

การนำของเหลือจากโรงงานผลิตลวดเหล็กอัดแรงมาใช้ในเชิงวิศวกรรมโยธา



นาย ธีรุตม์ สงวนวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2533

ISBN 974-577-070-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016797

I 10309506

CIVIL ENGINEERING APPLICATION OF WASTE
FROM PRESTRESSED WIRE PRODUCTION

Mister Natsom Sa-nguanwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1990

ISBN 974-577-070-1



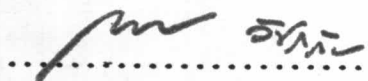
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การนำของเหลือจากโรงงานผลิตลวดเหล็กอัดแรงมาใช้ใน
เชิงวิศวกรรมโยธา

โดย นาย ญัฐสม สงวนวงษ์

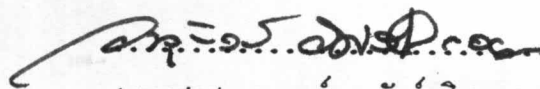
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา


อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญย์ศิริ

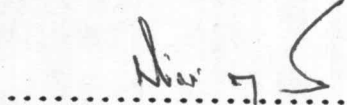
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

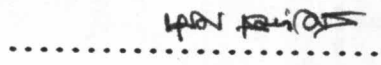

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วิษราภัย)

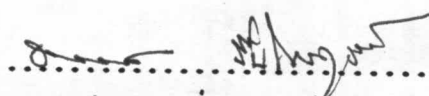
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อนุกัญย์ อิศรเสนา ณ อยุธยา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญย์ศิริ)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. นิวัตต์ ดารานันท์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐสม เลิศศิริวงษ์)


..... กรรมการ
(ดร. ชีระชาติ รุ่งไกรฤกษ์)



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อ วิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ผู้รสม สงวนวงษ์ : การนำของเหลือจากโรงงานผลิตลวดเหล็กอัดแรงมาใช้ในเชิง
วิศวกรรมโยธา (CIVIL ENGINEERING APPLICATION OF WASTE FROM PRESTRESSED
WIRE PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ, 203 หน้า.
ISBN 974-577-070-1

ของเหลือจากโรงงานผลิตลวดเหล็กอัดแรงเป็นกากวัสดุซึ่งถ้าหากไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านหนึ่ง
ด้านใดแล้ว จะก่อให้เกิดภาระต่อการขนส่งและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในการนำของเหลือซึ่ง
เป็นผงโลหะมาใช้ในเชิงวิศวกรรมโยธา จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการประยุกต์มาใช้งานซึ่งได้คัดเลือกมา
ทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของผงโลหะที่เกี่ยวข้องกับด้านวิศวกรรม
โยธา ศึกษาคุณสมบัติของผงโลหะเมื่อผสมด้วยสาร stabilizer โดยคำนึงถึงกำลังที่เปลี่ยนแปลงไป และ
เพื่อกำหนดขอบเขตการใช้สาร stabilizer โดยคำนึงถึงชนิดและปริมาณของสาร stabilizer

สำหรับวิธีการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วย การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ
ของผงโลหะตัวอย่าง การทดสอบเพื่อพิจารณาตุ้มน้ำหนักของผงโลหะอย่างเดี่ยว การคัดเลือกสรร
stabilizer ที่เหมาะสมกับผงโลหะ การทดสอบเพื่อพิจารณาตุ้มน้ำหนักของผงโลหะผสมซีเมนต์ที่เกิดขึ้น
และการพิจารณาและวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังโดยการทดสอบนี้จะใช้วิธีการทดลองตามมาตรฐาน
กรมทางหลวง

จากการศึกษาวิจัยพบว่า ของเหลือจากโรงงานผลิตลวดเหล็กอัดแรงนี้เป็นผงโลหะ ซึ่ง
ประกอบด้วย iron oxide เป็นส่วนมาก เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบของ AASHTO soil
classification พบว่ามีคุณสมบัติด้วย soil group A-5 และ group A-7-5 สำหรับสาร
stabilizer ที่เหมาะสมกับผงโลหะคือซีเมนต์

