ค่าโมดูลัสคืนตัวของดินผสมซีเมนต์สำหรับการออกแบบผิวทาง

นายพิษณุ พลกายนุวัตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2519-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RESILIENT MODULUS OF SOIL - CEMENT MIX FOR PAVEMENT DESIGN

Mr. Phitsanu Pholkainuwatra

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2006
ISBN 974-14-2519-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ค่าโมดูลัสคืนตัวของดินผสมซีเมนต์สำหรับการออกแบบผิวทาง
โดย	นายพิษณุ พลกายนุวัตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฎชน)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐิรวัตร บุญญะฐี)

..... กรรมการ

(นายจเร รุ่งฐานีย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิษณุ พลกายนุวัตร : ค่าโมดูลัสคืนตัวของดินผสมซีเมนต์สำหรับการออกแบบผิวทาง. (RESILIENT MODULUS OF SOIL – CEMENT MIX FOR PAVEMENT DESIGN) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 75 หน้า. ISBN 974-14-2519-8.

ในปัจจุบันการออกแบบถนนโดยทั่วไปนั้น วิศวกรผู้ออกแบบมักจะใช้แนวทางออกแบบโดยใช้ค่าดัชนีเป็นหลัก เช่น ค่า California Bearing Ratio (CBR) ค่า Plasticity Index (PI) เป็นตัวกำหนดความหนาของชั้นโครงสร้างทางในชั้นต่าง ๆ ซึ่งวิธีดังกล่าวได้มองข้ามพฤติกรรมของดินไป โดยตัวอย่างการออกแบบที่ถูกต้องนั้นอาจนำวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) และความรู้ทางด้านการคืนตัวของดินซึ่งพัฒนามาจากความรู้ทางด้าน Plastic Strain ภายใต้สภาวะน้ำหนักที่ซ้ำไปซ้ำมามาประกอบการพิจารณา ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการออกแบบโครงสร้างถนนมากขึ้น ซึ่งจะใช้แนวความคิดในการออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์เข้ามาใช้ในการออกแบบ โดยจะมุ่งเน้นในการคำนวณหาความเค้นหรือความเครียดวิกฤตของวัสดุ ซึ่งในวัสดุงานทางนั้นมีอาจจะสมมุติว่าเป็น Visco – Elastic Materials และไม่เป็นของแข็งตลอดทั้งชั้น ทำให้จำเป็นที่จะต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องต่อพฤติกรรมดังกล่าว เช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัวเป็นต้น สำหรับในประเทศไทยนั้นได้มีการพัฒนาการใช้วัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพมาใช้ในการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง เนื่องจากการเกิดปัญหาที่วัสดุในท้องถิ่นที่ทำการก่อสร้างนั้นมีคุณภาพไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ในบางครั้งจะต้องนำเข้าวัสดุจากแหล่งที่ไกลออกไปมาใช้ในการก่อสร้าง ทำให้งบประมาณนั้นมีค่าสูงขึ้น การปรับปรุงคุณภาพดินผสมซีเมนต์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน จากหลักการออกแบบถนนเชิงเคราะห์ทำให้จะต้องมีการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการออกแบบโครงสร้างทางที่ใช้วัสดุดินผสมซีเมนต์ด้วย โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพดินจากภูมิภาคต่าง ๆ ในประเทศไทย ได้แก่ ภาคกลาง และ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยที่จะใช้ปริมาณซีเมนต์ในการผสมร้อยละ 2.0, 3.5, 5.0, 6.5 ตามลำดับ จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดพบว่าตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือสมควรอย่างยิ่งที่จะต้องปรับปรุงคุณภาพดินเนื่องจากให้กำลังที่ได้มีค่าที่ต่ำมาก สำหรับค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้นั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมมากขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2549.....

477 03836 21 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : Pavement Engineering / Soil – Cement / Indirect Tensile Strength/ Resilient Modulus

PHITSANU PHOLKAINUWATRA : RESILIENT MODULUS OF SOIL – CEMENT MIX FOR PAVEMENT DESIGN. THESIS ADVISOR : SUCHED LIKITLERSUANG, 75 pp. ISBN 974-14-2519-8.

In general practice, most engineers usually refer to the index properties such as California Bearing Ratio (CBR) value, plasticity index to design the pavement layers. This, however, does not reflect any real beaviour of pavement structures. Therefore, the analytical design approach which is taken to account of stress-strain-strength characteristic should be more realistic approach to the future pavement design. Shear strength of soil and resilient modulus (M_R) based on the plasticity theory are often used in the analytical design method. In the analysis, the pavement material is assumed to be visco-elasticity and not necessary to be rigid layers. This leads to the more research development on material parameter to better explain the pavement material characteristic. This research focuses on the evaluation of unconfined compressive strength (q_u), indirect tensile strength (σ_T) and resilient modulus (M_R) of soil-cement mixing material. This is because the soil-cement mixing material is popular ground improvement technique for Thailand pavement design. The soil specimens are collected from the North-East and Central part of Thailand and mixed with the cement at 2.0, 3.5, 5.0, and 6.5%. The research find out that the North-East specimens are quite poor in terms of strength. For specimens, the indirect tensile strength and resilient modulus are increase when the cement content increases as expected.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....CIVIL ENGINEERING.....Student's signature.....

Field of study..CIVIL ENGINEERING.....Advisor's signature.....

Academic year.....2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดมา พร้อมทั้งคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยให้ข้อคิดเพิ่มเติมและคำแนะนำต่าง ๆ เป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. นเรศ พันธราธร รองอธิการบดี มหาวิทยาลัยรังสิต และ อ. ไพจิตร ผาวัน อาจารย์มหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่ช่วยเหลือและแนะนำผู้เขียนในการศึกษาระดับมหาวิทยาลัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ นายช่างจเร รุ่งฐานีย ที่ได้ให้คำข้อเสนอแนะต่าง ๆ นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ นายช่างพิศาล ตั้งตรงมิตร นายช่างสุชีพ สุขสว่าง นายช่างพลวุฒิ เกตะวันดี นายช่างกำพล บุญชม พี่สำราญ พรกัน พี่ธนา ใจกล้า พี่อรรถพล เก่าประเสริฐ พร้อมทั้งเจ้าหน้าที่กองโครงสร้าง ศูนย์อาคารและสถานที่ และ เจ้าหน้าที่กองทางถาวร ศูนย์ทางถาวร ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทยทุกท่าน ที่ช่วยเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณลุงชัยสวัสดิ์ กิตติพรไพบูลย์ อธิบดีกรมทางหลวง คุณอาเหม โง้วศิริ อ.ดร. ธันวิน สวัสดิศานต์ ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล พี่เศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ และเจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวงทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำปลีกย่อย และอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ภายในกรมทางหลวงโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณอาอภิชาต ภู่กัณหพันธ์ พี่เสรี เย็นใจ Mr. Kiat Kaekul และเพื่อนร่วมงานที่บริษัท AP Engineering & Testing, Inc. ขณะที่ผู้เขียนทำงานในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้สอนประสบการณ์พื้นฐานต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค และเป็นแรงบันดาลใจให้ผู้เขียนศึกษาต่อในสาขานี้

ขอขอบพระคุณ พี่ธวัชชัย สังขะวิไล พี่ขวัญ สุขคง พี่ณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์ พี่วีระศักดิ์สุพรรณ พี่นราวุธ ทองมะโรงสี คุณธนกร ชมภูรัตน์ คุณบุษยรัตน์ โกวิทจินดาชัย เพื่อน พี่น้องเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค ตลอดจนเพื่อน ๆ ชาวเซนต์ดอมินิก ที่ช่วยเป็นกำลังใจและอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ให้แก่ผู้เขียน

ความดีและประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่บิดามารดา ผู้มีอุปการคุณสูงสุดในชีวิต คณาจารย์ผู้ประสาทความรู้ ผู้มีพระคุณทุกท่าน และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อันเป็นที่รักนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย……..……ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ……..……จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ……..……ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ญ
บทที่
1 บทนำ
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย……...2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... 3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1 แนวคิดและทฤษฎี..... 4
2.1.1 คำจำกัดความของดินซีเมนต์ (Definition of Soil-Cement Cement)..4
2.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....5
2.1. 3ปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์……..……6
2.1. 4คุณสมบัติของดินผสมซีเมนต์……9
2.1. 5องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของ Cement – Treated Soil……9
2.1.6 ลักษณะของน้ำหนักการจราจรที่นำมาพิจารณา..... 13
2.1. 7ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)..... 14
2.1. 8แนวความคิดของการออกแบบโครงสร้างถนนในอดีต……..17
2.1. 9การออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์……..18
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย.....21
2.2.1 ดินลูกรัง (Lateritic Soil)……26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2 ดินทรายปนดินตะกอน (Silty Sand)……29

2.2.3 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีต่อค่า q_u ของดินเหนียวกรุงเทพ.....30

2.2.4 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีต่อค่า q_u ของดินเหนียวจันทบุรี……..31

3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย……..…… 37

3.1.1 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง……37

3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด……38

3.1.3 ขั้นตอนการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม……38

3.1.4 ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าโมดูลัสคืนตัว…….. 38

3.2 วิธีการทดสอบ..... 39

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของดินตัวอย่างก่อนปรับปรุงคุณภาพ.....39

3.2.2การหาปริมาณความชื้นที่ใช้ผสมในการปรับปรุงคุณภาพดินตัวอย่าง……..39

3.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด…..... 39

3.2.4 การหากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสคืนตัว……40

4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์.....44

4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของดินตัวอย่างก่อนปรับปรุงคุณภาพ.....44

4.1.2 การทดสอบหาปริมาณความชื้นที่ใช้ผสมในการปรับปรุงคุณภาพ
ดินตัวอย่าง……..45

4.1.3 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด……45

4.1.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม……54

4.1.5 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว…… 55

5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย……...66

5.2 ประโยชน์ที่นำไปใช้……67

5.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม……..67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....68
ภาคผนวก ก .ผลการทดสอบพิกัดเหลวของดินตัวอย่าง.....70
ภาคผนวก ข. เส้นโค้งการบดอัดของดินตัวอย่าง.....72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

D	เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างทดสอบ
H	ค่าการคืนตัวทั้งหมดในแต่ละทิศทาง (Instantaneous Recoverable)
M_R	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)
P	ค่าน้ำหนักทดสอบแบบวัฏจักรที่ใช้ในการทดสอบการหาค่าโมดูลัสคืนตัว
P_f	ค่าน้ำหนักสูงสุดที่ได้จากการทดสอบกำลังแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile strength)
t	ความสูงของก้อนตัวอย่างทดสอบ
q_u	ค่ากำลังของการทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined Compressive Strength)
W_n	ค่าความชื้นตามธรรมชาติของดิน (Natural Water Content)
W_{Opt}	ค่าความชื้นอิ่มตัวสูงสุด (Optimum Moisture Content)
ε	ความเครียด (Strain)
ε_R	ความเครียดที่สามารถคืนกลับได้ตามแนวแกน (Recoverable Axial Strain)
γ_d	ค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density)
ν	ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)
σ	ความเค้น (Stress)
σ_T	ค่ากำลังของการทดสอบแบบกำลังแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในการก่อสร้างถนนนั้น จะคำนึงถึงคุณภาพของวัสดุที่ใช้มาก่อสร้างเป็นชั้นโครงสร้างทางเป็นหลัก โดยมาตรฐานการใช้วัสดุในงานวิศวกรรมการทางนั้น วิศวกรผู้ออกแบบมักจะเลือกใช้ตามมาตรฐานจากสถาบันต่าง ๆ เช่น มาตรฐานของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), กรมทางหลวง เป็นต้น เพื่อที่จะได้คุณภาพของโครงสร้างทางที่มีความทนทาน และสามารถคาดการณ์การซ่อมบำรุงได้อย่างถูกต้อง ซึ่งในปัจจุบันบางภูมิภาคในประเทศไทยมักจะเกิดปัญหาของคุณภาพของวัสดุที่มาใช้สำหรับในการก่อสร้างนั้น ไม่ได้คุณภาพเพียงพอสำหรับการก่อสร้าง จึงทำให้ต้องมีการขนส่งวัสดุเข้ามาจากแหล่งอื่นที่ไกลออกไป ทำให้ราคาของการก่อสร้างนั้นสูงขึ้น และเกิดความล่าช้าของงาน และยังเกิดปัญหาการทำลายทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย

เนื่องจากปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นที่จะต้องหาวัสดุมาทดแทนหรือปรับปรุงคุณภาพของวัสดุให้คุณภาพตามมาตรฐาน ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันวิธีหนึ่งก็คือการใช้ดินผสมซีเมนต์ โดยเป็นการนำซีเมนต์เข้ามาผสมเพื่อช่วยเสริมสร้างกำลังของดินที่นำมาเป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง โดยสามารถนำวัสดุจากแหล่งในท้องถิ่นมาปรับปรุงคุณภาพให้ใช้ได้อย่างเหมาะสม

การออกแบบโครงสร้างถนนในปัจจุบันนั้นได้เริ่มหันมาใช้วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์มากขึ้น ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่มีข้อจำกัด ทำให้สามารถวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างทางให้ใช้รองรับการจราจรโดยประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถกำหนดการใช้วัสดุโครงสร้างทางได้หลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วก็ตาม และยังมีเหตุผลรองรับเชิงวิทยาศาสตร์ ซึ่งจะสามารถทำนายพฤติกรรมของชั้นโครงสร้างทางได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้นซึ่งจะแตกต่างกับวิธีในอดีตที่วิธีการออกแบบนั้นอาศัยผลจากประสบการณ์การใช้งานและติดตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ซึ่งข้อมูลที่มีอยู่นั้นเป็นเพียงแค่ค่าดรรชนี ตัวอย่างเช่น ค่า CBR ซึ่งไม่มีค่าของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแต่อย่างใดทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน

ซึ่งในปัจจุบันนี้มีการนำเทคโนโลยีการทดสอบที่สอดคล้องในการพัฒนาการออกแบบเชิงวิเคราะห์ เพื่อให้ทราบค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับเป็นพารามิเตอร์ประกอบการออกแบบให้เหมาะสมกับวัสดุโดยทั่วไป ซึ่งการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุดินผสมซีเมนต์ ซึ่งเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่ใช้ในการก่อสร้างถนนในประเทศไทย ในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาเพื่อให้ทราบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) และค่ากำลังการต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญค่าหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างชั้นทางที่มีวัสดุดินผสมซีเมนต์

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสคืนตัวและคุณสมบัติการรับน้ำหนักของวัสดุดินผสมซีเมนต์ที่ใช้งานวิศวกรรมการทางในประเทศไทย ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิธีการออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาเพื่อศึกษากำลังของการรับน้ำหนักแบบไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compressive Strength) ความต้านทานต่อแรงดึงด้านอ้อม (Indirect Tensile Strength) และค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยจะทดสอบจากตัวอย่างดินผสมซีเมนต์จากแหล่งดินต่าง ๆ 2 ภูมิภาคในเมืองไทยคือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับร้อยละของปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมนั้น จะใช้ที่ 2, 3.5, 5, 6.5 ตามน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งจะทำการทดสอบกำลังรับแรงดังกล่าวแบบสถิตย์จากเครื่องต้านทานแรงดึงทางอ้อม หลังจากนั้นจะทำการทดสอบกำลังรับแรงแบบวัฏจักร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1 เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของดินผสมซีเมนต์ในการสภาวะจำลองการรับน้ำหนักจริงของโครงสร้างทาง

2 เพื่อศึกษากำลังการรับน้ำหนักของวัสดุดินผสมซีเมนต์แบบไม่มีแรงดันด้านข้างจากแหล่งดินที่ใช้งานในประเทศไทย

3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุดินผสมซีเมนต์จากแหล่งดินที่ใช้งานในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1 ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุดินผสมซีเมนต์จากการสภาวะจำลองการรับน้ำหนักของชั้นทางจริง โดยขนาดของตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีความสูง 70 มิลลิเมตร

2 ประมวลผลของการทดสอบและหาค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุดินผสมซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

3 สรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางที่ใช้วัสดุดินผสมซีเมนต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1 ทำให้ทราบถึงกำลังการรับน้ำหนักของดินผสมซีเมนต์จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีแรงดันด้านข้างจากตัวอย่างดินในประเทศไทย

2 ทำให้ทราบถึงลักษณะของพฤติกรรมของดินผสมซีเมนต์ในการทดสอบโดยใช้วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางด้านอ้อม

3 ทำให้ทราบถึงค่าของโมดูลัสคืนตัวของวัสดุดินผสมซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างในประเทศไทย

4 เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์ต่อไปในอนาคต

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1 ศึกษาและทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่ใช้ในการในการก่อสร้างถนนจริง

2 ศึกษาการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงทางอ้อม และค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างวัสดุดินผสมซีเมนต์

3 สรุปผลที่ได้การทดสอบของตัวอย่างดินผสมซีเมนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 คำจำกัดความของดินซีเมนต์ (Definition of Soil-Cement)

Highway Research Board's Committee on Soil-Portland Cement Stabilization ได้ให้คำจำกัดความของ Cement-Treated Soil คือการนำดินและซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการมาผสมกับน้ำให้เข้ากันแล้วบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดและป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียระหว่างการบ่ม ดินซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ 5 แบบ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของ Cement-Treated Soil

ประเภท	ลักษณะของดินที่ใช้ผสมกับซีเมนต์	เปอร์เซ็นต์ของซีเมนต์ที่ใช้โดยประมาณ	การประยุกต์นำไปใช้งาน
Cement Modified Silty Clay Soil	ดินที่เป็นดินอ่อนมากหรือดินที่มีลักษณะเปียกแฉะ เช่น Silty Clay	1-3	ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติผิวดินเดิมให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุก
Cement Modified Granular Soil Mixture	ดินที่มีค่า Plasticity สูงเช่น ดินทรายและกรวด	1-3	ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นรองพื้นทางให้มีกำลังรับน้ำหนักสูงขึ้น
Soil-Cement	ดินทั่วไป เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพให้มีกำลังรับแรงตามมาตรฐานของ PCA หรือ AASHTO	5-7	ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน PCA หรือ AASHTO
Plastic Soil-Cement	ดินทั่วไป เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพให้มีกำลังรับแรงตามมาตรฐานของ PCA หรือ AASHTO	2	ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน PCA หรือ AASHTO
Cement-Treated Soil Slurries and Grouts	ดินทรายและน้ำโดยมีปริมาณของน้ำสูงมาก	5	ใช้กับงานบำรุงรักษา เช่นการทำ Mud Jetting กับดินคันทางที่เกิดการทรุดตัว

หมายเหตุ PCA = Portland Cement Association

2.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากที่ได้มีการบันทึกว่าปูนซีเมนต์ถือกำเนิดขึ้นมานานแล้ว โดยชาติแรกที่รู้จักการใช้ปูนซีเมนต์คืออียิปต์ โดยใช้เป็นช่วยในการก่อสร้างพีรามิด โดยใช้ปูนขาวเป็นปูนก่อ (Mortar) แต่ปูนชนิดนี้ไม่ได้อยู่ตัวด้วยน้ำ ต่อมาจึงได้มีการเติมสารประเภท Hydraulic ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิก้าเข้าไป เช่น หิน Volcanic Pozzolana หรือ ดิน Santorin คำว่า Hydraulic หมายถึงสารซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำแล้วสามารถแข็งตัวในอากาศหรือน้ำได้และเมื่อก่อตัวแล้วจะไม่ละลายในน้ำ และหลังจากนั้นได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านคุณลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ Hydraulic ต่อมาในศตวรรษที่ 19 มีความต้องการที่จะใช้ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จึงได้มีการค้นคว้านำเอาหินปูนมาผสมกับหินดินดานแล้วนำไปเผาจะเกิดสารซีเมนต์ (Cementing Material) ซึ่งสามารถแข็งตัวในน้ำและไม่ละลายน้ำโดยที่เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีสีคล้ายกับสีของหินในเหมืองของเกาะ Portland จึงเรียกกันว่า “ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์”

สำหรับในประเทศไทยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้อธิบายเกี่ยวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หมายถึงผลผลิตที่ได้จากปูนอัดเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ จนรวมตัวกันสุกพอดี ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ไฮดรอลิคแคลเซียมซิลิเกต (Hydraulic Calcium Silicates) กล่าวว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลผลิตที่ได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ Hydraulic Calcium Silicates วัตถุที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ได้แก่ หินปูน (Lime Stone) หินชอล์ค (Chalk) ดินสอพองหรือหินขาว (Marl) ซึ่งจะให้ธาตุแคลเซียม และพวกหินดินดาน (Shale) ดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate) และทราย (Sand) เป็นตัวให้ธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม

สารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ ซึ่งได้แก่

1.Tricalcium Silicate ($3CaOSiO_2$) ใช้ชื่อย่อว่า C_3S เป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงสูงในช่วงแรกและให้ความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ

2.Dicalcium Silicate ($2CaOSiO_2$) ใช้ชื่อย่อว่า C_2S เป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงในช่วงแรกต่ำ แต่จะให้กำลังสูงขึ้นภายหลัง และให้ความร้อนต่ำเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ

3.Tricalcium Aluminate ($3CaOAl_2O_3$) ใช้ชื่อย่อว่า C_3A เป็นสารที่ให้ความแข็งแรงเพียงเล็กน้อย ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาลื่น แต่ซีเมนต์ที่มีสาร C_3A มากจะไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้มากนัก

4.($4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$) ใช้ชื่อย่อว่า C_4AF เป็นสารที่ช่วยในด้านความดันอยู่ตัว (Soundness) และช่วยป้องกันปฏิกิริยาเคมีจากสิ่งต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรง

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (ม.อ.ก.) แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทใหญ่คือ

1.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)

2.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) ซึ่งให้ความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง

3.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High-early Strength Portland Cement)

4.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement)

5.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตสูง (Sulfate-Resistant Portland Cement)

สำหรับประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานดินผสมซีเมนต์นั้น จะใช้ปูนซีเมนต์อยู่สองประเภทคือ ประเภทที่หนึ่งและประเภทที่สามในการปรับปรุงคุณภาพของดิน ซึ่งมีงานวิจัยอยู่ค่อนข้างมาก ผลของงานวิจัยที่ได้จะคล้ายคลึงกันคือพบว่าความแข็งแรงของดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่สามจะสูงกว่าซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งที่อายุการบ่มเดียวกัน แต่โดยทั่วไปจะใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมากกว่า เนื่องจากใช้งานได้ง่ายและราคาถูกกว่า ในขณะที่ซีเมนต์ประเภทที่สามจะมีราคาที่แพงกว่าซึ่งจะทำราคาของงานสูงขึ้น

2.1.3 ปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์

การพิจารณากำลังรับแรงอัดของดินผสมซีเมนต์นั้นจะพิจารณาจากปฏิกิริยา Cement Hydration เป็นหลักจะเกิดขึ้นทันทีเมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำแต่ Pozzolanic Reaction จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และเกิดต่อเนื่องกันไปอีกหลายเดือน เหมือนกับปฏิกิริยาระหว่างดินกับปูนขาว จะเห็นได้ว่า Hydration Reaction ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ทำให้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้นสามารถใช้กับดินได้เกือบทุกประเภท โดยปฏิกิริยานี้คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีต กล่าวคือเมื่ออนุภาคซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยา

Cement Hydration ทำให้เกิด $Ca(OH)_2$ ขึ้นมาประมาณ 25% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ซึ่งต่อมาดินเหนียวจะถูกดูดซับ (Adsorption) ด้วย $Ca(OH)_2$ หรือเรียกว่า Cation Exchange Reaction เมื่ออนุภาคดินเหนียวอิ่มตัวด้วย $Ca(OH)_2$ ก็จะเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ขึ้น ผลของปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวทั้งหมดนี้จะก่อให้เกิดสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH) Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrated Lime สาร CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะ โดยสามารถยึดเกาะเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้เป็นเม็ดขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง Hydrated Lime ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวเป็น Ca^{2+} และจะทำปฏิกิริยากับ Silica และ Alumina ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ซึ่งอนุภาคดินจะฝังอยู่ใน Reaction Product จะมีลักษณะเป็น Cement paste และจะแข็งตัวตามเวลาและเปลี่ยนโครงสร้างดินให้แข็งตัวด้วย

ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการปฏิกิริยาของดินผสมซีเมนต์เขียนได้ดังนี้

$$\text{Cement} + H_2O \rightarrow \text{CSH} + \text{CAH} + Ca(OH)_2 \quad (1)$$

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

$$Ca^{2+} + 2(OH) + SiO_2\,(\text{Soil Silica}) \rightarrow \text{CSH} \quad (3)$$

$$Ca^{2+} + 2(OH) + Al_2O_3\,(\text{Soil Alumina}) \rightarrow \text{CAH} \quad (4)$$

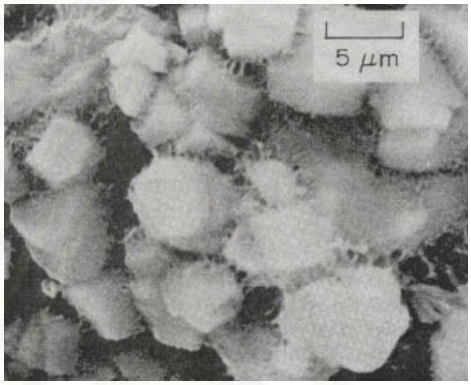
ดังนั้น จะเห็นได้ว่าผลของปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์จะก่อให้เกิดสาร CSH และ CAH ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะดังแสดงในสมการ (1), (3) และ (4)

สมการที่ (1) CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยา Cement Hydration โดยตรง ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่า Hydration Reaction หรือ Primary Reaction

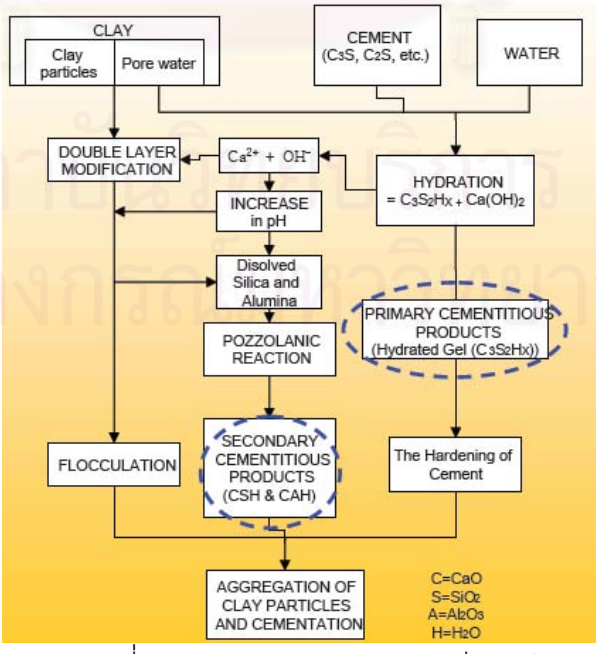
สมการที่ (3) และ (4) CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง Ca^{2+} กับซิลิกาและอะลูมินาในดิน ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่า Pozzolanic Reaction หรือ Secondary Reaction

โดยปฏิกิริยาของดินผสมซีเมนต์จะเป็นเป็นไปตาม Diagram ที่แสดงไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 โดยกล่าวสรุปได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ และขั้นตอนที่ 3 จากปฏิกิริยาทั้ง 3 ขั้นตอน ก็จะได้ Reaction Product ที่ทำให้อนุภาคดินเชื่อมประสานกัน ได้แก่ สาร CSH และ CAH

ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากส่วนผสมของดินกับซีเมนต์ หรือ Cement paste ที่เริ่มแข็งตัวเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน (Scanning Electron Microscope) มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ของดินผสมซีเมนต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์

2.1.4 คุณสมบัติของดินผสมซีเมนต์

เมื่อผสมซีเมนต์ลงในดินจะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป คือจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงแบกทานของดินเพิ่มขึ้น ความคงทนของดินเพิ่มขึ้น การบวมตัวและการหดตัวจะน้อยลง ดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ดินจะเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นวัสดุประเภท Elasto-Plastic Materials กลายเป็นวัสดุประเภท Brittle Material เพิ่มค่า Plastic Limit หรือลดค่า Liquid Limit ซึ่งค่าของ Plasticity Index จะลดต่ำลงด้วย ทำให้ดินผสมซีเมนต์จะมีลักษณะของการวิบัติที่ความเครียดต่ำ Water Content ของดินที่ปรับปรุงจะมีค่าต่ำลง ในขณะที่ Unit Weight จะสูงขึ้นโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านได้ของดินที่ได้รับการปรับปรุงจะต่ำลงแต่อาจจะสูงขึ้นได้สำหรับดินเหนียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินด้วย ทางด้านค่าของความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นสำหรับดินเหนียวและดินทราย สำหรับดินตะกอนทราย ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงเล็กน้อย องค์ประกอบหลักของการควบคุมการผสมของดินซีเมนต์มีอยู่ 3 อย่างคือ สภาพธรรมชาติของดิน ปริมาณและคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ใช้ผสม ปริมาณความชื้นในการบดอัดและความหนาแน่นที่ต้องการในการบดอัด

2.1.5 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของ Cement-Treated Soil

คุณสมบัติของ Cement-Treated Soil นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างดังต่อไปนี้

1.คุณสมบัติของดินธรรมชาติ ส่วนประกอบที่มีตามธรรมชาติของดินธรรมชาติ มีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมดินกับน้ำ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการรับแรงและความคงทนของดินผสมซีเมนต์ ส่วนประกอบดังกล่าวนี้รวมถึงด้าน ฟิสิกส์และเคมี เป็นต้นว่าปริมาณส่วนผสมของ ดินทราย ดินตะกอน และ ดินเหนียว ที่มีอยู่ในดิน เช่น การทำดินลูกรังผสมซีเมนต์ให้มีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดินและค่าของการเป็นดินลูกรังของดิน (Degree of Laterization) ซึ่งข้อมูลที่ใช้เป็นแนวทางที่กำหนดปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมนั้น สามารถใช้ข้อมูลจากสิ่งต่อไปนี้

