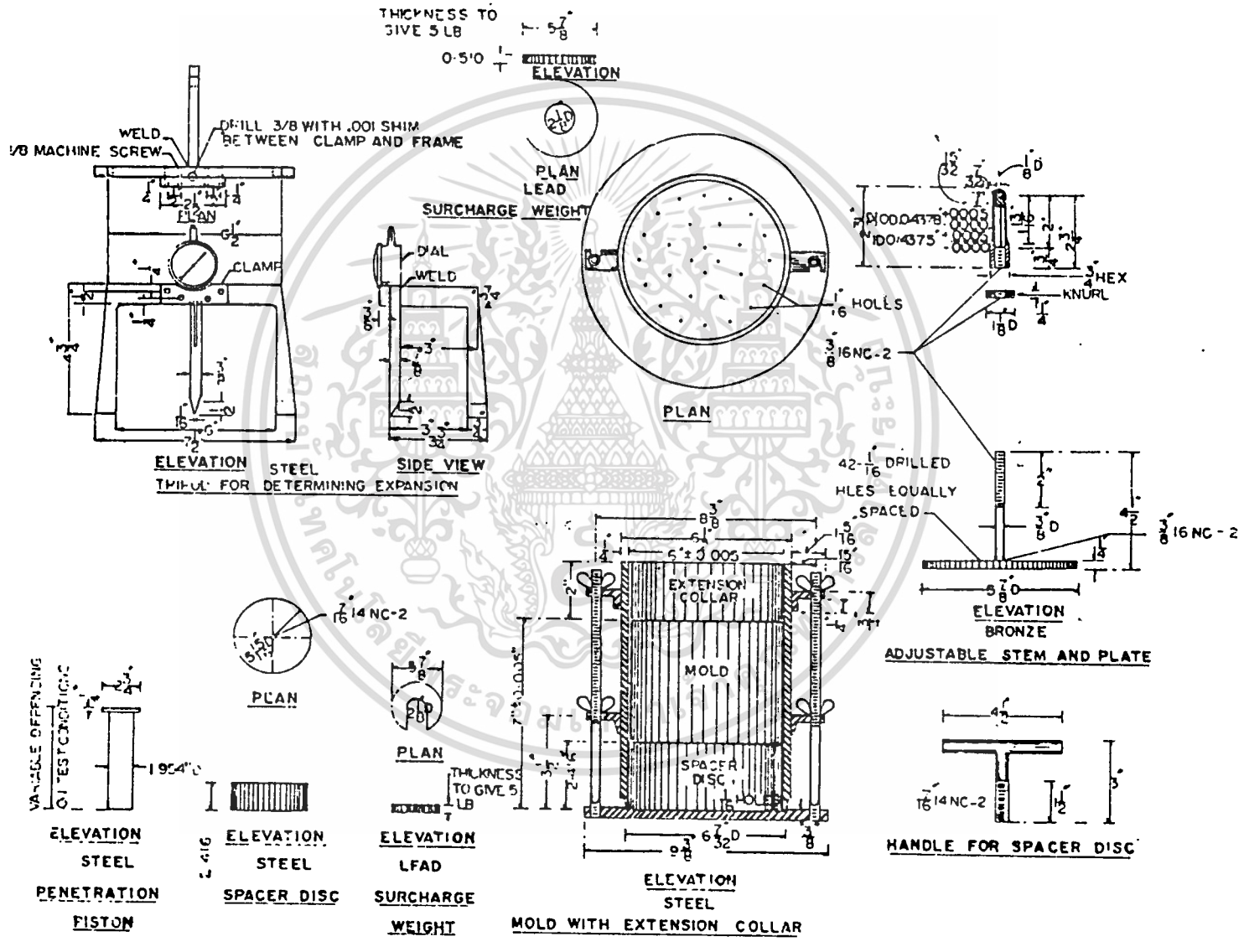
12. เครื่องชั่ง ถาดคลุกดิน Straight edge กระบอกตวงน้ำ

การเตรียมตัวอย่างดิน

1.ดินตัวอย่าง ก่อนจะนำมาทดลองจะต้องปล่อยทิ้งให้แห้งในห้องปฏิบัติการ (air dry) แบ่งดินออกเป็นกองตามวิธี Quartering แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/4" ให้ทิ้งไปและชดเชยด้วยดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ด้วยจำนวนน้ำหนักเท่ากัน

2.หาจุด Optimum moisture content โดยวิธี Modified Proctor method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ทดสอบ C.B.R.

