การออกแบบชั้นรองพื้นทางของถนนชนบทโดยใช้วัสดุท้องถิ่นบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย

นายวรากร กริ่มวงษ์รัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-347-223-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I14[illegible]382 2 1 ส.ค. 2545

SUBBASE DESIGN OF LOCAL ROADS USING LOCAL MATERIALS IN EASTERN THAILAND

Mr. Warakorn Krimwongrat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-347-223-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบชั้นรองพื้นทางของถนนชนบทโดยใช้วัสดุท้องถิ่นบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย
โดย	นายวรากร กริ่มวงษ์รัตน์
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ อนุกัลย์ อิศรเสนา ณ อยุธยา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรวิศ นฤปิติ)

วรากร กริ่มวงษ์รัตน์ : การออกแบบชั้นรองพื้นทางของถนนชนบทโดยใช้วัสดุท้องถิ่นบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย. (SUBBASE DESIGN OF LOCAL ROADS USING LOCAL MATERIALS IN EASTERN THAILAND)
อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ, 141 หน้า. ISBN 974-347-223-1.

ในงานวิจัยนี้เป็นการทำการทดสอบเพื่อหาค่า Resilient Modulus (M_r) ของวัสดุท้องถิ่นดินลูกรังที่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานซึ่งนำมาใช้ทำชั้นรองพื้นทางของถนนลาดยางชนบท เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางด้วยโปรแกรม KENLAYER ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถสร้าง Design Chart ช่วยในการออกแบบความหนาชั้นรองพื้นทางของถนนลาดยางชนบทที่มีปริมาณจราจรน้อยถึงสูงปานกลางได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ ดินลูกรังกลุ่ม A-1-a กลุ่ม A-2-4 และกลุ่ม A-2-6 ซึ่งเก็บรวบรวมจากแหล่งดินลูกรังบริเวณ 3 จังหวัดในภาคตะวันออกของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดชลบุรี ฉะเชิงเทรา และปราจีนบุรี คุณสมบัติของดินลูกรังทั้ง 3 แหล่งนี้จะมีขนาดคละไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทางถนนลาดยางชนบท แต่สามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างถนนซึ่งออกแบบด้วยวิธี Analytical ได้ เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นพลาสติกผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จากนั้นทำการทดสอบเพื่อหาค่า M_r ตามมาตรฐาน AASHTO T292-91 เพื่อทำการสร้าง Design Chart สำหรับวัสดุเหล่านี้ จากผลการทดสอบพบว่าดินลูกรังกลุ่ม A-1-a ดินลูกรังกลุ่ม A-2-4 และดินลูกรังกลุ่ม A-2-6 มีค่า M_r เฉลี่ยเท่ากับ $402\theta^{0.36}$ MPa , $445\theta^{0.26}$ MPa และ $467\theta^{0.25}$ MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบโดยพิจารณาผลของความชื้นต่อค่า M_r ของวัสดุดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัย พบว่าความชื้นมีผลต่อค่า M_r น้อยมาก

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต.....วรากร กริ่มวงษ์รัตน์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170502421 :MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : RESILIENT MODULUS / LATERITIC SOIL / LOCAL ROADS / LOCAL MATERIALS / FLEXIBLE PAVEMENT / DESIGN CHART

WARAKORN KRIMWONGRAT : SUBBASE DESIGN OF LOCAL ROADS USING LOCAL MATERIALS IN EASTERN THAILAND. THESIS ADVISOR : PROF. DIREK LAWANSIRI, Ph.D., 141 pp. ISBN 974-347-223-1.

The purpose of this study was to determine the values of Resilient Modulus (M_r) of local lateritic soil. The properties of the study soil were below the standard for the high-type highway material but it was suitable for local roads subbase use. The research developed the design charts for subbase of low to medium traffic volume flexible pavement using the KENLAYER program.

Materials under studied were lateritic soil: A-1-a, A-2-4 and A-2-6 from 3 eastern provinces of Thailand, namely-Chonburi, Chachoengsao and Prachinburi. The soils from the three sites met the specification of plasticity but failed to meet the gradation standard for use as a subbase course so they can be used for the road construction by analytical design. Nonetheless, the M_rs were experimented by AASHTO T292-91 protocal and then used to develop the design chart suitable for these material properties. The result was found that the average values of M_r for type: A-1-a, A-2-4 and A-2-6 were $402\theta^{0.36}$ MPa , $445\theta^{0.26}$ MPa and $467\theta^{0.25}$ MPa respectively. The effect of moisture on M_r and design values was also investigated. There were little effect on M_r.