(1) การจำแนกกลุ่มของดิน สภาพธรรมชาติของดินนั้นเป็นตัวกำหนดปริมาณของซีเมนต์ที่ใช้ใน การปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นหลัก ซึ่ง AASHTO และ Unified Soil ได้แบ่งดินออกเป็นกลุ่มใหญ่หลายกลุ่มใช้ปริมาณซีเมนต์แตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 2.2

(2) มวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์สี่ ปริมาณมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์สี่ มีผลต่อการใช้ของปริมาณซีเมนต์ด้วย ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการรับกำลังของดินผสมซีเมนต์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการทดลองกับดิน 3 ชนิดคือ Coarse Sand, Fine Sandy Loam และ Loamy Sand ด้วยปริมาณซีเมนต์เท่ากันทั้ง 3 อย่าง แต่มีการเพิ่มมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ที่ต่างกันแล้วนำไปทดลองกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน จะพบว่าจะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น

(3) ปริมาณดินเหนียว Reinhold(1955)ได้ทำการทดลองโดยนำเอาดินทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของดินเหนียว ตั้งแต่ร้อยละ 0-100 แล้วผสมกับซีเมนต์ในปริมาณที่คงที่ จากนั้นนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัดและค่าของ Modulus of Elasticity พบว่าเมื่อปริมาณของดินเหนียวเพิ่มมากขึ้นค่าของ Modulus of Elasticity จะลดลง แสดงว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามไปด้วย

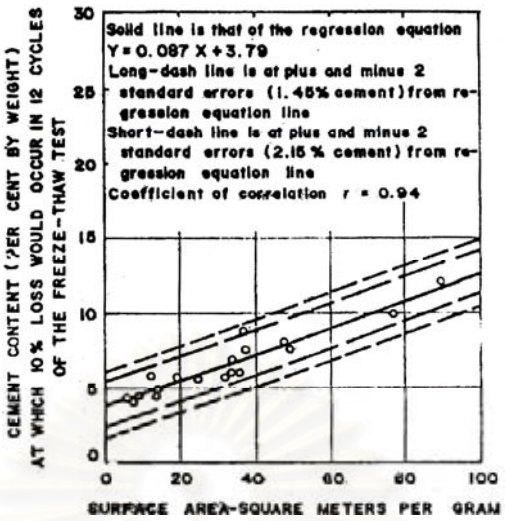
(4) พื้นที่ผิวของเม็ดดิน Diamond และ Kinter(1958) ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับพื้นที่ผิวของเม็ดดิน ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาณซีเมนต์นั้น เมื่อพื้นที่ผิวมากจะต้องใช้ปริมาณซีเมนต์มากขึ้นด้วย พื้นที่ผิวเม็ดดินมีค่าอยู่ระหว่าง 6 ถึง 90 เมตร^2 / กรัม จากภาพที่ 2.3 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาณซีเมนต์ สามารถเขียนได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$Y = 0.087(X) + 3.79 \qquad (6)$$

Y คือ ปริมาณซีเมนต์คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักดิน

X คือ พื้นที่ผิวของเม็ดดิน มีหน่วยเป็น เมตร^2 / กรัม

2.ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นในการบดอัดความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของ Cement-Treated Soil จะมีพฤติกรรมเหมือนกับดินทั่วไปที่ไม่ได้ผสมกับซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ความชื้นในส่วนผสมความชื้นในส่วนผสมเมื่อทำการบดอัดจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์ ความชื้นที่เหมาะสมในการผสมดินซีเมนต์จะทำให้การทำงานและการบดอัดสะดวกและง่ายขึ้น แล้วยัง เพียงพอที่ใช้ในปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์อีกด้วย ซึ่งได้มีการศึกษาหาผลของความชื้นที่มีต่อกำลังรับแรงอัด และ ความชื้นกับ การสูญเสียน้ำหนักจากการทำ Wet-Dry และ การละลายน้ำแข็ง จากผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวพอที่จะสรุปได้ว่า ถ้าเป็นดินทรายควรบดอัดด้วยปริมาณความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นที่อิ่มตัว จะ



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาณซีเมนต์, (Diamond and Kinter, 1953)

ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดส่วนดินเหนียวถ้าจะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงสุดจะต้องใช้ปริมาณความชื้นมากกว่า ค่าความชื้นอิ่มตัวเล็กน้อย ส่วนผลของการทดสอบนั้นสรุปได้ว่า สำหรับดินเหนียวและดินตะกอนความคงทนจะลดลงถ้าปริมาณความชื้นในการบดอัดมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นอิ่มตัวส่วนดินทรายนั้นปริมาณความชื้นจะไม่มีผลต่อความคงทนเลย ธีระชาติ(2525)ได้ทำศึกษาเพิ่มเติมของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่ทำการบดอัด ตามวิธีของ Poctor ในการทำดินซีเมนต์ พบว่าปริมาณความชื้นที่ค่าความชื้นอิ่มตัวทำให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยา Hydration ได้อย่างสมบูรณ์อีกด้วย แต่ผลการทดสอบกำลังการรับน้ำหนักพบว่าการบดอัดที่ความหนาแน่นสูงสุดนั้น ไม่ได้แสดงถึงความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์นั้นจะสูงตามด้วย การทดสอบหาความคงทนแบบ การแช่แข็ง และ การละลาย ของดินเหนียวและดินตะกอนที่ผสมซีเมนต์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่ค่าความชื้นอิ่มตัว หรือมากกว่าเล็กน้อย แต่ถ้าบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าที่ค่าความชื้นอิ่มตัว ค่าความคงทนจะลดลง แต่กรณีดินทรายผสมซีเมนต์การบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นอิ่มตัว เล็กน้อยจะให้ค่าความคงทนสูงขึ้น โดยที่ความแข็งแรงของดินทรายเกิดขึ้นที่ความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นอิ่มตัวประมาณร้อยละ 3 ถึง 6 แต่ถ้าเป็นดินเหนียวความแข็งแรงจะเกิดที่ปริมาณความชื้นเกินค่าความชื้นอิ่มตัวไปเล็กน้อย

3. ปริมาณและคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ใช้ผสม โดยทั่วไปแล้วดินเกือบทุกชนิดจะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับประเภทของ Cement-Treated Soil สัดส่วนของซีเมนต์ที่ใช้จะเปลี่ยนไปตามค่า Plasticity Index การเปลี่ยนแปลงปริมาตร คุณสมบัติความยืดหยุ่นความคงทน และชนิดของดินที่จะนำมาปรับปรุงคุณภาพ Felt(1955)ได้ทำการ

ทดสอบตัวอย่างจากดิน 3 ชนิด คือ Sandy Loam, Silty Loam และ Silty Clay มาทดลองผสมกับซีเมนต์ โดยเปลี่ยนปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 ถึง 30 ตามปริมาตร แล้วทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 5 แบบ ตั้งแต่ 2 วัน จนถึง 1 ปี และการทดสอบความคงทนด้วยวิธี Wet-Dry และ แช่แข็งแล้วละลาย ตั้งแต่ 12 รอบถึง 96 รอบ ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก และดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะรับกำลังน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำกว่า ความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณซีเมนต์เป็นตัวหลักที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้นด้วย สำหรับทางด้านการเลือกใช้ซีเมนต์ในงานดินซีเมนต์นั้นจะใช้ซีเมนต์อยู่สองประเภทคือ ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ซึ่งได้มีการทดสอบ โดยการนำดินสองชนิด คือ Sandy Loam และ Silty Clay Loam มาผสมซีเมนต์ทั้งสองประเภท พบว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะไม่เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการรับกำลังของดินทุกชนิด เป็นต้นว่าดิน Loamy Sand ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังรับแรงอัดเป็น 2 เท่า ของดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน และเป็น 1.4 เท่าเมื่ออายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty Clay Loam เมื่อใช้ซีเมนต์ประเภท 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมจากการจัดกลุ่มดินของ AASHTO และ Unified Soil

AASHTO Soil Classification	Unified Soil Classification	Usual Range in Cement Requirement		Estimated Cement Content and That Used in Moisture-Density Test Percent by Weight	Cement Contents for Wet-Dry and Freeze-Thaw Tests Percent by Weight
		Percent by Volume	Percent by Weight		
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-b	GM, GP, SM, SP	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	GM, GC, SM, SC	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	SP	8-12	7-11	9	7-9-11

A-4	CL, ML	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	ML, MH, CH	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	CL, CH	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	OH, MH, CH	10-14	10-16	13	10-13-15

2.1.6 ลักษณะของน้ำหนักการจราจรที่นำมาพิจารณา

การพิจารณาน้ำหนักการจราจรของโครงสร้างถนนและทาง นั้นสามารถพิจารณาออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ชนิดของยานพาหนะที่ใช้งานบนโครงสร้างถนน เช่นจำนวนเพลา ระยะห่างของเพลา จำนวนล้อต่อเพลา น้ำหนักล้อ แรงดันลมในล้อน้ำหนักล้อของยานพาหนะมีผลต่อความหนาของผิวทาง ทั้งถนนลาดยางและถนนคอนกรีต ความดันลมในล้อยานพาหนะเกือบจะไม่มีผลต่อการกำหนดความหนาของผิวทาง แต่จะมีผลกับคุณภาพของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างผิวทาง การกระจายน้ำหนักจากล้อสู่ผิวทางขึ้นอยู่กับความดันของลมในล้อ ถ้าแรงดันของลมสูงขอบของล้อจะเกิดแรงดึงทำให้แรงกดที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับผิวทางต่ำกว่าแรงดันของลมถ้าแรงดันของลมในล้อต่ำแรงกด ณ จุดสัมผัส จะสูงกว่าแรงดันในล้อ ผิวสัมผัสระหว่างล้อกับผิวทางลาดยางจะใกล้เคียงรูปวงกลม บนทางคอนกรีตถ้าเป็นล้อยางขนาดใหญ่ เช่นล้อเครื่องบินจะมีพื้นที่เป็นรูปวงรี

2.ปริมาณการจราจร ซึ่งจะพิจารณาจากสถิติการใช้ถนนหรือสนามบินของยานพาหนะที่ผ่านมาและคาดคะเนล่วงหน้าตลอดอายุการใช้งานทางที่มีรถบรรทุกหนักแล่นบดทับวันละหลาย ๆ ครั้ง ตลอดอายุการใช้งาน ทำให้ผิวทางเกิดการล้า (Fatigue) ซึ่งมีผลต่อความต้านทานและความหนาของโครงสร้างทาง ถ้าผิวทางแคบเกินไปทำให้จุดที่ล้อบดทับอยู่ชิดขอบทางมาก จะทำให้ทางเกิดการชำรุดเสียหายเร็วกว่าทางที่มีผิวทางกว้างและจุดบดทับอยู่ห่างจากขอบทางมากพออย่างน้อย 1 เมตร

3.ลักษณะของการใช้งานผิวทาง เช่น ลานจอด ทางขับ ทางวิ่ง ลักษณะการรับน้ำหนักและความเร็วของยานพาหนะจะต่างกันมากยานพาหนะที่มาใช้ในถนนและทางเมื่อเปิดการจราจรจะมีหลายขนาดและหลายแบบซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งน้ำหนักบรรทุกและ

จำนวนเพลา ในการออกแบบจำเป็นที่จะต้องยึดน้ำหนักมาตรฐาน เป็นค่าใดค่าหนึ่งที่ใช้เปรียบเทียบ การออกแบบสนามบินมักจะเลือกเครื่องบินที่มีน้ำหนักสูงสุดเป็นตัวกำหนดในการออกแบบความหนาของชั้นทาง และเนื่องด้วยล้อเครื่องบินมีจำนวนหลายล้อต่อเพลา จึงเปรียบเทียบปรับเปลี่ยนน้ำหนักกลุ่มล้อให้เปรียบเทียบเท่ากับน้ำหนักล้อเดี่ยวเสียก่อน เรียกว่า น้ำหนักสมมูลล้อเดี่ยว Equivalent Single Wheel Load (ESWL) การออกแบบถนนใช้การกำหนดน้ำหนักเพลามาตรฐานและเปรียบเทียบน้ำหนักเพลาของยานพาหนะทุกคันที่ใช้ถนนกับค่าน้ำหนักเพลามาตรฐานเพื่อจะหาจำนวนครั้ง การบดทับในลักษณะของเพลามาตรฐาน ค่าแฟกเตอร์ที่คำนวณ ได้นี้เรียกว่า Equivalent Axel Loads Factor (EALF)

2.1.7 ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

ค่าโมดูลัสคืนตัวเป็นค่าโมดูลัสที่ใช้ในทฤษฎีอีลาสติก ซึ่งใช้อธิบายวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น Visco – Elastic Materials กล่าวได้ว่าการยืดตัวของวัสดุนั้นจะมีส่วนที่ยืดตัวถาวรอยู่ด้วยจึงทำให้ไม่สามรถสรุปว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่เป็นอีลาสติกโดยทีเดียว ในสภาวะที่มีแรงกระทำต่อวัสดุเพียงเล็กน้อยในลักษณะที่ซ้ำไปซ้ำมาหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งค่าโมดูลัสคืนตัวนี้ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ในการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ค่าของโมดูลัสคืนตัวนี้สามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด (Peak Deviator Stress, σ_d) และ ความเครียดที่สามารถคืนกลับได้ตามแนวแกน (Recoverable Axial Strain, ε_r) โดยแสดงในภาพที่ 2.4

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \tag{7}$$

2.1.6 Critical Stress/Strain ของโครงสร้างถนน

โครงสร้างชั้นทางแบบ Multi – Layered System จะประกอบด้วยชั้นทางที่มีค่า Elastic Modulus แตกต่างกันวางทับกันอย่างเป็นระบบ ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันอยู่ 2 ระบบ คือ Unbound Granular Material System และ Stabilized Material System การเกิด Critical Stress/Strain นั้นเกิดอันเนื่องมาจากน้ำหนักกดทับของล้อดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งโดยปกติแล้ววัสดุใดชั้นทางนั้นจะสามารถต้านทานหน่วยแรงได้มากกว่าความเครียด นอกจากนั้นค่าของความเครียดที่พังทลายมีความแปรปวนน้อยกว่า หน่วยแรงที่พังทลาย นอกจากนี้ผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Visco - Elastic Materials มักจะไม่แสดงความเครียดที่พังทลายที่เด่นชัด ซึ่งมีลักษณะคล้าย ๆ กับ Strain Curve ของดินเหนียว ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างถนน

ภาพที่ 2.4 ลักษณะของการทดสอบเพื่อจะหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยทั่วไป

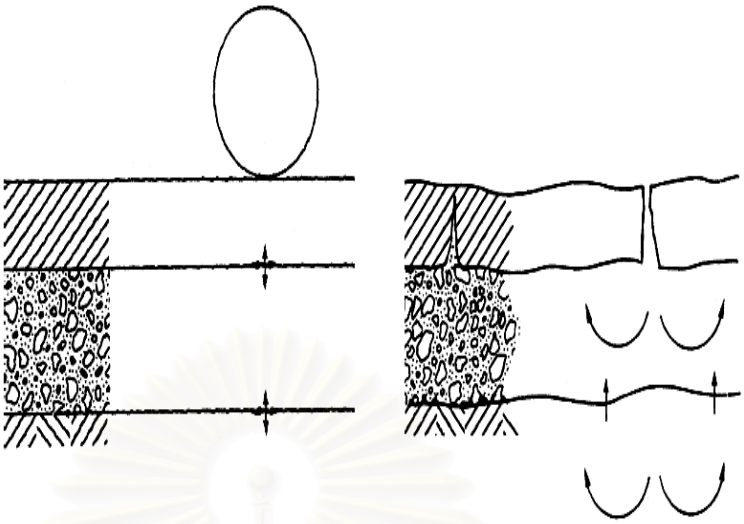
มักจะใช้ความเครียดเป็นตัวกำหนดความวิบัติของชั้นทางแต่ละชั้น การเกิดความเครียดที่มากเกินไปที่ชั้นทางจะทนได้จะก่อให้เกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue Crack) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 และรอยร่องล้อ (Rutting)ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ในชั้นทางตามลักษณะของความเครียดที่เกิดขึ้น ความเครียดดึงในชั้นทางจะทำให้เกิดรอยแตก ในขณะที่ความเครียดกดจะทำให้เกิดรอยร่องล้อ ซึ่งทั้งรอยแตกและรอยร่องล้อถือเป็น Failure Criteria ในการออกแบบโครงสร้างถนน

เมื่อโครงสร้างถนนถูกกดโดยน้ำหนักล้อ จะทำให้เกิด หน่วยแรง ความเครียด และการโก่ง ขึ้นในชั้นทาง หน่วยแรง และ ความเครียด ที่เกิดขึ้นในชั้นทางแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ

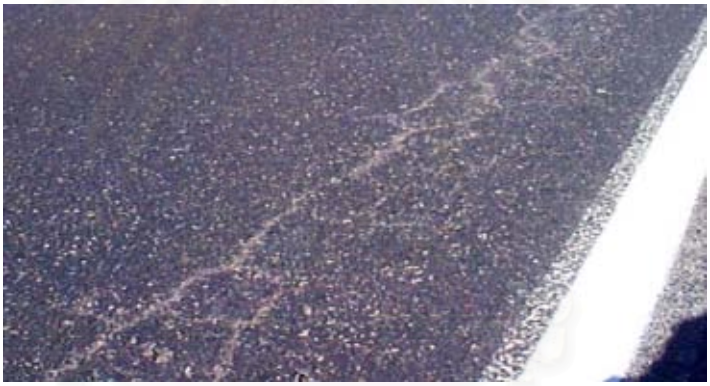
1.Vertical Compressive Stress/Strains เป็น Stress/Strain ที่กดลงในชั้นทางระดับต่าง ๆ ในแนวดิ่ง เป็นผลให้วัสดุชั้นทางมีความแน่นสูงและทำให้เกิดรอยร่องล้อในชั้นทาง

2.Vertical Compressive Stress/Strains ทำให้โครงสร้างถนนไม่มั่นคง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อน้ำหนักล้อมีค่าสูงมากเช่น กรณีของรถบรรทุกเกินพิกัด Shear Stress/Strain จะเกิดขึ้นมากที่สุดในชั้นพื้นทาง

3.Radial Stress/Strains เป็น Stress/Strain ที่เกิดอันเป็นผลมาจากการแอ่นตัวของชั้นทาง ใต้ชั้นทางของวัสดุประเภท Asphalt Concrete หรือ Asphalt Treated Base หรือ Cement Treated Base จะเกิด หน่วยแรง/ความเครียด ในแนวรัศมี ขึ้นเนื่องจากน้ำหนักล้อทำให้ชั้นทางนั้นเกิดTensile Strain โดยเริ่มจากแตกจากด้านล่างก่อน แล้วจึงลามสู่ผิวหน้า



ภาพที่ 2.5 รูปแบบของการเกิด Stress/Strain ในโครงสร้างถนน



ภาพที่ 2.6 ลักษณะรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้าบนผิวถนน (Fatigue Crack)

ภาพที่ 2.7 ลักษณะรอยร่องล้อบนพื้นถนน (Rutting)

2.1.8 แนวความคิดของการออกแบบโครงสร้างถนนในอดีต

โดยทั่วไปค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางนั้นมักจะใช้ค่า California Bearing Ratio (CBR) ซึ่งค่าดัชนีที่ได้จากการทดลองที่เริ่มใช้โดย US Corps of Engineer เมื่อประมาณ 60 ปีที่ผ่านมาในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน

โดยแท้จริงแล้วนั้นการออกแบบที่ถูกต้องจำเป็นต้องมีการวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำและความรู้ทางด้านการคืนตัวของดินซึ่งพัฒนามาจากความรู้ของ Plastic Strain ภายใต้สภาวะน้ำหนักที่ซ้ำไปซ้ำมา

Jim Porter (1929) ได้เสนอแนวความคิดที่จะใช้การกดรับน้ำหนักของดินเป็นค่าดัชนีที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนนเป็นครั้งแรก

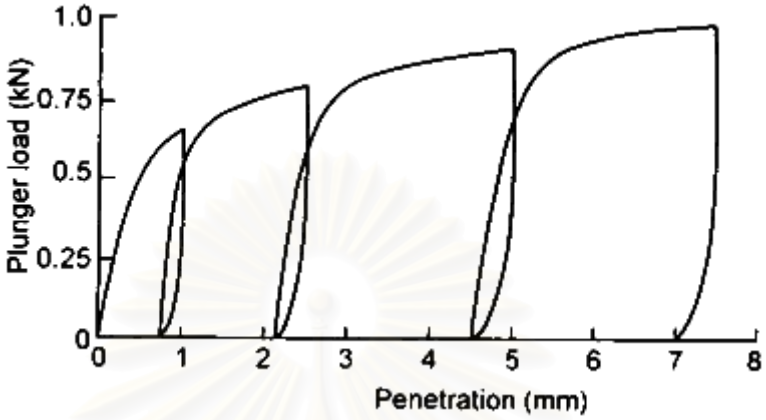
สำหรับในประเทศอังกฤษนั้นได้ทำการศึกษาต่อเนื่องเรื่อยมา โดยสรุปได้ว่าค่า CBR ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน และ อิทธิพลของความชื้นในดิน ซึ่งตัวแปรทั้ง 2 นั้น Croney (1977) ให้แนวคิดไว้ว่า “ค่ากำลังรับแรงเฉือนในดินนั้นไม่เป็นที่สนใจในงานวิศวกรรมการทาง และพฤติกรรมความเค้นของดินนั้นจะอยู่ในช่วงอิลาสติก โดยที่วิศวกรควรจะให้ความสำคัญกับค่าโมดูลัสอิลาสติกและพฤติกรรมภายใต้การให้น้ำหนักซ้ำไปซ้ำมา”

Hight และ Stevens (1982) กล่าวไว้ว่า “ในโครงสร้างทางนั้นเราไม่สามารถที่จะทราบค่าของความเค้นประสิทธิผลได้เลยพร้อมทั้งไม่สามารถควบคุมการระบายน้ำได้อีกด้วย” และสรุปไว้ว่าไม่สามารถระบุ Stiffness ของดินที่ความเครียดน้อย ๆ ได้

สถาบัน Nottingham Loach (1987) ได้นำเสนอผลการทดสอบการให้น้ำหนักซ้ำไปซ้ำมาของการทดสอบ CBR ในดินตัวอย่างที่บรรจุใหม่ที่ทราบค่าความเค้นประสิทธิ์ผลและประวัติศาสตร์ความเค้นของดิน ผลทดสอบที่ได้นั้นตามภาพที่ 2.8 พบว่าความชันในช่วงต้นของ Load – Penetration Curve กับการทดสอบ CBR นั้นไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับ ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ได้

ซึ่งยังมีอีกหลายแนวความคิดในการออกแบบโครงสร้างถนน ที่จะต้องคงพัฒนาต่อไปในอนาคตโดยขึ้นอยู่กับการพัฒนาแบบจำลองในเชิงวิเคราะห์ต่อไป โดยจะมุ่งเน้นที่ว่าดินใน

ชั้นโครงสร้างของถนนนั้น มีความสัมพันธ์ที่มิใช่เชิงเส้น และดินนั้นเป็นวัสดุในลักษณะ Visco – Elastic Materials



ภาพที่ 2.8 การทดสอบ CBR แบบซ้ำไปซ้ำมาในดิน

2.1.9 การออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์

โดยทั่วไปสำหรับการออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์นั้นมีหลักการที่มุ่งเน้นในการคำนวณหาความเค้นวิกฤต (Critical Stresses) หรือ ความเครียด โดยอาศัยทฤษฎีบางส่วนจาก Theory of Elasticity โดยอาจจะกำหนดเงื่อนไขของน้ำหนักหรือสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน คุณสมบัติของวัสดุซึ่งความเสียหายที่ประเมินได้นั้นจะออกมาในรูปของความเค้นหรือความเครียด

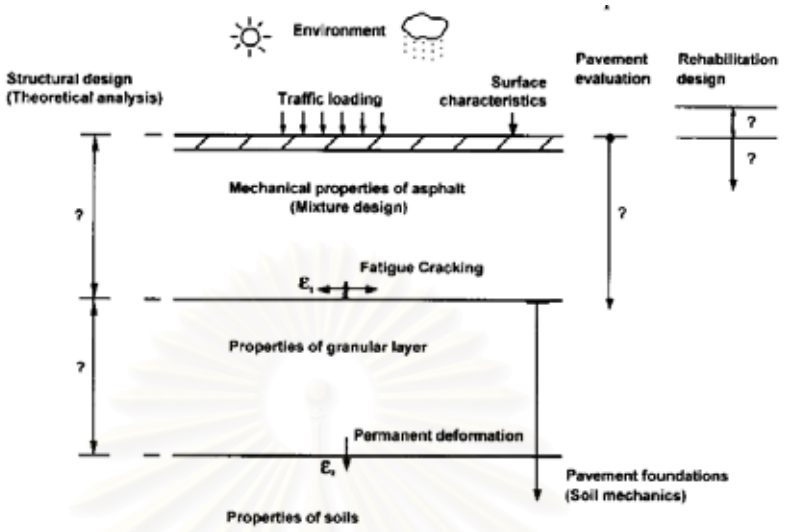
ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์จะพิจารณาจากหลายส่วนประกอบด้วยกัน ได้แก่ หลักการทางกลศาสตร์ของวัสดุ (Continuum Mechanics หรือ Solid Mechanics) สภาพแวดล้อม พร้อมทั้งงบประมาณของการก่อสร้างถนนของแต่ละเส้นทาง ดังแสดงในภาพที่ 2.9 – 2.10 ซึ่งถ้ากล่าวถึงทางด้านวิศวกรรมแต่เพียงอย่างเดียวจะใช้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. สภาพสมดุลสถิตย์ (Static Equilibrium)

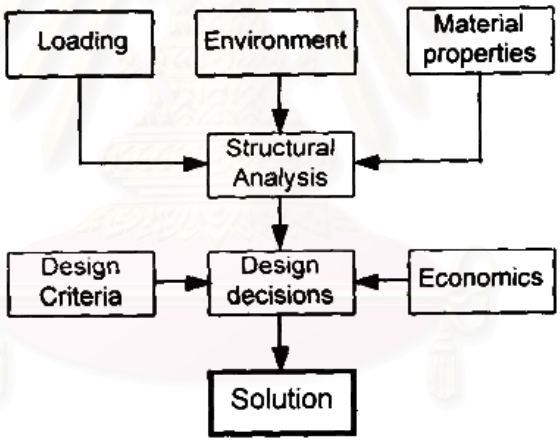
2. ความเข้ากันได้ (Compatibility or Continuity)

3. กฎของฮุค (Hooke's Law)

จากสมมุติฐานที่กล่าวข้างต้นนี้สามารถเขียนออกมาได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสี่ ซึ่งการการหาผลเฉลยของสมการดังกล่าวนั้นจะต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) พร้อมทั้งทราบเงื่อนไขขอบเขตเพื่อใช้ในการหาคำตอบ



ภาพที่ 2.9 สภาวะโดยทั่วไปของโครงสร้างถนน



ภาพที่ 2.10 กระบวนการของการออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์

เนื่องสมมุติฐานตามที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้นไม่สอดคล้องกับกับสภาวะที่เป็นจริงของถนนที่มีพื้นผิวยืดหยุ่น (Flexible Pavement) เนื่องจาก

1.น้ำหนักที่มากระทำนั้นโดยส่วนใหญ่จะมาในลักษณะพลวัต (Dynamics)

2.วัสดุในชั้นทางไม่ใช่วัสดุที่แข็ง (Solid) โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นวัสดุ Granular

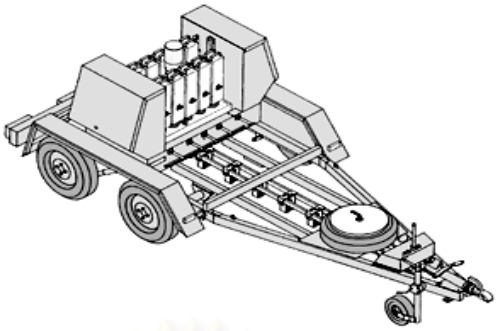
3.การยืดหดนั้นไม่ได้มีพฤติกรรมเฉพาะอีลาสติกแต่มีพฤติกรรมของพลาสติกด้วย วัสดุมีพฤติกรรมในลักษณะ Visco - Elastic และ ความเครียดนั้น จะมีลักษณะที่ไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Non – linear function) และวัสดุมีลักษณะที่เป็นวัสดุ Non - homogeneous และ Anisotropic

ซึ่งในบางสมมุติฐานนั้นถูกทำให้สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) เช่น การกำหนดให้ความกว้างของชั้นทางมีค่าที่ไม่สิ้นสุด หรือ กำหนดว่าการกระจายน้ำหนักที่มากระทำนั้นในลักษณะที่เป็นวงกลมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ไม่ถูกต้องเนื่องจากสภาวะที่เกิดขึ้นจริงนั้นแตกต่างกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ทำให้มีการคิดค้นและพัฒนาแบบจำลองต่าง ๆ ขึ้นมา

สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คิดค้นขึ้นมาสำหรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์นั้นมีอยู่หลายโปรแกรมด้วยกัน บางโปรแกรมนั้นยึดหลักการพื้นฐานของ Layered Elastic Theory (LET) รวมไปถึงการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุแบบ Visco – Elastic และ Anisotropic ซึ่งวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์นั้นสามารถทำให้พิจารณาพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของวัสดุ น้ำหนักที่มากระทำแบบพลวัต และ Yield Criteria ที่แตกต่างกัน แต่สำหรับการพิจารณารูปแบบของวัสดุนั้นยังคงพิจารณาให้เป็นในลักษณะของแข็งเช่นเดิม ซึ่งในสภาพเป็นจริงชั้นทางมีลักษณะเป็น Granular Materials มิใช่เป็นของแข็งตลอดทั้งชั้นโครงสร้างทาง

จากสมมุติฐานดังกล่าวนั้นทำให้แบบจำลองต่าง ๆ นั้นจะใกล้เคียงความเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อความเค้นและความเครียดที่พิจารณามีค่าใกล้เคียงค่าที่เกิดขึ้นจริงในถนน ซึ่งมีหนทางเดียวที่จะทราบได้ว่าแบบจำลองนั้นสามารถเปรียบเทียบหรือทำนายได้อย่างถูกต้องแม่นยำได้นั้นจะต้องทำการวัดผลที่เกิดขึ้นสนามด้วย