วิธีทำการทดลอง

สำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ต้องมีการแช่น้ำ (Unsoaked CBR test)

1. ชั่งดินที่เตรียมไว้ประมาณ 12 ปอนด์ หรือ 6 กก. และนำดินตัวอย่างประมาณ 100 กรัม เพื่อนำไปหาเปอร์เซนต์ความชื้น(initial water content) ที่มีอยู่ในดินตัวอย่าง

2. เตรียม mold ไว้ 2 ชุด ชั่งหาน้ำหนัก mold (เฉพาะ mold ไม่รวม base plate)

3. ประกอบ mold เข้ากับ base plate spacer (ขนาด ϕ6" x 2") ใช้กระดาษกรอง ϕ6" ปูทับบน spacer เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดกับแผ่นเหล็ก

4. กระทุ้งดินอัดแน่นใน mold ตามวิธี compaction test ASTM D 1557 optimum moisture content 2 %

5. หลังจากบดอัดจนครบจำนวนชั้นและจำนวนครั้งแล้วถอด collar ออกใช้ไม้บรรทัดเหล็ก (Straight edge) ปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบ mold พร้อมกับซ่อมแต่ผิวบนของดินตัวอย่างให้เรียบเสมอกับปาก mold

6. ถอด base plate และ spacer disc ออกนำ mold และดินไปชั่งหาน้ำหนักเพื่อจะนำไปหา Wet density

7. เอากระดาษกรองวางบน base plate เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดแผ่นเหล็กประกอบ mold ที่มีดินอัดแน่นนี้เข้ากับ base plate โดยให้ปาก mold ด้านที่มีดินเสมอปากวางบน base plate และส่วนที่มีช่องว่าง 2.5 นิ้วอยู่ด้านบน

ขั้นต่อไปสำหรับ unsosked sample ทำข้อ 8-11

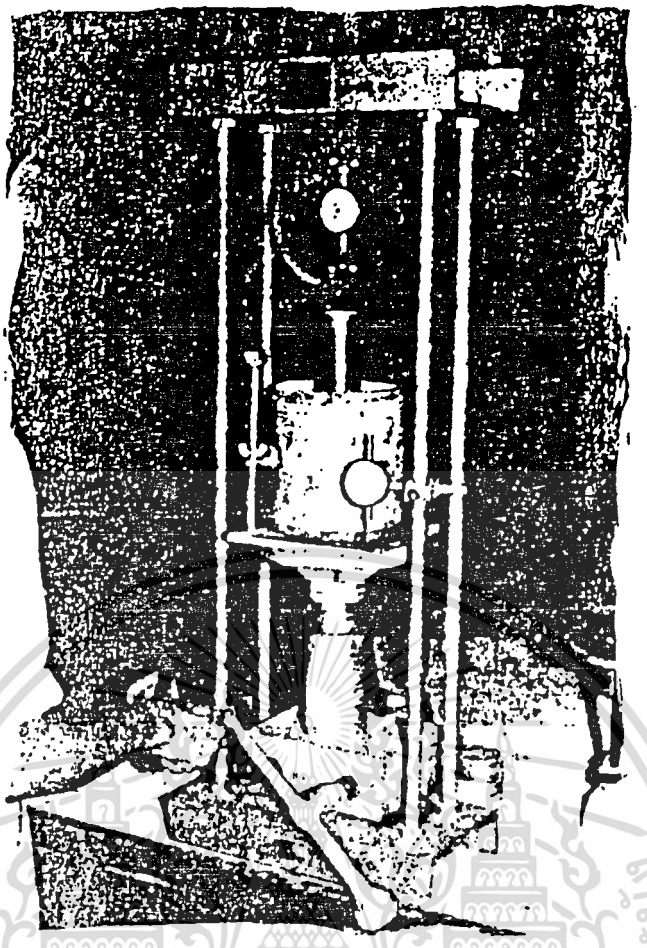
8. วางแผ่นเหล็ก surcharge อย่างน้อย 1 ปอนด์ ลงบนดินตัวอย่างใน mold