Department	Civil Engineering	Student's signature Warakorn Krimwongrat
Field of study	Civil Engineering	Advisor's signature D.L. Lawansiri
Academic year	2000	Co-advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ อนุกัลย์ อิศรเสนา ณ อยุธยา ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรวิศ นฤปิติ ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอบพระคุณอาจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล ที่กรุณาให้คำแนะนำในการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ

นอกจากนี้ยังได้รับความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ซึ่งได้แก่ นายนิพนธ์ ตั้งติรวัฒน์ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่อง Servopulser ในการทดสอบวัสดุ เจ้าหน้าที่ห้องทดลองภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้ช่วยเหลือแนะนำการใช้เครื่องมืออุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการของภาควิชาตลอดจนข้อแนะนำต่างๆในการทดสอบ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนอุดหนุนการวิจัยนี้

คุณความดีของวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ครู อาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้เขียนทุกท่าน และบิดา มารดา ที่ได้ให้การอบรม เลี้ยงดู สนับสนุนให้ผู้เขียนได้รับการศึกษาที่ดีเสมอมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณหน่วยงานกรมทางหลวงที่ให้การสนับสนุนข้อมูล ข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมขนส่งและการจราจร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อุทิศกำลังกายในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณนางสาว เพ็ญสุดา เชาว์วะณิช ที่ให้กำลังใจตลอดช่วงเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วรากร กริ่มวงษ์รัตน์

มีนาคม พ.ศ. 2544

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 2

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย..... 2

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย..... 3

2 ทฤษฎีและผลงานการวิจัยในอดีต..... 4

2.1 การออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางด้วยวิธี Analytical 4

2.1.1 สมมติฐานของการออกแบบตามวิธี Analytical..... 4

2.2 วัสดุท้องถิ่นดินลูกรังในประเทศไทย..... 6

2.3 มาตรฐานของวัสดุท้องถิ่นที่นำมาใช้เป็นชั้นรองพื้นทางของถนนซนบท..... 8

2.3.1 มาตรฐานของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย..... 8

2.3.2 ข้อกำหนดของสถาบันวิจัยการก่อสร้างและการทางแห่งประเทศกานา..... 9

2.3.3 ข้อกำหนดของกรมทางหลวงแห่งประเทศบราซิล..... 10

2.3.4 ข้อกำหนดของประเทศแองโกล่า..... 11

2.4 เกณฑ์ในการคัดเลือกวัสดุเป็นชั้นรองพื้นทางเพื่อออกแบบตามวิธี Analytical 13

2.5 ค่า Resilient Modulus ของวัสดุก่อสร้างทาง..... 14

2.6 คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางเพื่อการออกแบบด้วยวิธี Analytical..... 16

2.6.1วัสดุแอสฟัลท์..... 16

2.6.2 วัสดุประเภท Cemented Materials..... 19

2.6.3 วัสดุประเภท Granular..... 20

2.6.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่า Resilient Modulus ของวัสดุประเภท Granular..... 25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6.4 Subgrade Soil	29
2.7 Critical Strain ที่เกิดขึ้นในชั้นทาง และ Design Criteria ของวัสดุชั้นทาง	29
2.7.1 Critical Strain ที่เกิดขึ้นในชั้นทาง	29
2.7.2 Design Criteria ของวัสดุชั้นทาง	33
2.7.2.1 Fatigue Crack Criteria สำหรับแอสฟัลท์คอนกรีต	33
2.7.2.2 Fatigue Crack Criteria สำหรับ Cemented Material	33
2.7.2.3 Permanent Deformation Criteria	34
3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ	35
3.1วัสดุที่ใช้ทำการทดสอบ	35
3.2 การทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของดินลูกรัง	35
3.3 การทดสอบเพื่อหาค่า Resilient Modulus ของดินลูกรัง	36
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	37
3.3.2 การเตรียมแท่งตัวอย่างทดสอบ	44
3.3.3 การประกอบแท่งตัวอย่างเข้ากับกระบอก Triaxial	44
3.3.4 การทดสอบน้ำหนักกระทำซ้ำเพื่อหาค่า Resilient Modulus	49
4 ผลการทดสอบ	52
4.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัย	52
4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Resilient Modulus ของดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัย	54
5 การวิเคราะห์โครงสร้างถนนด้วยโปรแกรม KENLAYER	64
5.1 โปรแกรม KENLAYER	64
5.2 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์	65
5.2.1 คุณสมบัติของวัสดุ	65
5.2.2 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางที่ทำการวิเคราะห์	66
5.2.3 Design Criteria สำหรับโครงสร้างทาง	69
5.3 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางด้วยโปรแกรม KENLAYER	70
5.3.1 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 1	70
5.3.2 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 2	73
5.3.3 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 3	74
5.3.4 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 4	76