โดยทั่วไปการทดสอบแรงอัดสามแกนนั้นอาจจะใช้กับทุกวัสดุ ๆ แต่ไม่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่ก่อสร้างในชั้นโครงสร้างทาง โดยที่วัสดุในชั้นโครงสร้างทาง ดังเช่น Bitumen หรือ Cement การทดสอบโดยวิธี Bending Test หรือ Indirect Tensile Test จะเหมาะสมมากกว่าสำหรับการหาค่าของโมดูลัสซึ่งจะคล้ายคลึงการับน้ำหนักจริงของถนนโดยค่าโมดูลัสนั้นจะเรียกว่าค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) และการทดสอบในสนามที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันคือการทดสอบโดยเครื่องมือการตกกระทบของน้ำหนัก (Falling Weight Deflectometer) ดังแสดงในภาพที่ 2.11 – 2.12



ภาพที่ 2.11 เครื่องมือการตกกระทบของน้ำหนัก (Falling Weight Deflectometer)

ภาพที่ 2.12 การใช้งานเครื่องมือการตกกระทบของน้ำหนักในสนาม

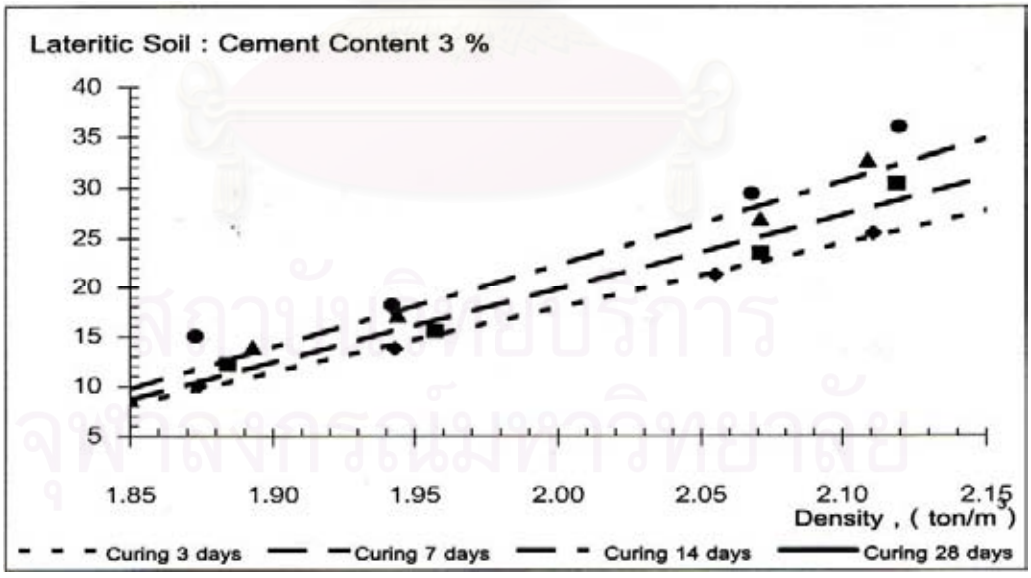
สำหรับในประเทศไทยนั้นการออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์ยังเป็นแนวความคิดใหม่ที่จะนำมาออกแบบถนนในประเทศไทย ซึ่งปัจจุบันการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในแบบจำลองต่าง ๆ นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง ประกอบด้วยข้อมูลในการวิเคราะห์และพัฒนานั้นยังมีอยู่ค่อนข้างที่จะน้อย ทำให้มีข้อจำกัดในการออกแบบอยู่มาก ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงแก้ไขกันต่อไปในอนาคต

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย

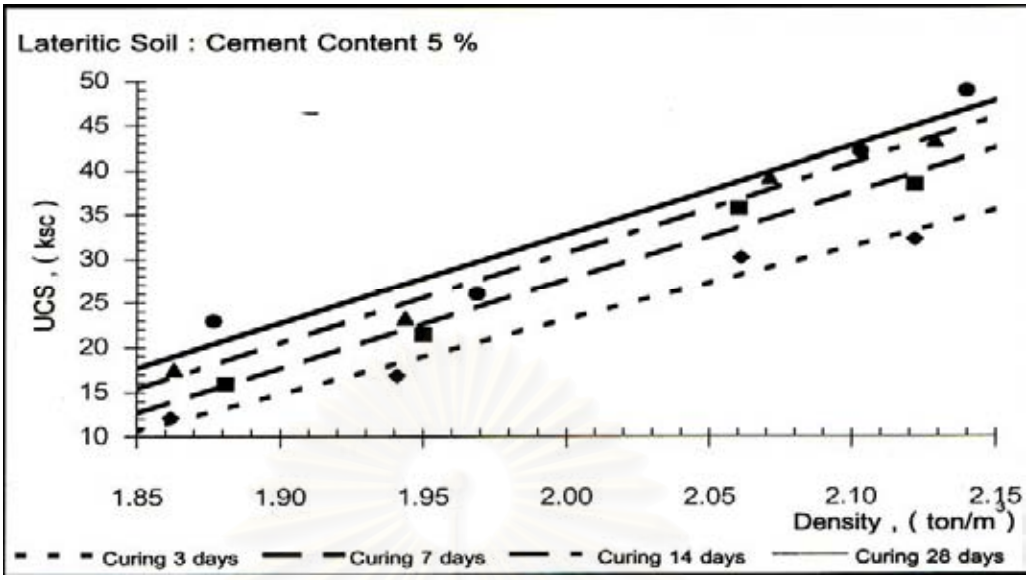
พฤติกรรมและคุณสมบัติของดินซีเมนต์ในทางวิศวกรรมนั้นมีการศึกษาและวิจัยกันมาพอสมควร ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยเกิดจากที่ดินที่ใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างนั้นมีปัญหาไม่ได้คุณภาพดีพอ ทำให้จำเป็นที่จะต้องมีการขนส่งวัสดุจากแหล่งวัสดุที่ไกลออกไปเข้ามา ซึ่งทำให้ราคาของค่าก่อสร้างนั้นสูงขึ้นมาก จึงมีการนำดินผสมซีเมนต์เข้ามาใช้งานแทนเพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยงานวิจัยที่เกิดขึ้นได้มี

การศึกษาถึงคุณสมบัติของดินซีเมนต์เป็นหลักพร้อมทั้งพฤติกรรมของดินซีเมนต์เมื่อได้รับแรงต่าง ๆ สำหรับปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์นั้นสามารถกล่าวได้เป็นหลัก ๆ ได้ 3 ส่วน คือ คุณสมบัติของดินในธรรมชาติ ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นในการบดอัด และปริมาณและคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ใช้ผสม

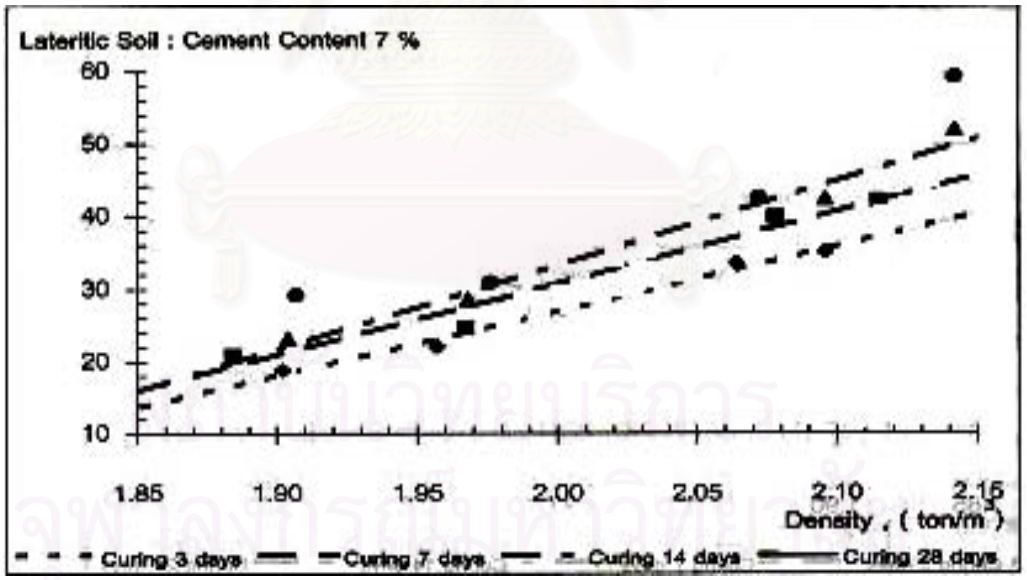
คุณสมบัติของดินในธรรมชาติเป็นสิ่งที่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากสภาพแวดล้อม สภาวะอากาศ ตลอดจนสภาพภูมิประเทศ จะมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนำซีเมนต์มาผสมกับน้ำจะส่งผลไปถึงการรับแรงและความคงทนของดินซีเมนต์ ซึ่งคุณสมบัตินี้จะรวมไปถึงทั้งกายภาพและทางเคมีของดิน สำหรับความหนาแน่นในการบดอัดที่มีผลต่อคุณภาพของดินซีเมนต์นั้นได้มีการศึกษาหาค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) ของดินซีเมนต์ภายใต้ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน (ธีระชาติ และ สมบัติกระแส, 2544) โดยใช้ตัวอย่างดินสำหรับการศึกษานั้นจากภาคตะวันเฉียงเหนือจำนวน 2 ชนิด คือ ดินลูกรัง และ ดินทรายปนดินตะกอน ตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 3, 5 และ 7 จากการศึกษาพบว่าดินลูกรังและดินทรายปนดินตะกอนจะมีค่า q_u เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นแห้งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และความหนาแน่นแห้งนั้นมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรง (ดังภาพที่ 2.13 ถึง ภาพที่ 2.18)



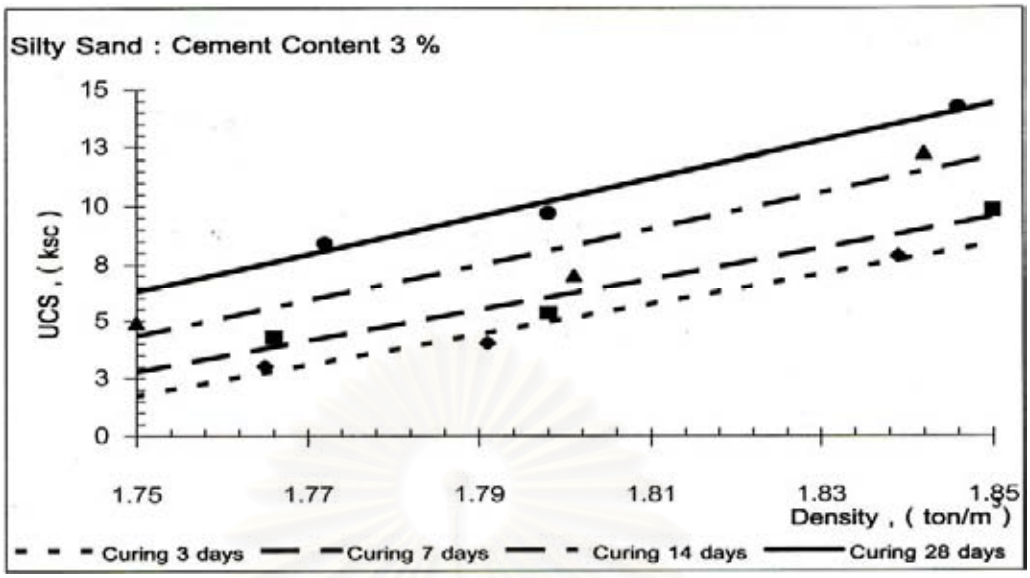
ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ ความหนาแน่นแห้ง ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 (ธีระชาติ และ สมบัติกระแส, 2544)



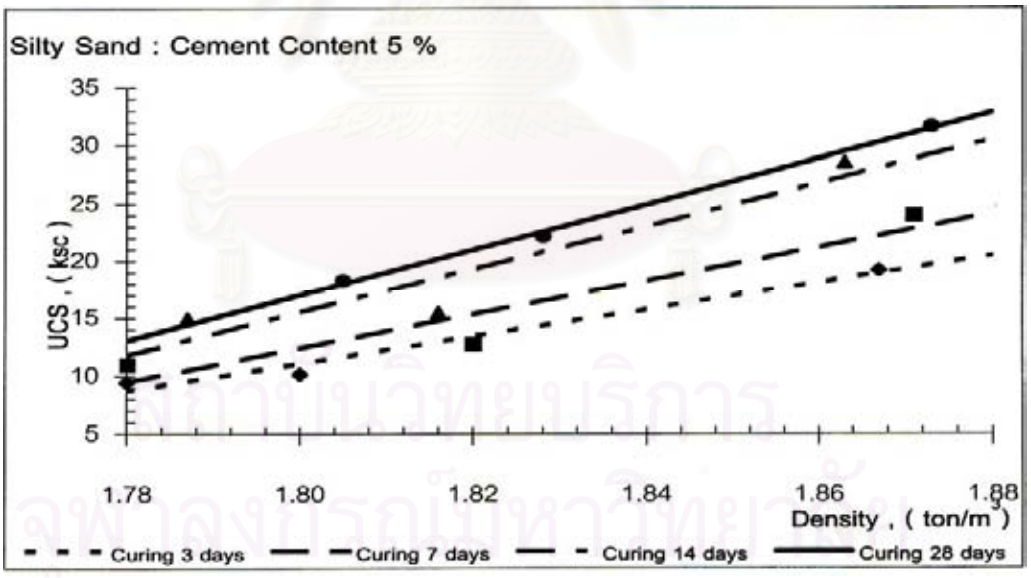
ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ ความหนาแน่นแห้ง ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 (ธีระชาติ และ สมบัติกระแส, 2544)



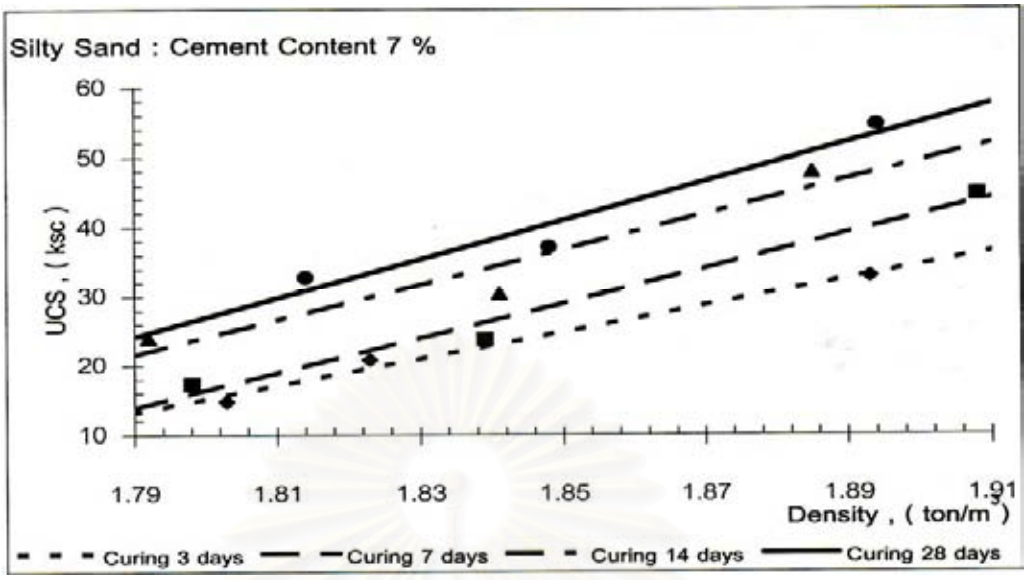
ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ ความหนาแน่นแห้ง ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 7 (ธีระชาติ และ สมบัติกระแส, 2544)



ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ ความหนาแน่นแห้ง ของดินทรายผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 (ธีระชาติ และ สมบัติกระแส, 2544)

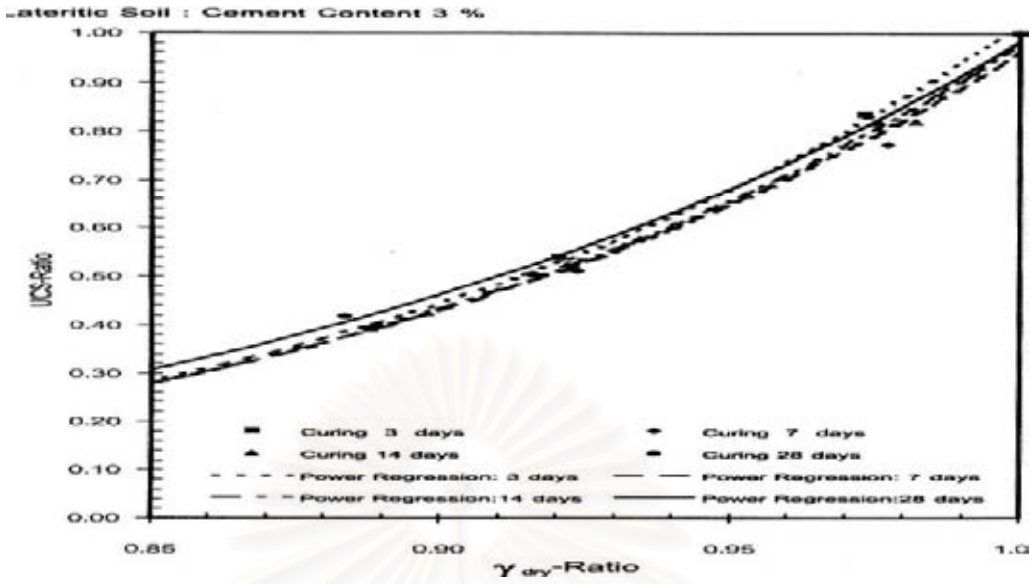


ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ ความหนาแน่นแห้ง ของดินทรายผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 (ธีระชาติ และ สมบัติกระแส, 2544)



ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ ความหนาแน่นแห้ง ของดินทรายผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 7 (ธีระชาติ และ สมบัติกระแส, 2544)

จากการศึกษาพบว่า อิทธิพลของการลดลงของความหนาแน่นมีผลต่อค่า q_u ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาแน่นและอัตราส่วนค่า q_u ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีแนวโน้มเป็นเลขยกกำลัง ในตัวอย่างดินลูกรังพบว่าการลดลงของอัตราส่วนความหนาแน่นเพียงร้อยละ 5 ทำให้อัตราส่วนของค่า q_u ลดลงถึงร้อยละ 30 และในตัวอย่างดินทรายปนดินตะกอนให้ผลในลักษณะเดียวกัน การลดลงของอัตราส่วนความหนาแน่นทำให้อัตราส่วนของค่า q_u ลดลงถึงร้อยละ 55 ที่เป็นอย่างนี้อาจเป็นเพราะ ขนาดคละของดินลูกรังดีกว่าดินทรายปนดินตะกอนมาก ทำให้การลดลงของอัตราส่วนความหนาแน่นมีผลต่อค่า q_u ของดินลูกรังน้อยกว่าดินทราย ดังนั้นในการก่อสร้างชั้นทางดินซีเมนต์ จึงควรเลือกวัสดุที่มีขนาดคละดีผลทางด้านกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของการบดัดในสนามซึ่งการวิเคราะห์ผลของการทดสอบหาค่า q_u ของวัสดุภายใต้แต่ละรูปแบบการบดอัด ดังภาพที่ 2.19 ถึง ภาพที่ 2.24

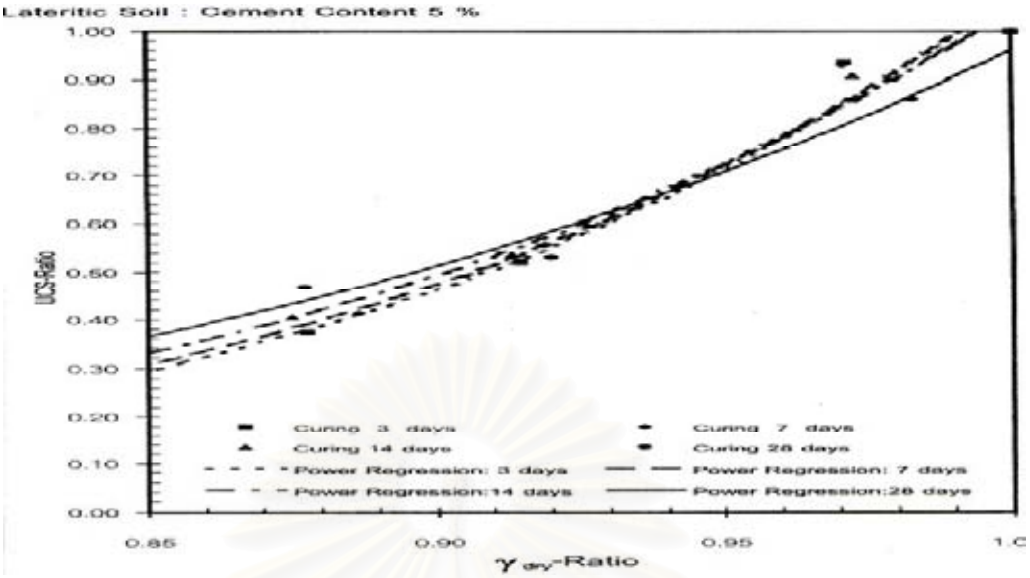


ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความหนาแน่นและอัตราส่วนของค่า q_u ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ตามอายุการบ่มต่าง ๆ ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 3

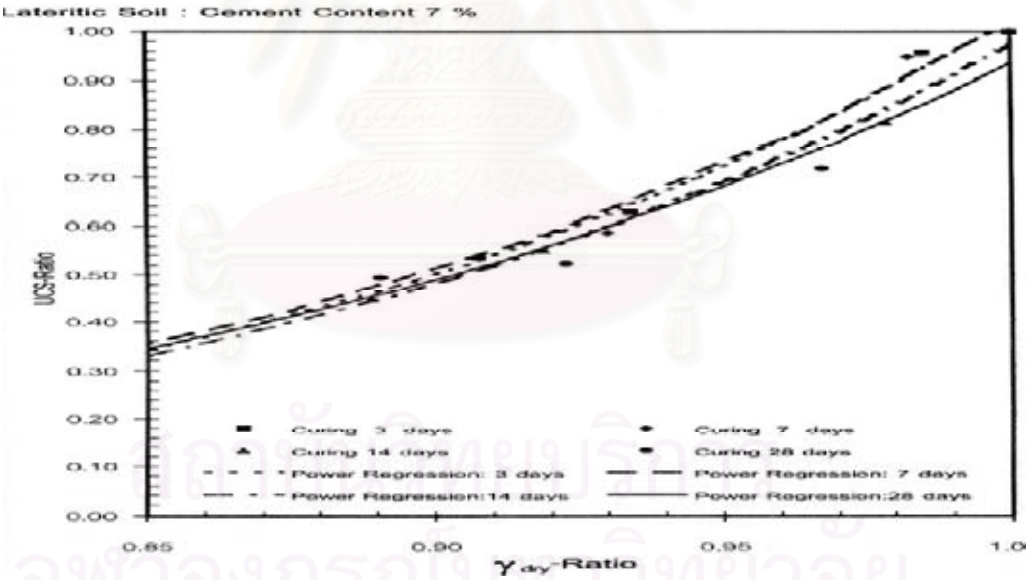
2.2.1 ดินลูกรัง (Lateritic Soil)

จากการบดอัดดินลูกรังเพื่อทดสอบหาค่า UCS และค่า Elastic Modulus ที่ 50% Strain (E_{50}) ของดินลูกรังได้แสดงในตารางที่ 2.3 จากการทดสอบพบว่า เมื่อพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้นจะมีอิทธิพลทำให้ความหนาแน่น, q_u และ E_{50} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน (25 ครั้ง/ชั้น) จะมีค่า q_u และ E_{50} มากกว่าการบดอัดแบบ 1/2 มาตรฐาน (13 ครั้ง/ชั้น) อยู่ 15.17 เท่า และ 13.38 เท่า ตามลำดับ การบดอัดแบบ 1/2 สูงกว่ามาตรฐาน

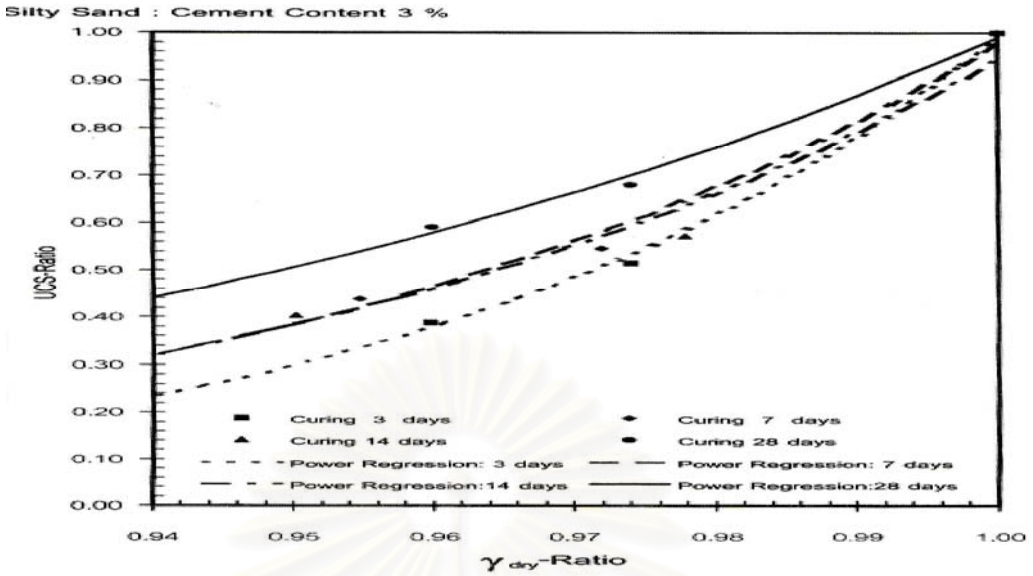
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



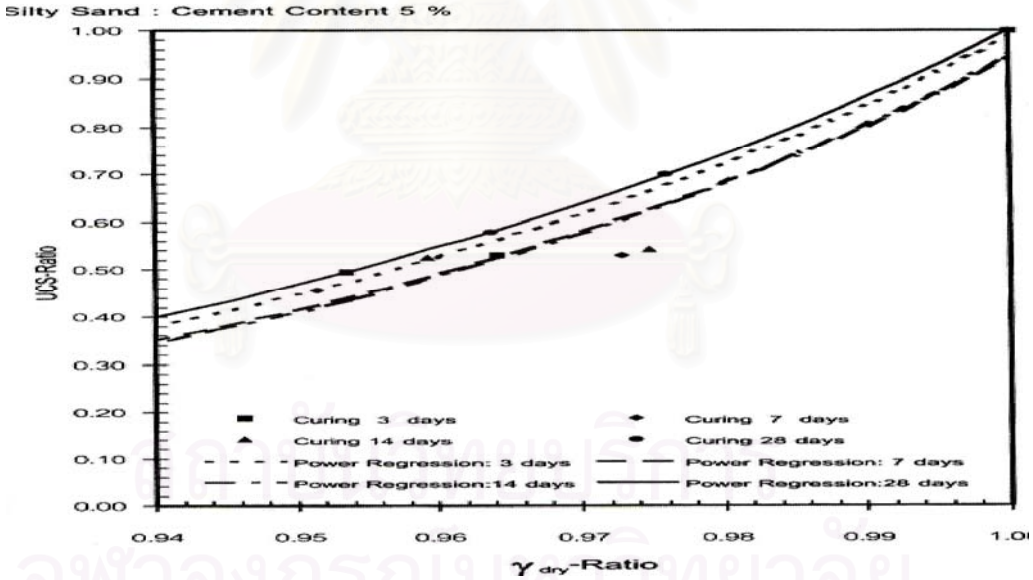
ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความหนาแน่นและอัตราส่วนของค่า q_u ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ตามอายุการบ่มต่าง ๆ ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 5



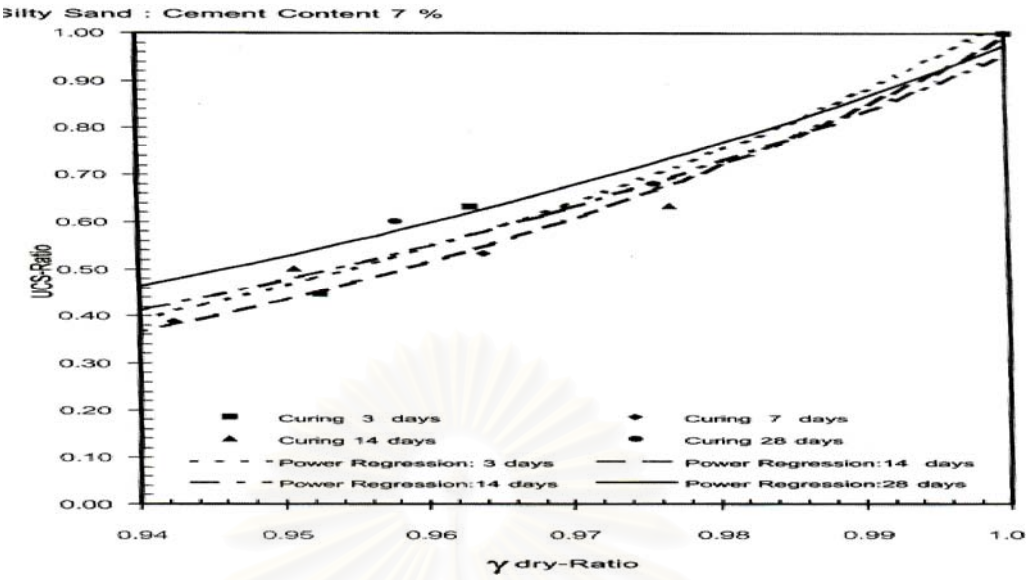
ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความหนาแน่นและอัตราส่วนของค่า q_u ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ตามอายุการบ่มต่าง ๆ ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 7



ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความหนาแน่นและอัตราส่วนของค่า q_u ของดินลูกทรายผสมซีเมนต์ ตามอายุการบ่มต่าง ๆ ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 3



ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความหนาแน่นและอัตราส่วนของค่า q_u ของดินลูกทรายผสมซีเมนต์ ตามอายุการบ่มต่าง ๆ ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 5



ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความหนาแน่นและอัตราส่วนของค่า q_u ของดินลูกทรายผสมซีเมนต์ ตามอายุการบ่มต่าง ๆ ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 7

(13 ครั้ง/ชั้น) จะมีค่า UCS และ E_{50} มากกว่าการบดอัดแบบ 1/2 มาตรฐาน (13 ครั้ง/ชั้น) อยู่ 8.71 เท่า และ 6.69 เท่าตามลำดับ การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน (25 ครั้ง/ชั้น) จะมีค่า q_u และ E_{50} มากกว่าการบดอัดแบบ 1/2 มาตรฐาน (13 ครั้ง/ชั้น) อยู่ 1.73 เท่า และ 2.11 เท่าตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ผลทดสอบค่า Unconfined Compressive Strength และ E_{50} ของดินลูกรังบดอัด

คุณสมบัติของดินลูกรังบดอัด	แบบสูงกว่ามาตรฐาน		แบบมาตรฐาน	
	25ครั้ง/ชั้น	13ครั้ง/ชั้น	25ครั้ง/ชั้น	13ครั้ง/ชั้น
Maximum Dry Density, (t/m^3)	2.13	2.06	1.97	1.91
Optimum Moisture Content, %	8.7	9.8	11.5	13.5
Unconfined Compressive Strength, (ksc)	14.07	8.07	2.66	0.927
Elastic Modulus at 50% Strain E_{50}, (ksc)	1311	634	200	94.8

2.2.2 ดินทรายปนดินตะกอน (Silty Sand)

จากการบดอัดดินทรายปนดินตะกอนเพื่อทดสอบหาค่า q_u และค่า Elastic Modulus ที่ 50% Strain (E_{50}) ของดินทรายปนตะกอนได้แสดงในตารางที่ 2.4 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อพลังงานบดอักเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่น, q_u และ E_{50} มีแนวโน้มค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (25ครั้ง/ชั้น) จะมีค่า q_u และ E_{50} มากกว่าการบดอัดแบบ 1/2 มาตรฐาน (13ครั้ง/ชั้น) อยู่ 1.29 เท่า และ 1.44 เท่าตามลำดับ การบดอัดแบบ 1/2

สูงกว่ามาตรฐาน (13ครั้ง/ชั้น) จะมีค่า q_u และ E_{50} มากกว่าการบดอัดแบบ 1/2 มาตรฐาน (13ครั้ง/ชั้น) อยู่ 1.09 เท่า และ 1.34 เท่าตามลำดับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (25ครั้ง/ชั้น) จะมีค่า q_u และ E_{50} มากกว่าการบดอัดแบบ 1/2 มาตรฐาน (13ครั้ง/ชั้น) อยู่ 1.10 เท่า และ 1.19 เท่าตามลำดับ จากผลข้างบนแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า q_u และ E_{50} ของดินทรายปนตะกอนดินเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับดินลูกรัง ทั้งนี้เนื่องจากดินทรายปนดินตะกอนเป็นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless) แรงเฉือนของดินทรายปนดินตะกอนบดอัดจึงได้มาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน คือแรงตึงผิวของน้ำที่อยู่ระหว่างเม็ดดินซึ่งเป็นแรงที่มีค่าน้อย นอกจากนี้ผลต่างของความหนาแน่นของในแต่ละรูปแบบการบดอัดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นแรงเฉือนที่เกิดจาการ Interlocking ระหว่างเม็ดดินจึงมีค่าไม่แตกต่างกันส่งผลให้ค่า q_u ที่ได้จากรูปแบบการบดอัดในแต่ละแบบมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

ทางด้านอิทธิพลของปริมาณและชนิดของซีเมนต์ที่ใช้นั้น เนื่องจากในการศึกษาโดยทั่วไปนั้นจะใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งใช้งานได้ง่ายและราคาถูกจึงเหมาะสมกับการใช้งานก่อสร้าง เคยมีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อค่า q_u (วินัย, 2540) จากดินเหนียวสองแหล่ง คือ ดินเหนียวกรุงเทพมหานคร และ ดินเหนียวจันทบุรี

ตารางที่ 2.4 ผลทดสอบค่า Unconfined Compressive Strength และ E_{50} ของดินทรายปนดินตะกอนบดอัด

คุณสมบัติของดินลูกรังบดอัด	แบบสูงกว่ามาตรฐาน		แบบมาตรฐาน	
	25ครั้ง/ชั้น	13ครั้ง/ชั้น	25ครั้ง/ชั้น	13ครั้ง/ชั้น
Maximum Dry Density, (t/m^3)	1.80	1.76	1.76	1.71
Optimum Moisture Content, %	10.7	12.5	12.5	12.9
Unconfined Compressive Strength, (ksc)	0.407	0.362	0.354	0.315
Elastic Modulus at 50% Strain E_{50}, (ksc)	23.04	21.03	19.08	16.04

2.2.3 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีต่อค่า q_u ของดินเหนียวกรุงเทพ

โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 5, 7, 9, 11, 13 ของน้ำหนักดินแห้ง และได้ทดสอบหาค่า q_u ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยทำการบดอัดดินตัวอย่างทั้งแบบมาตรฐาน และสูงกว่ามาตรฐาน

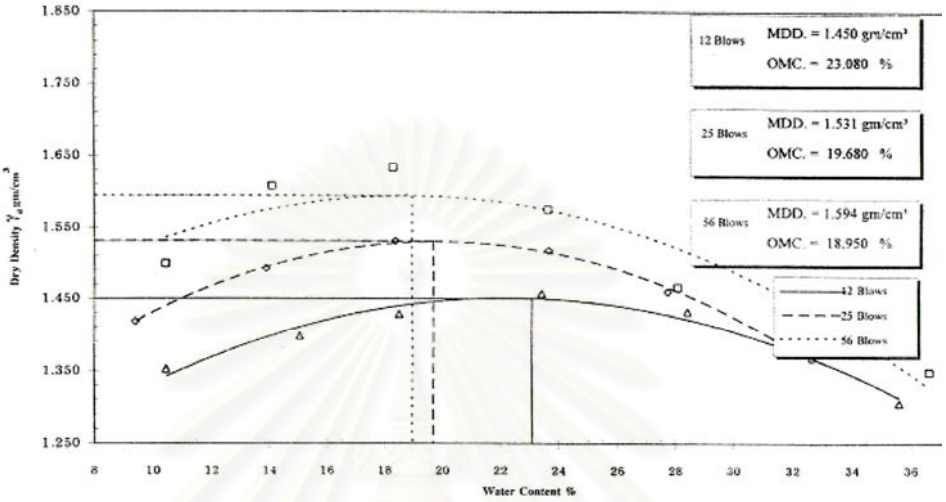
ค่า q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ และอายุการบ่มต่าง ๆ ได้แสดงในตาราง 2.5 และ 2.6 ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบผลค่า q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่ปริมาณ

ซีเมนต์ต่าง ๆ กับดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ค่าของ q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์มีค่าสูงกว่าดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 1.5, 1.99, 2.38, 2.44 และ 2.49 เท่าสำหรับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ 1.14, 1.63, 2.03, 2.18, 2.36 เท่าสำหรับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าทุก ๆ ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า q_u มีค่าสูงกว่าดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์ ทั้งนี้เพราะเมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน ผลของปฏิกิริยาได้สารประกอบ CSH และ CAH ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมยึดประสานระหว่างเม็ดดินเหนียวเข้าด้วยกัน ทำให้มีความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ทำให้ปริมาณของสารประกอบประเภท CSH และ CAH มากยิ่งขึ้นตามไปด้วย ส่วนผลที่อายุอื่น ๆ ก็มีผลในแนวทางเดียวกัน ภาพที่ 2.25 และ ภาพที่ 2.26

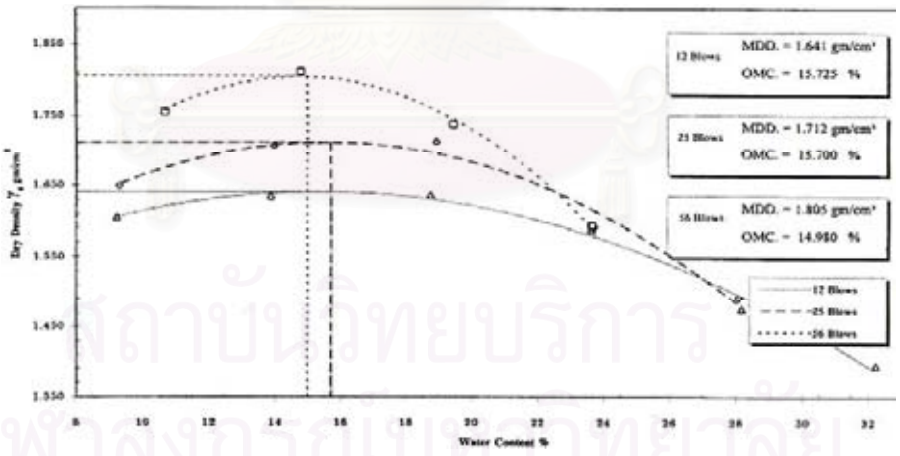
2.2.4 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีต่อค่า q_u ของดินเหนียวจันทบุรี

โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 5, 7, 9, 11, 13 ของน้ำหนักดินแห้ง และได้ทดสอบหาค่า q_u ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยทำการบดอัดดินตัวอย่างทั้งแบบมาตรฐาน และสูงกว่ามาตรฐานค่า q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ และอายุการบ่มต่าง ๆ ได้แสดงในตาราง 2.7 และ 2.8 ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบผลค่า q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ กับดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ค่าของ q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์มีค่าสูงกว่าดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 1.24, 1.47, 1.63, 1.71 และ 1.90 เท่าสำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ 1.73, 1.55, 1.88, 2.10 และ 2.38 เท่าสำหรับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าทุก ๆ ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า q_u มีค่าสูงกว่าดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์ แต่การเพิ่มขึ้นของค่า q_u ของดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์ แต่การเพิ่มขึ้นของค่า q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ทุก ๆ ปริมาณซีเมนต์ของการบดอัดแบบมาตรฐานมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่ไม่ผสมกับซีเมนต์ แต่สำหรับค่า q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน มีแนวโน้มที่เด่นชัดดีกว่าในระดับปริมาณช่วงซีเมนต์เดียวกัน ซึ่งอาจจะสันนิษฐานได้ว่าพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า q_u มีค่าเพิ่มขึ้นจริงเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นกับดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ที่ได้กล่าวไปตอนต้น และ การเพิ่มขึ้นของค่า q_u ที่ดินเหนียวผสมซีเมนต์เพราะว่าเมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำทำให้ปฏิกิริยาระหว่างกัน ผลของปฏิกิริยาได้สารประกอบ CSH และ CAH ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมยึดประสานระหว่างเม็ดดินเหนียวเข้าด้วยกัน ทำให้มีความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ทำให้ปริมาณของสารประกอบ

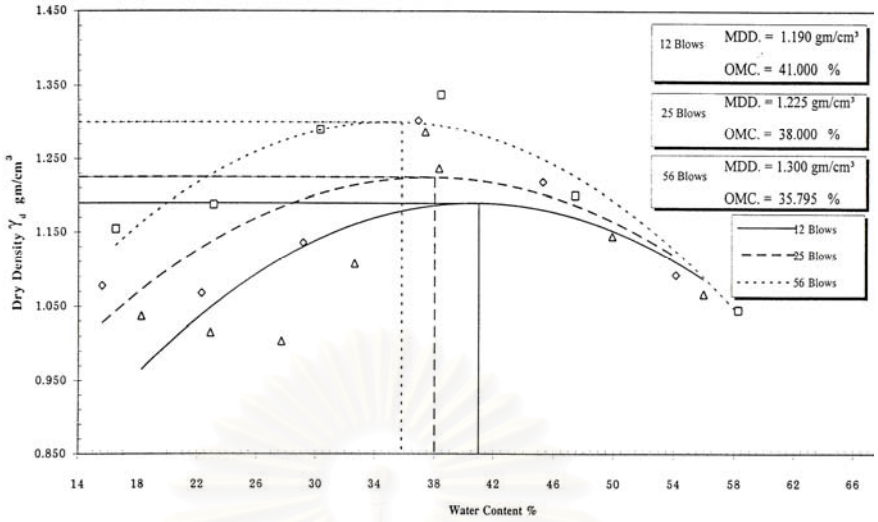
ประเภท CSH และ CAH มากยิ่งขึ้นตามไปด้วย ส่วนผลที่อายุอื่น ๆ ก็มีผลในแนวทางเดียวกันและยังมีผลคล้ายคลึงกับดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์อีกด้วย ดังภาพที่ 2.27 และ ภาพที่ 2.28



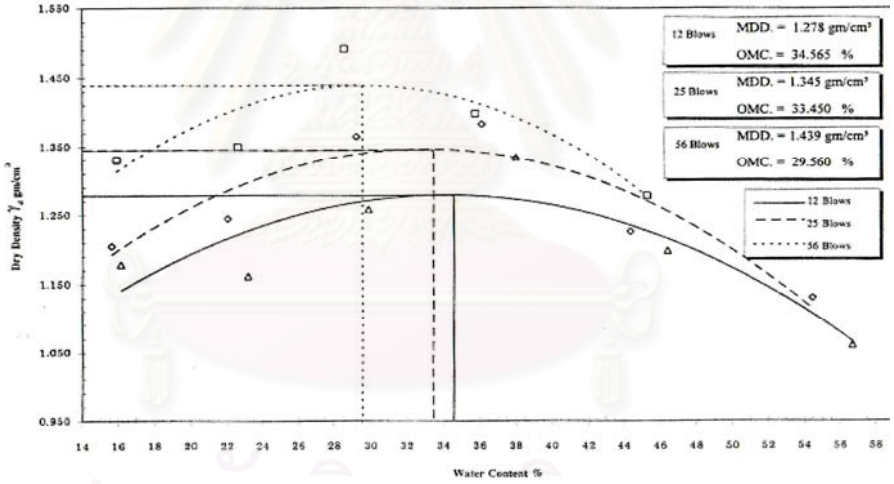
ภาพที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินกรุงเทพลักษณะบดอัดแบบมาตรฐาน



ภาพที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินกรุงเทพลักษณะบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน



ภาพที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินจันทบุรี ลักษณะบดอัดแบบมาตรฐาน



ภาพที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินจันทบุรี ลักษณะบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 2.5 สรุปผลการทดสอบดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ด้วยการบดแบบมาตรฐาน

ปริมาณซีเมนต์ (%)	อายุ (วัน)	q_u (ksc)	E_{50} (ksc)	γ_d (t/m^3)	E_{50}/q_u	Unsoaked CBR (%)	Soaked CBR (%)	Swell (%)
0	0	4.28	178.21	1.52	41.67	14.43	1.44	5.27
5	3	6.41	415.58	1.46	64.87	23.78		
	7	6.22	471.21	1.52	75.75	59.85	22.14	1.32

	14	6.65	443.47	1.51	66.67	80.35		
	28	8.86	632.86	1.56	71.43	86.09		
7	3	8.50	559.21	1.54	65.80	40.80	32.96	1.07
	7	8.50	685.48	1.53	80.68	63.95		
	14	9.00	523.25	1.52	58.12	93.95		
	28	9.95	753.64	1.52	75.76	98.88		
9	3	10.18	925.45	1.53	90.90	44.28	44.60	0.58
	7	9.02	617.95	1.53	68.49	84.29		
	14	9.60	606.33	1.52	63.19	108.56		
	28	11.84	986.67	1.55	83.37	120.99		
11	3	10.44	677.92	1.56	64.95	55.43	52.97	0.78
	7	10.63	749.43	1.56	70.49	93.14		
	14	12.42	765.43	1.58	61.65	122.17		
	28	15.36	1259.02	1.58	81.97	130.86		
13	3	10.64	858.06	1.55	80.64	61.00	71.74	0.46
	7	12.43	1071.21	1.58	86.21	97.24		
	14	16.85	1253.59	1.60	74.41	134.47		
	28	18.58	1498.65	1.59	80.86	146.76		

ตารางที่ 2.6 สรุปผลการทดสอบดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ด้วยการบดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ปริมาณซีเมนต์ (%)	**อายุ (วัน)**	q_u (ksc)	E_{50} (ksc)	γ_d (t/m^3)	E_{50}/q_u	Unsoaked CBR (%)	Soaked CBR (%)	Swell (%)
0	0	11.55	525.45	1.62	45.48	33.62	2.46	5.57
5	3	13.16	614.86	1.67	46.73	65.92	33.21	2.51
	7	17.08	928.26	1.70	54.35	89.04		
	14	18.63	1293.75	1.70	69.44	104.13		
	28	23.04	1355.41	1.74	58.82	120.04		
7	3	18.77	1091.27	1.75	58.14	69.69	47.97	1.78
	7	21.22	1453.56	1.73	68.50	107.41		
	14	23.65	1713.48	1.75	72.46	129.22		
	28	24.45	1509.38	1.73	61.73	154.96		
9	3	23.39	1458.75	1.77	62.36	86.75	89.37	0.87
	7	25.87	1596.67	1.79	61.73	126.43		
	14	27.54	1860.95	1.78	67.57	155.46		
	28	27.16	2026.87	1.79	74.63	163.41		
11	3	25.16	1771.55	1.76	70.43	102.08	109.21	0.88
	7	27.73	2166.56	1.79	78.12	143.98		
	14	28.16	1928.90	1.75	68.50	149.22		
	28	28.52	1550.22	1.76	54.35	186.37		

13	3	27.28	1921.13	1.79	70.42	122.33	130.20	0.49
	7	29.49	2106.57	1.78	71.43	158.57		
	14	31.94	2707.12	1.78	84.75	186.61		
	28	31.93	1995.75	1.78	62.50	201.37		

ตารางที่ 2.7 สรุปผลการทดสอบดินเหนียวจันทบุรีผสมซีเมนต์ด้วยการบดแบบมาตรฐาน

ปริมาณซีเมนต์ (%)	อายุ (วัน)	q_u (ksc)	E_{50} (ksc)	γ_d (t/m^3)	E_{50}/q_u	Unsoaked CBR (%)	Soaked CBR (%)	Swell (%)
0	0	2.04	65.74	1.22	32.26	6.15	4.59	0.48
5	3	2.53	158.38	1.24	62.50	16.23	17.63	0.02
	7	2.69	172.56	1.27	64.08	17.55		
	14	2.79	199.57	1.27	71.43	21.56		
	28	3.03	194.23	1.26	64.12	25.83		
7	3	3.00	154.64	1.25	51.56	19.02	19.10	0.03
	7	3.04	190.25	1.27	62.50	21.97		
	14	3.33	256.15	1.27	76.92	28.70		
	28	3.73	266.36	1.26	71.43	28.37		
9	3	3.32	202.19	1.28	60.97	18.69	17.87	0.03
	7	3.50	221.65	1.25	63.29	26.24		
	14	3.61	346.95	1.28	96.19	34.44		
	28	3.79	278.68	1.28	73.55	35.09		
11	3	3.48	212.26	1.27	60.98	20.66	21.97	0.02
	7	3.77	289.85	1.28	76.94	27.39		
	14	4.47	290.13	1.30	64.95	39.85		
	28	4.90	306.19	1.30	62.50	44.69		
13	3	3.87	193.30	1.31	50.00	25.91	25.66	0.02
	7	4.42	491.33	1.30	111.11	29.52		
	14	4.92	282.76	1.28	57.46	42.87		
	28	5.50	343.75	1.28	62.51	53.29		

ตารางที่ 2.8 สรุปผลการทดสอบดินเหนียวจันทบุรีผสมซีเมนต์ด้วยการบดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ปริมาณซีเมนต์ (%)	อายุ (วัน)	q_u (ksc)	E_{50} (ksc)	γ_d (t/m^3)	E_{50}/q_u	Unsoaked CBR (%)	Soaked CBR (%)	Swell (%)
0	0	5.10	157.57	1.33	30.88	17.38	15.33	0.60
5	3	8.84	513.72	1.41	58.15	28.53	28.94	0.03
	7	8.27	523.54	1.43	63.29	30.83		
	14	8.57	463.24	1.42	54.05	47.56		

	28	9.01	643.86	1.42	71.43	51.49		
7	3	7.90	526.40	1.45	66.67	27.22	32.31	0.03
	7	8.74	693.33	1.46	79.37	39.85		
	14	11.37	747.89	1.45	65.79	53.13		
	28	12.44	864.17	1.44	69.44	64.45		
9	3	9.59	760.79	1.44	79.37	33.70	31.73	0.02
	7	10.07	629.25	1.43	62.50	43.21		
	14	12.11	637.37	1.45	52.63	67.07		
	28	13.29	1186.79	1.45	89.29	69.69		
11	3	10.69	636.61	1.44	59.56	30.83	35.99	0.02
	7	13.34	1041.88	1.46	78.13	52.15		
	14	13.70	1086.98	1.45	79.37	74.28		
	28	14.37	958.13	1.43	66.67	80.43		
13	3	12.12	853.24	1.48	70.43	36.32	42.64	0.01
	7	12.80	984.62	1.47	76.92	59.53		
	14	16.00	1290.65	1.47	80.65	82.65		
	28	18.17	1465.48	1.47	80.64	84.54		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง

1 การทดสอบหาความชื้น (Soil Water Content)

- ตู้อบไฟฟ้าที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส
- เครื่องชั่ง อ่านละเอียด 0.01 กรัม สำหรับตัวอย่างไม่เกิน 100 กรัม อ่านละเอียด 0.1 กรัม สำหรับชั่งตัวอย่าง 100 – 1000 กรัม และอ่านละเอียด 1 กรัม สำหรับตัวอย่างที่หนักกว่า 1000 กรัม
- กระป๋องใส่ตัวอย่างดิน เป็นภาชนะรูปทรงกระบอก

2 การทดสอบหาพิกัดเหลว (Liquid Limit)

- เครื่องเคาะดิน (Liquid Limit Device) ประกอบด้วยกระทะทองเหลือง ฐานแบบยางแข็งหรือแบบไมกาต้า พร้อมด้วยลูกเบี้ยวและมือหมุนเคาะกระทะ
- มีดปาดร่องดิน (Grooving Tool) แบบคาสซาแกรนด์ (Cassagrande) หรือ แบบโค้ง (ASTM) มีแท่งวัด (Gauge) ระยะ 10 มม. ที่ปลายด้าม
- ถ้วยผสมดิน
- มีดปาดดิน (Spatula) ขนาด 10 ซม.

3 การทดสอบหาพิกัดพลาสติก (Plastic Limit)

- แผ่นกระจกขนาด 30 ซม. X 30 ซม. หนา 1 ซม. (3/8 นิ้ว)
- เพลาโลหะขนาด 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) ไว้เปรียบเทียบขนาดเส้นดินที่ปั้น

4 การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยตะแกรงร่อน (Sieve Analysis)

- กล่องแบ่งตัวอย่างดิน
- ถาดใส่ตัวอย่าง
- ชุดตะแกรงร่อนตามมาตรฐาน ASTM
- เครื่องเขย่าตะแกรง
- เครื่องชั่ง ขนาด 2 กก. อ่านละเอียด 0.1 กรัม

5 การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis)

- ไฮโดรมิเตอร์ ชนิดอ่านค่าความถ่วงจำเพาะจาก 0.995 ถึง 1.030
- เครื่องปั่นดิน
- ผงเคมี ใช้ Hexa-Metaphosphate
- กระบอกไฮโดรมิเตอร์ หรือ กระบอกตวง 1000 ซม^3 2 ใบ
- เทอร์โมมิเตอร์ 0-50 องศาเซลเซียส อ่านละเอียด 0.1-0.5 องศาเซลเซียส
- นาฬิกาจับเวลา
- น้ำกลั่น

6 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

- แบบหล่อดิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.586 นิ้ว พร้อมด้วยปลอก (Collar) ขนาดเดียวกัน และแผ่นฐาน (Base Plate) มีเสายึดแบบหล่อดินและปลอก
- ค้อนบดอัด ขนาด 5.5 ปอนด์ ระยะตก 12 นิ้ว และ ขนาด 10 ปอนด์ ระยะตก 18 นิ้ว
- เครื่องดันตัวอย่างดิน สามารถดันดินตัวอย่างบดอัดออกจากแบบหล่อดินขนาด 4 นิ้ว
- มีดปาดเส้นตรง ขนาด 30 ซม.
- ขวดบีบน้ำ ขนาดความจุ 500 ซม^3
- กระบอกตวง ขนาด 250-1000 ซม^3
- มือตักดิน
- ตาชั่งขนาด 20 กก. อ่านละเอียด 1 กรัม
- ตะแกรงขนาด 20 กก. อ่านละเอียด 1 กรัม
- ตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว และขนาดเบอร์ 4

3.12 ขั้นตอนการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด

- เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัดขนาดกำลังไม่ต่ำกว่า 2 ตัน

3.13 ขั้นตอนการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม

- เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัดขนาดกำลังไม่ต่ำกว่า 2 ตัน

3.14 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

- ตู้ทดสอบแบบ UTM ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

- ชุดเครื่องทดสอบการต้านทานแรงดึงทางอ้อม
- ตัวแปลงสัญญาณอ่านความเครียด (LVDT) อ่านละเอียด 10^{-6} นิ้ว

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของดินตัวอย่างก่อนปรับปรุงคุณภาพ

จะทำการทดสอบคุณสมบัติของดินโดยทางกายภาพพื้นฐานได้แก่ Soil Water Content, Atterberg's Limit, และ Soil Classification จากดินตัวอย่างในแต่ละภูมิภาคต่าง ๆ คือ ภาคกลาง และ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

3.2.2 การหาปริมาณความชื้นที่ใช้ผสมในการปรับปรุงคุณภาพดินตัวอย่าง

จะนำดินตัวอย่างจากในแต่ละภูมิภาคมาผสมกับซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 2, 3.5, 5 และ 6.5 ของน้ำหนักดินตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าความชื้นอิ่มตัวสูงสุดจากการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 3.1 แผนการทดสอบการหาปริมาณความชื้นที่ใช้ผสมโดยวิธีบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน

ตัวอย่างดินจากภูมิภาคต่าง ๆ	ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่ใช้ผสม	จำนวนชุดของการทดสอบ
ภาคกลาง	2.0	1
	3.5	1
	5.0	1
	6.5	1
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2.0	1
	3.5	1
	5.0	1
	6.5	1
		รวมจำนวนชุดทดสอบ 8 ชุด

3.2.3 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดแบบไม่กำจัด

จะทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด โดยจะนำดินจากสายทางจากภูมิภาคต่าง ๆ 3 ภูมิภาค คือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ผสมกับปริมาณของซีเมตรร้อยละ 2.0, 3.5, 5.0, 6.5 ของน้ำหนักดินตัวอย่างตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 แผนการทดสอบการหากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด

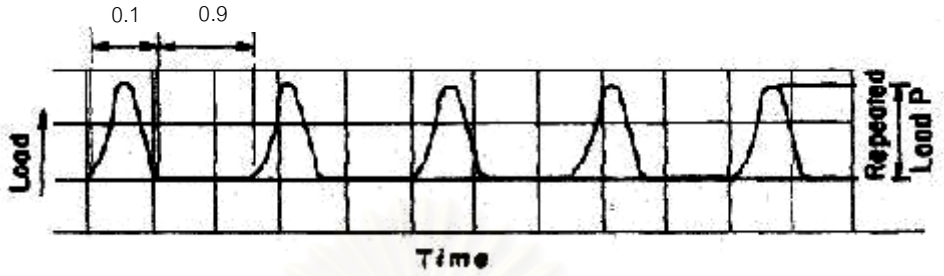
ตัวอย่างดินจากภูมิภาคต่าง ๆ	ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่ใช้ผสม	จำนวนตัวอย่างของระยะเวลาการบ่ม 7 วัน	จำนวนตัวอย่างของระยะเวลาการบ่ม 28 วัน
ภาคกลาง	2.0	3	3
	3.5	3	3
	5.0	3	3
	6.5	3	3
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2.0	3	3
	3.5	3	3
	5.0	3	3
	6.5	3	3

รวมจำนวนตัวอย่างทดสอบระยะการบ่ม 7 วัน 24 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าทดสอบงระยะการบ่ม 28 วัน 24 ตัวอย่าง

3.2.4 การหากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสคืนตัว

จะทดสอบด้วยเครื่องมือการทดสอบการต้านทานแรงดึงทางอ้อมดังภาพที่ 3.1 และ 3.2 โดยที่ทำการทดสอบการต้านทานแรงดึงทางอ้อมก่อนเพื่อที่จะใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวต่อไป เริ่มจากทำการกดน้ำหนักด้วยอัตราคงที่ หลังจากนั้นจะทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 4123 กำหนดให้มีค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการทดสอบจะกำหนดให้อุณหภูมิมาตรฐานอยู่ที่ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิปกติของพื้นผิวถนนประเทศไทย จากนั้นจะทำการกดน้ำหนักด้วยอัตราเร็ว 50 มม./นาที หรือ 2 นิ้ว/นาที จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย แล้วบันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด หลังจากนั้นจะทดสอบการให้น้ำหนักแบบวัฏจักร โดยใช้น้ำหนักร้อยละ 10 ของน้ำหนักการทดสอบจนพังทลาย ซึ่งจะให้อัตราการให้น้ำหนัก 1 Hz สัดส่วนช่วงเวลาน้ำหนัก (Load) ต่อช่วงเวลาปล่อยน้ำหนัก (Unload) เท่ากับ 1 ต่อ 9 โดยมีระยะเวลาการให้น้ำหนัก 0.1 วินาที รูปร่างของการกดน้ำหนักจะกำหนดให้เป็นรูป Haversine ดังภาพที่ 3.1 คือการรักษาค่า Preload ไว้ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อรักษาสภาพในการสัมผัสที่สม่ำเสมอระหว่างแท่งกดกับผิวก้อนตัวอย่าง จะทำการทดสอบต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) คงที่ หรือกระทำน้ำหนักซ้ำประมาณ 150 ครั้ง ซึ่งในมาตรฐานวิธีทดสอบ ASTM D 4123 กำหนดให้กระทำในช่วง 50-200 ครั้ง สำหรับตัวอย่าง ที่ทำการทดสอบนั้นจะใช้นั้น จะใช้ดินตัวอย่างจากภูมิภาคต่าง ๆ 2