9. จัดวาง mold พร้อมดินตัวอย่างเข้าเครื่องกดทดลองซึ่งมี piston ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว ประกอบติดอยู่ จัดให้ผิวหน้าของดินใน mold แตะสัมผัสกับ piston ดังกล่าว จัดเข็ม dial gauge ที่จะใช้วัด penetration ให้อยู่ที่จุดศูนย์

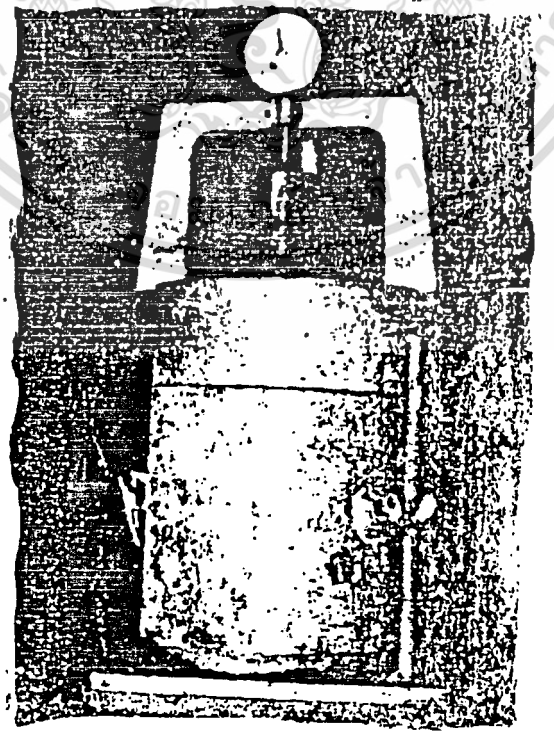
10. จัดการ load ในอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักที่ตรงกับ penetration 0, 0.025, 0.050, 0.750, 0.100, 0.150, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400 และ 0.500 นิ้ว

11. เสร็จแล้วถอด mold ออกจากเครื่องกดทดลองเก็บตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การกดตัวอย่าง C.B.R.



รูปที่ 5.4 การเตรียมตัวอย่าง C.B.R. เพื่อแช่น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม (fine grained soil) หรือประมาณ 500 กรัม (coarse grained soil) นำไปหาเปอร์เซนต์ความชื้น(water content)

สำหรับตัวอย่างดินที่มีการแช่น้ำ (Soaked sample) ทำข้อ 12-18 เพิ่มเติม

12. วางแผ่นเหล็ก surcharge หนัก 10 ปอนด์ ลงบนดินตัวอย่างใส่ swell plate สำหรับวัดอัตราการบวมตัวของดิน ซึ่งมีด้ามขันเกลียวขึ้นลงได้ติดอยู่กลาง plate ก่อนวางแผ่นเหล็ก surcharge ลงบนดินตัวอย่างจะต้องเอากระดาษกรองวางคั่นใต้แผ่น surcharge เสียก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้ดินติดแน่นกับแผ่นเหล็กหลังจากแช่น้ำแล้ว

13. แช่ mold ที่เตรียมไว้ในข้อ 12 นี้ ในภาชนะที่เตรียมไว้ให้น้ำท่วม surcharge ประมาณ 1 นิ้ว ใช้ dial gauge อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับ tripod แล้ววางบนปาก mold จัดให้ปลายของ dial gauge แตะสัมผัสกับก้าน swelling plate เพื่อวัดหาค่าการบวมตัวของดินต่อไป