กำลังของผงโลหะอย่างเดี่ยวเมื่อวัดในรูปของของของค่ากำลังรับแรงอัดหรือ UCS
(unconfined compressive strength) มีค่าเท่ากับ 4.70 กก./ซม² และเมื่อผสมซีเมนต์ลงไปด้วย
ปริมาณที่เหมาะสมคือ 20 เปอร์เซ็นต์ 22 เปอร์เซ็นต์ 24 เปอร์เซ็นต์ และ 26 เปอร์เซ็นต์ พบว่า
มีค่าของกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 15.89 กก./ซม² 22.16 กก./ซม²
23.57 กก./ซม² และ 27.01 กก./ซม² ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์หาค่ากำลังในรูปของค่ากำลังรับแรงอัด และค่า unsoaked CBR พบว่าดัชนีที่
2 ชนิด มีความสัมพันธ์กันในรูปของสมการถดถอยเส้นตรง (linear regression) คือ $CBR = 70.6 + 2.70 UCS$ ซึ่งใช้ได้เหมาะสมในช่วงที่ค่าของ UCS อยู่ระหว่าง 5 กก./ซม² ถึง 32 กก./ซม² โดย
มีความคลาดเคลื่อนของค่า unsoaked CBR เฉลี่ยประมาณ 6.4 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ พบว่า เมื่อนำของเหลือดังกล่าวมาผสมซีเมนต์ 26 เปอร์เซ็นต์
สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้ สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธาอื่น ๆ ต้อง
คำนึงถึงมาตรฐานและรายละเอียดต่าง ๆ ประกอบด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2532

ลายมือชื่อนิสิต *ผู้รสม สงวนวงษ์*.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ดิเรก ลาวัณย์ศิริ*.....



NATSOM SA-NGUANWONG : CIVIL ENGINEERING APPLICATION OF WASTE FROM PRESTRESSED WIRE PRODUCTION. THESIS ADVISOR : PROF. DIREK LAVANSIRI, Ph.D., 203 PP. ISBN 974-577-070-1

Waste from prestressed wire production create problem in transportation and expect to environment therefore it was considered on its application in civil engineering usage. The objectives were to study the properties of waste related to civil engineering, to consider the change in strength when mixed with an appropriate stabilizer and to specify the significance of both type and quantity of stabilizer.

The study composed of testing of chemical as well as physical properties of the steel dust by considering the strength of the dust alone and selecting sufficient stabilizer to mix with the dust and testing of the cement stabilized dust. All of the tests conformed to DOH standard procedures.

For properties, waste was mostly composed of iron oxide and similar to group A-5 and group A-7-5 in AASHTO soil classification. The appropriate stabilizer was cement which effected on cement hydration.

For strength, the unconfined compressive strength of specimen composed only waste was 4.70 ksc. and the unconfined compressive strength of specimens composed of waste and the significant cement contents in 20, 22, 24 and 26 per cent at an age of 28 days were 15.89, 22.16, 23.57 and 27.01 ksc. respectively.

The analysis for strength on the basis of both the unconfined compressive strength and the unsoaked CBR was comparatively considered. And the mathematical model of them in linear regression was $CBR = 70.6 + 2.70 UCS$. By means of this relationship the suitable values of unconfined compressive strength were between 5 and 32 ksc. and the standard error of unsoaked CBR estimation was 6.4 per cent.

From this research, waste from prestressed wire production mixed with 26 per cent cement can be used for base course of highways. For other purposes in civil engineering application, the standard, policy and implementation roles must be considered carefully.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2532

ลายมือชื่อนิสิต สนธิ์ น. ส.
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดิเรก ลาวนศิริ



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง
ของศาสตราจารย์ ดร. ตีเรก ลาวัญย์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้
คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิจัยครั้งนี้ ไว้เป็นอย่างสูง ซึ่งได้แก่

ศาสตราจารย์ ดร. นิวัตต์ ดารานันท์ แห่งภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร. วิมล ช่อวิเชียร หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ อนุภักดิ์ อิศรเสนา ณ อยุธยา หัวหน้าสาขาวิศวกรรมขนส่ง
และการจราจร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรพล จิวาลักษณ์ หัวหน้าสาขาวิศวกรรมประณีต
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ แห่งภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดร. ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ หัวหน้าฝ่ายวิชาการ กองวิเคราะห์และวิจัย
กรมทางหลวง