ภูมิภาค คือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ผสมกับซีเมนต์และความชื้นในปริมาณร้อยละ 2.0, 3.5, 5.0 และ 6.5 ของน้ำหนักดินตัวอย่างดังตาราง 3.3 และ 3.4



ภาพที่ 3.1 ลักษณะของการให้น้ำหนักทดสอบการหาค่าโมดูลัสคืนตัว

ตารางที่ 3.3 แผนการทดสอบการกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

ตัวอย่างดินจากภูมิภาคต่าง ๆ	ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่ใช้ผสม	จำนวนตัวอย่างของระยะเวลาการบ่ม 7 วัน	จำนวนตัวอย่างของระยะเวลาการบ่ม 28 วัน
ภาคกลาง	2.0	3	3
	3.5	3	3
	5.0	3	3
	6.5	3	3
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2.0	3	3
	3.5	3	3
	5.0	3	3
	6.5	3	3

รวมจำนวนตัวอย่างทดสอบระยะการบ่ม 7 วัน 36 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่างทดสอบระยะการบ่ม 28 วัน 36 ตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 3.2 ตู้ทดสอบแบบ UTM ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

ภาพที่ 3.3 ชุดเครื่องมือทดสอบการต้านทานแรงดึงทางอ้อม

ตารางที่ 3.4 แผนการทดสอบการหาค่าโมดูลัสคืนตัว

ตัวอย่างดินจากภูมิภาคต่าง ๆ	ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่ใช้ผสม	จำนวนตัวอย่างของระยะเวลาการบ่ม 7 วัน	จำนวนตัวอย่างของระยะเวลาการบ่ม 28 วัน
ภาคกลาง	2.0	3	3
	3.5	3	3
	5.0	3	3
	6.5	3	3
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2.0	3	3
	3.5	3	3
	5.0	3	3
	6.5	3	3

รวมจำนวนตัวอย่างทดสอบระยะการบ่ม 7 วัน 36 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่างทดสอบระยะการบ่ม 28 วัน 36 ตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์

4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของดินตัวอย่างก่อนปรับปรุงคุณภาพ

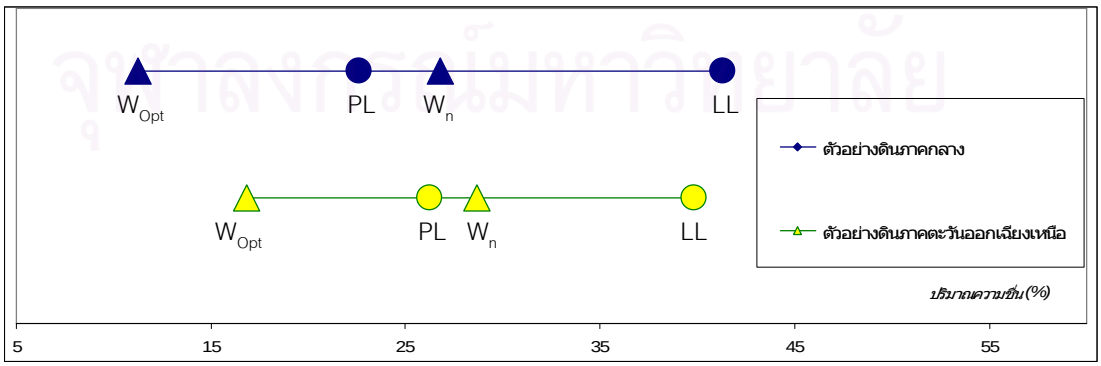
จะทำการทดสอบคุณสมบัติของดินโดยทางกายภาพพื้นฐานได้แก่ Soil Water Content, Atterberg's Limit และ Soil Classification จากดินตัวอย่างซึ่งเป็นตัวแทนจาก 2 ภูมิภาค คือ ภาคกลาง และ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของดินแต่ละพื้นที่ ซึ่งตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบนั้นมาจากแหล่งดินดังต่อไปนี้

1. ภาคกลาง จากโครงการก่อสร้างทางหลวงเลขที่ 3349 สาย บ้านท่ายาง –อำเภอหนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี ตอนที่ 2

2. ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากโครงการก่อสร้างทางหลวงเลขที่ 24 สาย อำเภอโชคชัย – อำเภอหนองกี่ จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 4.1 การจำแนกดินตัวอย่างตามระบบ Unified Soil Classification

ตัวอย่างดินภูมิภาคต่าง ๆ	ลักษณะของดินตัวอย่าง
ภาคกลาง	SM with Gravel
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	SM



ภาพที่ 4.1 ค่าพิกัดความชื้นของดินตัวอย่าง

4.1.2การทดสอบหาปริมาณความชื้นที่ใช้ผสมในการปรับปรุงคุณภาพดินตัวอย่าง

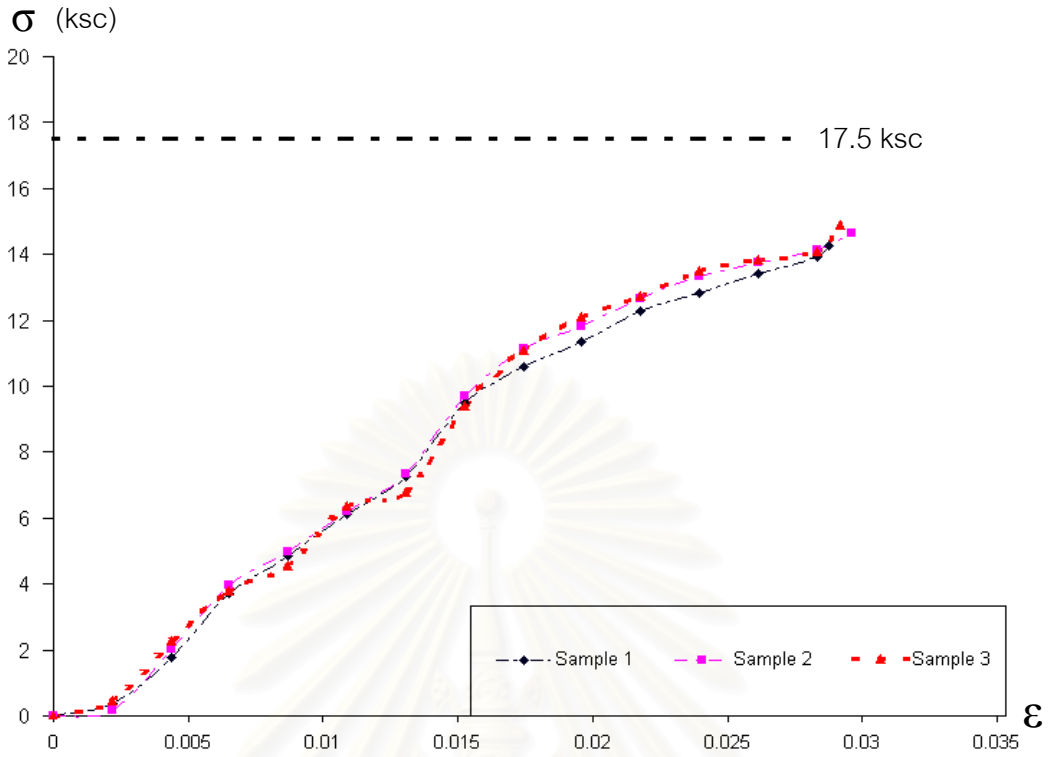
จะนำดินตัวอย่างจากในแต่ละภูมิภาคมาผสมกับซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 2.0, 3.5, 5.0 และ 6.5 ของน้ำหนักดินตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าความชื้นอิ่มตัวสูงสุดจากการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ผลการทดสอบที่ได้มีดังตารางที่ 4.2

ตารางที่4.2 ผลการทดสอบการหาปริมาณความชื้นในการปรับปรุงคุณภาพของดินตัวอย่าง

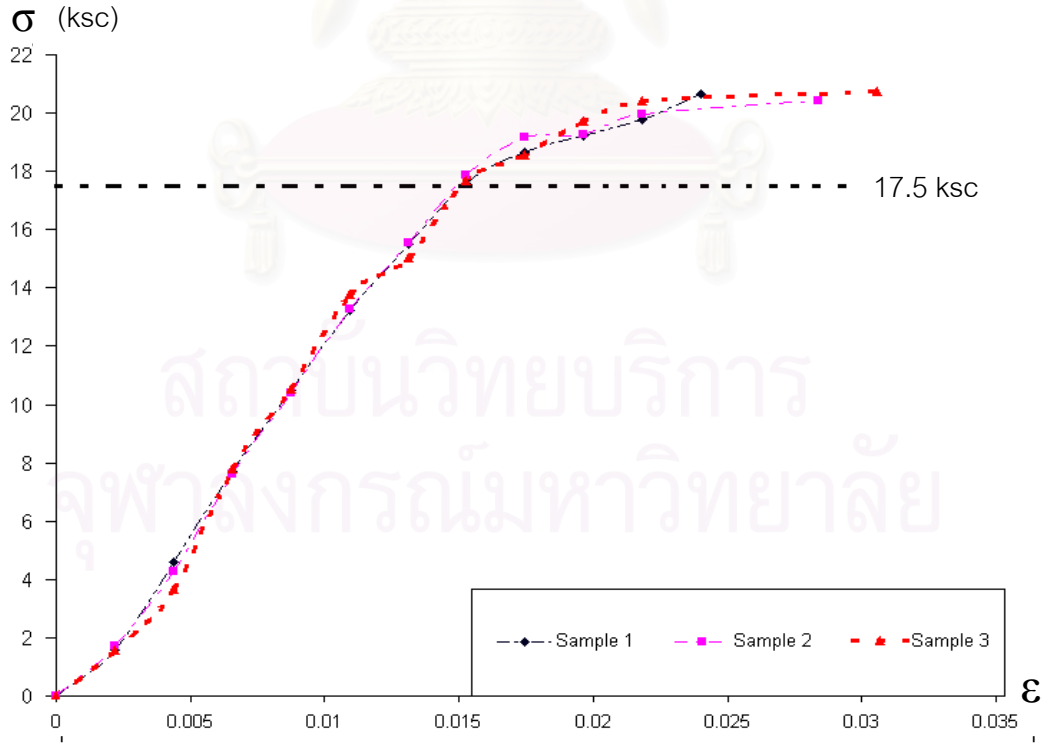
ตัวอย่างดินภูมิภาคต่าง ๆ	ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่ใช้ผสม	ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ความชื้นอิ่มตัวที่เหมาะสม (%)
ภาคกลาง	2.0	2.10	9.75
	3.5	2.17	9.80
	5.0	2.13	10.10
	6.5	2.05	10.30
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2.0	1.94	15.74
	3.5	1.94	15.50
	5.0	1.90	16.20
	6.5	1.88	15.85

4.1.3 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด

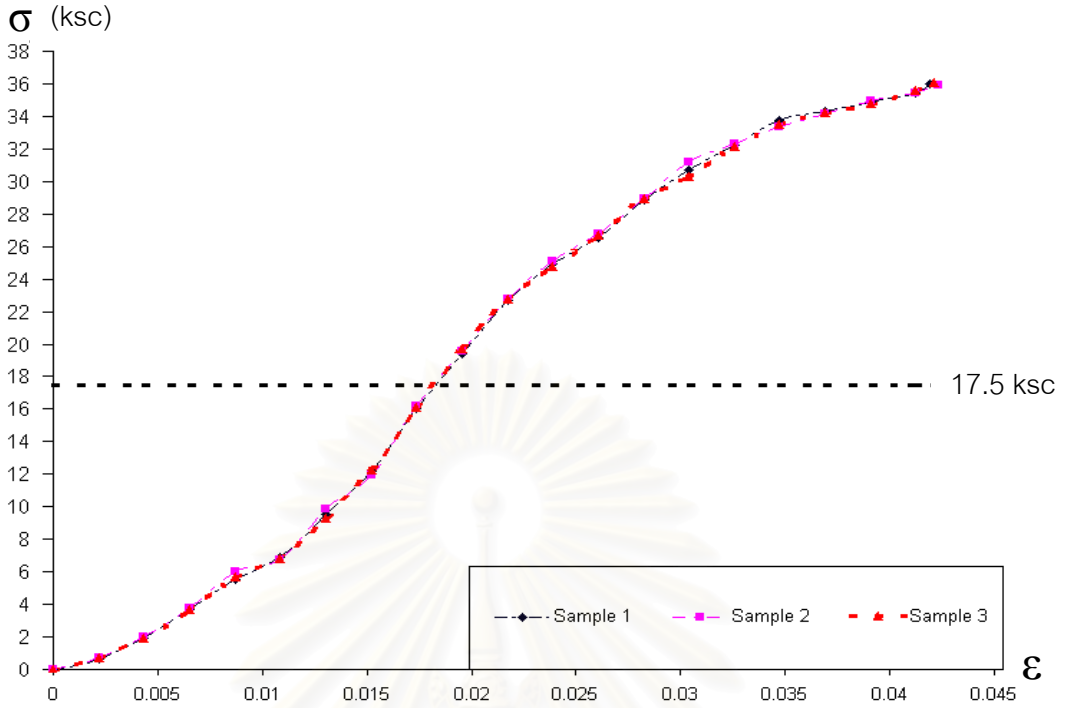
ทำการทดสอบโดยการนำดินตัวอย่างจากภูมิภาคต่าง ๆ มาผสมกับซีเมนต์ที่ร้อยละต่อน้ำหนักที่ 2.0, 3.5, 5.0, 6.5 ตามลำดับเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ว่าการผสมซีเมนต์ในดินลูกรังที่มีอายุการบ่ม 7 วัน สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด มีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 17.5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งผลการทดสอบมีดังภาพที่ 4.2 – 4.9 และสำหรับผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่มีอายุการบ่ม 28 วัน ดังไว้ในภาพที่ 4.10 – 4.17



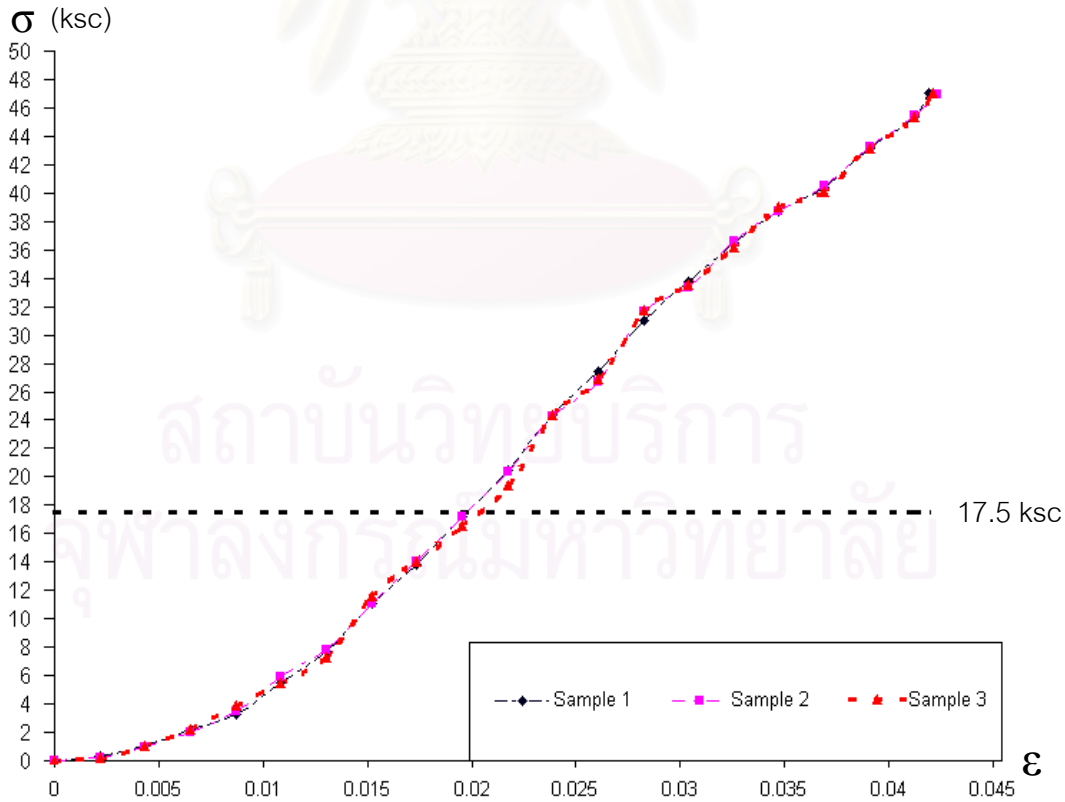
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคกลางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 2.0 ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคกลางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3.5 ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

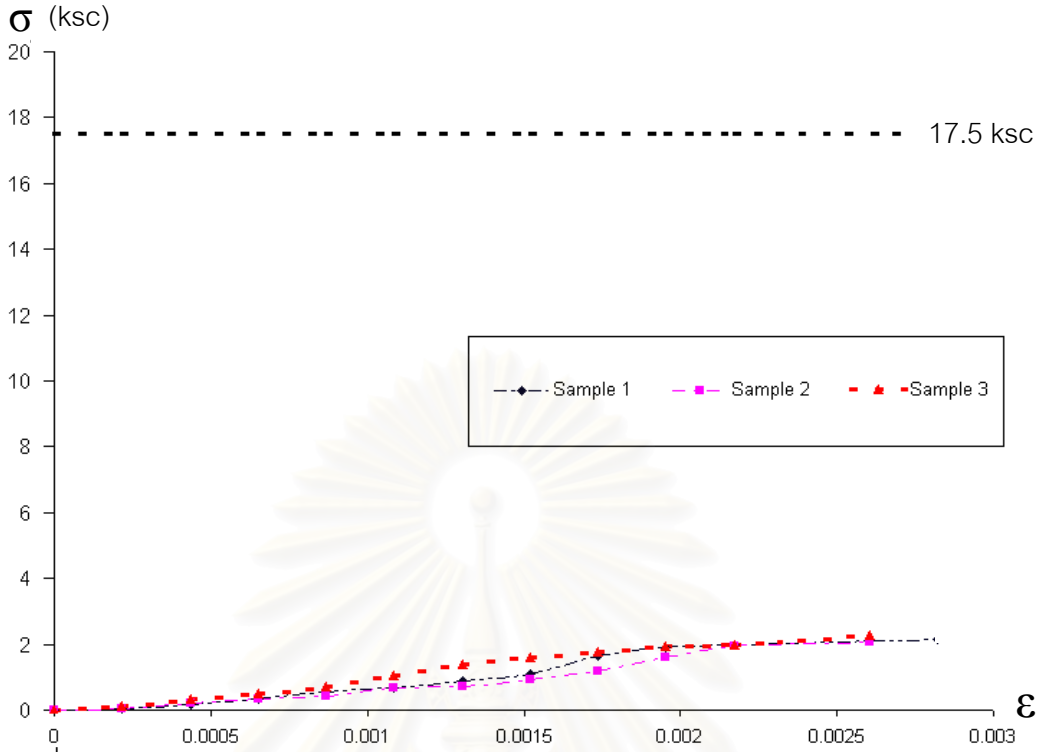


ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคกลางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5.0 ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

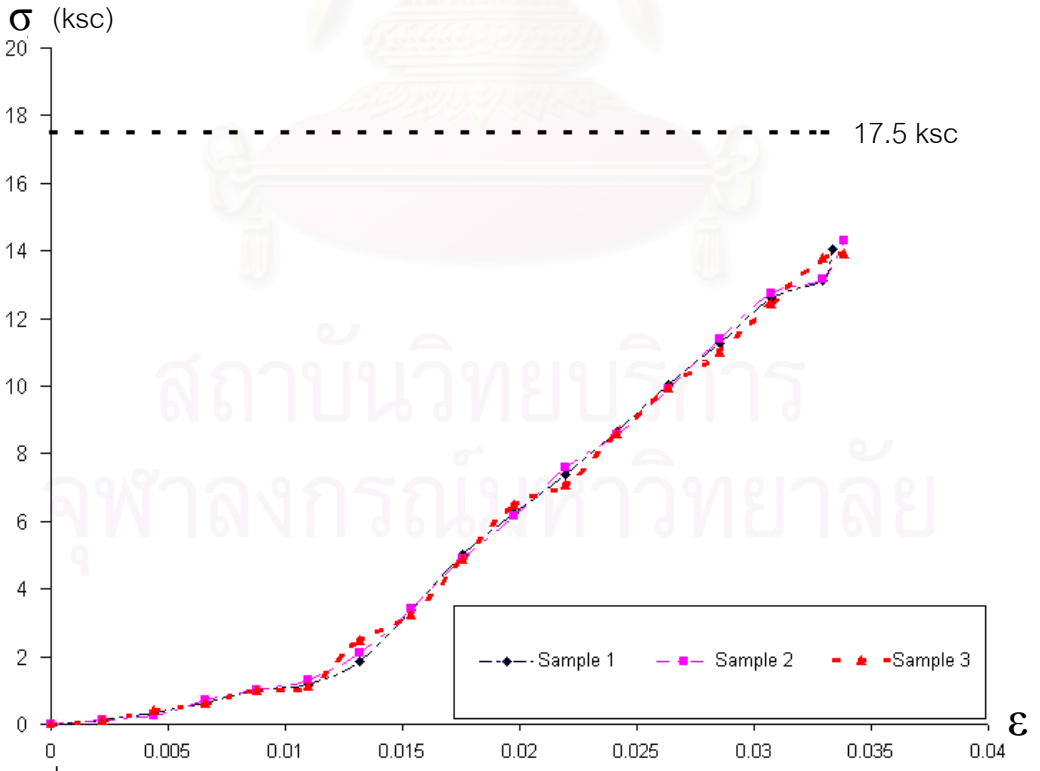


ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคกลางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6.5 ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

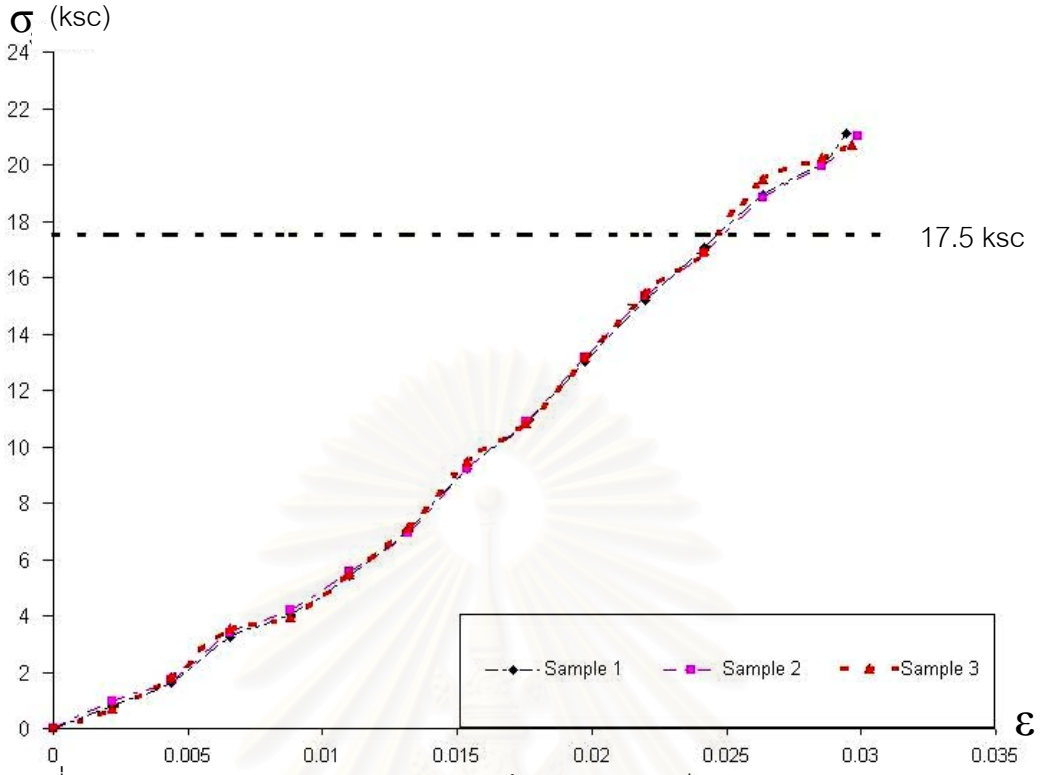
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



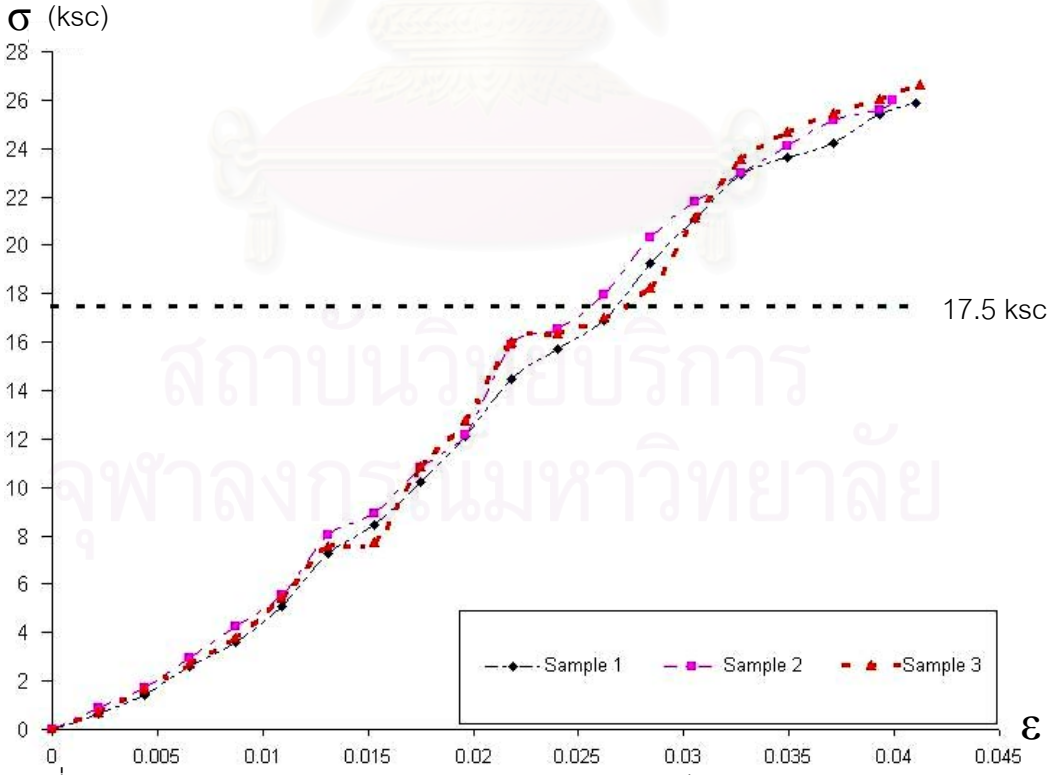
ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 2.0 ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3.5 ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

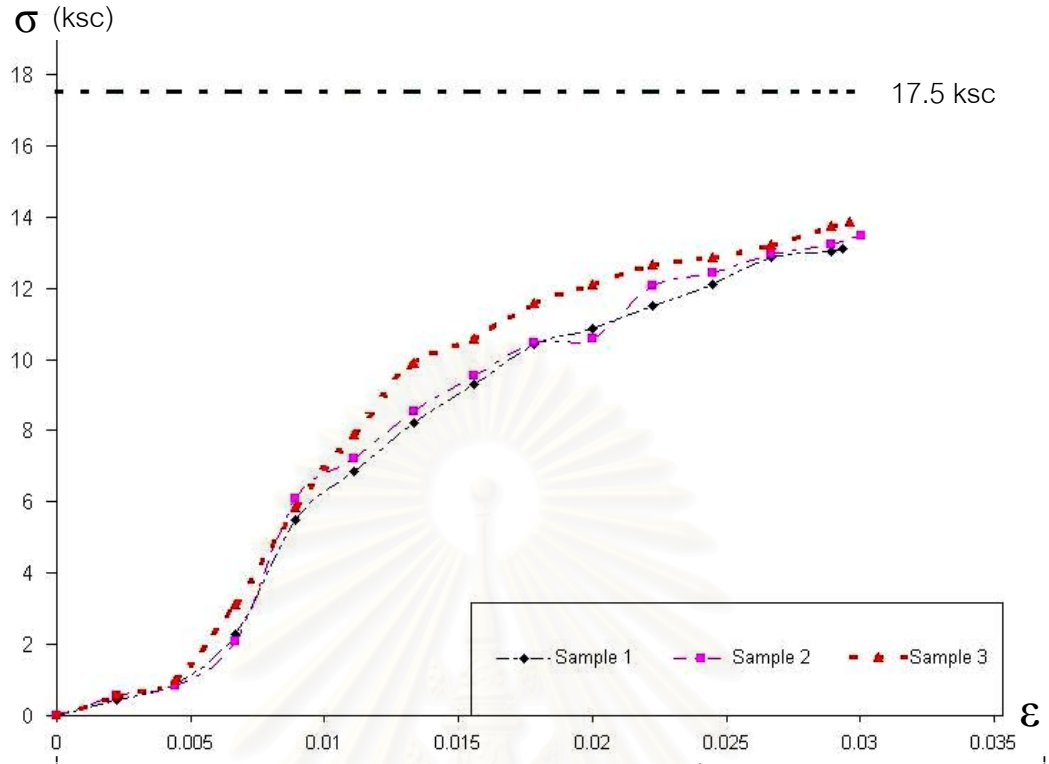


ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5.0 ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