14. แช่ดินตัวอย่างไว้ประมาณ 4 วัน จดค่าการบวมตัวจาก dial gauge ทุกวันจนครบ 4 วัน(ถ้าหากค่าการบวมตัวคงที่อาจจะหยุดอ่านได้หลังจากแช่น้ำแล้ว 48 ชั่วโมง)

15. หลังจากแช่ครบ 4 วันแล้ว ยก mold ออกจากน้ำและวางตะแคง mold เพื่อรินน้ำทิ้ง และปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้น้ำไหลออกจาก mold จนหมด

16. นำ mold พร้อมดินไปชั่งหาน้ำหนัก

17. ทำการทดลองตามวิธีข้อ 9 - ข้อ 10

18. เก็บดินตัวอย่างจาก soaked sample ไปหาเปอร์เซนต์ความชื้น

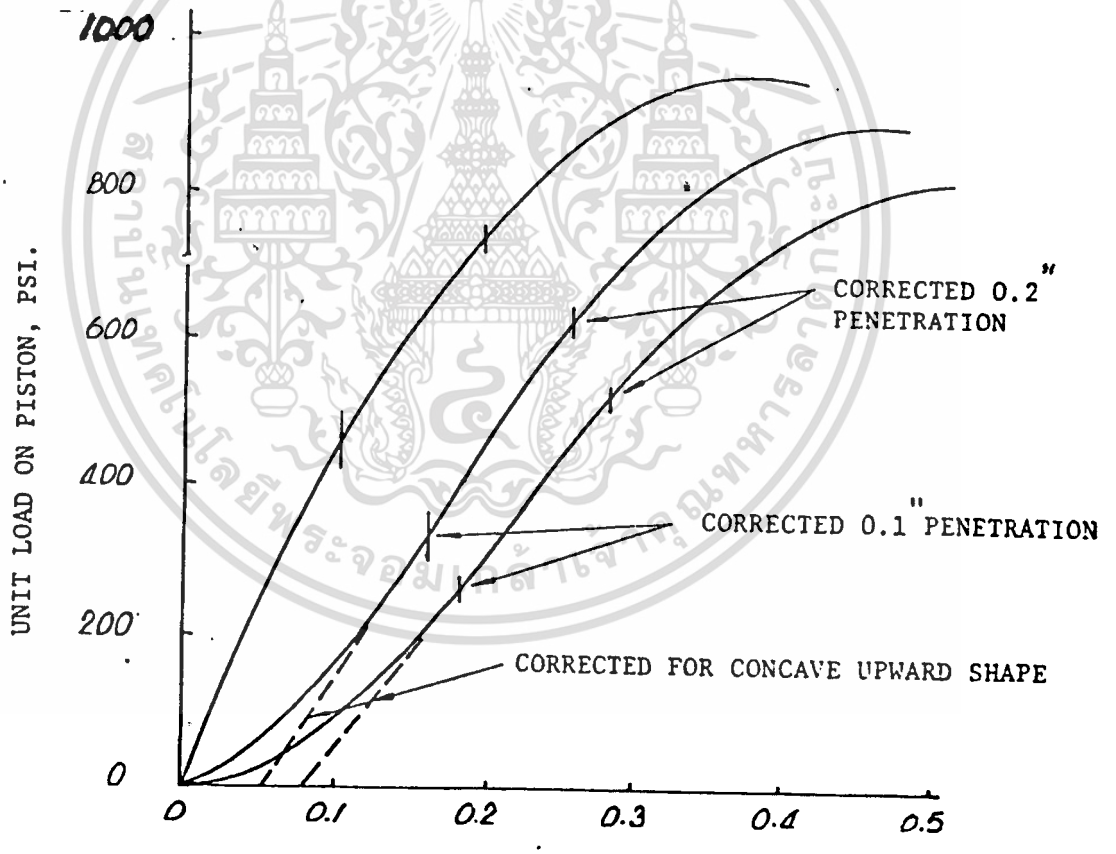
การคำนวณผลการทดลอง

1. คำนวณหาหน่วยแรงกดโดยสมการ

$$\text{Test unit load} = \frac{\text{penetration load}}{} \quad \text{psi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เขียนกราฟระหว่าง Test unit load ในแกนตั้งกับ penetration ในแกนนอนจากค่าที่ได้ทั้ง unsoaked และ soaked sample ลงในกระดาษกราฟแผ่นเดียวกัน โดยปกติแล้ว จะได้รูป curve โค้งคว่ำผ่านจุด origin แต่บางครั้งอาจจะปรากฏว่า curve ที่ได้มีรัศมีลักษณะโค้งคว่ำหงายในช่วงแรก ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการแก้ไขให้ได้ค่าที่ถูกต้องด้วยการลากเส้นตรงให้สัมผัสกับ curve ตรงส่วนที่มี origin ใหม่และ origin ใหม่นี้จะต้องอยู่ทางด้านขวาของ origin เดิมเสมอ เรียกว่า "Initial Correction"



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดและระยะจม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่ทำซ้ำ ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดและระยะจม

3. อ่านค่า test unit load จากกราฟที่ 0.1 และ 0.2 นิ้ว จากกราฟ และคำนวณค่า % CBR.

$$\% \text{ CBR.} = \frac{\text{test unit load}}{\text{standard unit load}} \times 100 \%$$

4. คำนวณหาเปอร์เซนต์ความชื้นและ dry density ของดินตัวอย่างทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุป

สรุปผลการทดสอบ

ผลจากการศึกษาทดสอบ และวิเคราะห์ผลของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังด้วยปูนขาว สรุปผลได้ดังนี้

1. ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมพอเหมาะ(Optimum Moisture Content) ของดินลูกรังเมื่อผสมด้วยปูนขาว จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น

2. ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Moisture Content) ของดินลูกรัง เมื่อผสมปูนขาวลงไป จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน แต่จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.221-2.324 g/cc