คุณองอาจ คุณอาทิตย์ วิศวกรโยธา 7 ฝ่ายออกแบบทาง กองสำรวจและออกแบบ
กรมทางหลวง

กรรมการผู้จัดการ บริษัทไทยสะเปเซียลไวร์ จำกัด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้าน
การเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ท
สารบัญภาพ	ด
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	น

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 คำนำและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตและแนวทางในการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย	2

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

2.	การคัดเลือกสาร stabilizer ในการปรับปรุงคุณภาพผงโลหะ	3
2.1	วัตถุประสงค์ในการนำสาร stabilizer มาปรับปรุงคุณภาพผงโลหะ	3
2.2	การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางเคมีของผงโลหะ	6
2.3	การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของผงโลหะ	6
2.3.1	การทดลองและวิเคราะห์หาขนาดคละ	9
2.3.2	การทดลองและวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะ	11
2.3.3	การทดลองและวิเคราะห์หา Atterberg limit ...	11
2.4	การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 2.2 และหัวข้อที่ 2.3	11
2.5	การคัดเลือกสาร stabilizer ในการปรับปรุงคุณภาพผงโลหะ	16
3.	ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีต	20
3.1	ชนิดของวัสดุที่เหมาะสมในการทำ cement - stabilization	20

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

3.1.1	คุณสมบัติโดยทั่วไป	20
3.1.2	คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุ	21
3.2	กลไกที่เกิดขึ้นในการทำ cement - stabilization	28
3.2.1	สารประกอบทางเคมีที่สำคัญ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	30
3.2.2	ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น	30
3.3	องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังของ cement - stabilized material	32
3.3.1	อิทธิพลเนื่องจากส่วนประกอบทางเคมี	34
3.3.2	อิทธิพลเนื่องจากส่วนประกอบทางกายภาพ	40
3.3.3	Curing	55
3.3.4	อิทธิพลเนื่องจากซีเมนต์	60
4.	การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	65
4.1	การทดสอบการบดอัดผงโลหะตัวอย่าง	66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

4.1.1	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	66
4.1.2	การทดสอบการบดอัด	66
4.2	การทดสอบ unconfined compressive strength (UCS) ของผงโลหะอย่างเดี่ยว	66
4.2.1	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	66
4.2.2	การทดสอบ UCS	68
4.3	การทดสอบ CBR ของผงโลหะอย่างเดี่ยว	68
4.3.1	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	68
4.3.2	การทดสอบ CBR	68
4.4	การทดสอบการบดอัดผงโลหะผสมซีเมนต์	68
4.4.1	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	70
4.4.2	การทดสอบการบดอัด	70
4.5	การทดสอบ unconfined compressive strength (UCS) ของผงโลหะผสมซีเมนต์	70

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

4.5.1	ปริมาณซีเมนต์และน้ำที่ใช้	70
4.5.2	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	70
4.5.3	การทดสอบ UCS	70
4.6	การทดสอบ CBR ของผงโลหะผสมซีเมนต์	71
4.6.1	ปริมาณซีเมนต์และน้ำที่ใช้	71
4.6.2	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	71
4.6.3	การทดสอบ CBR	71
5.	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	72
5.1	ผลการทดสอบการบดอัดผงโลหะตัวอย่าง	72
5.2	ผลการทดสอบ unconfined compressive strength (UCS) ของผงโลหะอย่างเดี่ยว	72
5.3	ผลการทดสอบ CBR ของผงโลหะอย่างเดี่ยว	74
5.4	ผลการทดสอบการบดอัดผงโลหะผสมซีเมนต์	74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

5.5 ผลการทดสอบ unconfined compressive strength (UCS) ของผงโลหะผสมซีเมนต์	78
5.5.1 อิทธิพลเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมี	78
5.5.2 อิทธิพลเนื่องจากองค์ประกอบทางกายภาพ	84
5.5.3 อิทธิพลเนื่องจากการบ่ม (curing)	84
5.5.4 อิทธิพลเนื่องจากซีเมนต์	85
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า unconfined compressive strength (UCS) กับค่า unsoaked CBR ของผงโลหะผสมซีเมนต์	85
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	92
6.1 ข้อสรุปโดยทั่วไป	92
6.2 การนำไปใช้ในเชิงวิศวกรรมโยธา	94
6.3 ข้อเสนอสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	96
ภาคผนวก	99
ประวัติผู้เขียน	203