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.3.5 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 5	80
5.3.6 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 6	82
6 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	85
6.1 สรุปผลการศึกษา	85
6.2 ข้อเสนอแนะ	87
รายการอ้างอิง	88
ภาคผนวก	91
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Resilient Modulus ของดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัย	92
ภาคผนวก ข. สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENLAYER	108
ภาคผนวก ค. Design Chart สำหรับการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางที่มีชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุดินลูกรังประเภท Granular	129
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างชั้นทางโดยใช้ Design Chart	137
ประวัติผู้เขียน	141

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินลูกรังในประเทศไทย 7

2.2 ขนาดคละของวัสดุสำหรับรองพื้นทางตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย..... 9

2.3 คุณสมบัติของดินลูกรังสำหรับรองพื้นทางของถนนในประเทศกานา..... 10

2.4 ขนาดคละของดินลูกรังสำหรับรองพื้นทางของถนนในประเทศกานา 10

2.5 ขนาดคละของวัสดุสำหรับรองพื้นทางของถนนในประเทศบราซิล..... 11

2.6 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับรองพื้นทางของถนนในประเทศบราซิล..... 11

2.7 ขนาดคละของดินลูกรังสำหรับรองพื้นทางของถนนในประเทศแองโกล่า..... 12

2.8 ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุท้องถิ่นที่ใช้ทำชั้นรองพื้นทางของถนนที่มีปริมาณการจราจรน้อย ถึงสูงปานกลาง..... 12

2.9 การประมาณค่า Stiffness ของ Bituminous Mixtures ขณะความเร็วและอุณหภูมิของถนนต่างๆกัน 17

2.10 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของถนนบริเวณภาคต่างๆของประเทศไทย..... 18

2.11 แสดงค่า Viscosity ของยางแอสฟัลท์เกรดต่างๆที่อุณหภูมิ 70°F 18

2.12 แสดงค่า Dynamic Modulus ของวัสดุดินซีเมนต์จากการทดสอบของนักวิจัยท่านอื่นๆ..... 19

2.13 Poisson's Ratio ของ Cemented Material 20

2.14 ช่วง k_1 , k_2 สำหรับ Untreated Granular Material 21

2.15 Resilient Modulus ของวัสดุประเภท Granular 22

2.16 แสดงค่า Resilient Modulus ของวัสดุประเภท Granular จากการศึกษาของ Witczak และ Bell 22

2.17 แสดงค่า Resilient Modulus ของวัสดุ Granular จากการศึกษาของ Rada และ Witczak . 23

2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_1 และ k_2 ของวัสดุ Granular จากการศึกษาของ Rada และ Witczak 23

2.19 ค่า k_1 และ k_2 ที่รวบรวมจากแหล่งอื่นๆ..... 24

2.20 แสดงค่า k_1 และ k_2 ของดินใน Oklahoma 24

2.21 แสดงค่า k_1 และ k_2 ของวัสดุ Granular จากการศึกษาของ Thompson และ Smith 25

2.22 แสดงค่า M_r ตามช่วงความชื้นของดินแหล่ง Richard Spur และ Sawyer 27

2.23 แสดง Fatigue Crack Model ที่กำลังของชั้นดินซีเมนต์ค่าต่างๆ..... 34

3.1 แหล่งและลักษณะของดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษา..... 35

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินลูกรัง..... 36

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

3.3 ลำดับการทดสอบของดินลูกรังประเภท Granular 50

3.4 แสดงค่า (σ_1/σ_3) ที่วิกฤต และค่า σ_d ที่ใช้ได้ในการทดสอบ..... 51

4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัย..... 52

4.2 คุณสมบัติทั่วไปของดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัย..... 53

4.3 แสดงค่า k_1 และ k_2 ของดินลูกรังแหล่งชลบุรี..... 55

4.4 แสดงค่า k_1 และ k_2 ของดินลูกรังแหล่งฉะเชิงเทรา..... 56

4.5 แสดงค่า k_1 และ k_2 ของดินลูกรังแหล่งปราจีนบุรี..... 57

4.6 สรุปค่า k_1 และ k_2 ของดินลูกรังทั้ง 3 แหล่งแบ่งตามช่วงความชื้น..... 62

4.7 ผลสรุปค่า M_r ของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ..... 63

5.1 คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางที่ใช้ในการออกแบบ..... 65

5.2 รูปแบบโครงสร้างถนนที่ทำการวิเคราะห์สำหรับระบบโครงสร้างถนน 4 ชั้น..... 68

5.3 รูปแบบโครงสร้างถนนที่ทำการวิเคราะห์สำหรับระบบโครงสร้างถนน 3 ชั้น..... 68

1 ก. ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Resilient Modulus (Mr) ของดินลูกรังแหล่งชลบุรี..... 93