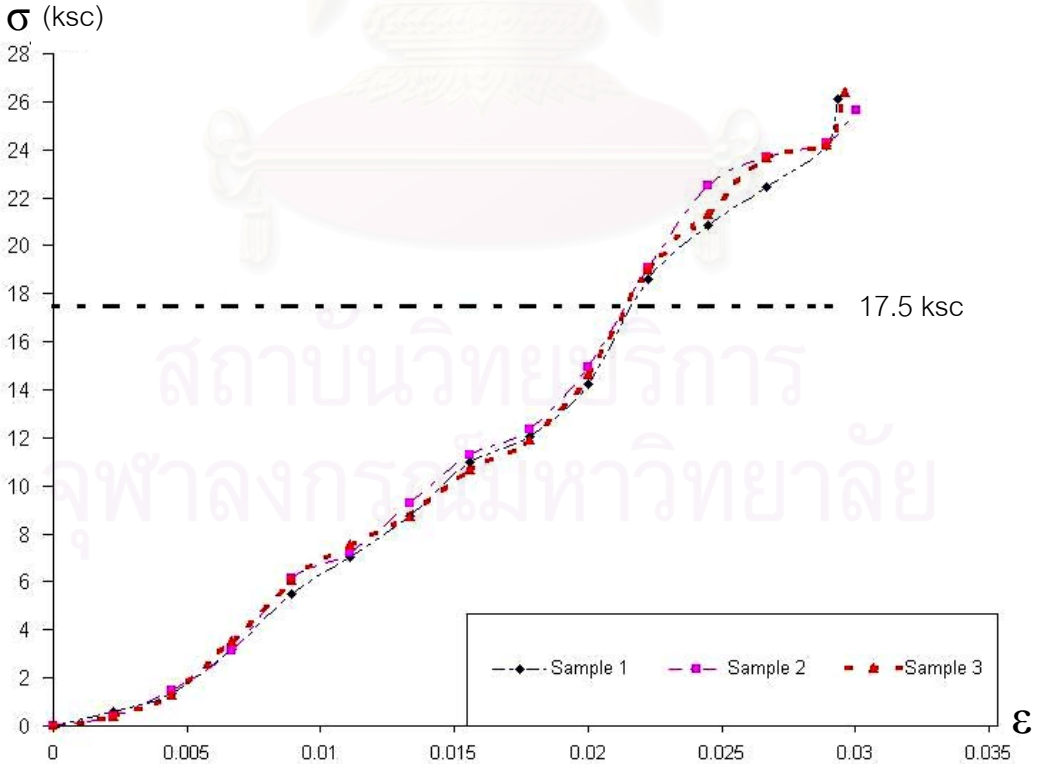


ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6.5 ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

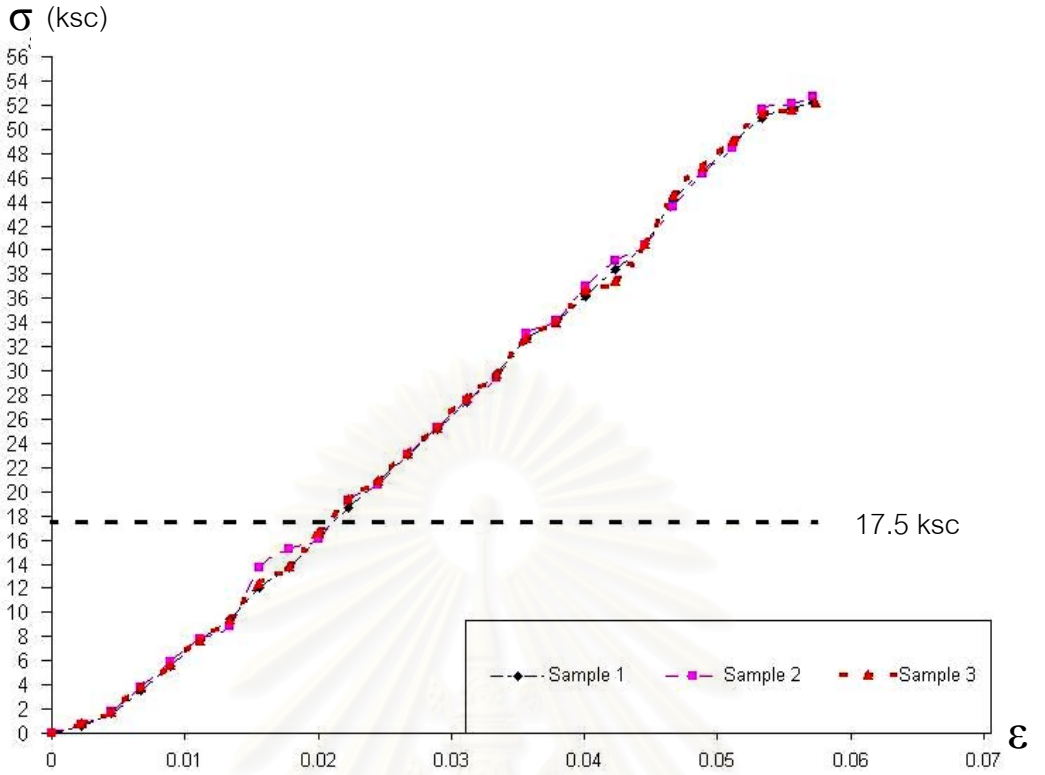
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



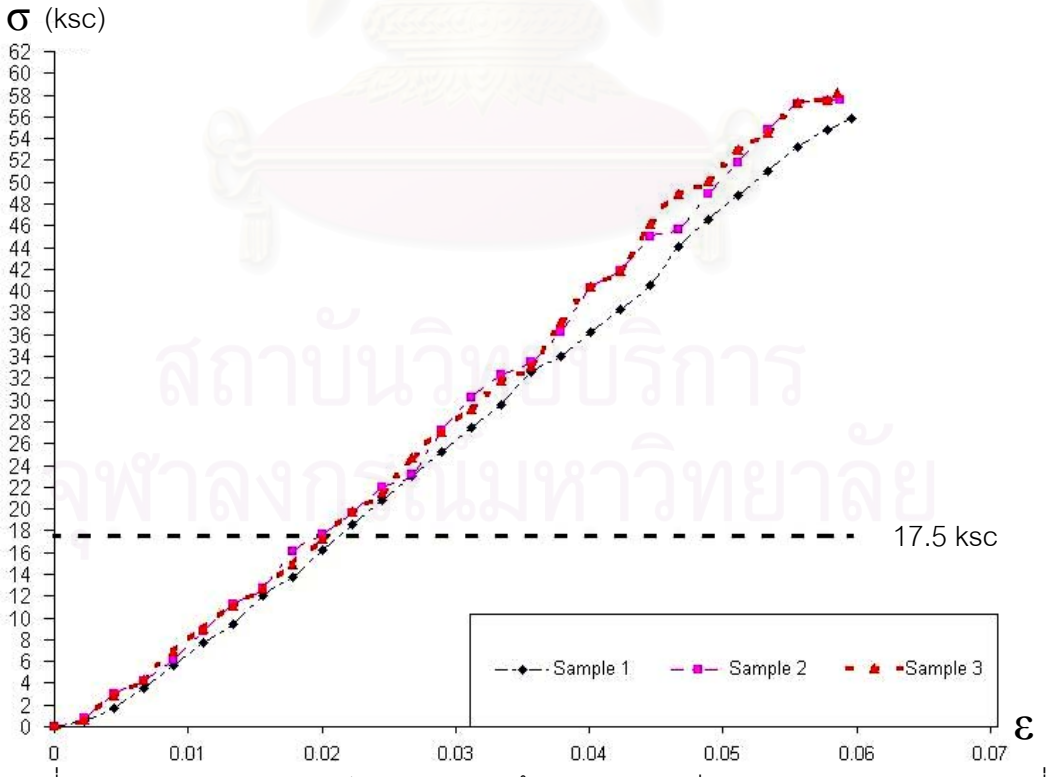
ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคกลางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 2.0 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



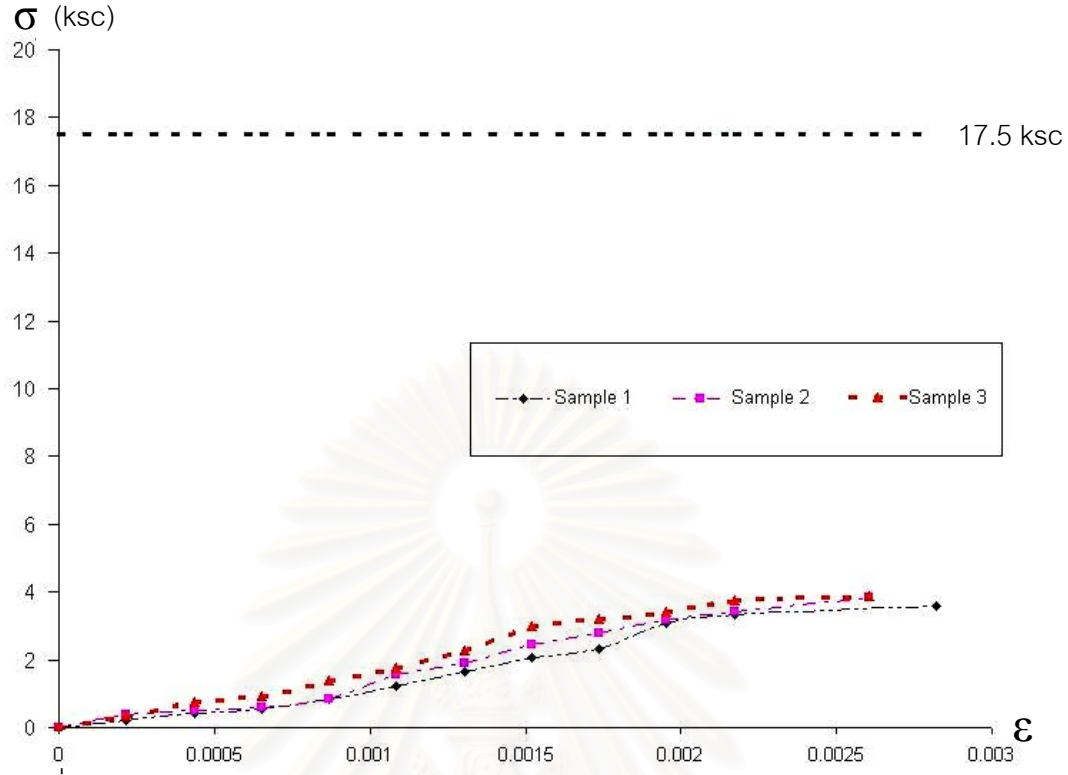
ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคกลางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3.5 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



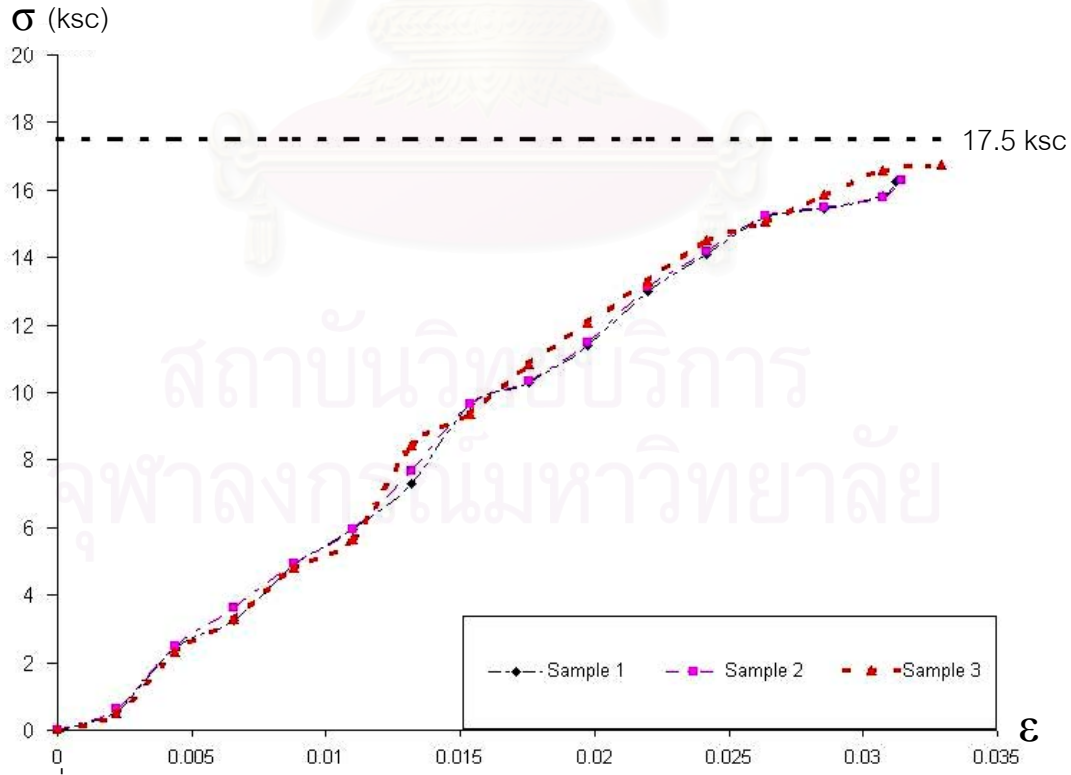
ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคกลางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5.0 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคกลางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6.5 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

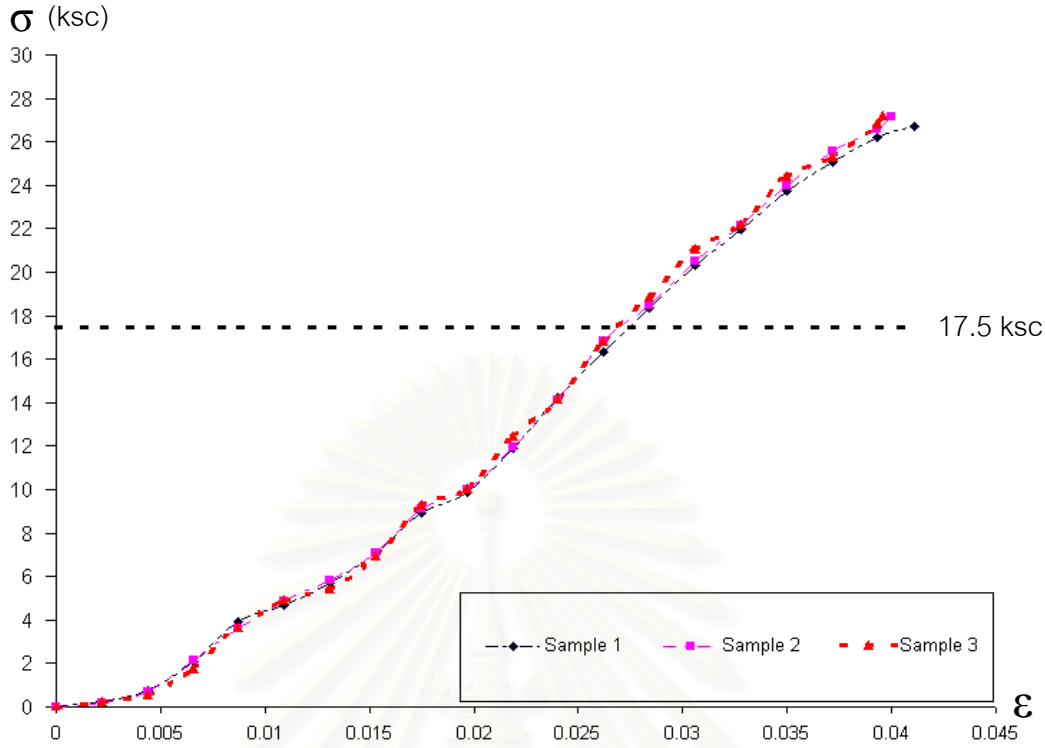


ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 2.0 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

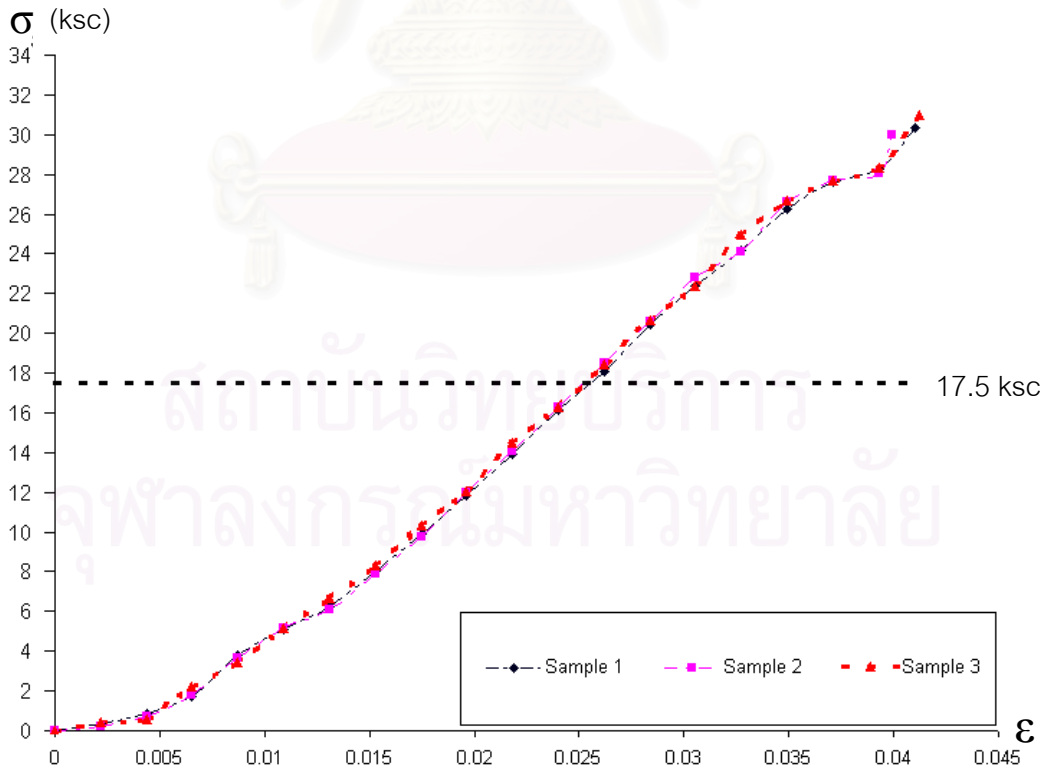


ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3.5 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5.0 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6.5 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

4.1.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม

จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมนั้นจากตัวอย่างดินผสมซีเมนต์โดยจะใช้ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งจะใช้ขนาดของตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 มม. หรือ 4 นิ้ว และมีความสูงของก้อนตัวอย่างไม่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยใช้อุณหภูมิที่ทดสอบที่ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นจะทำการกดน้ำหนักด้วยอัตราเร็ว 50 มม./นาที โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 4123 จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย แล้วบันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดและค่าระยะการยุบตัวและขยายตัวทางด้านบนและด้านข้างของก้อนตัวอย่างทดสอบพร้อมทั้งคำนวณหาค่ากำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อมและอัตราส่วนปัวซอง โดยรูปแบบทิศทางการทดสอบดังภาพที่ 4.18

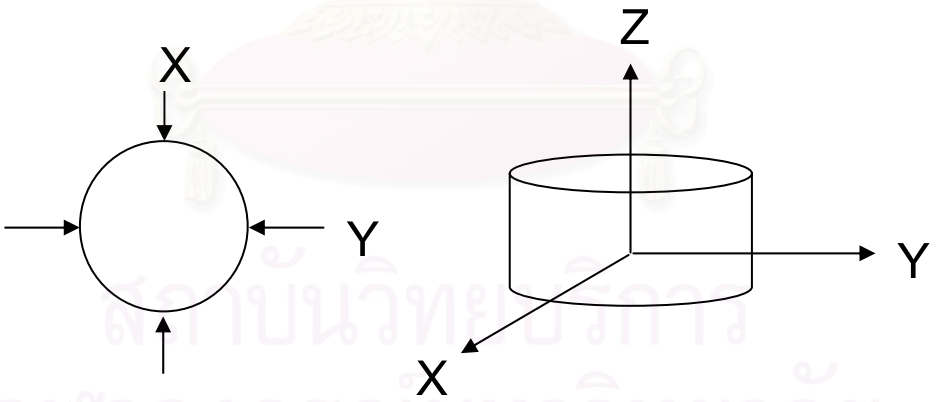
$$\sigma_T = \frac{2P_f}{\pi Dt}$$

โดยที่ P_f คือ ค่าน้ำหนักสูงสุดที่ทำการทดสอบ (N)

t คือ ค่าความความหนาของก้อนตัวอย่าง (mm.)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (mm.)

ซึ่งมีผลการทดสอบดังตาราง 4.3 – 4.4



ภาพที่ 4.18 แสดงถึงทิศทางของการทดสอบกำลังรับดึงทางอ้อม

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและอัตราส่วนปัวซองของดินตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

ตัวอย่างดินที่ภูมิภาคต่าง ๆ	ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่ใช้ผสม	กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (kPa)	อัตราส่วนปัวซอง ν_{xy}
ภาคกลาง	2.0	44.54	0.05
	3.5	191.40	0.09
	5.0	201.46	0.19
	6.5	231.02	0.18

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2.0	43.16	0.18
	3.5	47.00	0.17
	5.0	269.82	0.13
	6.5	293.48	0.38

หมายเหตุ อัตราส่วนป้วซองที่วัดเป็นอัตราส่วนในแนวแกนรอง (แกน Y)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและอัตราส่วนป้วซองของดินตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

ตัวอย่างดินที่ภูมิภาคต่าง ๆ	**ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่ใช้ผสม**	**กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (kPa)**	**อัตราส่วนป้วซอง ν_{xy}**
ภาคกลาง	2.0	66.12	0.07
	3.5	236.93	0.06
	5.0	395.04	0.15
	6.5	490.74	0.22
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2.0	20.92	0.01
	3.5	105.85	0.07
	5.0	348.99	0.06
	6.5	372.54	0.08

หมายเหตุ อัตราส่วนป้วซองที่วัดเป็นอัตราส่วนในแนวแกนรอง (แกน Y)

4.1.5 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

จะทดสอบคล้ายคลึงกับการทดสอบหาการต้านทานแรงดึงทางอ้อมกับตัวอย่างในแต่ละภูมิภาคตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมซึ่งขนาดของตัวอย่างจะมีขนาดเท่ากันกับการทดสอบการต้านทานแรงดึงทางอ้อม โดยจะใช้ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งจะทำการทดสอบการต้านทานแรงดึงทางอ้อมก่อนเพื่อที่จะใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวต่อไป เริ่มจากทำการกดน้ำหนักด้วยอัตราคงที่ หลังจากนั้นจะทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 4123 กำหนดให้มีค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการทดสอบจะกำหนดเลือกใช้อุณหภูมิมาตรฐานอยู่ที่ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิปกติของประเทศไทย ซึ่งจะทดสอบโดยการให้น้ำหนักแบบวัฏจักรแบบซ้ำไปซ้ำมาโดยใช้น้ำหนักร้อยละ 10 ของน้ำหนักการทดสอบจนพังทลายที่ได้จากทดสอบการต้านแรงดึงทางอ้อม ซึ่งจะให้อัตราการให้น้ำหนัก 1 Hz โดยมีระยะเวลาการให้น้ำหนัก 0.1 วินาที รูปร่างของการกดน้ำหนักจะกำหนดให้เป็นรูป Haversine คือการรักษาค่า Preload ไว้ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อรักษาสภาพในการสัมผัสที่สม่ำเสมอระหว่างแท่งกดกับผิวก้อนตัวอย่าง จะทำการทดสอบต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) คงที่ หรือกระทำน้ำหนักซ้ำ

ประมาณ 150 ครั้ง ซึ่งในมาตรฐานวิธีทดสอบ ASTM D 4123 กำหนดให้กระทำในช่วง 50-200 ครั้ง จะทำการเก็บข้อมูลพร้อมทั้งคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว จะทำการทดสอบต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) คงที่ หรือกระทำน้ำหนักซ้ำประมาณ 150 ครั้งโดยจะเป็นค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้าย ในแต่ละก้อนตัวอย่าง จะทำการทดสอบสองทิศทางตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของโมดูลัสคืนตัว สำหรับการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวนั้นจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จากเครื่องทดสอบดังสมการต่อไปนี้

$$M_R = \frac{P(\nu + 0.27)}{Ht}$$

P คือค่าน้ำหนักแบบวัฏจักรที่ใช้ในการทดสอบ (N)

ν คืออัตราส่วนปัวซอง

H คือค่าการคืนตัวทั้งหมดในแต่ละทิศทาง(Instantaneous recoverable, mm.)

t คือความหนาของก้อนตัวอย่าง (mm.)

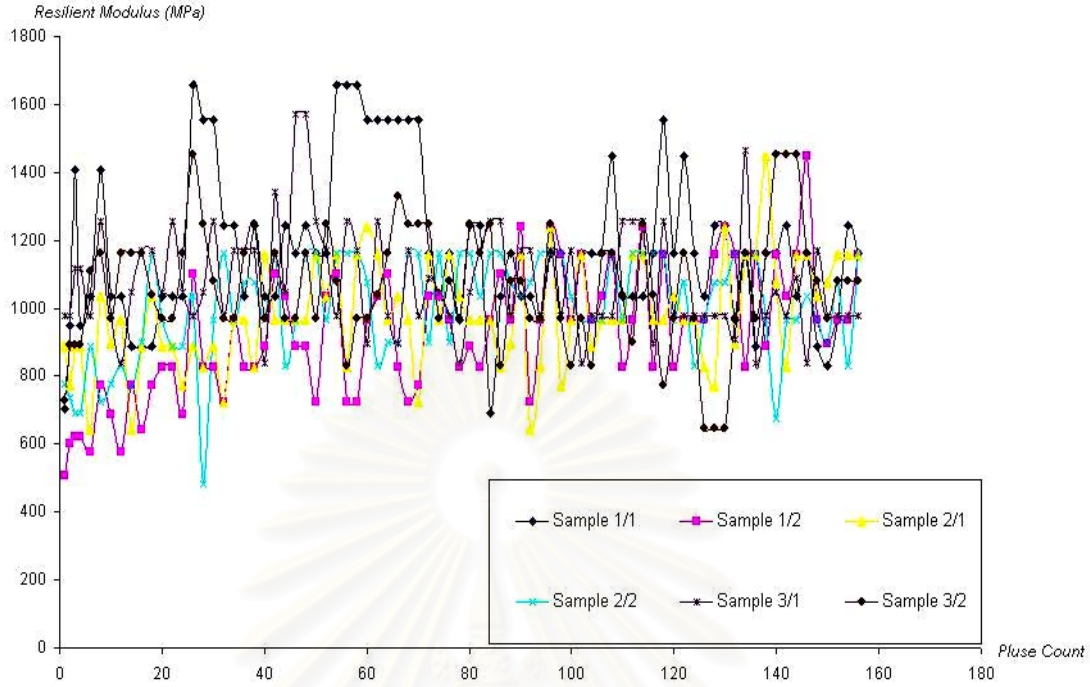
จากการทดสอบการหาค่าโมดูลัสคืนตัวพบว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากตัวอย่างดินที่อายุการบ่ม 7 วันนั้น มีค่าที่แปรปรวนสูงมากเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินกับซีเมนต์เกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์ทำให้ก้อนตัวอย่างทดสอบไม่เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะแบ่งได้เป็นช่วง ๆ ดังผลการทดสอบในตารางที่ 4.5 และในภาพที่ 4.19 – 4.26 สำหรับผลการทดสอบสำหรับค่าโมดูลัสคืนตัวของดินตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วันแสดงในภาพที่ 4.27 – 4.34

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการหาค่าโมดูลัสคืนตัวของดินตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 วัน

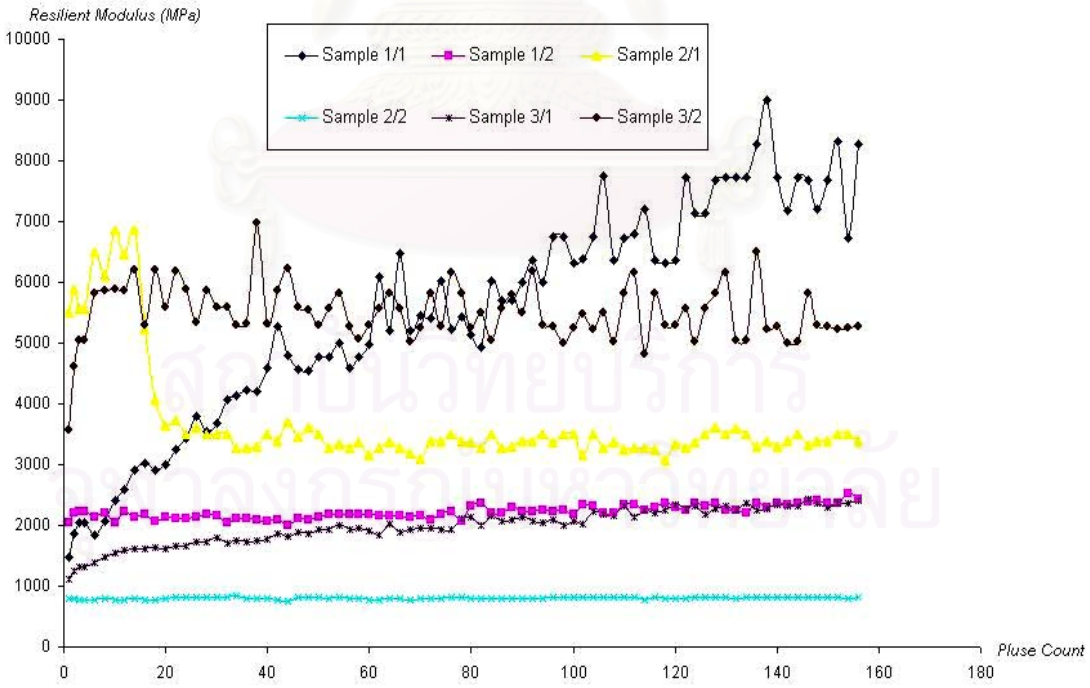
ตัวอย่างดินที่ภูมิภาคต่าง ๆ	ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่ใช้ผสม	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)
ภาคกลาง	2.0	986.24 – 1115.60
	3.5	809.62 – 7639.60
	5.0	815.12 – 5659.60
	6.5	550.58 – 4615.80
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2.0	766.66 – 1618.6
	3.5	498.68 – 1163.80
	5.0	202.06 – 3174.40
	6.5	528.66 – 6855.80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