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงผลการวิเคราะห์หึ่งโลหะตัวอย่าง	7
ตารางที่ 2.2 การจัดอันดับ oxide ของธาตุต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์	8
ตารางที่ 2.3 แสดงผลการทดลอง hydrometer analysis	9
ตารางที่ 2.4 AASHTO Soil Classification	14
ตารางที่ 2.5 United Soil Classification	17
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบการคัดเลือกวิธีในการ stabilization โดยพิจารณา จากคุณสมบัติทางกายภาพ	18
ตารางที่ 3.1 ปริมาณซีเมนต์สำหรับ soil ชนิดต่าง ๆ ตามระบบ AASHTO (PCA, 1959)	25
ตารางที่ 3.2 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการโดยเฉลี่ยของ sandy soil (PCA, 1959)	26
ตารางที่ 3.3 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการโดยเฉลี่ยของ silty soil และ clayey soil (PCA, 1959)	26
ตารางที่ 3.4 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการโดยเฉลี่ยของวัสดุต่าง ๆ (PCA, 1959) ...	27
ตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของ cement - stabilized soil	33

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 3.6	แสดงขนาดผลของวัสดุที่จะทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง กับ dry density 45
ตารางที่ 3.7	แสดงค่าของ n ในสมการ $S = KD^n$ สำหรับ granular material 3 ชนิด ที่สภาพต่าง ๆ กัน 48
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติของผงโลหะตัวอย่าง 65
ตารางที่ 5.1	แสดงผลการทดสอบหาค่า optimum moisture content และ maximum dry density ของผงโลหะตัวอย่างซึ่งผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณต่าง ๆ 75
ตารางที่ 5.2	แสดงผลการทดสอบหาค่า unconfined compressive strength ของผงโลหะผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ และระยะเวลาการบ่ม ต่าง ๆ กัน 79
ตารางที่ 5.3	แสดงผลการทดสอบหาค่า unsoaked CBR ของผงโลหะผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณต่าง ๆ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ กัน 79
ตารางที่ 5.4	แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าของ unsoaked CBR และ soaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์ 18 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ 86
ตารางที่ 5.5	แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าของ unsoaked CBR และ soaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์ 24 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ 86
ตารางที่ 5.6	แสดงผลการทดลองหาค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) 88

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองหาค่าการบวมตัว (swell)	89
ตารางที่ 5.8 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ UCS และ unsoaked CBR ที่ได้จากการทดสอบ	90
ตารางที่ ค.1 แสดงผลการทดสอบ compaction test ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ...	200