2 ก. ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Resilient Modulus (Mr) ของดินลูกรังแหล่งฉะเชิงเทรา..... 98

3 ก. ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Resilient Modulus (Mr) ของดินลูกรังแหล่งปราจีนบุรี..... 103

1 ข. สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENLAYER ของโครงสร้างรูปแบบที่ 1..... 109

2 ข. สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENLAYER ของโครงสร้างรูปแบบที่ 2..... 113

3 ข. สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENLAYER ของโครงสร้างรูปแบบที่ 3..... 117

4 ข. สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENLAYER ของโครงสร้างรูปแบบที่ 4..... 120

5 ข. สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENLAYER ของโครงสร้างรูปแบบที่ 5..... 123

6 ข. สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENLAYER ของโครงสร้างรูปแบบที่ 6..... 126

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

2.1 การกระจายน้ำหนักจากล้อผ่านโครงสร้างถนนลาดยาง..... 5

2.2 การแอ่นตัวของโครงสร้างทางภายใต้น้ำหนักล้อรถ..... 5

2.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นขณะยวดยานเคลื่อนที่บนผิวทาง..... 15

2.4 ลักษณะ Strain ที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักกระทำซ้ำ..... 16

2.5 แสดงค่า Critical Strain ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างถนนที่มีชั้นพื้นทาง เป็น Stabilized Material 32

3.1 ระบบของการทดสอบเพื่อหาค่า Resilient Modulus 38

3.2 ลักษณะสัญญาณของน้ำหนักกระทำซ้ำที่ใช้ในการทดสอบ..... 39

3.3 ลักษณะของกระบอก Triaxial และการติดตั้ง Lvdt 39

3.4 แสดงอุปกรณ์ยืดยาง (Membrane Enlarger)..... 42

3.5 แสดงเครื่องอัดอากาศ (Pressure Pump)..... 42

3.6 แสดงอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอากาศ (Pressure Regulator)..... 42

3.7 แสดงเครื่องดูดอากาศ (Vacuum Pump)..... 43

3.8 แสดงอุปกรณ์ตรวจสอบฟองอากาศ (Bubble Chamber)..... 43

3.9 แสดงกระบอกเตรียมตัวอย่างแบบผ่า (Split Mold)..... 43

3.10 การหุ้มถาดที่มีดินซึ่งผสมกับน้ำในปริมาณที่ต้องการ..... 46

3.11 แท่งตัวอย่างที่ทำการทดสอบ..... 46

3.12 แสดงการหุ้มแท่งตัวอย่างด้วยแผ่นยางที่รัดปลายด้วย O-ring 47

3.13 แสดงระบบการตรวจสอบรอยรั่วของแผ่นยางและที่รอยต่อต่างๆ..... 47

3.14 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบรอยรั่ว..... 48

3.15 แสดงการติดตั้งกระบอก Triaxial ที่ฐานของเครื่องให้น้ำหนัก..... 48

4.1 กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน..... 52

4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_r กับค่า θ ตามช่วงความชื้นของดินลูกรังแหล่งชลบุรี.... 58

4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_r กับค่า θ ตามช่วงความชื้นของดินลูกรังแหล่งฉะเชิงเทรา..... 59

4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_r กับค่า θ ตามช่วงความชื้นของดินลูกรังแหล่งปราจีนบุรี..... 60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_r กับค่า θ ของดินลูกรังแหล่งชลบุรี ฉะเชิงเทรา และปราจีนบุรี..... 61

5.1 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางที่ทำการวิเคราะห์..... 67

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_t กับความหนาของชั้นรองพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 1..... 72

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_c กับความหนาของชั้นรองพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 1..... 72

5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_t กับความหนาของชั้นรองพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 2..... 75

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_c กับความหนาของชั้นรองพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 2..... 75

5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_t กับความหนาของชั้นรองพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 3..... 77

5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_c กับความหนาของชั้นรองพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 3..... 77

5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_t กับความหนาของชั้นรองพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 4..... 79

5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_c กับความหนาของชั้นรองพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 4..... 79

5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_t กับความหนาของชั้นพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 5..... 81

5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_c กับความหนาของชั้นพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 5..... 81

5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_t กับความหนาของชั้นพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 6..... 84

5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical ε_c กับความหนาของชั้นพื้นทางที่ค่ากำลังของ Subgrade เป็นค่าต่างๆ ของโครงสร้างรูปแบบที่ 6..... 84