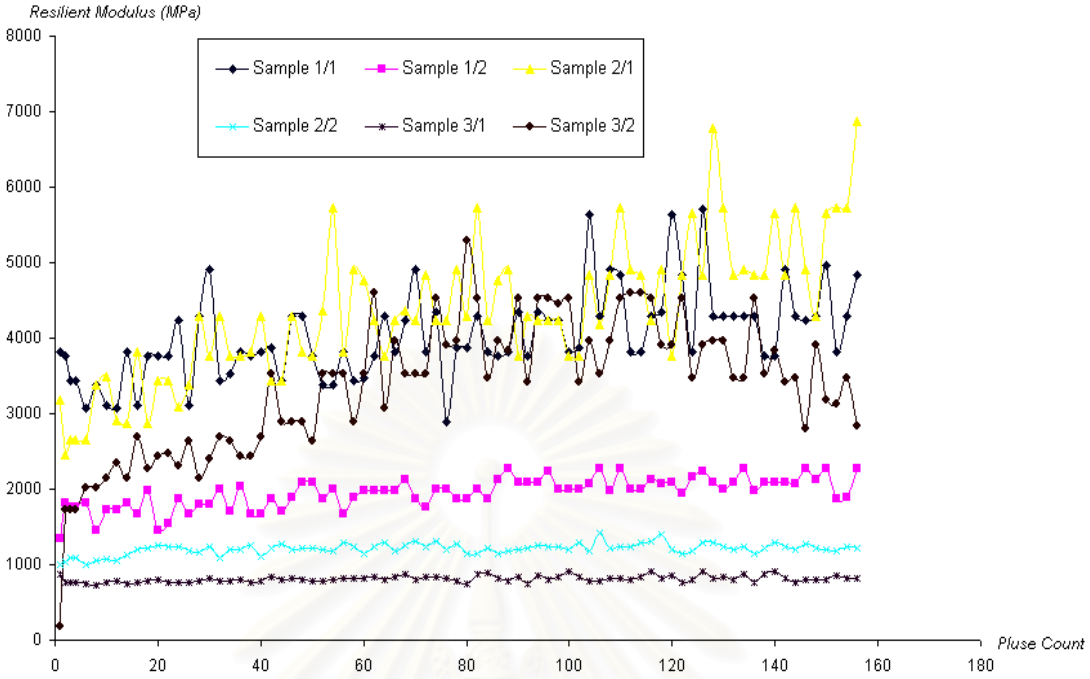
<u>หมายเหตุ</u> ภาพที่ 4.13 – 4.24 สัญลักษณ์ Sample 1/1 หมายถึงตัวอย่างทดสอบที่ 1 ทดสอบครั้งที่ 1 สัญลักษณ์ Sample 1/2 หมายถึงตัวอย่างทดสอบที่ 1 ทดสอบครั้งที่ 2 โดยหมุน ตัวอย่างทดสอบไป 90 องศา



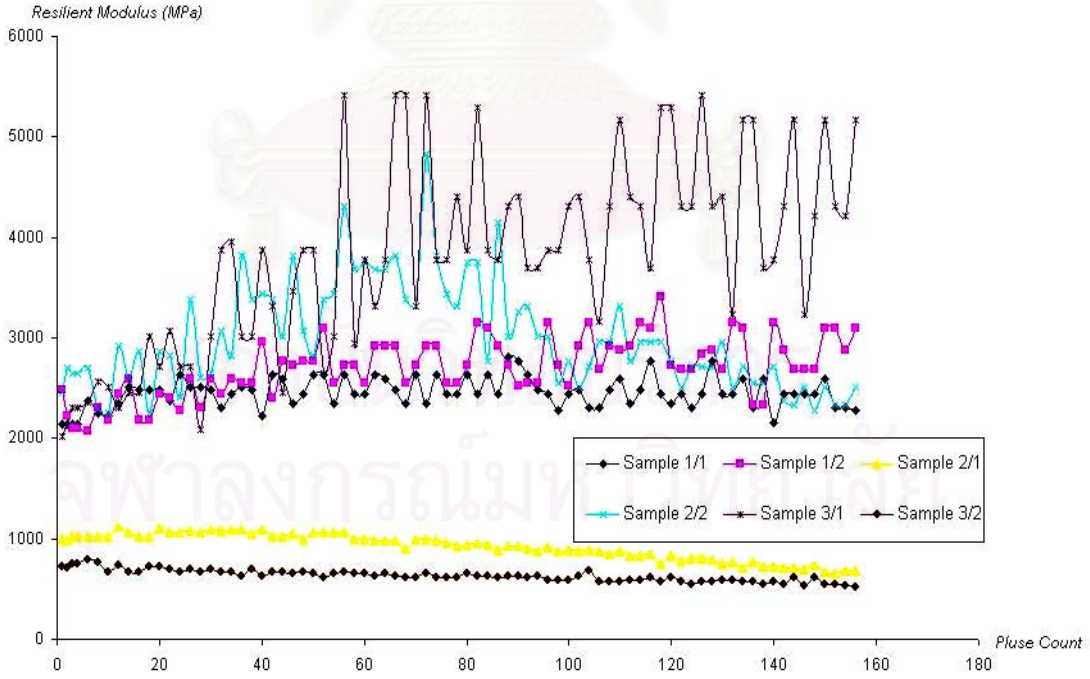
ภาพที่ 4.19 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคกลางที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 2.0 อายุการบ่ม 7 วัน



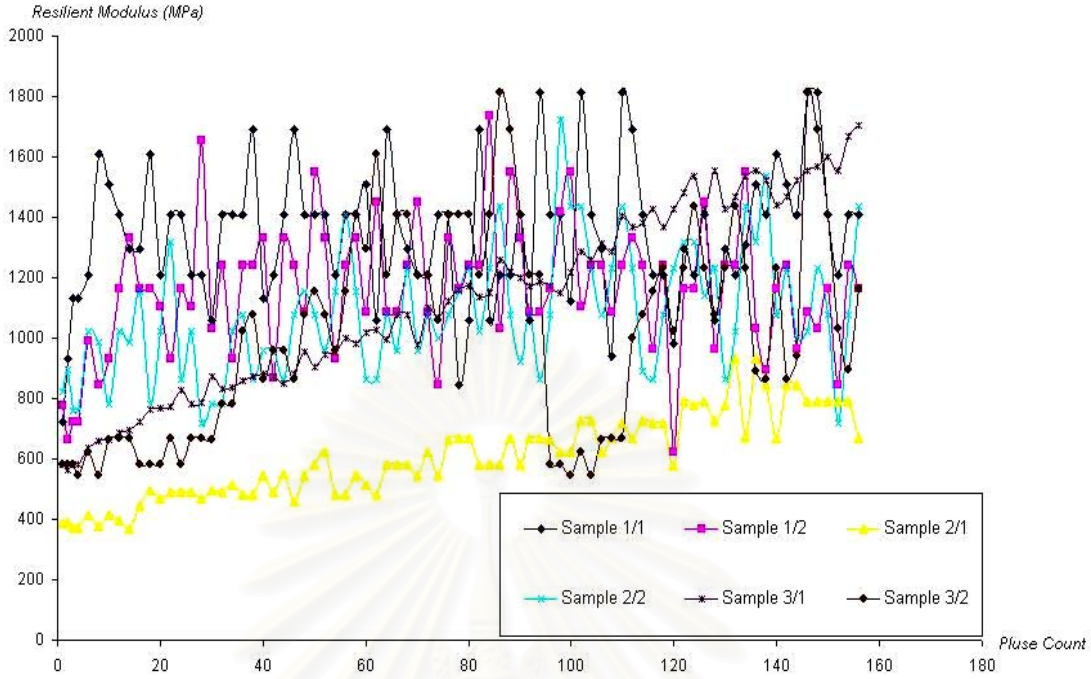
ภาพที่ 4.20 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคกลางที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 3.5 อายุการบ่ม 7 วัน



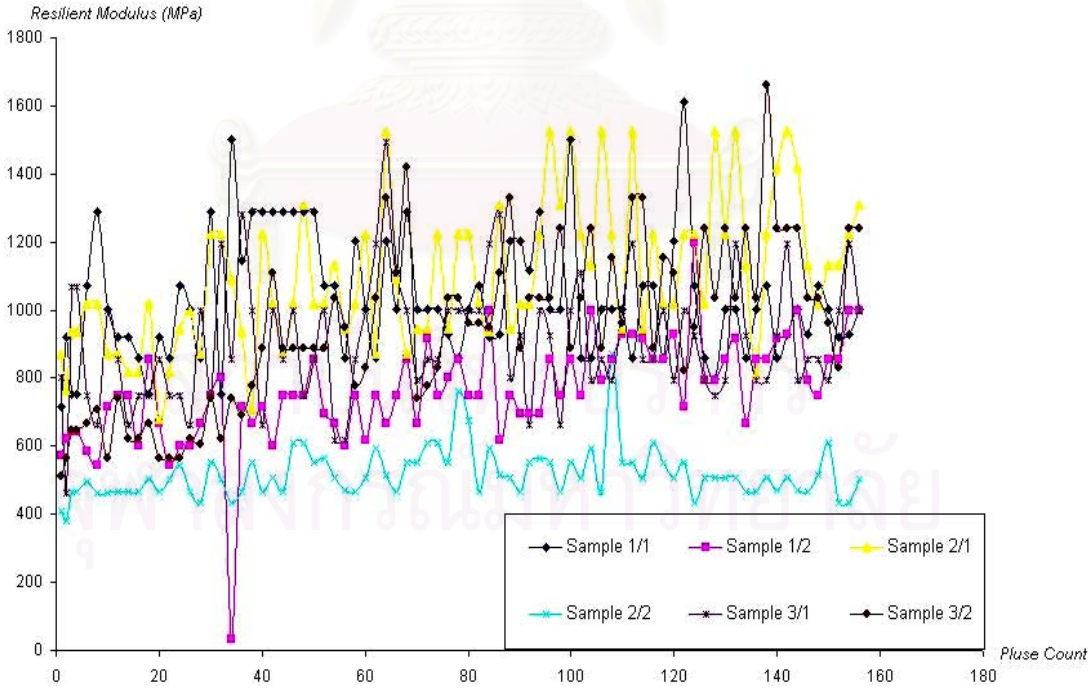
ภาพที่ 4.21 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคกลางที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 5.0 อายุการบ่ม 7 วัน



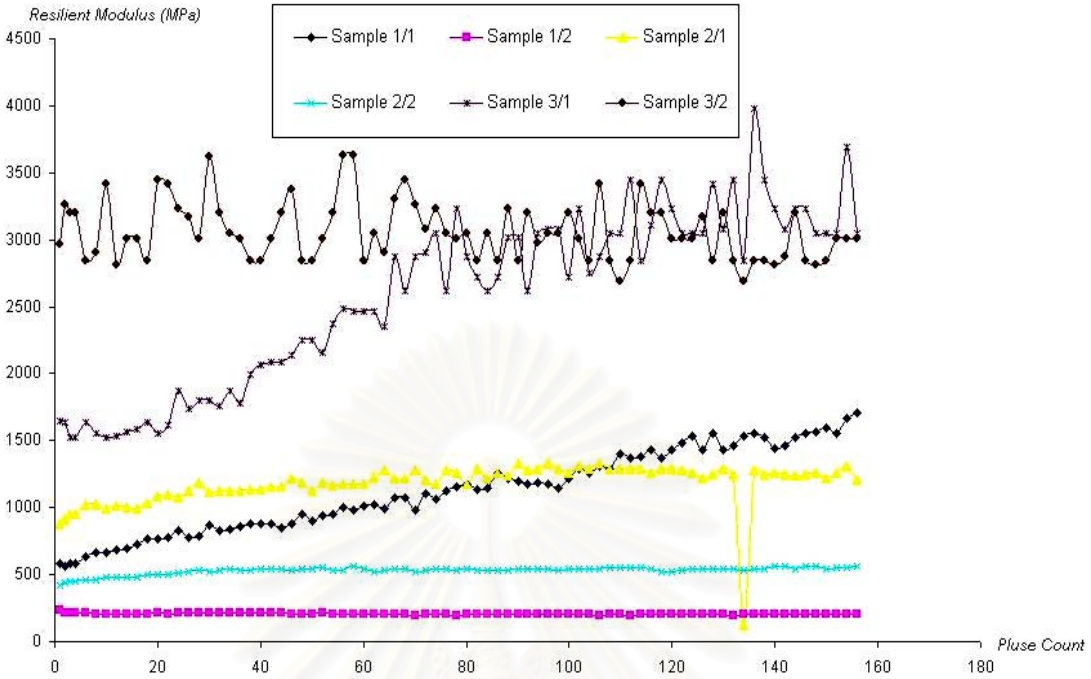
ภาพที่ 4.22 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคกลางที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 6.5 อายุการบ่ม 7 วัน



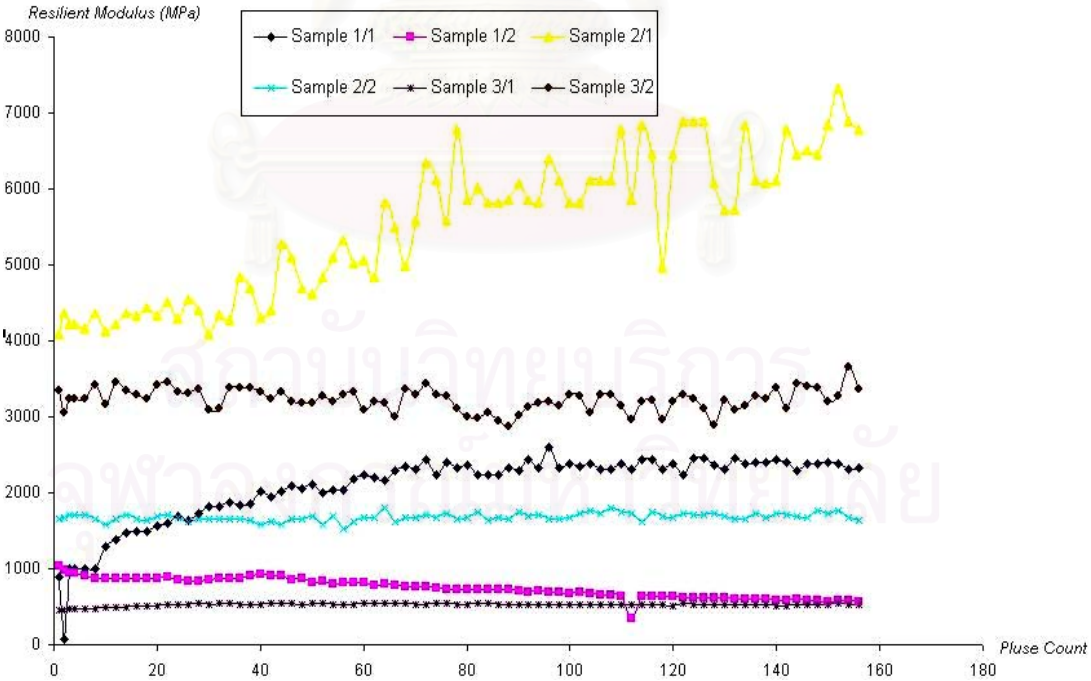
ภาพที่ 4.23 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 2.0 อายุการบ่ม 7 วัน



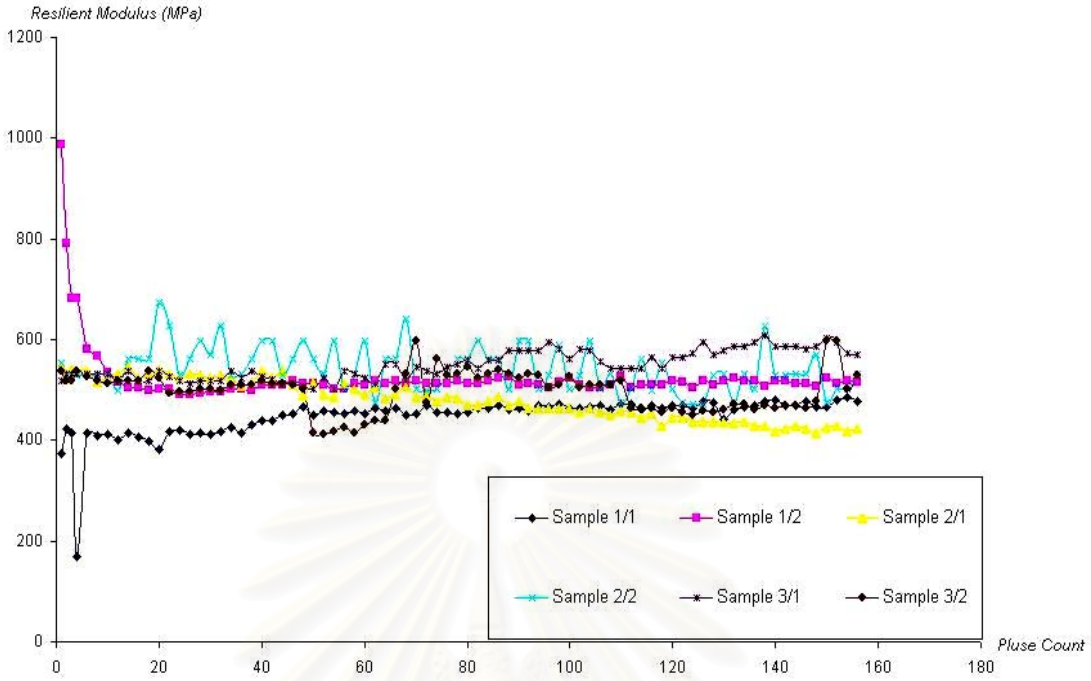
ภาพที่ 4.24 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 3.5 อายุการบ่ม 7 วัน



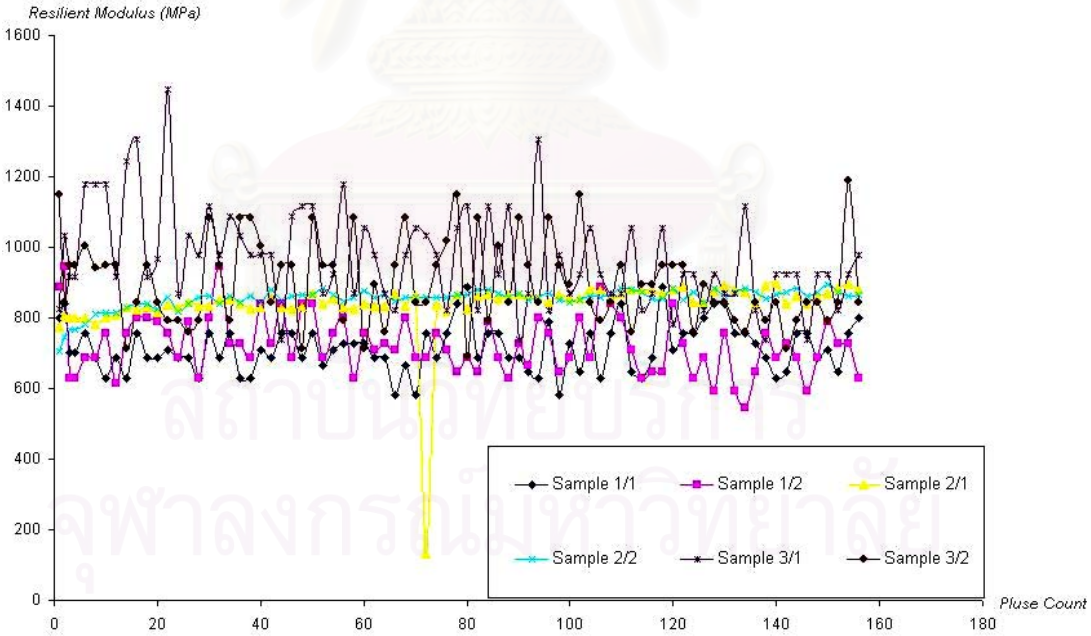
ภาพที่ 4.25 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 5.0 อายุการบ่ม 7 วัน



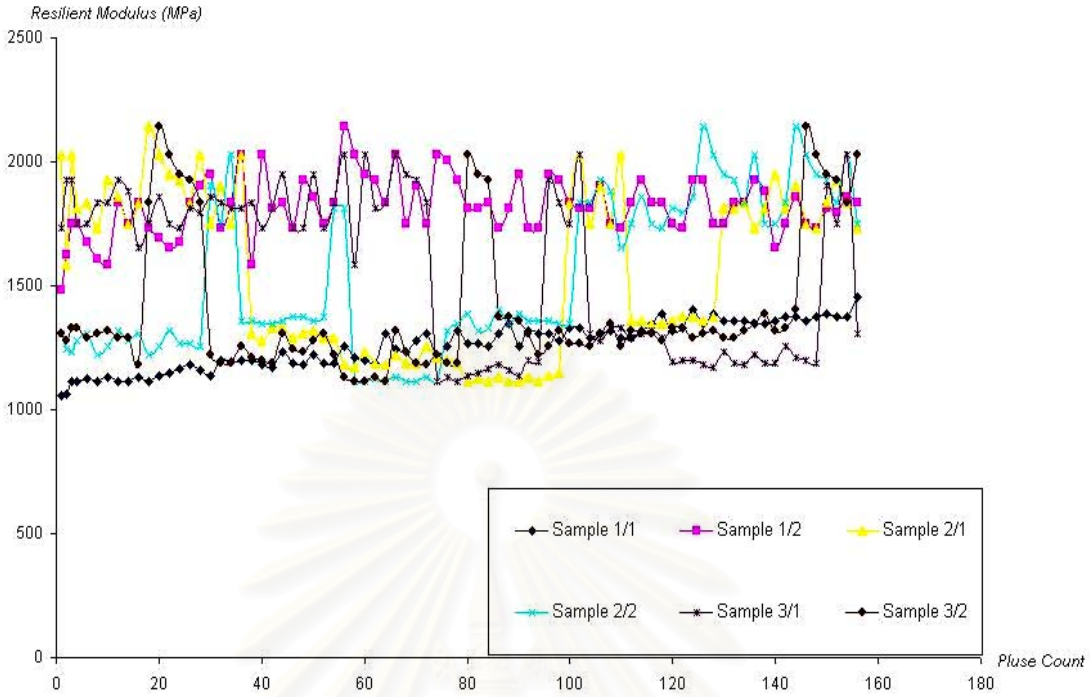
ภาพที่ 4.26 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 6.5 อายุการบ่ม 7 วัน



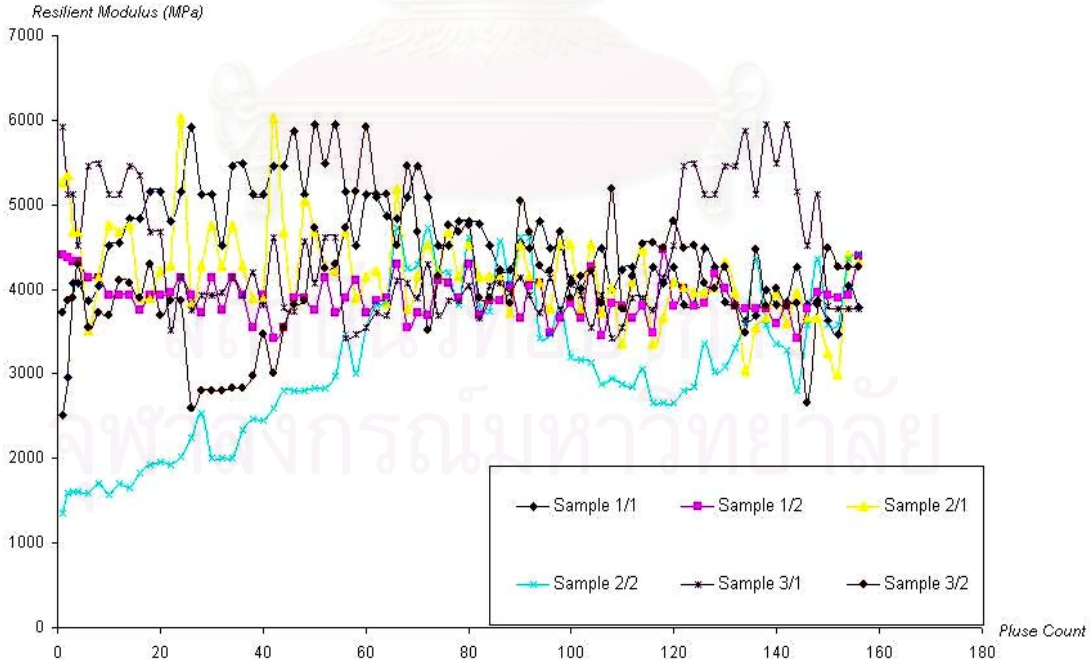
ภาพที่ 4.27 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคกลางที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 2.0 อายุการบ่ม 28 วัน



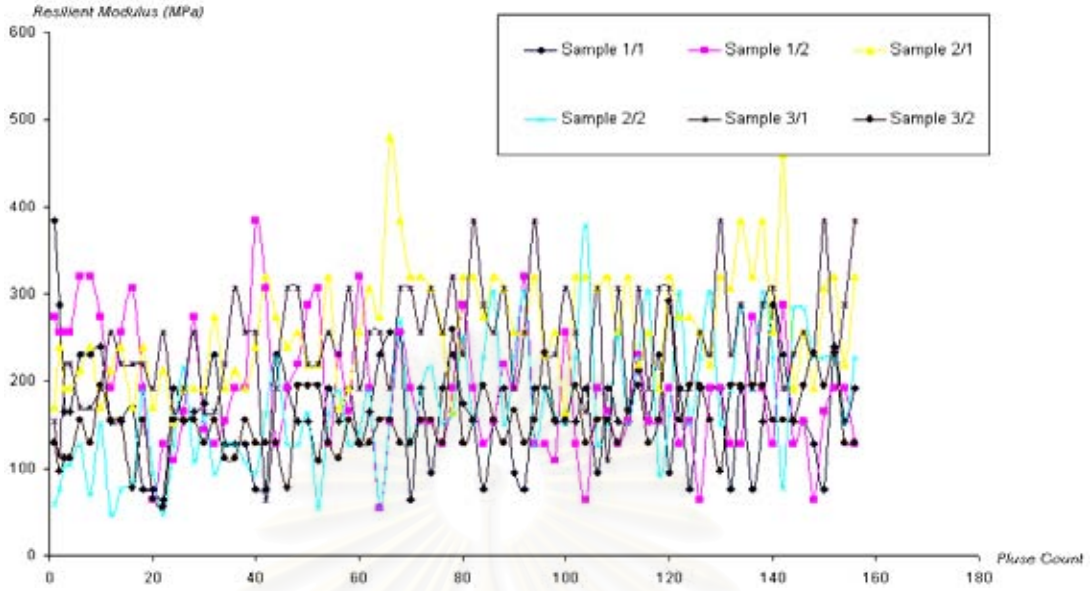
ภาพที่ 4.28 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคกลางที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 3.5 อายุการบ่ม 28 วัน



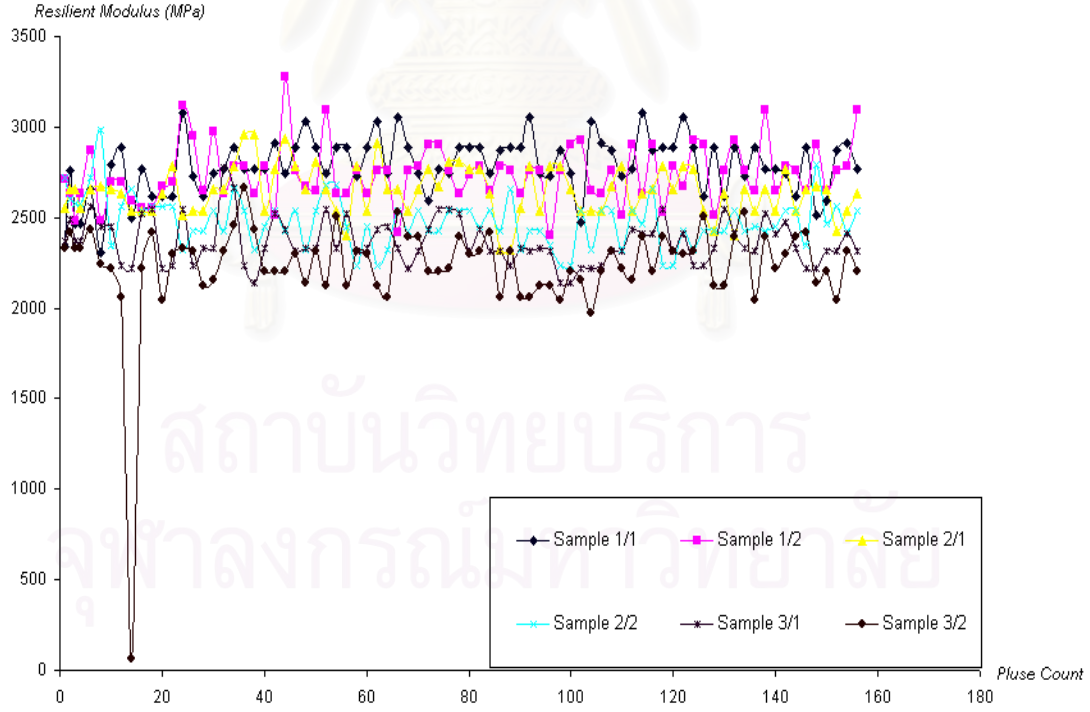
ภาพที่ 4.29 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคกลางที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 5.0 อายุการบ่ม 28 วัน



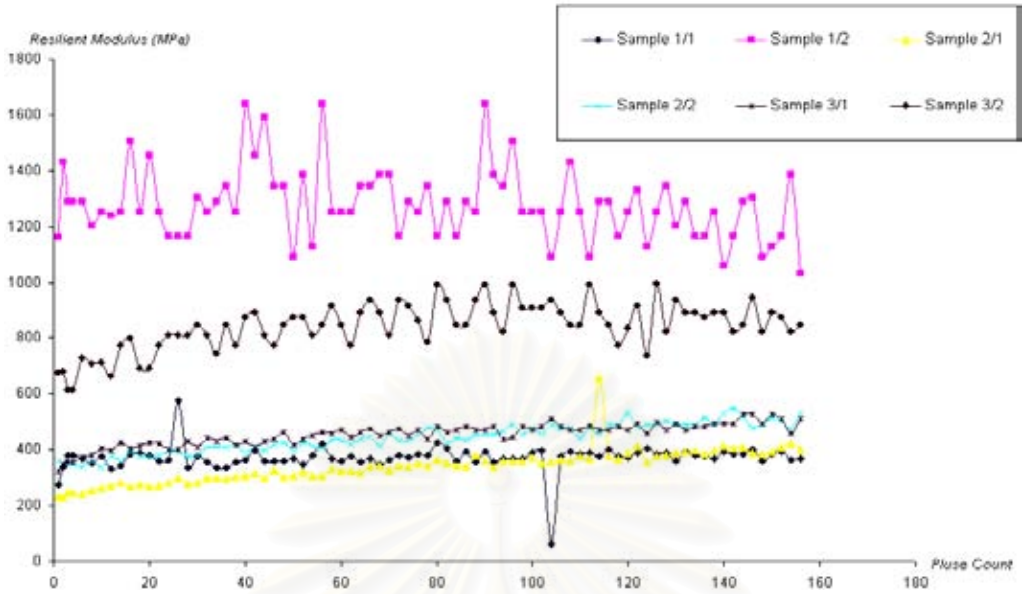
ภาพที่ 4.30 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคกลางที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 6.5 อายุการบ่ม 28 วัน