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดง grain size distribution ของผงโลหะตัวอย่าง	10
รูปที่ 2.2 Plasticity Chart	12
รูปที่ 2.3 แสดงการกำหนดขอบเขตขนาดคละของ cement - bound material ชนิดต่าง ๆ	19
รูปที่ 3.1 แสดงขนาดคละของวัสดุที่เหมาะสมกับการทำ cement - stabilization	22
รูปที่ 3.2 เกณฑ์กำหนดในการคัดเลือกสาร stabilizer ที่เหมาะสมกับ soil ชนิดต่าง ๆ ของ USA Air Force	23
รูปที่ 3.3 แสดงค่าของ plasticity ซึ่งมีผลต่อปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ	29
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength กับ pH ของ soil ซึ่งผสมซีเมนต์ 10 % โดยน้ำหนัก	36
รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของ soil ที่ระดับต่าง ๆ จากผิวบน กับเวลา ภายหลังจากทำการ stabilization ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10 %	37
รูปที่ 3.6 แสดงผลของ calcium chloride ที่มีต่อ cement - stabilized clay - sand mixture	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.7	แสดงผลของ calcium sulphate ที่มีต่อ cement - stabilized clay - sand mixture	39
รูปที่ 3.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของ cement - stabilized lateritic soil ซึ่งมี Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ประกอบอยู่	41
รูปที่ 3.9	แสดง degree of hydration ของ soil ชนิดต่าง ๆ เมื่อผสมด้วย ซีเมนต์ 10 %	42
รูปที่ 3.10	แสดงให้เห็นพฤติกรรมของ Al_2O_3 ใน soil ซึ่งมีผลต่อกำลังของ cement - stabilized soil ที่เวลาต่าง ๆ	43
รูปที่ 3.11 (a)	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength กับ dry density ของ silty clay และ fine gravel ที่ได้จากขนาดคละในตารางที่ 3.6 เมื่อนำมาทำการ stabilized ด้วยซีเมนต์ โดย plot บน normal scale	46
รูปที่ 3.11 (b)	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength กับ dry density ของ silty clay และ fine gravel ที่ได้จากขนาดคละในตารางที่ 3.6 เมื่อนำมาทำการ stabilized ด้วยซีเมนต์ โดย plot บน log scale	47
รูปที่ 3.12	แสดงค่า n ที่ได้จาก slope ของ cement - stabilized material ต่าง ๆ	49
รูปที่ 3.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง moisture content และ dry density ของ cement - stabilized soil	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.14	แสดงให้เห็นอิทธิพลของ moisture content ที่มีผลต่อ dry density และกำลังของ soil - cement mixture ซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์ 20 % และ dune clay ผสม montmorillonite clay ในอัตราส่วน 1 : 1	52
รูปที่ 3.15	แสดงการเปลี่ยนแปลงของ unconfined compressive strength เมื่อ mixing time เพิ่มขึ้น	54
รูปที่ 3.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง dry density และเวลาที่ล่าช้าในการบดอัด ภายหลัง mixing แล้ว ของวัสดุ 2 ชนิด ซึ่งผสมด้วยซีเมนต์ 10 %	56
รูปที่ 3.17	ผลที่เกิดขึ้นเมื่อ age of curing เพิ่มขึ้น ของ cement - stabilized soil โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ 5 %	58
รูปที่ 3.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง curing temperature และ unconfined compressive strength ของ soil 3 ชนิด ที่ stabilized ด้วยซีเมนต์ 10 %	59
รูปที่ 3.19	ผลที่เกิดขึ้นกับ unconfined compressive strength เมื่อทำการ soaking	61
รูปที่ 3.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength และปริมาณซีเมนต์ของ soil 5 ชนิด ซึ่งทำการ stabilized ด้วย ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength ที่ 7 วัน และปริมาณซีเมนต์ ของ stone 6 ชนิด ซึ่งทำการ stabilized ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	63
รูปที่ 4.1	กากวัสดุซึ่งนำมาจากโรงงานผลิตลวดเหล็กอัดแรง ซึ่งประกอบด้วยผงโลหะ โดยมี Fe_2O_3 เป็นสำคัญ	67
รูปที่ 4.2	นำมาทำการอบให้แห้งและร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4	67
รูปที่ 4.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาค่า unconfined compressive strength "VERSA-TESTER"	69
รูปที่ 5.1	แสดงการหาค่า optimum moisture content และ maximum dry density ของผงโลหะอย่างเดี่ยว	73
รูปที่ 5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง optimum moisture content และ maximum dry density ของผงโลหะตัวอย่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ	76
รูปที่ 5.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์ และค่าของ maximum dry density	77
รูปที่ 5.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า unconfined compressive strength และปริมาณซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	80
รูปที่ 5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า unconfined compressive strength และระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า unsoaked CBR และปริมาณซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	81
รูปที่ 5.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า unsoaked CBR และระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ	82
รูปที่ 5.8	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ unsoaked CBR และ soaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์ 18 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	87
รูปที่ 5.9	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ unsoaked CBR และ soaked CBR ที่ปริมาณซีเมนต์ 24 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	87
รูปที่ 5.10	แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของการดูดซึมน้ำ (water absorbtion)	88
รูปที่ 5.11	แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของการบวม (swell)	89
รูปที่ 5.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ UCS และ unsoaked CBR	91
รูปที่ ค.1	ลักษณะการ failure ของผงโลหะผสมซีเมนต์ เมื่อทำการทดสอบเพื่หาค่า UCS	202

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

g/ml	=	กรัมต่อมิลลิลิตร
lb/ft ³	=	ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต
S	=	ดีกรีของความอิ่มตัว (degree of saturation)
OMC	=	ความชื้นที่พอเหมาะ (optimum moisture content)
UCS	=	กำลังรับแรงอัด (unconfined compressive strength)
MPa (MN/m ²)	=	เมกะพาสคัล
kg/cm ²	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
lb/in. ²	=	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
CBR	=	California bearing ratio