3. ค่า C.B.R. ของดินลูกรัง ทั้งแบบแช่น้ำ (Soaked) และแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวที่ผสมลงไปเพิ่มขึ้น และค่า C.B.R. ของดินลูกรังเมื่อไม่ผสมปูนขาว ค่า C.B.R. แบบแช่น้ำ จะน้อยกว่าค่า C.B.R. แบบไม่แช่น้ำ แต่เมื่อผสมปูนขาวลงไป ค่า C.B.R. แบบแช่น้ำ จะมากกว่าค่า C.B.R. แบบไม่แช่น้ำ ทั้งนี้เพราะเมื่อปูนขาวทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง เนื้อดิน และน้ำ จะจับตัวกันแน่น จึงทำให้ค่า C.B.R. แบบแช่น้ำของดินลูกรังเมื่อผสมปูนขาวมีค่ามากกว่าค่า C.B.R. แบบไม่แช่น้ำ

4. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังด้วยปูนขาว ในปริมาณที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาในแง่ของความประหยัดแล้ว ควรจะใช้ที่ 4 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังด้วยปูนขาว ควรจะใช้ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในบริเวณนั้น เมื่อดินในบริเวณนั้นมีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่จะรับน้ำหนักสิ่งก่อสร้าง หรือใช้ในกรณีที่ดินลูกรังมีคุณภาพไม่ดีพอที่ใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง ให้สามารถใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้ แต่ไม่ควรที่จะปรับปรุงคุณภาพโดยปูนขาวจนใช้เป็นชั้นพื้นทางได้ เนื่องจากเหตุผลในแง่ความประหยัดดังที่ได้วิเคราะห์มาแล้ว

6. การทำปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่าง ปูนขาว เนื้อดิน และน้ำ จะทำให้ช่วยลดการบวมตัวของดินได้ โดยปริมาณปูนขาวยิ่งมากการบวมตัวของดินก็จะยิ่งน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง แสดงวัตถุประสงค์ของการผสมปูนขาวลงไปในดิน

(INGLE and METCALF, 1972)

SUGGESTED CRITERIA FOR SOIL-LIME		
Process	Purpose	Requirements
Lime "modification"	Improvement of access on wet site Improvement of workability and pulverization	Large increase in plastic limit Rapid increase in bearing strength Large and rapid decrease in plasticity Increase in proportion passing 3/16 in sieve
Lime "stabilization"	Improvement of subgrade material Improvement of base material	Increase in bearing capacity Decrease in swell Decrease in plasticity Decrease in swell Increase in strength

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมของปูนขาวที่สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ในการพัฒนาคุณภาพของดิน

(INGLES and METCALF, 1972)

SUGGESTED LIME* CONTENTS		
Soil Type	Content for Modification	Content for Stabilization
Fine crushed rock†	2 - 4 per cent	not recommended
Well graded clay gravels	1 - 3 per cent	3 per cent
Sands††	not recommended	not recommended
Sandy clay	not recommended	5 per cent
Silty clay	1 - 3 per cent	2 - 4 per cent
Heavy clay	1 - 3 per cent	3 - 8 per cent
Very heavy clay	1 - 3 per cent	3 - 8 per cent
Organic soils	not recommended	not recommended

* Hydrated lime $Ca(OH)^2$ as a percentage of dry weight of soil.

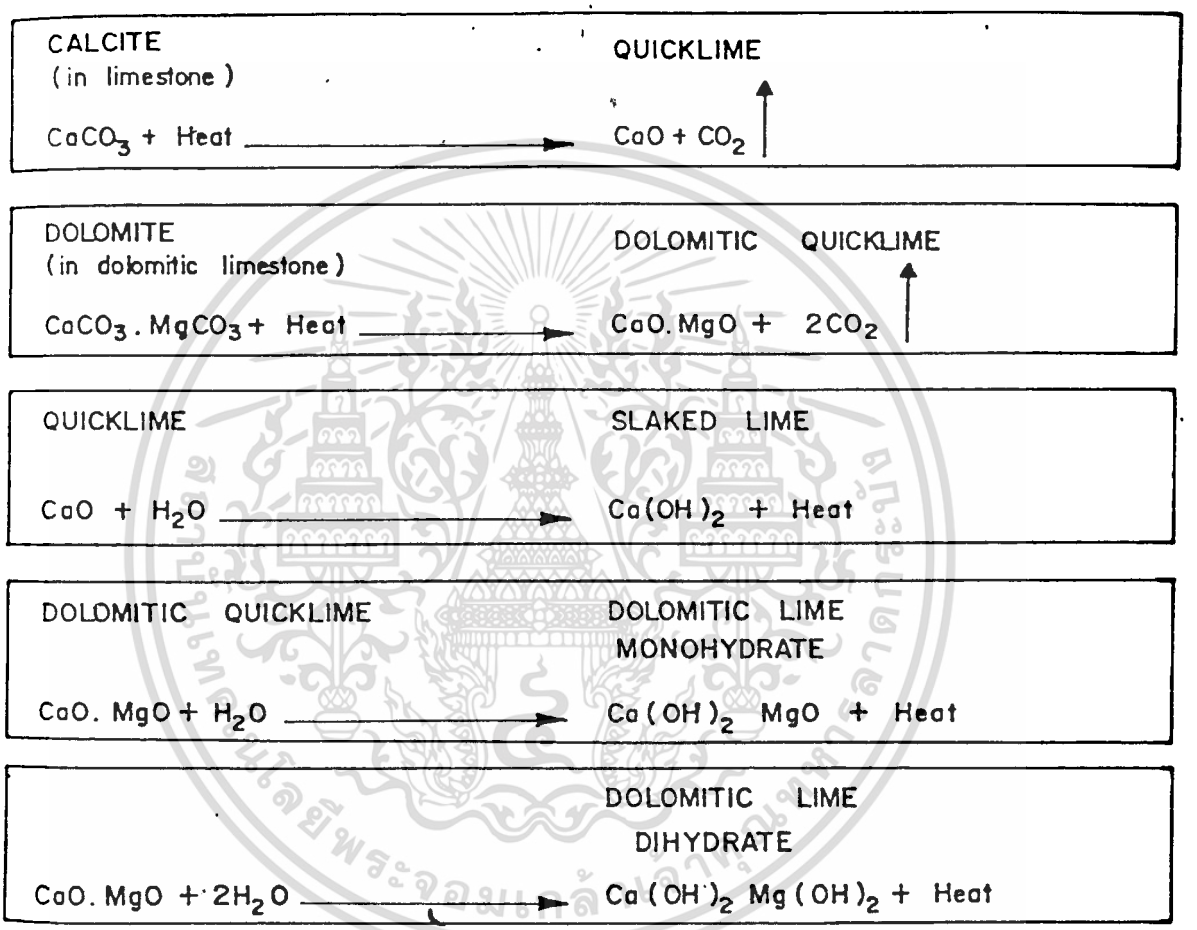
† Lime only effective if fines are plastic.

†† Lime used in bitumen stablization for promotion adhesion: Quicklime in loessal materials

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ แสดงปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นของปูนขาวชนิดต่างๆ

(GILLOTT, 1968)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RUENKRAIRERGSA (1982) อธิบายว่าเมื่อมีการแลกเปลี่ยน Ion นั้น Ion ของแคลเซียมที่มีอยู่ในปูนขาวเมื่อผสมลงไปในดิน จะเข้าไปเกาะติดอยู่รอบ ๆ เม็ดดิน ซึ่งจะได้สารใหม่ คือ $Ca(OH)_2$ และผลักให้ Fe_2O_3, Al_2O_3 และ SiO_2 เคลื่อนที่ห่างออกไปจากเม็ดดิน จากนั้นเม็ดดินก็จะเกิดประจุไฟฟ้าที่มีแรงดึงดูดให้เม็ดดินเคลื่อนที่เข้าหากัน ข้อคิดเห็นดังกล่าวนี้สอดคล้องกับข้อคิดเห็นของ DIAMONDและ KINTER (1965) เพราะน้ำที่อยู่ในชั้น Double Layer บางลงนี่เองที่เป็นสาเหตุในเกิดการ Flocculation และเกิดการรวมตัวกันของเม็ดดิน (Aggregate) ซึ่งเป็นการทำให้ Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น ผลก็คือ Plasticity Index ลดลง

การเกิด Flocculation นั้น จะทำให้ขนาดของเม็ดดินโตขึ้นและเนื่องจากโครงสร้างของเม็ดดินเหนียวส่วนมากเป็นแผ่นบาง ๆ (Platy Structure) ซึ่งเมื่อเข้ามาใกล้กันอย่างอิสระจะวางตัวในลักษณะของ Random Arrangement ทำให้เกิดเป็นมุมหรือเหลี่ยมซึ่งจะเป็นผลดีต่อการต้านทานแรงกระทำจากแรงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง แสดงความสัมพันธ์ของ % C.B.R. และการใช้งาน

% C.B.R.	คุณสมบัติเหมาะสมทางวิศวกรรม	การใช้งาน
0 - 3	very poor	subgrade
3 - 7	poor to fair	subgrade
7 - 20	fair	subbase
20 - 50	good	subbase,base
50 - 80	very good	base
> 80	excellent	base

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ดร. วรากร ไม้เรียง , อ. จิรพัฒน์ โชติกไกร , อ. ประทีป ดวงเดือน คู่มือปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ เล่ม 1 , ภาควิชาวิศวกรรมโยธา , คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2523)

2. ANDAY, M.C. and et al, (1961), Lime Stabilization : Properties, Mix Design, Construction Practice and Performance, HRB. 304

3. HERRIN, M. and MITCHELL, H. (1961), Lime-Soil Mixtures, HRB 304

4. DIAMOND, S.and KINTER, E.B.(1956), Mechanism of Soil-Lime Stabilization, HRB 92

5. HILT, G.W. and DAVIDSON, D.T. (1960), Lime Fixation in Clayer Soil, HRB 262

6. RHEE,Y.H.(1982), Soil Stabilization with Lime and Fly-ASh AIT Thesis, Bangkok, Thailand.

7. LU, L.W., DAVIDSON, D.T. and HANDY, R.L. (1960), Calcium-Magnesium Ratio in Soil Lime Stabilization, HRB 262

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้