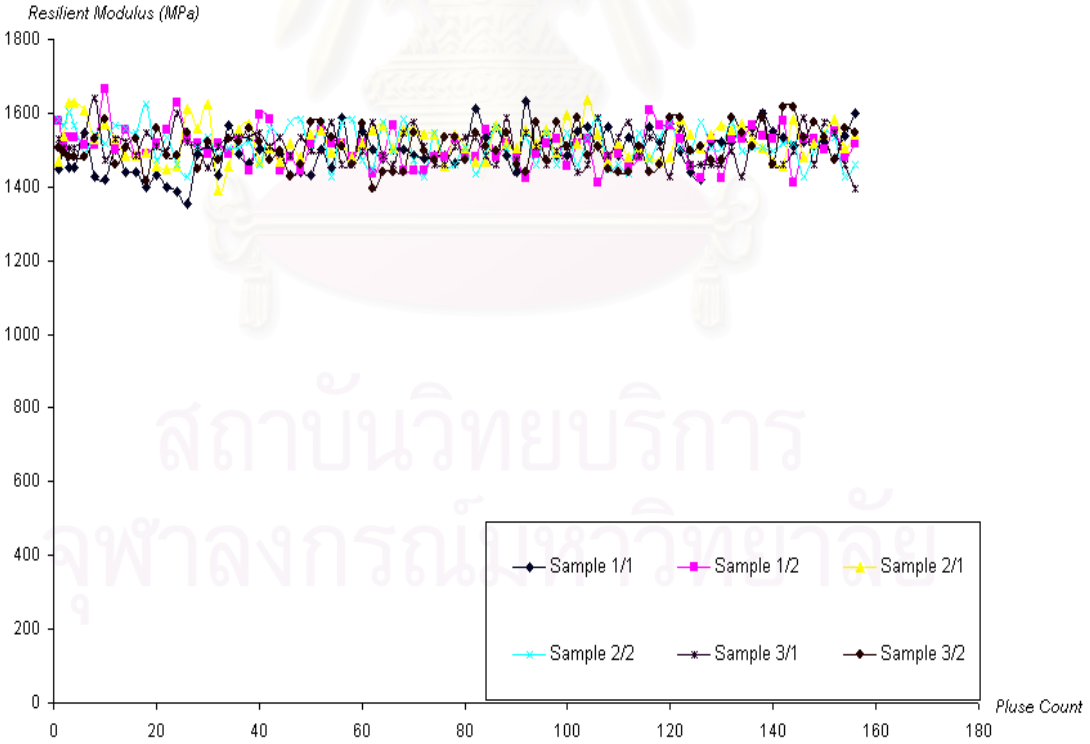
ภาพที่ 4.31 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 2.0 อายุการบ่ม 28 วัน



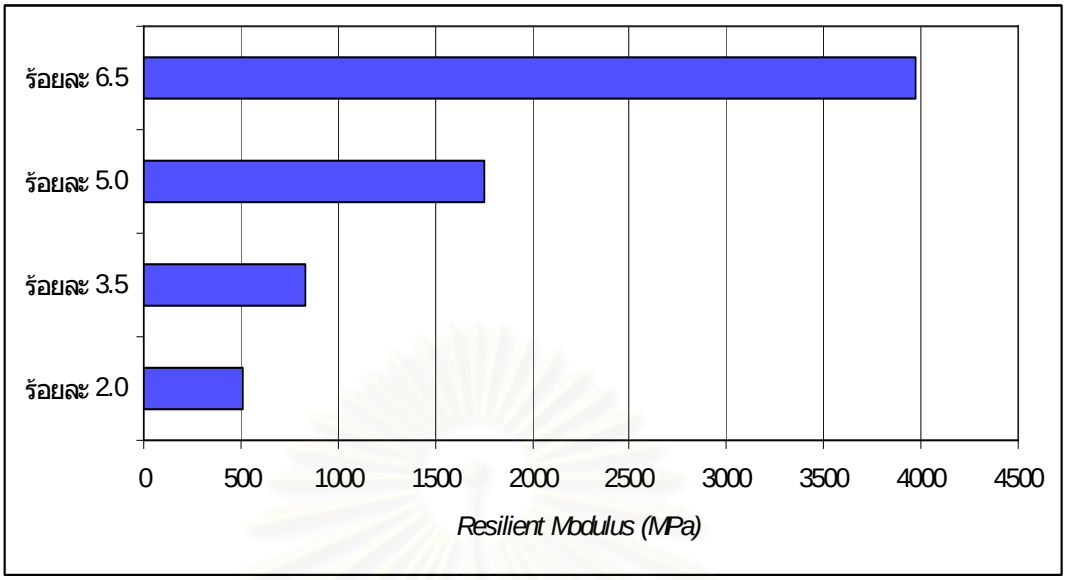
ภาพที่ 4.32 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 3.5 อายุการบ่ม 28 วัน



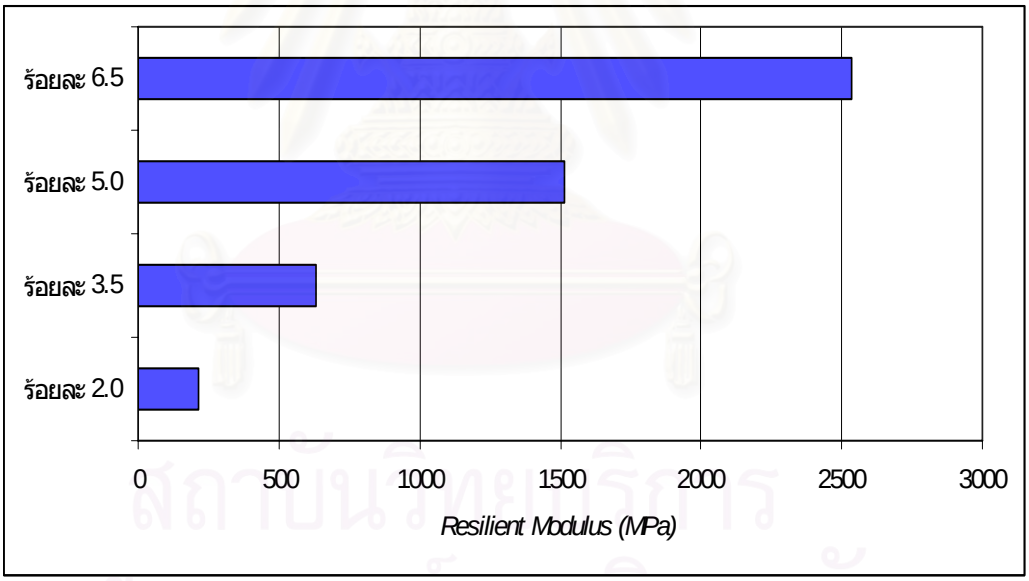
ภาพที่ 4.33 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 5.0 อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 4.34 กราฟระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 6.5 อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างดินภาคกลางที่อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่อายุการบ่ม 28 วัน

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการหาค่าโมดูลัสคืนของดินผสมซีเมนต์จากตัวอย่างดินที่ใช้ในการก่อสร้างถนนในประเทศไทย ซึ่งให้สอดคล้องการกับออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์ที่จะต้องมีการออกแบบชั้นโครงสร้างทางที่จะต้องปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์เบื้องต้นเช่น ค่ากำลังการรับแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสคืนตัว โดยที่การออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์นี้ในอนาคตข้างหน้าและจะเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการใช้ออกแบบโครงสร้างถนนต่อไป

5.1สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินตัวอย่างที่ผสมกับซีเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงพบว่าการใช้วัสดุดินผสมซีเมนต์นี้เหมาะสมอย่างยิ่งกับดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือเนื่องจากมีกำลังที่ต่ำมากในการทดสอบ ซึ่งควรจะใช้ปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 5.0 ขึ้นไปในการใช้ออกแบบชั้นโครงสร้างทาง สำหรับในภูมิภาคอื่นนั้น ควรจะใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3.5 ขึ้นไป

5.1.2 จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินตัวอย่างผสมกับซีเมนต์พบว่า ค่ากำลังที่ได้มีผลแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมโดยเรียงลำดับค่าของกำลังแล้วจากน้อยไปหามาก ซึ่งตัวอย่างดินจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือนั้นมีค่ากำลังที่ได้น้อยที่สุด จึงเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างมาก

5.1.3 จากผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวพบว่าแนวโน้มของค่าโมดูลัสคืนตัวที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน นั้นมีค่าที่แปรปรวนสูงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินกับซีเมนต์อาจจะยังไม่ทั่วถึงตลอดก้อนตัวอย่างที่ทดสอบทำให้ไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงได้ สำหรับการทดสอบกับตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน นั้นจะมีค่าการทดสอบที่ค่อนข้างจะคงที่มากกว่าในตัวอย่างดินภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์มากขึ้น

5.2 ประโยชน์ที่นำไปใช้

5.2.1 จากการทดสอบนั้นสามารถนำค่าของกำลังรับแรงทางอ้อมและค่าโมดูลัสคืนตัวไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์ได้

5.2.2 ทำให้มีการพัฒนาการปรับปรุงคุณภาพดินที่สอดคล้องกับความต้องการในการใช้งานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

5.2.3 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติดินในภูมิภาคต่าง ๆ ที่จะต้องทำการปรับปรุงคุณภาพดิน

5.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

5.3.1 เนื่องจากการวิจัยนี้เห็นว่าวัสดุดินผสมซีเมนต์นั้นมีสภาพที่เปราะ ควรจะมีการศึกษาความล้าของวัสดุเพิ่มเติมเพื่อจะใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างถนนต่อไปในอนาคตด้วย

5.3.2 การศึกษานั้นควรจะมีการศึกษาที่จำกัดวงแคบลงไปในเรื่องของปฏิกิริยาเคมีของดินผสมซีเมนต์ของประเทศไทยเพื่อเป็นการวิเคราะห์ต่อไปว่าคุณสมบัติทางเคมีของดินตัวอย่างของแต่ละภูมิภาคมีผลกระทบอย่างไรบางต่อปฏิกิริยาของดินผสมกับซีเมนต์ที่จะคาดการณ์ของค่าโมดูลัสคืนตัว

5.3.3 การเลือกใช้แบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบถนนเชิงวิเคราะห์ที่เหมาะกับคุณสมบัติดินจะต้องมีค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องต่อคุณสมบัติต่าง ๆ กับดินและสภาพแวดล้อมที่ใช้ในท้องถิ่นนั้น ๆ

5.3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวนั้นยังไม่ได้เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทยทำให้เป็นจุดด้อยในการวิจัยและพัฒนาการออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาและสอดคล้องให้ควบคู่กันไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

1. ธันวิน สวัสดิศานต์ เอกสารประกอบการเรียนวิชา การออกแบบผิวทาง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2548
2. ชยธันว์ พรหมศร และ คณะ คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) และค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง 2546
3. ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สมบัติกระแส จรัสกร กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความทนทานแตกต่างกัน สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง 2544
4. วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่ 9 ป.สัมพันธ์พาณิชย์ 2544
5. ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สถิตพงษ์ อภิเมธีธำรง การวิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Soil – Cement และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุมวลรวมภายใต้น้ำหนักบรรทุกปกติถึงหนักมาก สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง 2543
6. จิรพัฒน์ โชติกไกร การออกแบบทาง พิมพ์ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2543
6. สถาพร คูวิจิตรจารุ ปฐพีกลศาสตร์ รุ่งแสงการพิมพ์ สำนักพิมพ์ไลบรารี่ นาย พับลิซซิ่ง 2542
7. สถาพร คูวิจิตรจารุ ทดลองปฐพีกลศาสตร์ รุ่งแสงการพิมพ์ สำนักพิมพ์ไลบรารี่ นาย พับลิซซิ่ง 2541
8. ชยธันว์ พรหมศร การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี INDIRECT TENSILE STRENGTH เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์ ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง 2541
9. กมล อมรฟ้า การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว วิทยานิพนธ์ระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสร์ 2545
10. วินัย สีเที่ยงธรรม การปรับปรุงดินเหนียวเขตร้อนด้วยซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2540

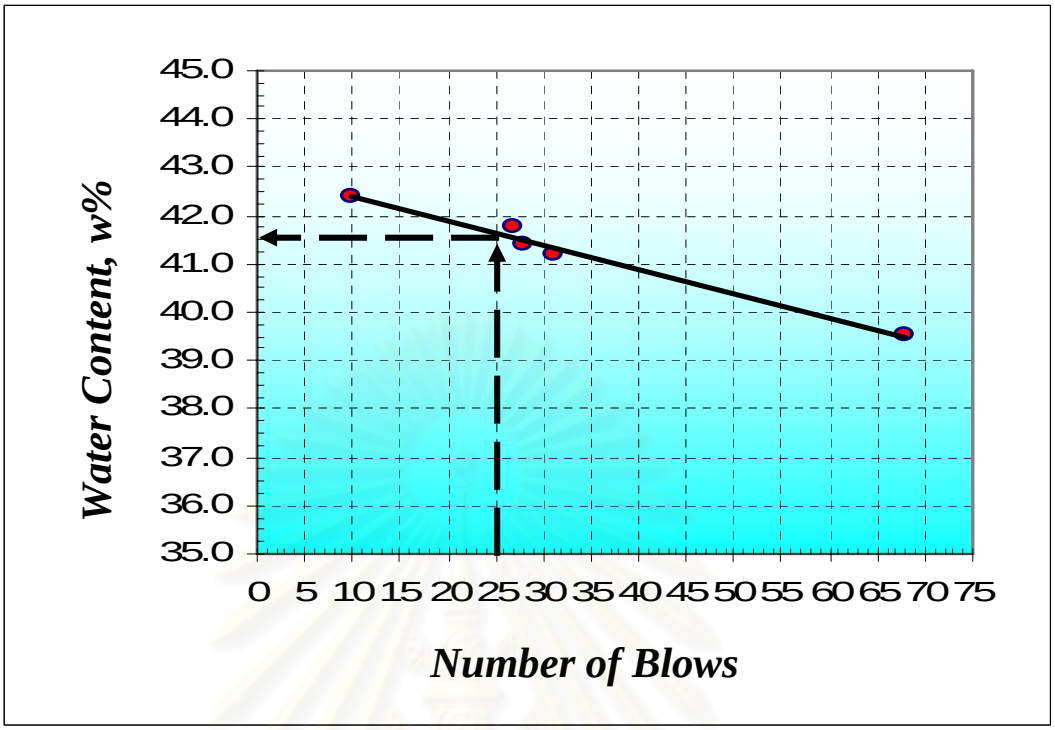
ภาษาอังกฤษ

1. Yang H. Huang. Pavement Analysis and Design. Person Education, Inc., 2004.
2. Stephen F Brown. “Achievements and Challenges in Asphalt Pavement Engineering,” Proceeding of the 8th International Conference on Asphalt Pavements (1997)
3. Per Ullidtz. “Analytical Tools for Design of Flexible Pavements,” Class Lecture Note. Technical University of Denmark.
4. Morched Zeghal. “Effect of Compaction on The Resilient Behaviour of Granular Materials: An analytical Study”. Institute for Research in Construction, Ottawa,Canada.

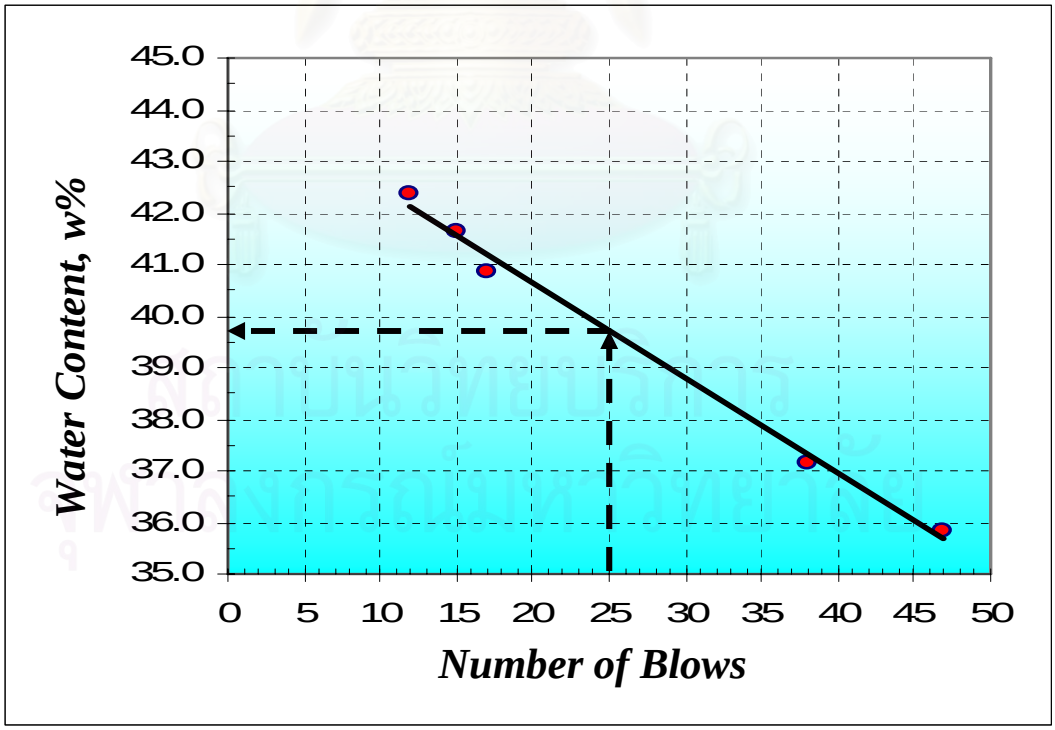
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.
ผลการทดสอบพิกัดเหลวของดินตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



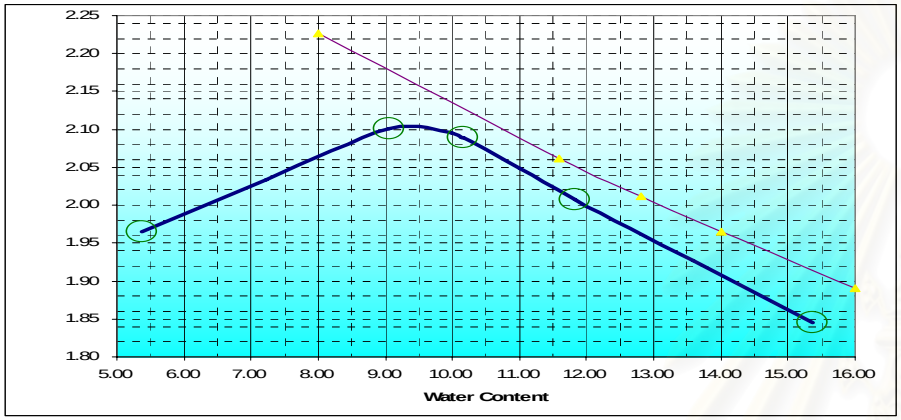
ภาพที่ ก-1 กราฟแสดงผลการหาค่าพิกัดเหลวของดินตัวอย่างภาคกลาง



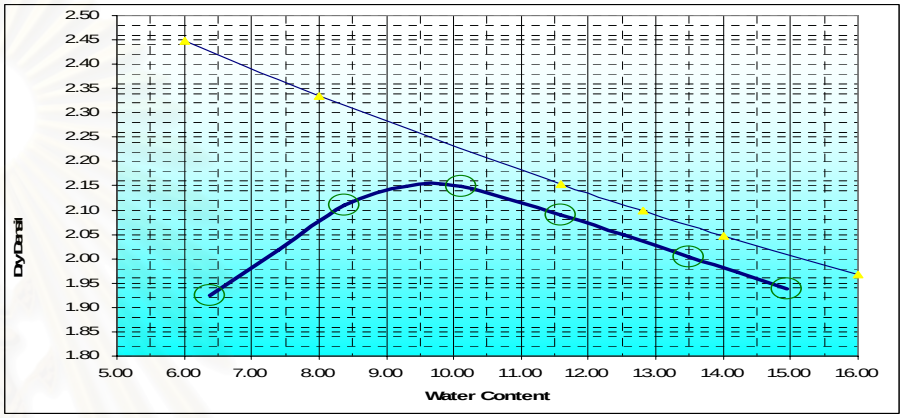
ภาพที่ ก-2 กราฟแสดงแสดงผลการหาพิกัดเหลวของดินตัวอย่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ภาคผนวก ข
เส้นโค้งการบดอัดของดินตัวอย่าง

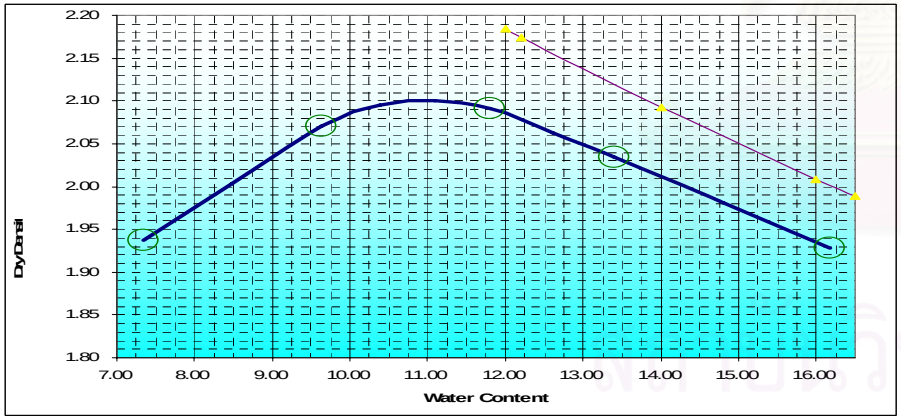
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



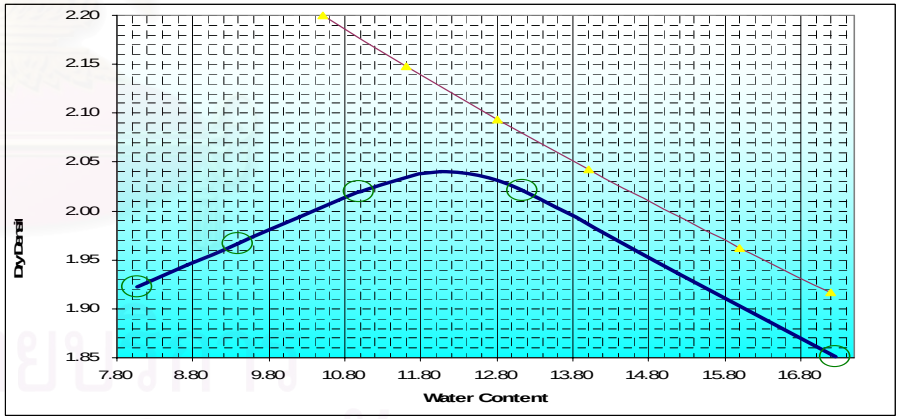
ภาพที่ ข-1 เส้นโค้งการบดอัดของตัวอย่างดินภาคกลาง
โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 2.0



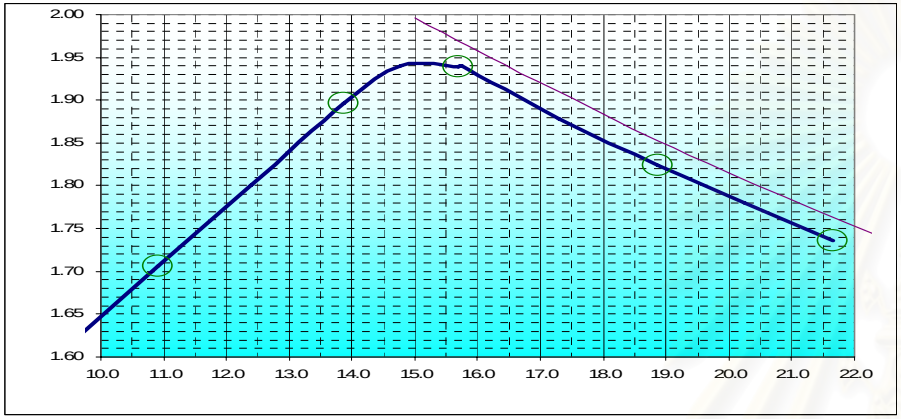
ภาพที่ ข-2 เส้นโค้งการบดอัดของตัวอย่างดินภาคกลาง
โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3.5



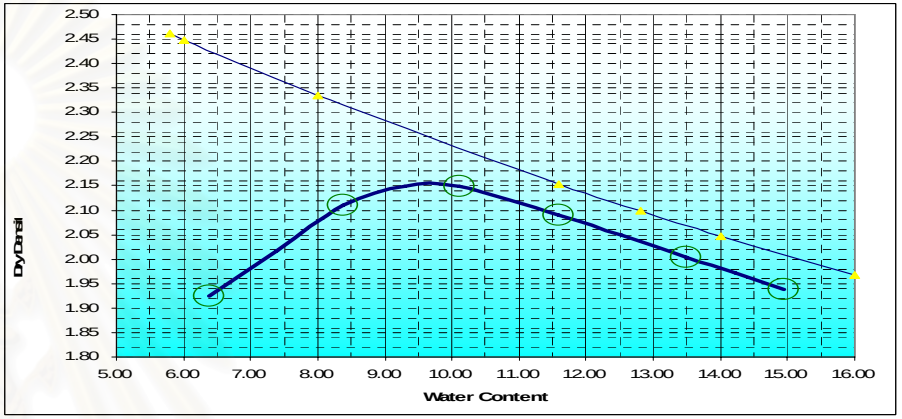
ภาพที่ ข-3 เส้นโค้งการบดอัดของตัวอย่างดินภาคกลาง
โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5.0



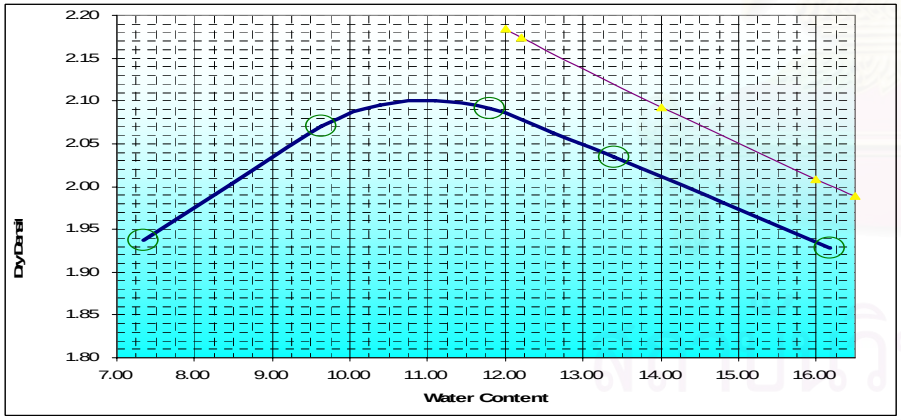
ภาพที่ ข-4 เส้นโค้งการบดอัดของตัวอย่างดินภาคกลาง
โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6.5



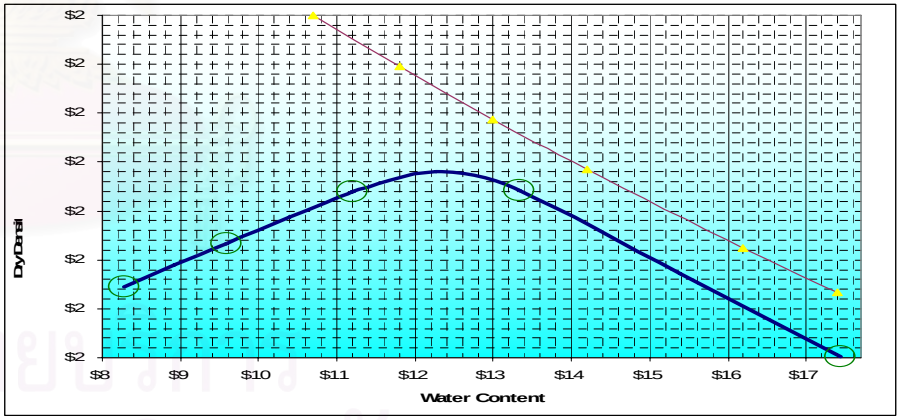
ภาพที่ ข-5 เส้นโค้งการบดอัดของตัวย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 2.0



ภาพที่ ข-6 เส้นโค้งการบดอัดของตัวย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3.5



ภาพที่ ข-7 เส้นโค้งการบดอัดของตัวย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5.0



ภาพที่ ข-8 เส้นโค้งการบดอัดของตัวอย่างดินภาคตะวันเฉียงเหนือ
โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6.5

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิษณุ พลกายนุวัตร เกิดวันอาทิตย์ที่ 27 กรกฎาคม 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2546 โดยได้รับทุนการศึกษาตลอดหลักสูตรจากการรถไฟแห่งประเทศไทย และทุนผู้ช่วยสอน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2545 - 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประสบการณ์ทำงานทำงานเคยทำงานที่บริษัท AP Engineering & Testing Inc., Pomona, Los Angeles ประเทศสหรัฐอเมริกา ในตำแหน่งผู้ทดสอบงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค สำหรับการรถไฟแห่งประเทศไทยเริ่มต้นดำรงตำแหน่งวิศวกรโยธา 6 งานออกแบบโครงสร้าง กองโครงสร้าง ศูนย์อาคารและสถานที่ ฝ่ายการช่างโยธา จากนั้นได้รับการโยกย้ายให้มาดำรงตำแหน่งวิศวกรโยธา 6 งานตรวจสอบด้านเทคนิคทางถาวร กองทางถาวร ศูนย์ทางถาวร ฝ่ายการช่างโยธา จนถึงปัจจุบัน สำหรับผลงานทางวิชาการเคยได้รับการตีพิมพ์ในหัวข้อเรื่อง การแก้ไขปัญหาคันทางรถไฟยุบตัวเนื่องมาจากดินกระจายตัวโดยวิธี JET GROUTING บริเวณเขื่อนลำตะคอง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11 ปี 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย