

พฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย



นายพนันท์ พรรณขาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556


ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

SHRINKAGE BEHAVIOUR OF SOFT CLAY TREATED WITH CEMENT AND FLY ASH



Mr. Nopphanan Phannakham

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยซีเมนต์
และเถ้าลอย

โดย

นายพนันท์ พรรณขาม

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์)

นพนันท์ พรรณขาม : พฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย.
(SHRINKAGE BEHAVIOUR OF SOFT CLAY TREATED WITH CEMENT AND FLY ASH)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 121 หน้า.

การก่อสร้างถนนบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย มักประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพของโครงสร้างชั้นทางและการทรุดตัว เนื่องจากชั้นดินเป็นดินอ่อนที่มีกำลังต่ำและการยุบตัวสูง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ วิศวกรมักเลือกออกแบบผิวทางด้วยวัสดุที่มีคุณภาพสูง เช่น เล็กอัสตุหินคลุกและดินลูกรังคู่สำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าก่อสร้างสูงและอาจไม่คุ้มทุน ในการก่อสร้างยังพบอีกว่าปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งคือการหดตัวของโครงสร้างทาง ซึ่งมักเริ่มเกิดจากไหล่ทางไปสู่การแตกตัวในแนวขนานกับถนน รอยแตกร้าวยังส่งผลให้เกิดการไหลซึมผ่านของน้ำสู่โครงสร้างด้านล่างของผิวทางได้ รวมไปถึงการสูญเสียค่ากำลังรับแรงเฉือน ค่ากำลังรับแรงอัด และเสถียรภาพอีกด้วย จึงเริ่มมีความคิดที่จะใช้ดินผสมซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้แก้ปัญหาดังกล่าว

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุโครงสร้างชั้นทาง โดยปรับปรุงคุณภาพชั้นรองพื้นทางและชั้นดินคั่นทางด้วยวัสดุผสมดินซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อลดการทรุดตัวและเพิ่มเสถียรภาพของดินเดิม สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย 1) ดินเหนียวสร้างใหม่ โดยใช้ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ทำการการสลายพันธะและสร้างตัวขึ้นใหม่ 2) พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3) เถ้าลอยจาก 2 แหล่ง คือ เถ้าลอย Class C จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเถ้าลอยต่ำกว่า Class C จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษในจังหวัดราชบุรี สำหรับสัดส่วนการผสมของดินผสมซีเมนต์จะกำหนดไว้ที่ ค่าอัตราส่วนระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (C/Wc) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ตามลำดับ สำหรับดินผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจะเลือกใช้ค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยที่เข้าไปแทนที่ซีเมนต์ปริมาณตั้งแต่ 0 - 60 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะดำเนินการทดสอบด้านกายภาพ เช่น ความถ่วงจำเพาะ ชีตจำกัดอัตราเตอร์เบิร์ก การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และการวิเคราะห์ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และทดสอบด้านกำลังด้วยการทดสอบแรงอัดแกนเดียว ส่วนการวัดการหดตัวนั้นจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย ผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์และใช้ค่า C/Wc เท่ากับ 0.3 นอกจากจะประหยัดซีเมนต์มากกว่าค่า C/Wc เท่ากับ 0.4 แล้ว ค่ากำลังยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง สำหรับค่าการหดตัวจะมีค่าน้อยสุดเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยวัดค่าการหดตัวได้เท่ากับ 4.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ C/Wc เท่ากับ 0.3 นอกเหนือจากนี้ งานวิจัยยังได้จำลองพฤติกรรมผิวทางด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยอาศัยค่าตัวแปรพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากผลการทดสอบ โดยพบว่าเมื่อใช้ดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อปรับปรุงคุณภาพชั้นรองพื้นทางและชั้นคั่นทาง จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพและลดการยุบตัวของโครงสร้างถนนได้อย่างมีนัยสำคัญ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5570247021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: CEMENT-ADMIXED CLAY / FLY ASH / UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH / SHRINKAGE

NOPPHANAN PHANNAKHAM: SHRINKAGE BEHAVIOUR OF SOFT CLAY TREATED WITH CEMENT AND FLY ASH. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUCHED LIKITLERSUANG, 121 pp.

Road embankment construction on soft clay usually faces several problems related to stability and excessive settlement issues. In particular, it can be found these problems in the Central Plain of Thailand where a thick soft clay layer underneath its structure. Civil engineers often use high quality crushed rock and lateritic soil for subbase and subgrade layer, respectively. As a result, cost of projects is relatively high and may not be worth to do. Additionally, another important problem caused surface cracking is shrinkage. Cracks can induce the water flow to the underneath structure and cause loss of shear strength of soils. This research aims to study a use of cement and fly ash stabilization to reduce the shrinkage problem.

Subbase and subgrade layers, which are replaced by the soft clay treated with cement and fly ash, were focused in this study. Materials used in this research are 1) reconstitute Bangkok clay 2) Portland cement type I 3) two sources of Fly ash: Class C from Mae Moh power plant and under class C from one industrial plant at Ratchaburi province. The mixing ratio among soil, cement and water defined by a cement per water ratio (C/W_c) was fixed at 0.3 and 0.4. The replacement ratio of fly ash to cement was varied from 0 to 60%.

Laboratory tests were carried out to determine physical and mechanical properties such as specific gravity test, Atterberg's limits, X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), and unconfined compressive test. In addition, the shrinkage measurement could loosely define using an image processing technique. The testing results indicate that using the Class C fly ash of 15% at the C/W_c of 0.3 was an optimum portion to save the use of cement. Moreover, it can be reduced the shrinkage of 4.5%. Finally, this research also simulates the behaviour of the road structure using finite element software based on parameters from laboratory. The finite element analysis results indicate that the soft clay treated with cement and fly ash can effectively increase stability and reduce settlement.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิต
เลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยเอาใจใส่ดูแล แนะนำ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือใน
ทุกๆด้าน รวมไปถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนกร ชมภูรัตน์ ที่คอยช่วยเหลือแนะนำ และให้คำปรึกษา
ทั้งยังเป็นกรรมสอบวิทยานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เดชวรสิน
สกุล และ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน ที่ได้ให้คำแนะนำและร่วมเป็นกรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทั้งในภาควิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค และชมรมค่าย
อาสาสมัครหอพักนิสิตจุฬาฯ ที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือในทุกๆด้าน

ขอบพระคุณหอพักนิสิตจุฬาฯ ที่ให้ความอนุเคราะห์ที่พักในช่วงตลอดระยะเวลาการศึกษา
ตั้งแต่ระดับปริญญาตรีจนกระทั่งระดับปริญญาโท

ขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้กำเนิดและเติบโตมาจนถึงปัจจุบันนี้ ทั้งยังได้
อบรมสั่งสอน ส่งเสียเรียนหนังสืออย่างเหน็ดเหนื่อย ทั้งยังคอยให้กำลังใจอยู่เสมอ ในทุกๆเรื่อง

หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พอจะมีประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาค้นคว้าในด้านนี้ ก็ถือให้
เป็นวิทยาทานกับท่านทั้งหลาย และขอให้ผลบุญทั้งหลายส่งให้แก่เจ้ากรรมนายเวรของข้าพเจ้า
ทั้งหลายด้วย

สุดท้ายนี้ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยดลบันดาลให้ท่านผู้มีพระคุณทั้งหลายในชีวิตของ
ข้าพเจ้าทั้งที่ได้กล่าว และไม่ได้กล่าวในที่นี้ จงมีแต่ความสุข ความเจริญ สุขภาพแข็งแรงๆ สืบไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงาน	3
1.4 แนวทางการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2	6
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 โครงสร้างทางแบบยึดหยุ่น	6
2.2 หินคลุกในประเทศไทย	7
2.3 ดินลูกรังในประเทศไทย	8
2.4 ดินเหนียวในกรุงเทพฯ	10
2.5 การปรับปรุงคุณภาพดิน	12
2.6 วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี.....	14
2.7 การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี.....	14
2.7.1 ปูนซีเมนต์ (Cement).....	15
2.7.2 เถ้าลอย (Fly Ash).....	15
2.8 การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์	15
2.8.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	17
2.9 สารปอซโซลาน.....	19
2.10 การใช้งานเถ้าลอย	20
2.11 การออกแบบดินซีเมนต์	21

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าลอย.....	22
2.13 การหดตัวของดินซีเมนต์.....	25
2.14 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing).....	26
2.15 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)	27
บทที่ 3	28
วิธีการและขั้นตอนการทดสอบ	28
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	28
3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น	28
3.3 การทดสอบ	31
3.3.1 การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียว	31
3.3.2 การทดสอบ Atterberg's Limit.....	31
3.3.3 การสร้างและทดสอบดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstitute Clay).....	32
3.3.4 การทดสอบการอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียว (Oedometer Testing).....	33
3.3.5 X-ray diffractometer (XRD).....	34
3.3.6 Scanning Electron Microscope (SEM).....	35
3.3.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression test).....	36
3.3.8 การทดสอบการหดตัวแห้งด้วยวิธีทางภาพถ่าย (Drying Shrinkage Test by Digital Image Processing).....	40
บทที่ 4	45
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	45
4.1 บทนำ	45
4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ ดินเหนียวอ่อน ซีเมนต์ และเถ้าลอย ที่นำมาใช้	45
4.2.1 ผลการทดสอบดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstitute Clay Test).....	45
4.2.2 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Test).....	45
4.2.3 ผลการทดสอบ Atterberg's limits	46
4.2.4 ผลการทดสอบ XRF (X-ray fluorescence spectrometry).....	47
4.2.5 ผลการทดสอบ SEM (Scanning Electron Microscope).....	48

4.2.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test).....	51
4.2.6.1 ผลการทดสอบดินเหนียวผสมซีเมนต์.....	51
4.2.6.2 ผลการทดสอบดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	54
4.2.6.3 ผลการทดสอบดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิต กระดาษ จังหวัดราชบุรี.....	59
4.2.7 ผลการทดสอบการหดตัวด้วยวิธีทางภาพถ่าย (Shrinkage Test by Digital Image Processing).....	64
4.3 สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D	68
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง	68
4.3.2 ค่าตัวแปร (Parameters) ที่ใช้ในแบบจำลอง	69
4.3.3 กระบวนการจำลองการก่อสร้างและใช้งานโครงสร้างถนน Unpaved	71
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D.....	73
บทที่ 5	75
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก.....	79
ภาคผนวก ข.....	82
ภาคผนวก ค.....	86
ภาคผนวก ง.....	90
ภาคผนวก จ.....	92
ภาคผนวก ฉ.....	102
ภาคผนวก ช.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	121

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การทรุดตัวของถนนบนชั้นดินอ่อน.....	2
รูปที่ 1.2 ภาพรวมแนวทางการดำเนินงาน.....	4
รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างทางแบบยึดหยุ่น.....	6
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างชั้นทาง.....	7
รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของดินลูกรังทั่วโลก.....	9
รูปที่ 2.4 ข้อมูลชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	11
รูปที่ 2.5 วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่แปรผันตามขนาดของเม็ดดิน.....	14
รูปที่ 2.6 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย.....	16
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	18
รูปที่ 2.8 ลักษณะของดินผสมซีเมนต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	19
รูปที่ 2.9 Chemical Requirement.....	21
รูปที่ 2.10 กราฟเส้นโค้งการบดอัดของดินที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ.....	23
รูปที่ 2.11 ค่ากำลังของตัวอย่างอายุ 28 วัน.....	24
รูปที่ 2.12 การแตกร้าวของถนน.....	25
รูปที่ 2.13 การซึมผ่านของน้ำจากชั้นล่างขึ้นสู่ผิวบนจากรอยการหดตัวของโครงสร้างทาง.....	26
รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายดินตัวอย่างที่ถูกตัดแต่งขอบ.....	26
รูปที่ 2.15 ค่าจากทดสอบการหดตัว โดยวิธี Manual Measurement และ Digital Image Technique.....	27
รูปที่ 3.1 แหล่งที่มาของวัสดุดิบที่ใช้ในการศึกษา.....	29
รูปที่ 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
รูปที่ 3.3 สถานภาพของมวลดินโดยขึ้นกับปริมาณความชื้นในมวลดิน.....	31
รูปที่ 3.4 เครื่อง Large Consolidometer.....	32
รูปที่ 3.5 ลักษณะทางกายภาพ การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ ของ Consolidometer.....	37
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและขั้นตอนการทดสอบ.....	38
รูปที่ 3.8 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการหดตัวแห้ง.....	41
รูปที่ 3.9 วิธีการทางภาพถ่ายเพื่อหาจำนวนพิกเซลโดยโปรแกรม Photoshop CS4 ของตัวอย่างอายุ 28 วัน.....	42
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio กับ normal stress.....	46
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	49
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 7000 เท่า.....	50

รูปที่ 4.4	กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามการเพิ่มปริมาณน้ำของดินซีเมนต์.....	52
รูปที่ 4.5	โมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามการเพิ่มปริมาณน้ำของดินซีเมนต์.....	53
รูปที่ 4.6	การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดตามอายุบ่มตัวอย่างของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	55
รูปที่ 4.7	การเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามอายุบ่มตัวอย่างของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	56
รูปที่ 4.8	กำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	57
รูปที่ 4.9	ค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	58
รูปที่ 4.10	การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดตามอายุบ่มตัวอย่างของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ.....	61
รูปที่ 4.11	ค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามอายุบ่มตัวอย่างของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ.....	60
รูปที่ 4.12	กำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ.....	62
รูปที่ 4.13	ค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ.....	63
รูปที่ 4.14	ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างตามเวลาของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากอำเภอมะเมาะ.....	65
รูปที่ 4.15	ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างตามเวลาของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากอำเภอมะม่วง.....	66
รูปที่ 4.16	ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์.....	67
รูปที่ 4.17	ลักษณะของชั้นดินและโครงสร้างทาง.....	68
รูปที่ 4.18	แรงดันน้ำของชั้นดินกรุงเทพฯ.....	69
รูปที่ 4.19	ภาพหน้าตัดของโครงสร้างถนนแสดงดัง.....	71
รูปที่ 4.20	ลักษณะของรถบรรทุกและแรงที่กระทำ.....	72
รูปที่ 4.21	ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D.....	72

รูปที่ จ-1 จุดวิบัติ (Plastic point)..... 94

รูปที่ จ-2 ลักษณะการเคลื่อนตัว (Total displacement) ของช่วงการก่อสร้าง..... 97

รูปที่ จ-3 ลักษณะการวิบัติของช่วงการก่อสร้าง..... 100

รูปที่ ฉ-1 จุดวิบัติ (Plastic point) ของช่วงการใช้งานระยะแรก..... 104

รูปที่ ฉ-2 ลักษณะการเคลื่อนตัว (Total displacement) ของช่วงการใช้งานระยะแรก..... 107

รูปที่ ฉ-3 ลักษณะการวิบัติของช่วงการใช้งานระยะแรก..... 110

รูปที่ ช-1 จุดวิบัติ (Plastic point) ของช่วงการใช้งานระยะยาว..... 114

รูปที่ ช-2 ลักษณะการเคลื่อนตัว (Total displacement) ของช่วงการใช้งานระยะยาว..... 116

รูปที่ ช-3 ลักษณะการวิบัติของช่วงการใช้งานระยะยาว..... 119



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตระแกรงแบบล้าง.....	8
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินลูกรังในประเทศไทย.....	9
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตระแกรงแบบล้าง.....	10
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	11
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	12
ตารางที่ 2.6 วิธีปรับปรุงคุณภาพดินชนิดต่างๆ.....	13
ตารางที่ 2.7 ชนิดของ Cement-Treated Soil.....	16
ตารางที่ 2.7 วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ.....	20
ตารางที่ 2.8 เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์.....	22
ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรม.....	28
ตารางที่ 3.2 แผนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมดินเหนียวซีเมนต์.....	39
ตารางที่ 3.3 แผนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย.....	39
ตารางที่ 3.4 แผนการทดสอบการหดตัวของวัสดุมวลรวมดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย.....	44
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ Atterberg's limits.....	46
ตารางที่ 4.2 ปริมาณสารประกอบต่างๆจากการทดสอบ XRF.....	47
ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรชั้นดินกรุงเทพฯ.....	70
ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรชั้นโครงสร้างทาง.....	71
ตารางที่ 4.5 กรณีศึกษาในการจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D.....	73
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D.....	74
ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างที่อายุตัวอย่าง 7 วัน.....	79
ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างที่อายุตัวอย่าง 28 วัน.....	80
ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ เถ้าลอยจากอำเภอมะแมะ ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 7 วัน.....	82
ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ เถ้าลอยจากอำเภอมะแมะ ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน.....	83
ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ เถ้าลอยจากอำเภอมะแมะ ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 60 วัน.....	84
ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ เถ้าลอยจากอำเภอนาทม ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 7 วัน.....	86
ตารางที่ ค-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ เถ้าลอยจากอำเภอนาทม ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน.....	87
ตารางที่ ค-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ เถ้าลอยจากอำเภอนาทม ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 60 วัน.....	88

ตารางที่ ง-1 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	90
ตารางที่ ง-2 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรม ผลิตกระดาษ.....	90



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สืบเนื่องจากมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างทางในประเทศไทย ได้มีการกำหนดคุณภาพของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างโครงสร้างทาง เช่น หินคลุกหรือดินลูกรังที่ใช้ทำชั้นพื้นทาง (Base layer) และชั้นรองพื้นทาง (Subbase layer) ให้เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้ และหลายครั้งพบว่าวัสดุจากแหล่งวัสดุท้องถิ่นที่มีอยู่อาจมีคุณสมบัติไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ประกอบกับแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพสูงอาจอยู่ห่างไกลจากสถานที่ก่อสร้างและมีราคาค่อนข้างสูง ด้วยปัญหาและข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีการนำเทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil stabilization) มาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering property) ของวัสดุท้องถิ่นให้สามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางได้ เช่น การปรับปรุงดินด้วยการผสมปูนขาวหรือซีเมนต์ (Lime or cement mixing) แต่เนื่องจากปูนขาวเป็นสารเคมีที่มีความเป็นเบสสูงและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน ดังนั้นในการปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทางจึงมักนิยมใช้การผสมดินซีเมนต์ (Soil-cement mixing) ประกอบกับมีเทคโนโลยีการหมุนเวียนวัสดุผิวทาง (Pavement recycling) ที่นำวัสดุชั้นผิวทางและชั้นทางที่เสื่อมสภาพแล้ว มาบดอัดพร้อมกับผสมซีเมนต์เพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นทางใหม่ที่มีคุณภาพสูงขึ้น โดยกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการผสมดินซีเมนต์จะต้องมีการศึกษาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อการบดอัดดิน (Soil compaction)

ปัญหาอีกประการหนึ่งที่พบบ่อยในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการก่อสร้างบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลาง คือ ปัญหาการทรุดตัวของถนนเนื่องจากดินคันทาง (Subgrade layer) ซึ่งเป็นดินอ่อนที่มีกำลังค่อนข้างต่ำและค่าการยุบตัวสูง ประกอบกับชั้นดินเหนียวอ่อนที่พบมักจะมีควมลึก 10 – 15 เมตร จึงทำให้ในปัจจุบันถนนบางสายยังเกิดการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง โดยจากผลการตรวจสอบของกรุงเทพมหานครในปี 2555 พบว่าจุดเสี่ยงต่อการยุบตัวและทรุดตัวของโครงสร้างถนนทั้งหมด 144 จุด ใน 32 เขต ภายในกรุงเทพมหานคร โดยยังไม่นับรวมในแถบปริมณฑล และยังพบว่าบางจุดได้เกิดการทรุดตัวและวิบัติแล้วเนื่องจากโครงสร้างทางไม่มีเสถียรภาพ เช่น ที่จังหวัดปทุมธานี และอยุธยา แสดงดังรูปที่ 1.1 และสำหรับการแก้ปัญหาในบางโครงการได้เริ่มมีการใช้วิธีการผสมลึก (Deep mixing) โดยใช้น้ำปูนซีเมนต์ (Cement slurry) เข้าไปกวนผสมกับดินให้แข็งตัวเสมือนเป็นเสาซีเมนต์ (Cement column) กระบวนการก่อสร้างจะต้องมีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมปูนซีเมนต์ และการเจาะเก็บตัวอย่างหาค่ากำลังรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ที่ระยะเวลาบ่ม (Curing time) ต่างๆ กันเพื่อเป็นฐานรากให้กับโครงสร้างของถนนเพื่อลดการทรุดตัว แต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเพราะยังมีการศึกษาค้นคว้าถึงพฤติกรรมและผลกระทบไม่มากนัก

การปรับปรุงคุณภาพดินทั้งสองวิธี ไม่ว่าจะเป็นการผสมดินซีเมนต์ หรือเสาซีเมนต์ จะต้องใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในปริมาณมาก โดยปกติแล้วจะออกแบบอยู่ระหว่างร้อยละ 5 – 10 สำหรับ

การผสมดินซีเมนต์ และอยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 30 สำหรับเสาซีเมนต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินเดิมด้วย ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่มีราคาค่อนข้างแพง จึงได้มีการศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้ง เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice ash) หรืออาจใช้เถ้าที่เกิดจากการเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Biomass ash) เพื่อทดแทนและ/หรือลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ทั้งนี้ในบางกรณีอาจทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นได้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)



รูปที่ 1.1 การทรุดตัวของถนนบนชั้นดินอ่อน (a) บางปะหัน ออยุธยา (b) คลองหลวง ปทุมธานี

นอกจากนั้นยังพบว่า พฤติกรรมอีกด้านหนึ่งที่สำคัญก็คือการหดตัว (Shrinkage) ของดินซีเมนต์ โดยหลังจากทำการผสมดินเข้ากับซีเมนต์แล้ว น้ำส่วนหนึ่งที่ผสมเข้าไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัว และน้ำส่วนหนึ่งจะระเหยออกทางผิวบน หลังจากนั้นน้ำก็จะค่อยๆ ระเหยออกจากตัวอย่างตามเงื่อนไขของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในอากาศ สภาวะการหดตัวของดินซีเมนต์นั้นจะก่อให้เกิดการแตกร้าวในแนวขวางกับโครงสร้างถนน (Transverse crack) ซึ่งเริ่มเกิดจากไหล่ทางก่อนแล้วนำไปสู่การแตกร้าวในแนวขนานกับโครงสร้างถนน (Longitudinal crack) ในลำดับต่อมา ดังนั้นอิทธิพลของการหดตัวของวัสดุนั้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึง ในวงการงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคแทบจะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวไปไม่ได้ เพราะการแตกร้าวยังส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ รวมไปถึงการสูญเสียค่ากำลังรับแรงเฉือน ค่ากำลังรับแรงอัด และเสถียรภาพของดิน ทั้งนี้ในปัจจุบันเชื่อกันว่าการลดการหดตัวนั้นต้องป้องกันการระเหยออกของน้ำอย่างมิดชิด หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของดินนั้นเสียก่อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาโครงสร้างชั้นทางโดยใช้วัสดุผสมดินซีเมนต์เพื่อลดการทรุดตัวและเพิ่มเสถียรภาพให้กับโครงสร้างสร้าง และยังได้นำเถ้าลอยที่ได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าท่าม่วง มาใช้เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์อีกด้วย และยังไปกว่านั้นยังได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการหดตัวของดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอย

1.2 วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์พัฒนาโครงสร้างชั้นทางที่มีชั้นคันทางเป็นดินเหนียวอ่อน โดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นส่วนผสม มีวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมทาง
- 2) ศึกษาการหดตัวของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมทาง
- 3) ศึกษาเสถียรภาพและการทรุดตัวของโครงสร้างทางที่เกิดขึ้นทั้งในระยะสั้นและระยะยาวที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยโดยการใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลข

1.3 ขอบเขตงาน

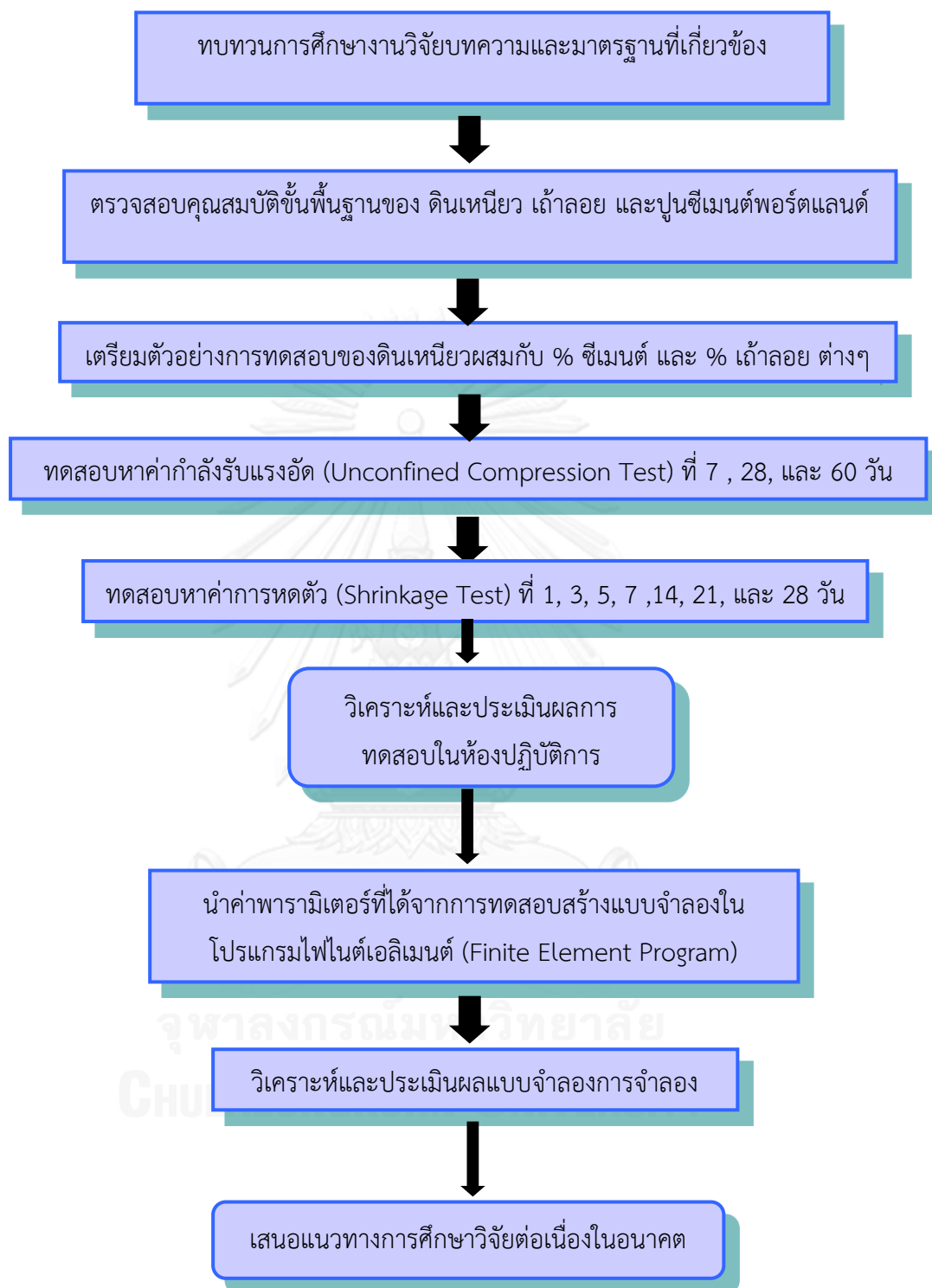
วิทยานิพนธ์พัฒนาโครงสร้างชั้นทางที่มีชั้นคันทางเป็นดินเหนียวอ่อน โดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ประกอบด้วยขอบเขตของงานดังต่อไปนี้

- 1) รวบรวมงานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย (เถ้าลอยจาก 2 แหล่ง คือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ SCG)
- 2) ศึกษาพฤติกรรมด้านวิศวกรรมของ ดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยขั้นต้น ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน การทดสอบการหดตัวโดยวิธีทางภาพถ่าย (Image Processing Method) การทดสอบการทดสอบแรงกดทางเดียว (Unconfined Compression test) โดยคำนึงถึงสัดส่วนปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ใช้ผสม (กล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3 เรื่อง วิธีและขั้นตอนการทดสอบ)
- 3) ศึกษาพฤติกรรมและผลกระทบของดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยโดยสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)
- 4) วิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการและจำลองแบบโครงสร้างถนนโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4 แนวทางการดำเนินงาน

แนวทางการดำเนินงานวิทยานิพนธ์พัฒนาโครงสร้างชั้นทางที่มีชั้นคันทางเป็นดินเหนียวอ่อน โดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ดังที่แสดงในรูปที่ 1.2 ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ทบทวนการศึกษางานวิจัยบทความและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
- 2) ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เถ้าลอย และปูนซีเมนต์
- 3) เตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยการผสมดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ด้วยการแปรเปลี่ยนค่าร้อยละของปูนซีเมนต์ และร้อยละของเถ้าลอย



รูปที่ 1.2 ภาพรวมแนวทางการดำเนินงาน

- 4) การทดสอบการทดสอบแรงกดทางเดียว เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือน ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ และเถ้าลอย
- 5) ทำการทดสอบเพื่อตรวจวัดการหดตัวโดยวิธีทางภาพถ่าย ของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอย
- 6) นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดสอบข้างต้น มาแทนที่พารามิเตอร์ของดินชั้นคันทาง ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อน โดยสร้างแบบจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วทำการวิเคราะห์และประเมินผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิทยานิพนธ์พัฒนาโครงสร้างชั้นทางที่มีชั้นคันทางเป็นดินเหนียวอ่อน โดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นส่วนผสม สามารถขยายผลการศึกษาต่อในอนาคตได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ได้ทราบถึงค่ากำลังการรับแรงของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยด้วยซีเมนต์ (Cement) และดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยด้วยซีเมนต์ (Cement) และเถ้าลอย (Fly Ash) จากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และอำเภอท่าม่วงจังหวัดราชบุรี
- 2) ได้ทราบถึงพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยด้วยซีเมนต์ (Cement) และดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยด้วยซีเมนต์ (Cement) และเถ้าลอย (Fly Ash) โดยใช้วิธีการทางภาพถ่าย (Image processing)
- 3) การศึกษาแบบจำลองโครงสร้างถนนทั้งก่อนและหลังจากการปรับปรุงคุณภาพดินชั้นคันทางที่เป็นดินเหนียวอ่อนด้วย ซีเมนต์ (Cement) และเถ้าลอย (Fly Ash) โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Program) ทำให้ทราบถึงเสถียรภาพและการทรุดตัวของโครงสร้าง และยังสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้โครงการสร้างถนนในแถบที่ราบลุ่มภาคกลางได้ในอนาคต
- 4) จากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างถนนโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วยังทำให้ทราบถึงปริมาณการแทนที่ของดินที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะสามารถลดค่าใช้จ่ายของโครงการได้ในอนาคต

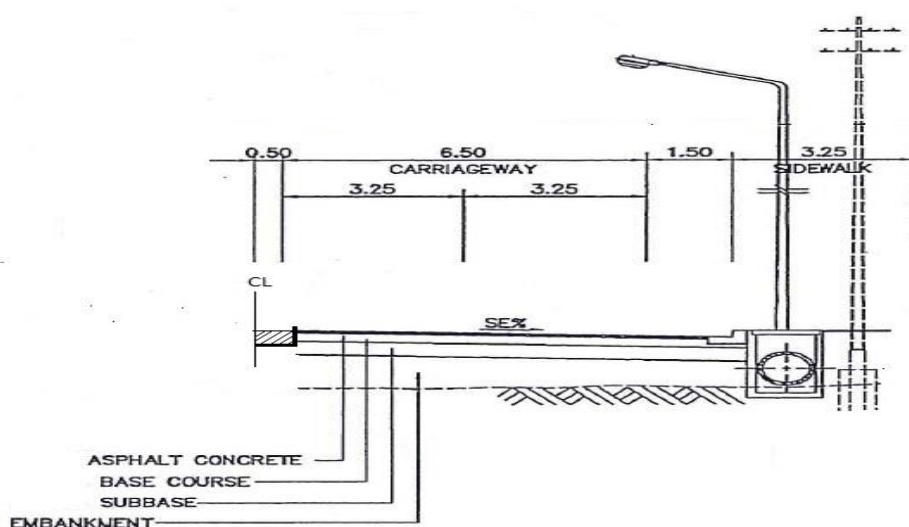
บทที่ 2

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

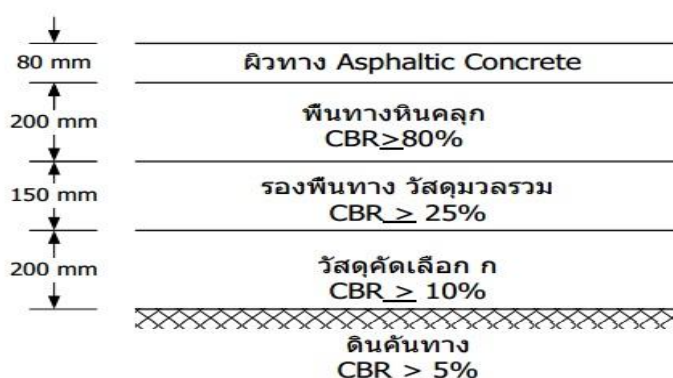
2.1 โครงสร้างทางแบบยืดหยุ่น

โครงสร้างถนนแบบยืดหยุ่น (Flexible pavement) จะมีลักษณะเป็นชั้นทางแบบยืดหยุ่น ประกอบไปด้วย ชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphaltic concrete) ชั้นพื้นทาง (Base) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นดินคั่นทาง (Subgrade) ตามลำดับ โดยเรียงจากชั้นบนลงชั้นล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยวัสดุที่มีคุณภาพดีจะถูกก่อสร้างไว้บริเวณชั้นบน เนื่องจากต้องรองรับความเค้น (Stress) ค่ามากกว่าและวัสดุที่มีคุณภาพด้อยกว่าจะถูกก่อสร้างไว้บริเวณชั้นล่างต่อไป เนื่องจากต้องรองรับความเค้นค่าน้อยกว่า

โดยมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างทางในประเทศไทย ได้มีการกำหนดคุณภาพของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างโครงสร้างทาง เช่น หินคลุกหรือดินลูกรังที่ใช้สร้างชั้นพื้นทาง (Base layer) และชั้นรองพื้นทาง (Subbase layer) ให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ตัวอย่างชั้นทาง (คู่มือออกแบบกรรมทางหลวง) แสดงดังรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตามในบางพื้นที่อาจไม่สามารถหาหินลูกรังและหินคลุกที่มีนั้น มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่นำมาใช้ในการก่อสร้างถนนได้ ประกอบกับแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพสูง อาจอยู่ห่างไกลจากสถานที่ก่อสร้างจึงทำให้การขนส่งเป็นไปอย่างลำบากส่งผลให้ค่าขนส่งมีราคา ค่อนข้างสูง ด้วยปัญหาและข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีการนำเทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil stabilization) มาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering property) เช่น ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังที่คุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานให้มีประสิทธิภาพในการรับแรงมากขึ้นจนมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับดินที่มีคุณภาพตามมาตรฐานโดยการใช้สารผสมเพิ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างทางแบบยืดหยุ่น



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างชั้นทาง (คู่มือออกแบบกรรมทางหลวง)

2.2 หินคลุกในประเทศไทย

พบว่าได้มีการนำหินคลุก (Crush Rock Base) มาใช้ทำพื้นทางในประเทศไทยเป็นครั้งแรก บนถนนทางหลวงมิตรภาพ หมายเลข 2 เส้นทางระหว่าง สระบุรี- นครราชสีมา ต่อจากนั้นมา พื้นทางหินคลุกก็เป็นที่นิยม แพร่หลายมาจนถึงปัจจุบัน หลังจากการก่อสร้างทางสายมิตรภาพ หมายเลข 2 เส้นทางระหว่าง สระบุรี- นครราชสีมา ก็ได้มีการออกแบบพื้นทางโดยใช้หินที่มีขนาดคละกัน (Soil Aggregate Type) ที่นิยมเรียกกันว่าหินคลุกเพราะในการย่อยหินจะใช้เครื่องจักรจำนวนมากขึ้นทำให้สามารถนำหินที่ย่อยแล้วมาใช้งานได้แทบทั้งหมด ทำให้ราคาของวัสดุถูกลง อีกทั้งการทำงานก่อสร้างมีการใช้เครื่องจักรมาแทนแรงงานคนมากขึ้น การควบคุมการก่อสร้างและควบคุมคุณภาพงาน และความแน่นของวัสดุสม่ำเสมอตลอดชั้นทาง ได้มีการจัดทำเป็นมาตรฐานงานทางชั้นพื้นทาง หมายเลขมาตรฐานที่ ทล.-ม. 201/25 “มาตรฐานพื้นทางหินคลุก”

ดังนั้นหินคลุกจึงหมายถึง วัสดุซึ่งมีหินขนาดคละกันสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก เพื่อนำมาเสริมชั้นรองพื้นทางหรือชั้นคันทาง ซึ่งตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 201/25 “มาตรฐานพื้นทางหินคลุก” กล่าวไว้ดังนี้ต้องเป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาดไม่ผุและปราศจากวัสดุอื่นเจือปน ซึ่งได้จากจากแหล่งที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงแล้ว วัสดุจำพวกแผ่นหิน (Shale) ห้ามใช้ ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุพื้นทางหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำพื้นทางหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) มีการสึกหรอ เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 202 “วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion” ไม่เกินร้อยละ 40
- 2) ไม่มีส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 213 “วิธีทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลองทุกครั้งที่น่าไปใช้
- 3) ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) กรณีใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปน เพื่อปรับปรุงคุณภาพจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

- 4) มีขนาดคละที่ดีที่สุด และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตระแกรงแบบล่าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตระแกรงแบบล่าง

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	A	B
50 (2 นิ้ว)	100	100
25.0 (1 นิ้ว)	-	75-95
9.5 (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75
4.75 (เบอร์ 4)	25-55	30-60
2.00 (เบอร์ 10)	15-40	20-45
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20

- 5) ส่วนละเอียดที่ผ่านตระแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสามของส่วนละเอียดที่ผ่านตระแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
- 6) มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 102 “วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
- 7) มีค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 103 “วิธีการทดสอบหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Index” ไม่เกินร้อยละ 6
- 8) มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 109 “วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟซทรีตเมนต์ที่มีความหนาแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตาม ทล.-ท. 108

2.3 ดินลูกรังในประเทศไทย

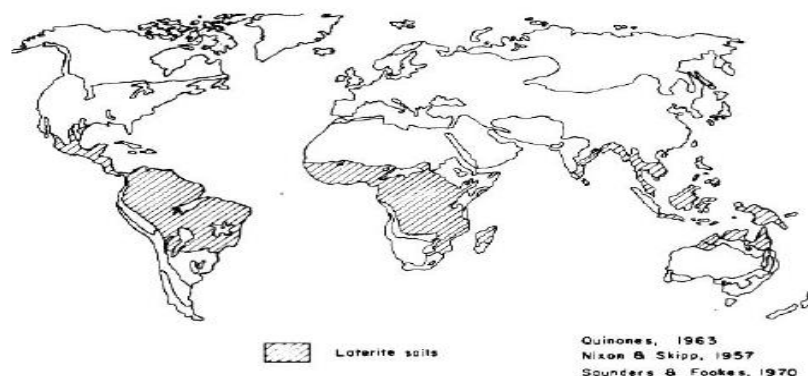
ดินลูกรังเกิดจากการผุพังของหินในสภาพอากาศร้อนและมีความชื้นสูง โดยดินลูกรังมีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ สามารถแข็งตัวเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ และมักมีสีแดงเพราะมีออกไซด์ของเหล็กปนอยู่ ซึ่งรูปที่ 2.3 แสดงการกระจายตัวของดินลูกรังที่พบทั่วโลก สำหรับดินลูกรังที่พบในประเทศไทยนั้น ธีรชาติและวุฒิชัย (2528) สรุปไว้ว่า ดินลูกรังในประเทศไทยจะพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยพบเป็นบริเวณกว้างตลอดทั้งภาค โดยดินลูกรังในประเทศไทยสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ A-2-4 A-2-6 และ A-2-7 ตามมาตรฐานของ AASHTO หรือจะเป็นประเภท GW GP และ SW ตามมาตรฐาน USC โดยตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของดินลูกรังในประเทศไทย ดินลูกรังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามการกำเนิด (Hongnoi, 1969) ดังนี้

- 1) ดินลูกรังปฐมภูมิ (Primary lateritic soils) คือ ดินลูกรังที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบหลัก และเกิดอยู่กับที่เหนือหินเดิม เหล็กที่เป็นส่วนประกอบหลักได้จากธาตุจำพวกเฟอร์โร

- แมกนีเซียม (Ferro – magnesium) ที่มีมากอยู่ในหินชั้นล่างและเคลื่อนที่มาสะสมมากในบริเวณชั้นบน ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน การเกิดดินลูกรังประเภทนี้ในประเทศไทยมักเกิดเป็นชั้นๆ จากผิวดินจนถึงชั้นหินเดิม โดยค่าขีดจำกัดอัตรเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limits) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกจากชั้นดินลูกรังถึงชั้นหินเดิม
- 2) ดินลูกรังทุติยภูมิ (Secondary lateritic soils) คือ ดินลูกรังที่เกิดขึ้นจากเคลื่อนที่จากหินเดิม โดยน้ำใต้ดินจะทำการเพิ่มออกไซด์ในดินทำให้ดินแข็งตัวขึ้น ดินลูกรังประเภทนี้จะไม่แบ่งเป็นชั้นๆ และเหล็กออกไซด์สีแดงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เหล็กออกไซด์ของดินประเภทนี้จะกระจายอยู่ในมวลดินมากกว่าดินประเภทแรก มักเกิดล้อมรอบกรวดหรือหินที่แตกหัก ทำให้ดินลูกรังประเภทนี้มักมีขนาดใหญ่มีความแข็งแรงแตกต่างกัน ขีดจำกัดอัตรเตอร์เบอร์กของดินลูกรังประเภทนี้จะมีค่าน้อยกว่าดินประเภทแรก

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินลูกรังในประเทศไทย (Morrison, 1965)

คุณสมบัติ	ต่ำสุด	สูงสุด
% ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	0	66
ขีดจำกัดเหลว	18	97
ดัชนีพลาสติก	NP	51
ดัชนีกลุ่ม	0	10
ความถ่วงจำเพาะ	2.59	3.20
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (lb/ft ³)	118	114.5
ปริมาณน้ำในมวลดิน (%)	7.0	13.4
California bearing ratio (%)	7	60
การบวมตัว (%)	0.1	55
LA (%)	20	60
การจำแนกประเภทดินตามมาตรฐาน AASHTO	A-1-a	A-7-6



รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของดินลูกรังทั่วโลก

สำหรับมาตรฐานดินลูกรังที่ใช้ในประเทศไทยนั้นอ้างอิงตามมาตรฐานทางหลวงชนบท มทข. 206-2545 โดยในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุดินลูกรังไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) ปราศจากก้อนดินเหนียว (Clay Lump) Shale รากไม้ หรือวัชพืชอื่น ๆ
- 2) ขนาดวัสดุใหญ่สุดต้องไม่โตกว่า 5 เซนติเมตร
- 3) ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่มากกว่า 2/3 ของขนาดผ่านตะแกรง เบอร์ 40
- 4) ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่า 35
- 5) ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) อยู่ในระหว่าง 4-11
- 6) ค่าจำนวนส่วนร้อยละของความสึกหรอ (Percentage of wear) ไม่มากกว่า 60
- 7) ค่า CBR จากห้องทดลอง ไม่น้อยกว่า 30 หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบ
- 8) มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง

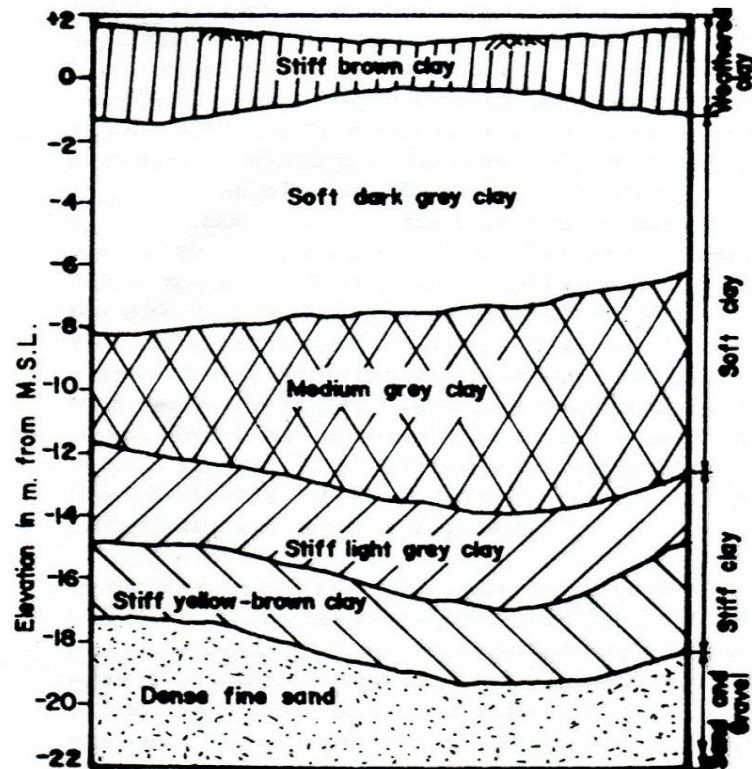
ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล			
	ชนิด ก	ชนิด ข	ชนิด ค	ชนิด ง
50 (2 นิ้ว)	-	-	-	-
25.0 (1 นิ้ว)	100	100	100	100
9.5 (3/8 นิ้ว)	50-85	50-85	50-85	50-85
4.75 (เบอร์ 4)	25-65	25-65	25-65	25-65
2.00 (เบอร์ 10)	25-50	25-50	25-50	25-50
0.425 (เบอร์ 40)	15-30	15-30	15-30	15-30
0.075 (เบอร์ 200)	8-15	8-15	8-15	8-15

2.4 ดินเหนียวในกรุงเทพฯ

ดินเหนียวเป็นดินที่แสดงพฤติกรรมแบบมีความเชื่อมแน่น (Cohesiveness) และสภาพพลาสติก (Plasticity) ขนาดของดินเหนียวซึ่งการจัดหมวดหมู่ของดินเหนียวส่วนใหญ่จะนิยามขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร (μm) แร่ดินเหนียวเป็นสารโครงสร้างผลึก (Crystalline) ที่มีโครงสร้างเฉพาะแบบแผ่น (Sheet) โดยประกอบด้วยอนุภาคชนิดเพลต (Plate) (สุเชษฐ์, 2551)

ลักษณะเฉพาะของดินเหนียวกรุงเทพฯ (Characteristic of Bangkok Clay) จากงานวิจัยและการศึกษาในอดีตหลายพื้นที่ ทำให้ทราบว่าดินเหนียวกรุงเทพฯมีคุณสมบัติทั่วไปที่ใกล้เคียงกัน เช่น การศึกษาชั้นดินบริเวณแม่น้ำเจ้าพระยาของชัย มุกตพันธุ์ (2510) ได้แสดงข้อมูลของชั้นดิน ดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 ข้อมูลชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ (ชัย มุกตพันธุ์, 2510)

จากงานวิจัยของ คิม (1991) แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Kim, 1991)

Natural water content (%)	81
Liquid limit (%)	98
Plastic limit (%)	37
Plasticity index (%)	61
Liquidity index	0.73
Average unit weight (kN/m^3)	14.8
Specific gravity	2.69
Clay content (%)	70
Silt content (%)	24
Sand content (%)	6

ข้อมูลจากงานวิจัยของสมชาย อัครพงศ์พิสัย (2513) แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ ในชั้นดินทับถม (Weathered layer) และชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ (สมชาย อัครพงศ์พิสัย, 2513)

Properties	Typical Range	
	* Weathered Clay	** Soft Clay
Particle Size Distribution		
Sand 2.0 - 0.06 mm (%)	1-2	1-3
Silt 0.06 - 0.002 mm (%)	43 - 47	38-43
Clay < 0.002mm (%)	52-56	54-61
Natural Water Content, w (%)	71-85	77-91
Liquid Limit, LL (%)	81-88	82-94
Plastic Limit, PL (%)	33-36	35-39
Plasticity Index, PI (%)	45-52	45-58
Liquidity Index, LI (%)	0.72-0.96	0.80-1.00
Activity	0.87-0.92	0.77-1.01
Specific Gravity	2.67-2.69	2.66-2.69
Total Unit Weight (t/m ²)	1.56-1.9	1.50-1.52
Sensitivity		
-Field Vane Shear	3-4	3-8
-Laboratory Vane Shear	4-8	3-6
-Unconfined Compression Test	4-12	4-14
Color	Dark Grey	
Consistency	Soft	

* Depth from 2.50-4.50 m below existing ground surface ** Depth from 4.50-7.50 m below existing ground surface

2.5 การปรับปรุงคุณภาพดิน

งานก่อสร้างถนนโดยทั่วไปนั้นดินมักเป็นปัญหาและอุปสรรคในการก่อสร้างมากกว่าวัสดุประเภทอื่นๆ ทั้งนี้เพราะดินเป็นสิ่งที่เกิดตามธรรมชาติ ดังนั้นสมบัติต่างๆมักเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่ และลักษณะการกำเนิด ซึ่งบางครั้งอาจสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาโดยการเปลี่ยนแปลงสถานที่ก่อสร้าง

แต่หากไม่สามารถใช้วิธีดังกล่าวได้ทุกครั้งทำให้จำเป็นต้องแก้ปัญหาด้านเสถียรภาพของดินแทน ซึ่งวิศวกรอาจใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดิน กล่าวคือ การปรับปรุงดินให้มีเสถียรภาพมากขึ้นหรือเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม ในงานวิศวกรรมผิวทาง การปรับปรุงดิน หมายถึง การปรับปรุงวัสดุท้องถิ่นให้สามารถใช้งานได้โดยทำการเพิ่มสารผสม (Stabilizing agent) การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุเป็นกระบวนการซึ่งนักวิจัยพยายามที่จะใช้ปรับปรุงวัสดุที่มีคุณภาพต่ำหรือมีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานให้มีคุณภาพดีขึ้น เพื่อใช้ประโยชน์ในการสร้างทาง (ธีรชาติ, 2539) โดย Hausmann (1990) กล่าวว่าไว้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับนำมาใช้ในงานวิศวกรรมทางนั้นมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) เพิ่มความสามารถในการรับกำลัง (Strength)
- 2) ลดการเสียรูป (Distortion) ภายใต้การเพิ่มขึ้นของแรง (Force)
- 3) ลดความสามารถในการยุบอัดตัว (Compressibility)
- 4) ควบคุมการหดตัว (Shrinkage) และการบวมตัว (Swelling)
- 5) ควบคุมการระบายน้ำ (Drainage) และการซึมน้ำ (Permeability)



ในการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถแบ่งเทคนิคออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ การปรับปรุงเชิงกล (Mechanical modification) การปรับปรุงทางไฮดรอลิก (Hydraulic modification) (มักทำในสนาม) การปรับปรุงโดยการผสมสารเคมี (Chemical modification) และการปรับปรุงโดยการเสริมกำลัง (Modification by inclusions and confinement) โดยรายงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นถึงการปรับปรุงดินด้วยการใช้การผสมสารเคมีเท่านั้น

United State Airforce (1966) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยแบ่งตามขนาดและค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index) ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และ Metcalf (1977) ได้เสนอการเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพดิน ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งวิธีการจะต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละชนิดของดิน โดยคำนึงถึงอิทธิพลของขนาดของเม็ดดินเป็นหลัก

ตารางที่ 2.6 วิธีปรับปรุงคุณภาพดินชนิดต่างๆ (ปรับปรุง United State Airforce, 1966)

ชนิดดิน	วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด
Coarse granular	ผสมแอสฟัลท์ (Asphalt) ผสมปูนซีเมนต์ (Cement) ผสมปูนขาวและเถ้าลอย (Lime and fly ash)
Fine granular	ผสมแอสฟัลท์ ผสมปูนซีเมนต์ ผสมปูนขาวและเถ้าลอย ผสมคลอไรด์ (Chloride)
Clay (low plasticity)	ผสมปูนซีเมนต์ ผสมปูนขาว
Clay (high plasticity)	ผสมปูนขาว

Designation	Fine clays	Coarse clays	Fine silts	Coarse silts	Fine sands	Coarse sands
Soil Particle size (mm.)	<.0006	.0006-.002	.002-.01	.01-.06	.06-.4	.4-2.0
Soil Volume Stability	Very poor	Fair	Fair	Good	Very good	Very good
Type of Stabilisation Application						
LIME	Range of maximum efficiency			Effective, but quality control may be difficult		
CEMENT	Effective, but quality control may be difficult					
BITUMENS	Effective, but quality control may be difficult					
POLYMERIC-ORGANIC MECHANICAL	Effective, but quality control may be difficult					
THERMAL	Range of maximum efficiency			Effective, but quality control may be difficult		

 Range of maximum efficiency
  Effective, but quality control may be difficult

* i.e. improvement of soil grading by mixing-in gravels, sands or clays as appropriate

รูปที่ 2.5 วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่แปรผันตามขนาดของเม็ดดิน (Metcalf, 1977)

2.6 วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นการทำให้ดินตามธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงแบกทาน (Bearing capacity) ได้ดีขึ้นและทนทานต่อการสึกหรอ วิธีการปรับปรุงดินอาจเป็นการบดอัดให้แน่นหรือการใช้สารผสมเพิ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ โดย Circeo et al. (1962) กล่าวว่า การใส่ปูนซีเมนต์ลงในดินเป็นการเปลี่ยนสมบัติและโครงสร้างของดิน โดยดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ แต่จะให้ผลที่แตกต่างกันถึงแม้ว่าดินจะมีสมบัติทางฟิสิกส์ (Physics) ที่เหมือนกันและใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมเท่ากัน ทั้งนี้เพราะดินมีสมบัติทางเคมี (Chemical property) ไม่เหมือนกัน ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีผลต่อกำลังของดิน

Mitchell (1982) กล่าวว่าไว้ว่า วัตถุประสงค์ในการผสมสารเคมีลงในดินก็เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน เช่น ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เป็นต้น โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน ได้แก่ การบวมตัว หรือการหดตัวของดินเมื่อความชื้นในดินมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ ทำให้มีผลต่อกำลังแบกทานของดิน การควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินสามารถทำได้โดยการผสมสารเคมีที่มีไฮเดรชันแคตไอออน (Hydration cation) ต่างๆ เช่น แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) และอลูมิเนียม (Aluminum) เข้าไปแทนที่ดินที่มีสารประกอบประเภทยโซเดียม (Sodium) หรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการประสานเม็ดดิน (Cementation) เกิดขึ้น การที่จะทำให้ดินสามารถรับแรงแบกทานได้มากขึ้นหรือมีกำลังมากขึ้นนั้นทำได้โดยการลดช่องว่างของเม็ดดิน การทำให้เม็ดดินเชื่อมติดกัน หรือการทำให้เกิด Flocculation รวมไปถึงการป้องกันไม่ให้เกิดการบวมตัวของดิน

2.7 การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

สารผสมเพิ่มที่นำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับวัสดุทางมีอยู่หลายชนิด ดังนั้นการเลือกใช้สารผสมเพิ่มจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงสมบัติตามธรรมชาติของดินที่จะนำมาปรับปรุง (Gordon,

1984) สำหรับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงๆ นั้นนิยมใช้ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย หรือ ปูนขาวผสมเถ้าลอย เป็นต้น จากนั้น Wilmot (1995) กล่าวไว้ว่า การปรับปรุงดินในที่ (In-situ stabilization) สำหรับงานทางนิคมใช้ปูนซีเมนต์ หรือปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ซึ่งสำหรับงาน หมุนเวียนวัสดุผิวทาง (Pavement recycling) นิยมใช้ปูนซีเมนต์มาผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการใช้สารเคมีเป็นการปรับปรุงดินที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในงานทางด้านวิศวกรรมการทาง ซึ่งมีสารเคมีที่นำมาใช้ผสมนั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นกล่าวถึงแค่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นหลัก

2.7.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปฏิกิริยาประสานที่สำคัญของปูนซีเมนต์ คือ ปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน (Cement hydration) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่เรียกว่า ซีเมนต์เจล (Cement gel) ซึ่งจะจับตัวแข็งเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นและปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยสารแคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) ชนิดต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความแตกต่างในด้านสมบัติการแข็งตัว

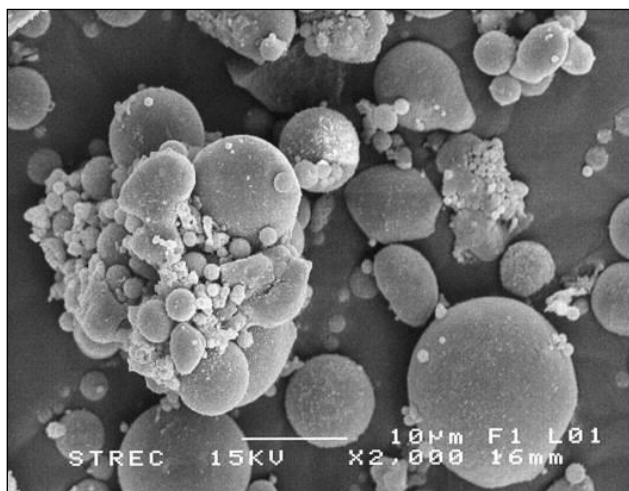
2.7.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิง ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน สิ่งที่เป็นในถ่านหิน เช่น ดินเหนียว (Clay) ควอทซ์ (Quartz) และ เฟลด์สปาร์ (Feldspar) เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและเป็นผงฝุ่นจะไม่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค ทั่วไปเถ้าลอยจะมีลักษณะเป็นผงสีเทาคล้ายกับปูนซีเมนต์ ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลม หรืออาจพบรูปร่างที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา และชนิดของถ่านหิน โดยแสดงลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอยดังรูปที่ 2.6

วิจิต และคณะ (2536) กล่าวว่า ถ้าบางชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอโซลานิก (Pozzolanic reaction) เนื่องจากเถ้าลอยมีส่วนผสมของซิลิกาและอลูมินาสูง ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปูนขาว แล้วเกิดเป็น Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งทำให้เม็ดของเถ้าเกิดการเกาะรวมกัน ซึ่งปฏิกิริยานี้คล้ายคลึงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ดังนั้นจึงมีการนำเอาเถ้าลอยมาใช้แทนปูนซีเมนต์เพื่อลดค่าใช้จ่าย เพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาของถ่านหินๆ

2.8 การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์

Highway Research Board's Committee on Soil-Portland Cement Stabilization ได้ให้คำจำกัดความของ Cement-treated soil คือ การนำดินและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการมาผสมกับน้ำให้เข้ากันแล้วบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดและป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียระหว่างการบ่ม ดินซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ 5 แบบ ดังตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย

ตารางที่ 2.7 ชนิดของ Cement-Treated Soil

ประเภท	ลักษณะของดินที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์	ร้อยละปูนซีเมนต์ที่ใช้โดยประมาณ	การประยุกต์ใช้งาน
Cement Modified Silty Clay Soil	ดินอ่อนมากหรือดินที่มีลักษณะเปือกแฉะ เช่น Silty Clay	1 - 3	ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติดินเดิมให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุก
Cement Modified Granular Soil Mixture	ดินที่มีค่าพลาสติกซิติ (Plasticity) สูง เช่น ดินทรายและกรวด	1 - 3	ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นรองพื้นทางให้มีความรับน้ำหนักสูงขึ้น
Soil-Cement	ดินทุกประเภท เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพให้มีความรับแรงตามมาตรฐานของ PCA หรือ AASHTO	5 - 7	ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้ เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน PCA หรือ AASHTO
Plastic Soil-Cement	ดินทุกประเภท เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพให้มีความรับแรงตามมาตรฐานของ PCA หรือ AASHTO	2	ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้ เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน PCA หรือ AASHTO
Cement-Treated Soil Slurries and Grouts	ดินทรายและน้ำ โดยมีปริมาณของน้ำสูงมาก	5	ใช้กับงานบำรุงรักษา เช่น การทำ Mud Jetting กับดินคันทางที่เกิดการทรุดตัว

หมายเหตุ PCA = Portland Cement Association

Lambe และคณะ (1959) และ Moh (1962) ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดสารประกอบหลัก 4 ประเภท คือ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF ซึ่งจะเป็นตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารประกอบ CSH CAH และ Released hydrate lime กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH โดยสารทั้งสองจะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะ ซึ่งสามารถยึดเกาะเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้เป็นเม็ดขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง สำหรับ Hydrated Lime ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวเป็น Ca_2^+ และจะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ซึ่งอนุภาคดินจะฝังอยู่ใน Reaction Product จะมีลักษณะเป็นซีเมนต์เพส (Cement paste) และจะแข็งตัวตามเวลา และเปลี่ยนโครงสร้างดินให้แข็งตัวด้วย โดย Moh (1965) ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังนี้

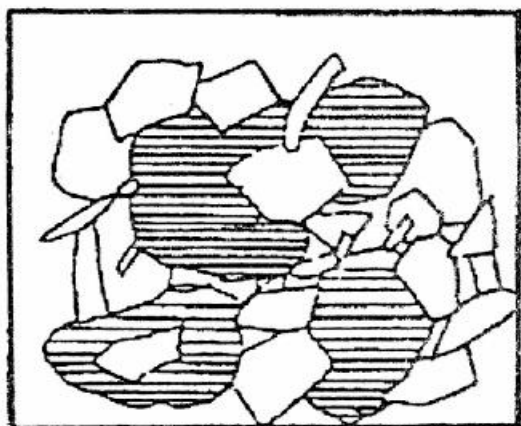


2.8.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell และ Jack (1966) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินภายหลังจากผสมปูนซีเมนต์ โดยการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สถานะ ดังนี้

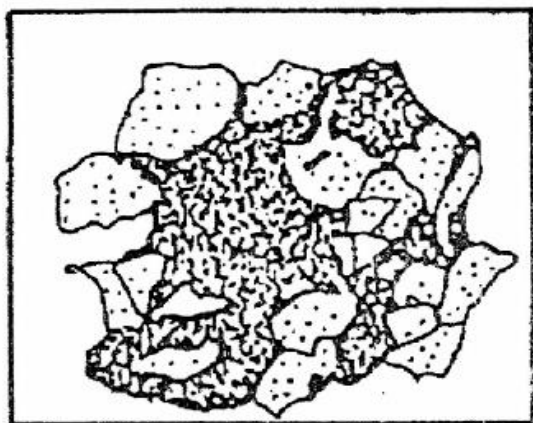
- 1) สถานะขณะบดอัดอนุภาค ขั้นตอนนี้เป็นช่วงเวลาที่ปูนซีเมนต์จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของเม็ดดิน ซึ่งสถานะนี้ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ดังรูป 2.7(a)
- 2) สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นซีเมนต์เจล เข้าแทรกซึมตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดินและจะปล่อยปูนขาว โดยทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินาในดิน หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.7(b)
- 3) สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ทำให้ซีเมนต์เจลกระจายและแทรกซึมไปทั่วดินซีเมนต์ ซึ่งทำให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.7(c)

ลักษณะของดินกับซีเมนต์ หรือซีเมนต์เพสที่เริ่มแข็งตัวเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope) มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.8



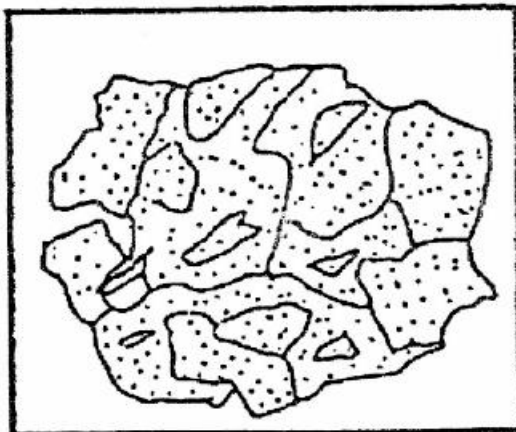
○ Clay Particles
 ◻ Cement Particles (unhydrated)

(a) สถานะขณะบดอัดอนุภาค



◻ Degrading Clay Particles
 ◻ Hydrating Cement Gel and Lime - Clay Reaction Products

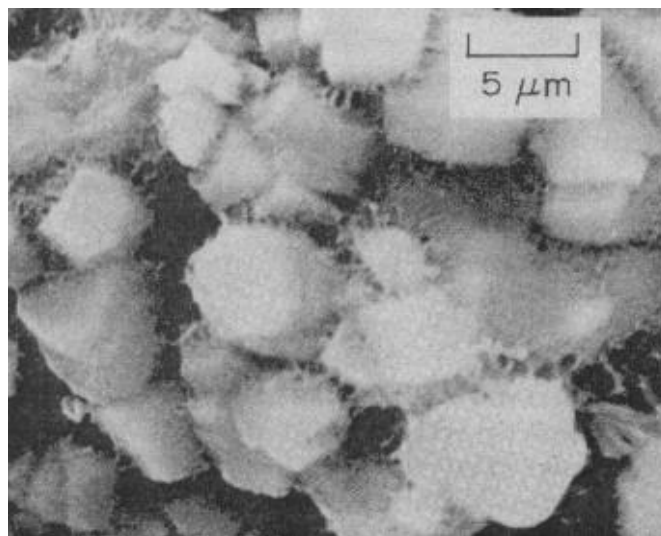
(b) สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น



◻ Indistinguishable Clay and Cement Phase

(c) สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ Jack, 1966)



รูปที่ 2.8 ลักษณะของดินผสมซีเมนต์โดยใช้กลังจูลทรศน์โอเลคตรอน (พิชณู, 2549)

2.9 สารปอซโซลาน

ตามมาตรฐาน ASTM ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า ปอซโซลาน (Pozzolana) ไว้ว่า สารปอซโซลาน คือ วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา และอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ซัยดูคิ และไกรรูคิ (2549) กล่าวไว้ว่า ทั่วไปแล้วสารปอซโซลานมีสมบัติเป็นวัสดุประสานน้อยมาก แต่เนื่องจากสารปอซโซลานมีความละเอียดค่อนข้างสูงและมีปริมาณความชื้นเพียงพอที่จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่อุณหภูมิห้องได้ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก



สารปอซโซลานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการนำมาใช้งาน ดังนี้

- 1) สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural pozzolanas) โดยทั่วไปคือ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดภูเขาไฟ เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และหินพูน (Pumicite) เป็นต้น
- 2) สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolanas) ส่วนใหญ่ คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ ดินเหนียว หินดินดาน (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ และเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการทำเกษตรกรรม

สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเอาเถ้าลอยลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้ โดยเถ้าลอยดังกล่าวเมื่อนำมาผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะแล้วบ่มทิ้งไว้จะเริ่มแข็งตัวภายใน 1 วัน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะส่วนใหญ่มีปริมาณ CaO ปนอยู่ในปริมาณที่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจน

กลายเป็น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และทำให้เกิดปฏิกิริยาปอโซลานิก กับซิลิกาและอลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของ Non-crystalline glass จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวขึ้นได้ คือ CSH และ CAH การใช้เถ้าลอยแม่เหมาะไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานดินสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ เถ้าลอยผสมน้ำและเถ้าลอยบดอัด ในปี พ.ศ. 2530 ได้มีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์มาก่อสร้างชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางของถนนภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเหมืองลิกไนต์ จากนั้นในปี พ.ศ. 2535 ได้เริ่มนำเถ้าลอยผสมน้ำไปใช้ในการซ่อมแซมการทรุดตัวของระบบระบายน้ำรอบสถานีไฟฟ้าแรงสูง (สมชัย, 2536) สำหรับในส่วนของกรมทางหลวง ประเทศไทย ได้เริ่มนำเถ้าลอยมาใช้ในการปรับปรุงชั้นทาง โดยได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยเถ้าลอยโดยแบ่งตามคุณลักษณะต่างๆ ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ

ชื่อวัสดุผสมเพิ่ม	คุณลักษณะ
General Purpose Fly Ash Cement (โดยทั่วไปจะมีเถ้าลอยผสมอยู่ 25%)	เหมาะสำหรับดินเกือบทุกประเภท โดยปกติสามารถเพิ่มระยะเวลาการทำงานได้เป็น 4 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ
ปูนขาว/เถ้าลอย	เหมาะสำหรับดินปนดินเหนียว และดินที่มีลักษณะเป็นเม็ดๆ อัตราส่วนผสมขึ้นอยู่กับสัดส่วนประกอบของดินโดยทั่วไปสามารถยืดอายุการทำงานได้เป็น 20 ชั่วโมง หรือมากกว่านี้
Hydrated Lime และ Quick Lime	ใช้ได้ผลดีกับดินเหนียว การเกิดปฏิกิริยาเกิดอย่างช้าๆ ระยะเวลาการทำงานได้นาน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	ส่วนใหญ่ใช้ได้ดีกับดินปนกรวด ระยะเวลาการทำงานได้จำกัดได้สูงสุด 2 ชั่วโมง
เถ้าลอย	เหมาะสมสำหรับดินเกือบทุกประเภท ระยะเวลาการทำงานได้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการผสม

2.10 การใช้งานเถ้าลอย

ประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินและถ่านหินผสมเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่หลายแห่ง ซึ่งการนำเถ้าลอยแต่ละแหล่งมาใช้ในงานปรับปรุงดินเพื่อจุดประสงค์การปรับปรุงและเพิ่มคุณภาพดิน หรือเพื่อการลดต้นทุน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงการใช้งานเถ้าลอย คือ คุณภาพทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยแหล่งนั้นๆ สำหรับการใช้เถ้าลอยจะพิจารณาคัดเลือกตามคุณสมบัติที่เข้าเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 หรือมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2135-2545 ของประเทศไทย ดังนั้นการใช้งานเถ้าลอยจำเป็นต้องอ้างอิงตามมาตรฐานและข้อกำหนดอย่างเคร่งครัด ปัจจุบันเถ้าลอยจากแหล่งโรงไฟฟ้าแม่เมาะถือได้ว่ามีคุณภาพสูงและเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งานมากที่สุดในประเทศไทย

อย่างไรก็ตามยังมีเถ้าลอยจากแหล่งอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและราคาถูก แต่ยังไม่เคยนำมาใช้งานหรือเคยมีการนำมาใช้งานแล้วเกิดผลเสียหายตามมา ทั้งนี้เพราะวิศวกรมักนิยมนำเอาเถ้าลอยจากแหล่งอื่นๆ มาใช้งานโดยการทดแทนตามสัดส่วนการออกแบบส่วนผสมที่แทนที่เถ้า

ลอยจากแม่เมาะ ซึ่งคุณสมบัติเถ้าลอยจากแหล่งอื่นๆ นอกเหนือจากเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จะไม่เหมือนกัน ดังนั้นการใช้งานเถ้าลอยในการทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนหรือเพื่อการเพิ่มคุณสมบัติของดินควรได้รับการออกแบบตามคุณสมบัติของเถ้าลอยในแต่ละแหล่งที่เรานำมาใช้งาน เมื่อเรามีความเข้าใจการใช้งานเถ้าลอยอย่างถูกต้องจะช่วยให้ทำให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพดินที่มีต้นทุนต่ำและคุณภาพสูงได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทาง อีกทั้งเป็นการช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและลดการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการขนส่งเถ้าลอยจากแหล่งระยะทางไกลๆ อีกด้วย

เถ้าลอยลิกไนต์โดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลม มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.15 มิลลิเมตร) ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ, สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C 618 "Specification for Fly ash and Raw or Calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete" ได้จัดแยกประเภทของเถ้าลอยไว้ 2 ชนิดคือ Class F และ Class C โดย Class F มีปริมาณ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก และ Class C มีปริมาณ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ ระหว่าง 50-70% โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติย่อมมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ การที่เถ้าลอยจากแหล่งเดียวกันพบว่าเป็น Class C และ Class F เป็นเรื่องที่เป็นปกติ แม้ว่าจะเป็น Class C หรือ Class F ต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ทั้งสิ้น โดยปริมาณองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM แบ่ง Class ดังรูปที่ 2.9

	Class		
	N	F	C
Silicon dioxide (SiO ₂) plus aluminum oxide (Al ₂ O ₃) plus iron oxide (Fe ₂ O ₃), min, %	70.0	70.0	50.0
Sulfur trioxide (SO ₃), max, %	4.0	5.0	5.0
Moisture content, max, %	3.0	3.0	3.0
Loss on ignition, max, %	10.0	6.0 ^A	6.0

รูปที่ 2.9 Chemical Requirement (ASTM C618-08a)

2.11 การออกแบบดินซีเมนต์

กรมทางหลวง ประเทศไทย ได้เลือกใช้ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined compressive strength, UCS) ภายหลังจากบ่มแห้งตัวอย่างดินซีเมนต์อายุครบ 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1,725 kPa สำหรับชั้นพื้นทาง มีค่าไม่น้อยกว่า 690 kPa สำหรับชั้นรองพื้นทาง และ สำหรับชั้นคันทางนั้นกรมทางหลวงเลือกใช้ค่า CBR เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ โดยต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 95%

Ruenkairergsa (1989) ได้รายงานว่าการศึกษานอนที่ก่อสร้างด้วยดินซีเมนต์ภายใต้เกณฑ์การออกแบบ UCS ข้างต้นนั้นเหมาะสมกับสภาพเงื่อนไขด้านจราจรในประเทศไทย และงานวิจัยฉบับนี้ได้แนะนำปริมาณปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในการปรับปรุงดินอยู่ในช่วงร้อยละ 3 – 5 ซึ่งค่า

ปริมาณปูนซีเมนต์ดังกล่าวก็เพียงพอจะทำให้ค่า UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน จะอยู่ในช่วง 1,380 – 2,070 kPa โดยตารางที่ 2.8 แสดงเกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์ของประเทศต่างๆ

ตารางที่ 2.8 เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์

สถาบัน	เกณฑ์การออกแบบ
กรมทางหลวง	1) สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทาง UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 1,725 kPa 2) สำหรับก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 690 kPa 3) สำหรับก่อสร้างชั้นคั่นทาง CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 95%
บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)	ค่า CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 120%
British Road Research Laboratory, United Kingdom	UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 1,725 kPa
Ghana Department of Highways, Ghana	CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 120%
Most African Countries	CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 180%
National Association of Australian State Road Authority (NAASRA), Australia	1) UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,035 – 1,725 kPa 2) CBR ที่บ่มอายุ 7 วัน จากนั้นนำไปแช่น้ำอีก 4 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 120%

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าลอย

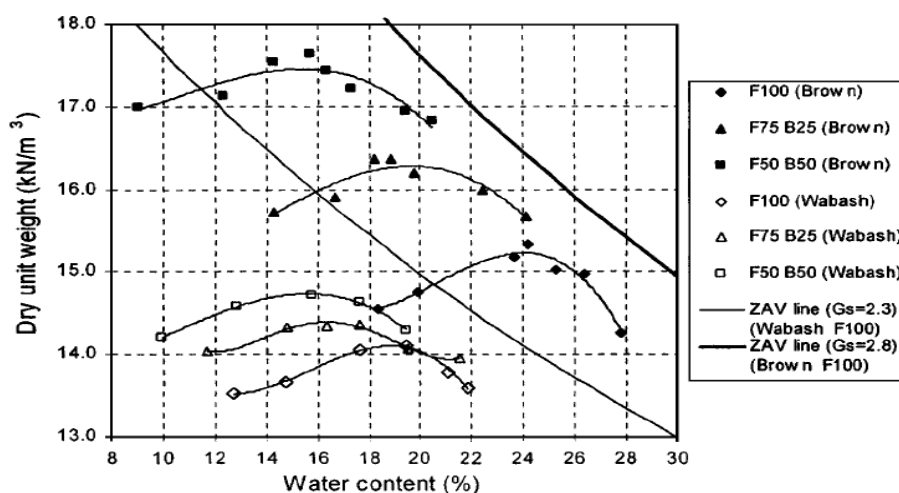
ในอดีตมีรายงานวิจัยมากมายที่พยายามศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรม ของเถ้าลอย โดย Selving และ Gibson (1956) และ Abernethy และคณะ (1969) ได้ทำการศึกษารายละเอียดของเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างเถ้าลอยที่ได้จากถ่านหิน (Coal) กว่า 600 ชนิด ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินประกอบไปด้วย Silica (SiO_2) Ferric oxide (Fe_2O_3) และ Alumina (Al_2O_3) และพบ Calcium oxide (CaO) Potassium oxide (K_2O) Sodium oxide (Na_2O) Magnesium oxide (MgO) Titanium oxide (TiO_2) Phosphorous pentoxide (P_2O_5) และ Sulfur trioxide (SO_3) ในปริมาณที่น้อยและไม่ค่อยมีคุณภาพ สำหรับถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous coal) จะพบองค์ประกอบหลัก (SiO_2 Fe_2O_3 และ Al_2O_3) ในปริมาณที่สูงมากประมาณร้อยละ 90 ขององค์ประกอบหลักทั้งหมด แต่ในทางตรงกันข้ามเถ้าถ่านหินลิกไนต์และสับบิทูมินัส (Subbituminous coal) จะพบ CaO MgO และ SO_3 ในปริมาณที่มาก จากนั้นในปี 1985 Diamond ได้ทำการตรวจสอบคุณลักษณะทางเคมีและคุณลักษณะทางแร่ (Mineralogical characteristic) ของเถ้าลอยอินเดียนนา (Indiana) ซึ่งการศึกษานี้พบว่าเถ้าลอยอินเดียนนามีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานชั้น F ตามมาตรฐาน ASTM โดยมีปริมาณ SiO_2 Fe_2O_3 และ Al_2O_3 สูงถึงร้อยละ 90 หรือมากกว่า และมี

ปริมาณ CaO และ SO₃ ในปริมาณที่น้อยมากประมาณไม่เกินร้อยละ 2 นอกจากนี้ยังพบปริมาณ Alkali ประมาณร้อยละ 2 ของ K₂O และร้อยละ 0.5 ของ Na₂O

DiGioia และคณะ (1986) ได้ศึกษาเส้นโค้งบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor compaction curve) ของเถ้าลอยบิทูมินัส Western Pennsylvania (ชั้น F) และเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์และสับบิทูมินัส Western US (ชั้น C) ซึ่งการศึกษาพบว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และปริมาณความชื้นสูงสุด (Optimum water content) ของเถ้าลอยบิทูมินัส Western Pennsylvania มีค่าอยู่ในช่วง 11.9 ถึง 18.7 kN/m³ และจากร้อยละ 13 ถึง 32 ตามลำดับ สำหรับเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์และสับบิทูมินัส Western US มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 13.0 ถึง 18.7 kN/m³ และปริมาณความชื้นสูงสุดจากร้อยละ 11 ถึง 19 นอกจากนี้ งานวิจัยฉบับนี้ยังได้สรุปเพิ่มเติมว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นสูงสุดที่ได้นั้นมีค่าอยู่ในช่วงที่กว้างและมีการเปลี่ยนแปลงสูงนั้นมีสาเหตุหลักมาจากการเปลี่ยนแปลงในตัวของเถ้าลอยเอง เช่น การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งเกิดจากแหล่งของถ่านหินและกระบวนการเผาไหม้ (Combustion)

McLaren และ DiGioia (1987) ได้ศึกษากำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) ของวัสดุผสมเถ้าลอย โดยได้รวบรวมผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างผสมเถ้าลอยทั้งหมด 51 ตัวอย่าง ซึ่งการศึกษานี้สรุปว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยชั้น F จะมีคุณสมบัติด้านแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยชั้น C นั้นจะมีคุณสมบัติด้านกำลังยึดเหนี่ยว (Cohesive strength) เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาซีเมนต์เตชัน (Cementitious reaction)

Kim และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาคงสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา (Bottom ash) สำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุทาง โดยส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้สรุปว่าถ้าเพิ่มปริมาณเถ้าลอย (ชั้น F) จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จะมีค่าน้อยลง แต่ปริมาณความชื้นสูงสุดที่ได้จะมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10



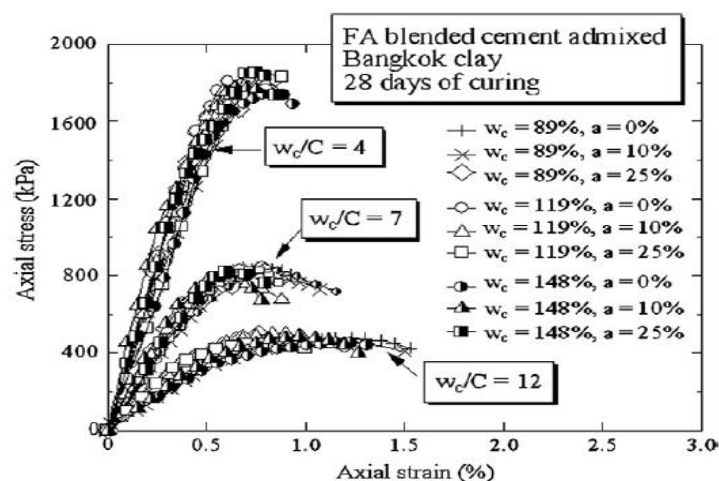
รูปที่ 2.10 กราฟเส้นโค้งการบดอัดของดินที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ (Kim และคณะ, 2005)

นอกจากนี้ยังได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์โดย Suksan และคณะ (2011) ได้ทำการทดสอบดินที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยและทดสอบค่ากำลัง ค่ากำลังของตัวอย่างอายุ 28 วัน ที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.11 หลังจากนั้น Suksan และคณะได้ทำการสร้างสมการภายใต้ความสัมพันธ์ของกำลังรวมกันทั่วไป (Generalized interrelationship strength) ระยะเวลาการบ่ม และอัตราส่วนน้ำในมวลดินต่อซีเมนต์ (Clay to water cement ratio, w_c/C) สำหรับทำนายกำลังของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และเถ้าลอย ในห้องปฏิบัติการไว้อีกด้วย (อ่านเพิ่มเติม Suksan และคณะ, 2011) แสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{q_{(w_c/C)_t}}{q_{(w_c/C)_{28}}} = \left[\frac{(w_c/C)_{28}}{(w_c/C)_t} \right]^{1.27} (0.039 + 0.283 \ln t)$$

$$\text{เมื่อ } C = C_i (1 + 0.75a)$$

โดยที่ $q_{(w_c/C)_t}$ คือ กำลังรับแรงอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ที่ประมาณจาก w_c/C ณ การบ่มวันที่ t $q_{(w_c/C)_{28}}$ คือ กำลังรับแรงอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ที่ประมาณจาก w_c/C ณ การบ่ม 28 C_i คือ เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ a คือเปอร์เซ็นต์เถ้าลอย จากการทดสอบยังพบอีกว่าที่ปริมาณเถ้าลอย 25 เปอร์เซ็นต์จะมีความเหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด อย่างไรก็ตามถ้าจะนำสมการทั้งหมดข้างต้นนี้มาใช้ทำนายพฤติกรรมหรือใช้ในการออกแบบด้านกำลังของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างทางนั้นอาจไม่เพียงพอ ทั้งนี้เพราะดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยยังมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกด้านหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง นั่นก็คือการหดตัว



รูปที่ 2.11 ค่ากำลังของตัวอย่างอายุ 28 วัน (Suksan และคณะ)

2.13 การหดตัวของดินซีเมนต์

จากการศึกษาในอดีตของ Anand J. Puppala และคณะ (2006) พบว่า การหดตัวนั้นมักเกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้าง การรับกำลังที่ผิว และการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม สภาวะการหดตัวของดินเหนียวอ่อนนั้นจะก่อให้เกิดการแตกตัวในแนวขวางกับโครงสร้างถนน (Transverse crack) ซึ่งเริ่มเกิดจากไหล่ทางก่อนแล้วนำไปสู่การแตกตัวในแนวขนานกับโครงสร้างถนน (Longitudinal crack) ในลำดับต่อมา ดังนั้นอิทธิพลของการหดตัวของวัสดุนั้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึง ในสาขาวิชาทางด้านธรณีเทคนิค ในวงการวิศวกรรมธรณีเทคนิคแทบจะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวไปไม่ได้ เพราะการแตกร้าวยังส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์ของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ รวมไปถึงค่ากำลังรับแรงเฉือน ค่ากำลังรับแรงอัด และเสถียรภาพของดิน ทั้งนี้ในปัจจุบันเชื่อกันว่าการลดการหดตัวนั้นต้องป้องกันการระเหยออกของน้ำอย่างมิดชิด หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของดินนั้นเสียก่อน

การแตกร้าวจากการหดตัว เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน เมื่อปริมาณน้ำในช่องว่างลดลงจะทำให้เกิดความเค้นดึงระหว่างอนุภาคของดินเหนียว และก่อให้เกิดแรงภายในที่สูงขึ้นจนกระทั่งสูงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคของดินเหนียวแยกตัวออกจากกันจนเกิดการแตกร้าว จากนั้นอนุภาคของดินจะปรับสภาพเข้าสู่ปกติโดยการเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างอนุภาค และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคยังสามารถต้านทานแรงดึงจากการหดตัวได้ การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้เกิดจากสภาวะทั้งภายนอกที่มากระทำซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยการเกิดนั้นจะขึ้นอยู่กับประกอบของอนุภาค อุณหภูมิ และช่องว่างของของเหลวที่อยู่ระหว่างอนุภาค โดยการแตกร้าวของถนนที่เกิดจากการหดตัวของโครงสร้างชั้นคันทาง (Subgrade Soil) แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การแตกร้าวของถนน (Anand J. Puppala และคณะ, 2006)

กรณีตัวอย่าง สนามบินสุวรรณภูมิ ใช้โครงสร้างของพื้นทางเป็นแบบ Flexible Pavement โดยใช้แอสฟัลท์ 3 ชั้น หนา 33 ซม วางบนฐานวัสดุมวลรวมที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Cement Treated Base) หรือ CTB หนา 72 ซม ทั้งหมดนี้ ปูบนดินอัดแน่นโดยการเร่งดึงน้ำใต้ดินออกโดยวิธี PVD (Prefabricate Vertical Drain) โดยมีชั้นทราย Sand Blanket หนาประมาณ 1.5 ม ซึ่งเป็นชั้นที่สามารถระบายน้ำที่อาจไหลตามท่อ PVD ที่ถูกตั้งค้างไว้ได้ จากกรณีดังกล่าวพบว่าเมื่อทำการเปิดใช้

งานอย่างเป็นทางการในปี 2549 โครงสร้างชั้นทางที่ถูกสร้างบนชั้นดินอ่อนที่มีระดับน้ำใต้ดินเฉลี่ยอยู่ที่ผิวดินเดิม เกิดการทรุดตัวและแตกร้าว มีน้ำใต้ดินดันขึ้นตามรอยแตกร้าวเป็นแนวยาว วิศวกรได้ทำการไถเปิดชั้นแอสฟัลท์ออก และทำการ coring ตัวอย่าง และทำการตรวจสอบพบว่าชั้น CTB ซึ่งพบว่าอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ดี ไม่มีความเสียหายใดๆ เว้นแต่น้ำซึมขึ้นมาตรงรอยตะเข็บ (joint) รอยตะเข็บนี้ เกิดจากการออกแบบเพื่อให้ CTB หดตัวได้ น้ำจึงซึมขึ้นมาตามตะเข็บก่อนที่จะไหลออกทางชั้นทรายที่ทำไว้เพื่อให้น้ำไหลออก เนื่องจากชั้น CTB มีการหดตัวสูงมาก ทำให้แอสฟัลท์ต้องแช่อยู่ในน้ำเป็นระยะเวลาหนึ่ง จึงทำให้เสื่อมวัสดุเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติและเกิดการทรุดตัวในที่สุด โดยการซึมผ่านของน้ำจากชั้นล่างขึ้นสู่ผิวแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การซึมผ่านของน้ำจากชั้นล่างขึ้นสู่ผิวบนจากรอยการหดตัวของโครงสร้างทาง

2.14 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing)

ในปี 2002 Katha จาก The University of Texas at Arlington ได้ทำการตรวจวัดการหดตัวของกลุ่มตัวอย่างดินโดยทำการถ่ายภาพตัวอย่างซึ่งอยู่ในแบบหล่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กแล้วทำการตัดภาพให้เหลือเพียงแค่ขนาดแบบหล่อที่เป็นขนาดเริ่มต้นของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยรูปตัวอย่างจะถูกดำเนินการโดยโปรแกรม Scion Image Software แล้วทำการหาค่าพิกเซลเริ่มต้นของภาพที่ถูกตัดแต่งขอบเรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็ทำการหาค่าพิกเซลของรอยแตกและรอยการหดตัวต่างๆ ของตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการหาค่าการหดตัวได้โดยการหาค่าอัตราระหว่างพิกเซล รอยแตกและรอยการหดตัวต่างๆ และพิกเซลเริ่มต้น

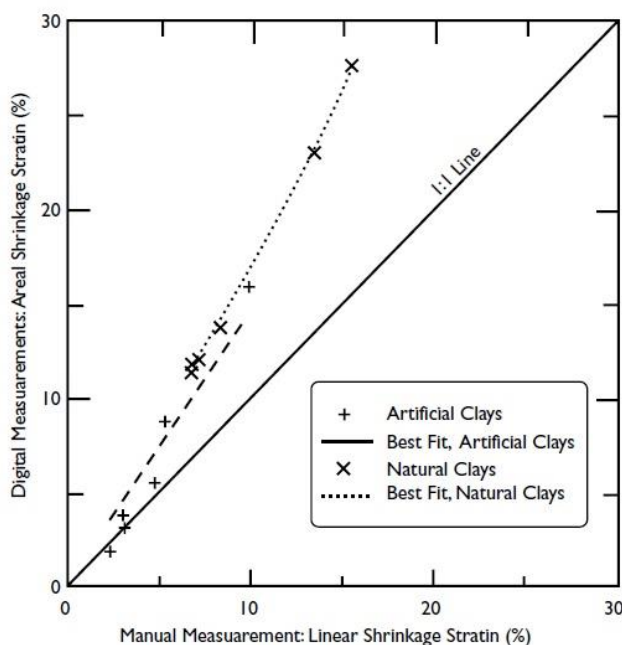


รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายดินตัวอย่างที่ถูกตัดแต่งขอบ (Katha, 2002)

โดย Katha ได้ทำการทดสอบดินทั้งหมด 4 ชนิด โดย 2 ชนิดแรก เป็นดินเหนียวที่ถูกสร้างขึ้นมา (Artificial soil) และอีก 2 ชนิดที่เหลือ เป็นดินเหนียวธรรมชาติ (Natural soil) และได้ทำการทดสอบเทียบกันระหว่างการใช้ Vernier Calipers (Manual Measurement) และ Digital Image Technique เปรียบเทียบกัน โดยผลการสอบเทียบแสดงในรูปที่ 2.14

จากผลดังกล่าวพบว่าเกิดความแตกต่างระหว่างการวัดโดยวิธี Manual Measurement ที่เป็นการวัดแบบ 1 มิติ และ Digital Image Technique ที่เป็นการวัดแบบ 2 มิติ โดยมีความแตกต่าง

กันประมาณ 3-12% และให้เหตุผลถึงข้อแตกต่างว่า ค่าความต่างนั้นอาจเกิดจากความผิดพลาดในการวัดและชนิดของการทดสอบ (เป็นการวัด 1 มิติ กับ 2 มิติ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการทดสอบที่มีชนิดต่างกัน)



รูปที่ 2.15 ค่าจากทดสอบการหดตัว โดยวิธี Manual Measurement และ Digital Image Technique (Katha, 2002)

2.15 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

สำหรับการประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) ในช่วงเริ่มแรกๆ ที่เริ่มมีการนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านธรณีเทคนิค มักจะเป็นการวิเคราะห์เชิงวิจัยเป็นส่วนใหญ่ แต่ระยะหลังนี้ได้เริ่มมาประยุกต์ใช้กับปัญหาจริงเพิ่มมากขึ้น เช่น การนำวิธีเชิงตัวเลขมาแก้ปัญหาการทรุดตัวของหอเออนเมืองปิซา (Leaning Tower of Pisa) ประเทศอิตาลี และการขุดอุโมงค์ส่วนขยายยูบอลลี (Jubilee Line Extension) ลอดใต้หอนาฬิกาบิ๊กเบน (Big Ben) ที่กรุงลอนดอนประเทศอังกฤษ โดย ศาสตราจารย์ เดวิด พ็อตตส์ (Professor David M. Potts) และ ศาสตราจารย์ จอห์น เบอร์แลนด์ (Professor John B. Burland) ที่วิทยาลัยอิมพีเรียล มหาวิทยาลัยลอนดอน (Imperial College, London University) (สุเชษฐ์, 2550)

สำหรับปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้วิธีทางตัวเลขในการแก้ปัญหากันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นการจำลองปัญหาทางด้านอุโมงค์ งานขุด งานกำแพงกันดินในรูปแบบต่างๆ หรือแม้กระทั่งการจำลองรูปแบบของแผ่นดินไหว จากความนิยมดังกล่าวก็เนื่องมาจากมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ง่ายต่อการทำงานไม่ยุ่งยากมากนักและประมาณค่าต่างๆได้อย่างแม่นยำ แต่ผู้ใช้ก็ต้องมีความรู้ความสามารถเลือกใช้พารามิเตอร์ต่างๆได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องตามทฤษฎี โดยโปรแกรมที่เป็นที่นิยมคือโปรแกรม Plaxis 2D และ Plaxis 3D

บทที่ 3

วิธีการและขั้นตอนการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาการพัฒนาโครงสร้างชั้นทางโดยใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม ประกอบไปด้วย ดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ได้ทำการบวกรสลายพันธะและสร้างตัวใหม่ขึ้นมา เราเรียกว่า ดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstitute Clay) ซึ่งได้วัตถุดิบในแถบที่ราบลุ่มแม่น้ำ สำหรับปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ใช้กันปกติในท้องตลาด สุกทำเถ้าลอยที่ใช้ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะของโครงการผลิตไฟฟ้าโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ อำเภอน้ำมวง จังหวัดราชบุรี ดังแสดงในรูปที่ 3.1

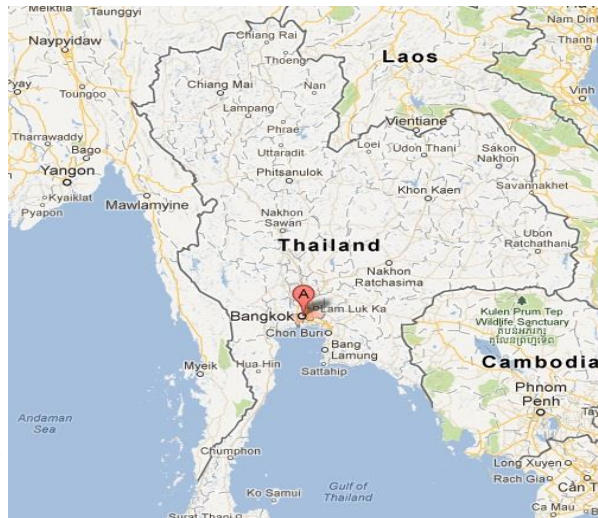
3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น

ส่วนนี้กล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย โดยโปรแกรมการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรม

วัสดุ	การทดสอบ	มาตรฐาน
ดินเหนียว	Atterberg's Limits and Indices	ASTM D 4318-93 และ D 427-93
	Specific Gravity Test	ASTM D 854-92
	Oedometer test	ASTM D 2435
	Reconstitute Test	-
	XRD (X-ray diffractometer)	-
	SEM (Scanning Electron Microscope)	-
เถ้าลอย	Atterberg's Limits and Indices	ASTM D 4318-93 และ D 427-93
	Specific Gravity Test	ASTM D 854-92
	XRD (X-ray diffractometer)	-
	SEM (Scanning Electron Microscope)	-

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์และใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆจากผู้ผลิต



(a) แหล่งดินเหนียวแถบราบลุ่มแม่น้ำ



(b) แหล่งถ้ำลอย อำเภอท่าม่วง จังหวัดราชบุรี



(c) แหล่งถ้ำลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

รูปที่ 3.1 แหล่งที่มาของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา (Google Map)



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (a) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (b) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (c) ทรายละเอียดจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ (d) ทรายละเอียดจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

3.3 การทดสอบ

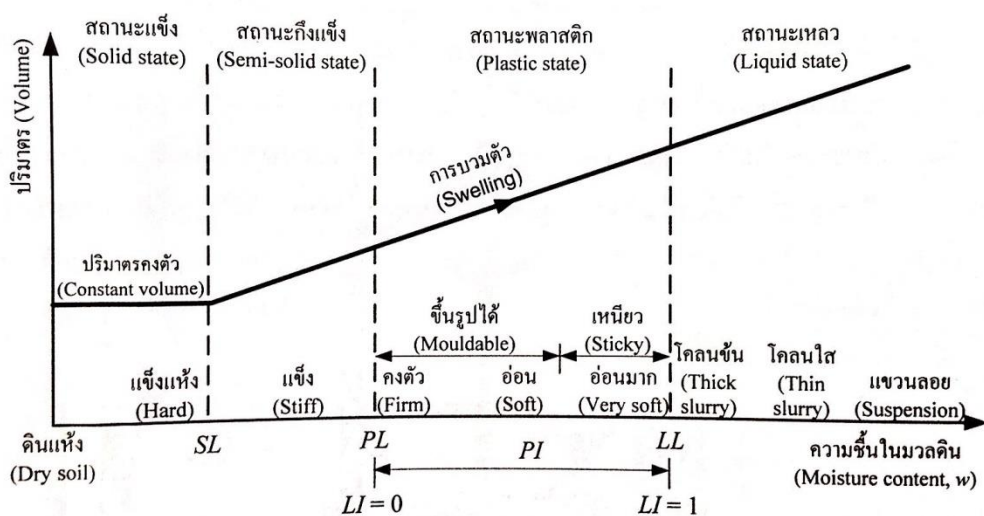
การทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติของ ดินเหนียว ผสมซีเมนต์ และเถ้าลอย ในห้องปฏิบัติการ โดยส่วนใหญ่งานทางด้านธรณีเทคนิคในประเทศไทยมักจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM และมาตรฐานของกรมทางหลวงในการทดสอบ โดยรายละเอียดการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

3.3.1 การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียว

การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของดินต่อน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4 °C มีปริมาตรเท่าวัตถุนั้น ในมวลดินจะประกอบด้วยธาตุหลายอย่าง ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะในมวลดินก็คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของวัสดุเหล่านั้น ความถ่วงจำเพาะจะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานสำคัญอีกค่าหนึ่ง ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาตรช่องว่าง Void Volume ความอิ่มตัว Degree of Saturation ความพรุน Porosity และอื่นๆ ได้ (ASTM D 854-58) โดยการทดสอบจะนำดินเหนียวทั้งหมดที่ได้มาละลายน้ำและปั่นด้วยเครื่องมือปั่นเพื่อให้ดินเหนียวแตกตัวและเป็นเนื้อเดียวกันเสียก่อน หลังจากนั้นจึงนำไปอบแห้ง 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 104 องศาเซลเซียส จึงค่อยนำไปทดสอบต่อไป

3.3.2 การทดสอบ Atterberg's Limit

เพื่อบอกคุณสมบัติของมวลดินเม็ดละเอียดถึงสภาพหรือสถานะต่างๆ เมื่อปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลดิน (Water content) เปลี่ยนไป โดยดินที่นำมาทดลองนั้นเป็นมวลดินที่มีขนาดเล็กกว่าผ่านตระแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) และแบ่งสถานะออกเป็น 4 ช่วง คือ สถานะของเหลว (Liquid state) สถานะพลาสติก (Plastic state) สถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) และสถานะของแข็ง (Solid state) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

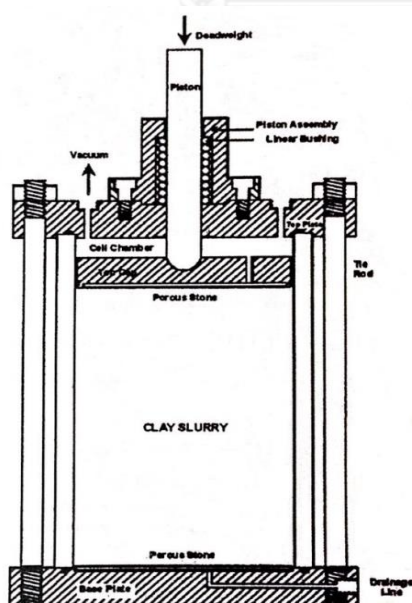


รูปที่ 3.3 สถานภาพของมวลดินโดยขึ้นกับปริมาณความชื้นในมวลดิน

3.3.3 การสร้างและทดสอบดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstitute Clay)

การทดสอบนี้ได้นำเสนอโดย B. Ukritchon และคณะ (2006) โดยลักษณะเครื่องมือทดสอบจะใช้เพื่อศึกษาการอัดตัวคายน้ำในสภาพ 1 มิติ ด้วยการระบายน้ำในแนวตั้ง ลักษณะเครื่องมือแสดงดังรูป 3.4 ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือประกอบด้วยแผ่นสแตนเลสด้านบนและด้านล่าง (Base Plate and Top Plate) ท่อทองเหลืองทรงกระบอก (Cell Chamber) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 155 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ส่วนประกอบทั้งสามส่วนยึดติดกันด้วยแกนสแตนเลส (Tei Rod) 4 แกน บริเวณรอยต่อติดแหวนยาง (O-ring) ป้องกันการรั่วซึม ใช้แผ่นกระจายน้ำหนัก (Top Cap) พร้อมกันเพลลา (Loading Piston) ส่งถ่ายน้ำหนัก dead weight ลงสู่ดิน โดยมีกระบอกลูกปืน (Piston Assembly) นำการเคลื่อนให้อยู่ในแนวตั้ง ที่ Top Cap และ Base Plate เจาะรูพร้อมติดตั้งแผ่นหินพรุนเพื่อระบายแรงดันน้ำส่วนเกินทางด้านบน และด้านล่างของตัวอย่าง ตามลำดับ โดยลักษณะทางกายภาพของเครื่อง Large Consolidometer ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.4

การทดสอบใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์ โดยเริ่มต้นจากการนำดินเหนียวอ่อนมาผสมน้ำแล้วปั่นเพื่อทำลายพันธะระหว่างอนุภาค หลังจากนั้นก็นำดินใส่ในเครื่อง Large Consolidometer และทำการปิดครอบด้วย Top Cap เพื่อกระจายแรงลงสู่เนื้อดิน จากนั้นก็นำตุ้มน้ำใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มความเค้นให้มวลดินเป็นชั้นๆ เริ่มจาก 10 กิโลกรัม เพิ่มทีละ 10 กิโลกรัมจนกระทั่งถึงระดับความเค้นที่ต้องการ โดยงานวิจัยนี้ใช้ระดับความเค้นที่ความลึกประมาณ 2 เมตร ของชั้นดินกรุงเทพฯ และแต่ละชั้นจะทิ้งน้ำหนักไว้ 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งอัตราการยุบตัวน้อยมากแล้ว เพื่อให้กระบวนการอัดตัวคายน้ำเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.4 เครื่อง Large Consolidometer (B. Ukritchon และคณะ, 2006)

3.3.4 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว (Oedometer Testing)

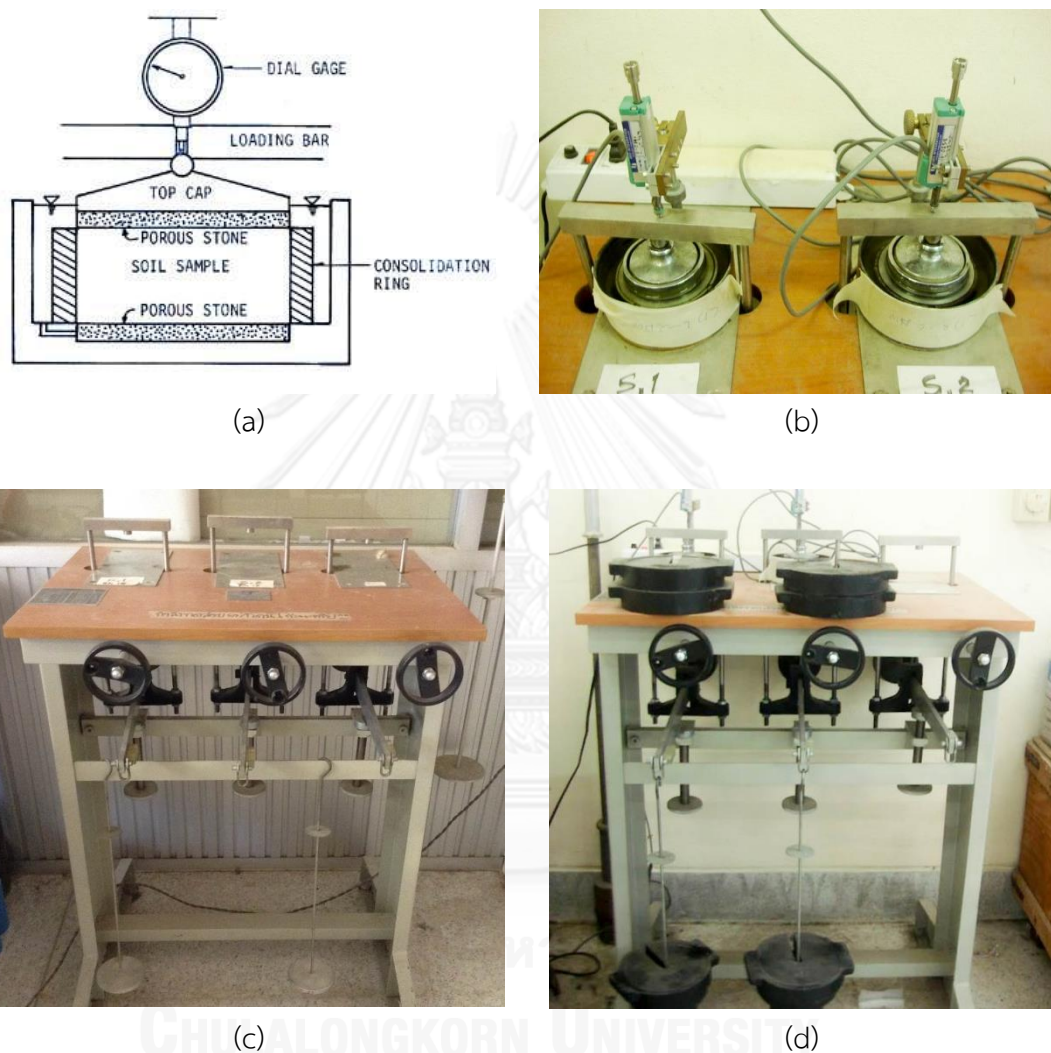
เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาปัญหาการทรุดตัวของชั้นดินอันเกิดจากการกดทับหรือน้ำหนักบรรทุกของสิ่งก่อสร้างบนผิวดิน ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. Elastic Deformation เกิดจากคุณสมบัติยืดหยุ่นของดินปกติ มักจะเกิดขึ้นทันทีที่มีน้ำหนักกดทับ และมีปริมาณไม่มากนัก
2. Primary Consolidation เกิดจากปริมาณน้ำหรืออากาศที่บีบออกจากมวลดินทำให้ปริมาตรรวมของดินลดลง ซึ่งมักเป็นสาเหตุสำคัญของการทรุดตัวของดินตะกอนในแถบลุ่มแม่น้ำ ใน กรุงเทพฯ, สมุทรปราการ, นนทบุรี, ปทุมธานี
3. Secondary Consolidation สันนิษฐานว่ามีสาเหตุมาจาก Plastic deformation และการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน เกิดขึ้นภายหลังจาก Primary Consolidation

การทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจาก Primary Consolidation มักเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหาย เช่น การทรุดตัวของถนนบริเวณคอสะพาน, การทรุดตัวของโครงสร้างถนน, การแตกร้าวของอาคารอันเนื่องจากการทรุดตัวมากเกินไปหรือทรุดตัวไม่เท่ากัน (Differential Settlement)

การทดสอบการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว (Oedometer Testing) จะทำการนำดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstitute Clay) มาทดสอบ โดยการทดสอบอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM Designation D 2435 มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคือ นำตัวอย่างดินมาตัดแต่งลงใน Consolidation ring โดยใช้ Specimen trimmer ช่วย ขนาดตัวอย่างมาตรฐานที่มักใช้ทดลองคือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว และหนา 1 นิ้ว หลังจากนั้นวัดขนาดตัวอย่างและชั่งน้ำหนักเพื่อจะคำนวณหาความหนาแน่นและ Initial void ratio ส่วนดินที่เหลือจากการตัดแต่งให้นำไปหาความชื้น ซึ่งเป็นความชื้นของตัวอย่างก่อนทดลองแล้ว นำตัวอย่างดินติดตั้งใน Consolidation ซึ่งมีหินพรุน (Porous stone) ประกอบทั้งของบนและล่างตัวอย่าง เพื่อให้ให้น้ำภายในตัวอย่างไหลออกได้สะดวกในขั้นตอนถัดไปก็นำ Consolidometer เข้าติดตั้งใน Loading frame ติด dial reading (LVDT) สำหรับวัดการทรุดของตัวอย่าง แล้วหล่อน้ำใน Consolidometer ให้ระดับน้ำอยู่เหนือระดับดินตัวอย่างดังรูปที่ 3.5 หลังจากนั้นก็ทำการทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักวางลงบนคานซึ่งสามารถขยายน้ำหนักให้กดลงบนตัวอย่างดินโดยปกติจะมีค่าเป็น 10 เท่าของน้ำหนักจริง ขนาดน้ำหนักที่จะใช้ขึ้นอยู่กับความลึกของตัวอย่าง โดยพิจารณาว่าจะต้องเริ่มต้นด้วยความดันที่น้อยกว่า Overburden pressure, P_0 แล้วเพิ่มจนมากกว่า โดยในงานวิจัยนี้ได้นำดินเหนียวสร้างใหม่ที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร มี $P_0 = 32$ kPa ดังนั้นความดันที่ใช้กดตัวอย่างจะอยู่ระหว่าง 12.5 – 300 kPa สำหรับขั้นตอนการใส่ น้ำหนักจะใส่ทั้งหมด 6 ครั้ง คือที่ความดันเท่ากับ 12.5, 25, 50, 100, 200, และ 300 kPa หลังจากวางน้ำหนักชุดแรกแล้วเครื่องคอมพิวเตอร์และชุดเก็บข้อมูลจะเก็บข้อมูลโดยอัตโนมัติหลังจากทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าตัวอย่างไม่เกิดการยุบตัวแล้ว จะต้องเพิ่มน้ำหนักชุดที่ 2 โดยปฏิบัติเช่นเดิมจนครบชุดน้ำหนักที่ระดับความดันเท่ากับ 300 kPa จากนั้นก็ทำการถอดน้ำหนักออกโดยขั้นตอนจะทำย้อนกลับจากการเพิ่มน้ำหนัก ก็เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของดินในการยึดตัว

จากการลดน้ำหนัก โดยให้ทำเช่นเดียวกันโดยเอาตุ้มน้ำหนักออกแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างหยุดการยัดตัว และหลังจากเสร็จการทดลองแล้วต้องนำตัวอย่างดินไปหาความชื้นต่อไป ลักษณะทางกายภาพของ Consolidometer การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะทางกายภาพ การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ ของ Consolidometer (a) รูปกราฟฟิก (b) ตัวอย่างพร้อมทดสอบ (c) ชุดโต๊ะทดสอบ (d) ทำการทดสอบโดยใส่ตุ้มน้ำหนัก

3.3.5 X-ray diffractometer (XRD)

ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ Theta รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน Theta เท่ากับมุมตกกระทบ ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปแบบการ Bragg's law หรือ $2d(\sin\theta) = n\lambda$ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุที่เป็นผลึกจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับการจัดเรียงตัวของ

อะตอมภายในผลึก ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จึงสามารถใช้เป็นตัวชี้บอกได้ว่าสารตัวอย่างนั้นประกอบด้วยวัฏภาคที่เป็นผลึกชนิดใดบ้าง ซึ่ง XRD นั้นเป็นการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวัฏภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง หลักการและวิธีการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)

ดังนั้นเทคนิค XRD จึงใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบของแร่ ซึ่งปริมาณของสารประกอบในรูปต่างๆที่มีอยู่ในวัสดุ นั้นมีนัยสำคัญต่อการพัฒนาคุณสมบัติต่างของตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาหาปริมาณสารประกอบในรูปออกไซด์ (oxide) และรูปต่างๆ ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ซีเมนต์ และแก้วลอย

3.3.6 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

หลักการการทำงานจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกรดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย (นาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล)

ซึ่งขนาดและรูปร่างของ ดินเหนียว และเถ้าลอยแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างกันจึง มีนัยสำคัญต่อลักษณะการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคของตัวอย่างที่ผสมระหว่างดินเหนียว ซีเมนต์ และเถ้าลอย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้เพื่อศึกษาเพื่อให้ทราบถึง ขนาด รูปร่าง และลักษณะทางกายภาพ ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ซีเมนต์ และเถ้าลอย

3.3.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression test)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดของวัสดุผสม โดยงานวิจัยนี้อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท 105/2515 ของกรมทางหลวง แสดงชุดอุปกรณ์การทดสอบดัง รูปที่ 3.7 Unconfined Compression test คือการทดสอบเพื่อหาค่า Compressive Strength ของดินตัวอย่างโดยประมาณในช่วงเวลาอันสั้น สำหรับการทดลองนี้ ค่า Unconfined Compression Strength จะมีค่าเท่ากับค่าน้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือถ้าตัวอย่างไม่เกิดการคราก ค่า Unconfined Compression Strength จะเท่ากับน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ที่ 15% ของ axial strain อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบในภาคปฏิบัติ มักจะใช้ค่า Undrain Shear strength มากกว่า ซึ่งถ้าหากเป็นการทดสอบดินเหนียวอ่อน หรือวัสดุที่ถือได้ว่าค่า friction angle มีค่าใกล้ศูนย์ ค่า Undrained Shear strength ก็ จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของ ค่า Unconfined Compression test

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบดินเหนียวอ่อนที่ถูกพัฒนา กำลังด้วยซีเมนต์และเถ้า ลอย จากตัวอย่างทรงกระบอกที่มีขนาดความสูงเท่ากับ 11.40 เซนติเมตร และเส้นผ่าน ศูนย์กลางเท่ากับ 5.70 เซนติเมตร เตรียมตัวอย่างโดยการนำดินเหนียวอ่อนมาทำการสลาย พันธะแล้วอบให้แห้งหลังจากนั้นบดเป็นผงแล้วนำมาผสมกับน้ำ ซีเมนต์ และเถ้าลอย ตาม เจริญใจที่ได้ออกแบบไว้ดังจะกล่าวต่อไป แล้วทำการหล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกในท่อ PVC หลังจากตัวอย่างเซตตัวก็นำไฮดรอลิกกดดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อและทำการตัดแต่ง ตัวอย่างให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยภาพแสดงขั้นตอนการหล่อตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 3.6 หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่บ่มตามอายุที่ต้องการไปทดสอบโดยเริ่มจากการแช่ตัวอย่างในน้ำ ก่อนทดสอบ 2 ชั่วโมง แล้วนำไปตรวจสอบขนาดของตัวอย่าง และทำการทดสอบในเครื่อง กดตัวอย่างที่เก็บค่าแรงกดในแนวตั้งและค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยภาพขั้นตอนการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.7

สำหรับค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่ใช้เป็นตัวกำหนดการแปรผันค่าปริมาณต่าง ของตัวอย่างทดสอบ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ (C) (น้ำหนักซีเมนต์แห้งต่อน้ำหนักดินแห้ง) ค่า เปอร์เซ็นต์เถ้าลอย (FA) (น้ำหนักเถ้าลอยแห้งต่อน้ำหนักซีเมนต์แห้ง) ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำในมวล ดิน (W_c) (น้ำหนักน้ำในมวลดินต่อน้ำหนักดินแห้ง)

สำหรับแผนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุผสมรวมดินเหนียวซีเมนต์ และ แผนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุผสมรวมดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย แสดงดัง ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการหล่อตัวอย่าง (a) ผสมตัวอย่างดินซีเมนต์และเถ้าลอย (b) หล่อตัวอย่างด้วยท่อ PVC (c) ใช้พลาสติกปิดป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกจากรหว่างรอตัวอย่างเซตตัว (c) ดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อหลังจากตัวอย่างเซตตัวแล้ว (d) ตัดแต่งตัวอย่างให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ (d) บ่มตัวอย่าง



(a)



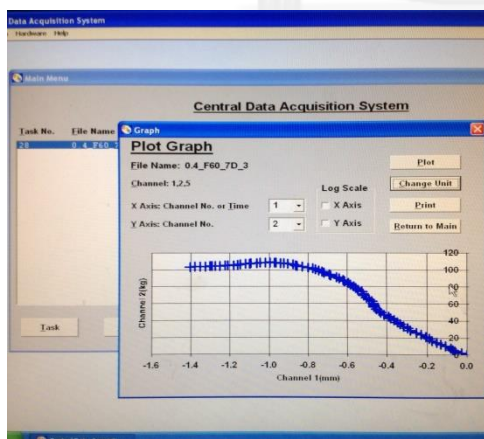
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและขั้นตอนการทดสอบ (a) เครื่องทดสอบ (b) แช่ตัวอย่าง
 ในน้ำ 2 ชั่วโมง (c) ตรวจสอบขนาดตัวอย่างก่อนการทดสอบ (d) ทดสอบตัวอย่าง (e) โปรแกรม
 คอมพิวเตอร์เก็บค่าอัตโนมัติ (f) ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างหลังการทดสอบเสร็จสมบูรณ์

ตารางที่ 3.2 แผนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมดินเหนียวซีเมนต์

ลำดับที่	C/W _c	Liquidity Index (%W _c)	จำนวนตัวอย่าง การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบ ปราศจากแรงดันด้านข้าง	
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
1	0.2	1.6 (96)	3	3
2		1.3 (84)	3	3
3		1.0 (72)	3	3
4	0.3	1.6 (96)	3	3
5		1.3 (84)	3	3
6		1.0 (72)	3	3
7	0.4	1.6 (96)	3	3
8		1.3 (84)	3	3
9		1.0 (72)	3	3

ตารางที่ 3.3 แผนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

ลำดับที่	C/W _c	อัตราส่วนร้อยละ ปริมาณเถ้าลอย ต่อการแทนที่ ซีเมนต์ (FA)	จำนวนตัวอย่าง การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจาก แรงดันด้านข้าง		
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน	บ่ม 60 วัน
1	0.3	0	3	3	3
2		15	3	3	3
3		30	3	3	3
4		45	3	3	3
5		60	3	3	3
6	0.4	0	3	3	3
7		15	3	3	3
8		30	3	3	3
9		45	3	3	3
10		60	3	3	3

หมายเหตุ ใช้เถ้าลอยสองชนิดคือเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ โดยทำการทดสอบตามตารางเหมือนกันทั้งสองชนิด

3.3.8 การทดสอบการหดตัวแห้งด้วยวิธีทางภาพถ่าย (Drying Shrinkage Test by Digital Image Processing)

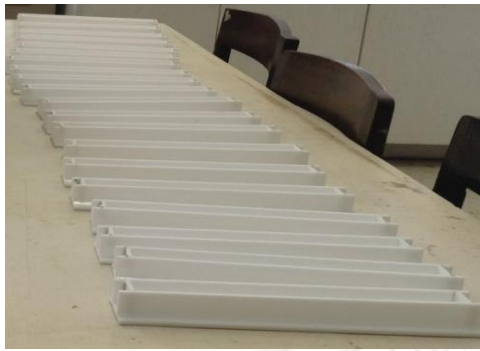
การทดสอบนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบการหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) โดยขนาดของตัวอย่างและกระบวนการเตรียมตัวอย่าง อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 596 – 96 โดยหลังจากเตรียมตัวอย่างเสร็จแล้วก็ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวของตัวอย่างในระนาบสองมิติ ซึ่งค่าการหดตัวนั้นจะแปรผันตามอายุ และปัจจัยภายนอกของตัวอย่าง โดยมีการสันนิษฐานว่าปัจจัยหลักๆที่มีผลต่อการหดตัวของตัวอย่าง ก็คือ อุณหภูมิ ความชื้น และอัตราการระเหยในสภาพแวดล้อม รวมไปถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่าง

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แบบหล่อขนาด กว้าง 25 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร ยาว 285 มิลลิเมตร เพื่อทำการหล่อตัวอย่าง โดยในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะนำดินเหนียวอ่อนมาทำการสลายพันธะแล้วอบให้แห้ง หลังจากนั้นบดเป็นผงแล้วนำมาผสมกับน้ำ ซีเมนต์ และเถ้าลอย ตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ แล้วทำการหล่อตัวอย่างตามขนาดที่ได้กล่าวไปข้างต้นในแบบหล่อที่ทำมาจากแผ่นอะคริลิกสีขาวที่สร้างขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อให้ง่ายต่อการระบุความแตกต่างของสีวัสดุกับสีของแบบหล่อ หลังจากทำการหล่อตัวอย่างเสร็จแล้วให้นำตัวอย่างไปบ่มในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเสียก่อนที่จะเกิดการสูญเสีย น้ำ จนน้ำไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา เป็นเวลา 7 วัน โดยแสดงภาพการเตรียมตัวอย่างดังรูปที่ 3.8 หลังจากเตรียมตัวอย่างเสร็จแล้วก็เริ่มทำการทดสอบการหดตัวโดยนำตัวอย่างออกมาอยู่ในสภาพอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตามธรรมชาติ และเริ่มนับเวลาจากศูนย์โดยทันที ซึ่งจะเก็บภาพตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัล ที่มีระยะภาพเท่ากันทุกภาพที่ทำการทดสอบ โดยจะเก็บภาพที่ตัวอย่างอายุ 1, 3, 5, 7, 14, 21, และ 28 วัน

หลังจากเก็บภาพเสร็จเรียบร้อยแล้วก็นำภาพถ่ายมาดำเนินการในโปรแกรม Photoshop CS4 เพื่อทำการหาค่าพิกเซลเริ่มต้นของภาพถ่ายที่ถูกตัดแต่งขอบตามขนาดแบบหล่อ (เท่ากับพิกเซลก่อนที่ตัวอย่างจะหดตัว) หลังจากนั้นทำการหาค่าพิกเซลของรอยแตกและรอยการหดตัวของตัวอย่าง (เท่ากับพิกเซลการหดตัวทั้งหมด) และทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวโดยการหาค่าอัตราส่วนร้อยละระหว่างค่าพิกเซลรอยแตกและรอยการหดตัวกับค่าพิกเซลเริ่มต้นก่อนการหดตัว

สำหรับกระบวนการในโปรแกรม Photoshop CS4 นั้น เริ่มแรกจะทำการหมุนภาพให้อยู่ในระนาบขนานด้วยฟังก์ชัน Rotate Canvas โดยคลิกที่แถบเครื่องมือด้านบนที่ชื่อว่า Image แล้วคลิกที่ Image Rotation สุดท้ายคลิกที่ Arbitrary หลังจากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Rotate Canvas ขึ้นมา ทำให้สามารถปรับหมุนภาพได้ตามที่ต้องการ ในขั้นถัดไป จะทำการตัดแต่งภาพให้ได้ขนาดตามขนาดของตัวอย่างด้วยฟังก์ชัน Crop Tool แล้วทำการเก็บค่าพิกเซลของภาพ (ก่อนหดตัว) ที่แสดงในฟังก์ชันฮิสโตแกรม (Histogram) จากนั้นใช้ฟังก์ชัน Magic Wand Tool เพื่อกำหนดพื้นที่ของความต่างระหว่างสีผิวของวัสดุกับผิวของพื้นที่ว่างที่เกิดจากการหดตัวของวัสดุ แล้วใช้ฟังก์ชัน Lasso Tool ช่วยในการตัดแต่งภาพส่วนที่เกิดการหดตัวไปให้มีความถูกต้องและชัดเจนยิ่งขึ้นโดยการเปลี่ยนส่วนที่หดตัวไปให้

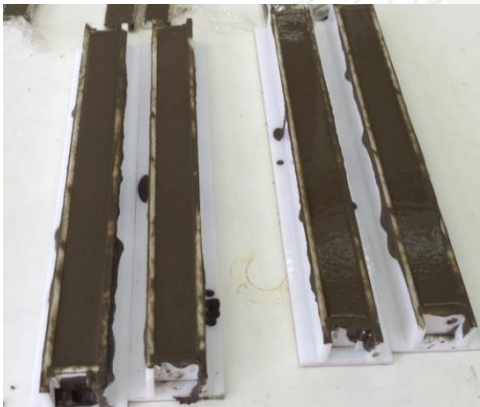
เป็นสีขาวเพื่อให้เกิดความต่างระหว่างผิวที่หดตัวไปกับผิวของวัสดุ แล้วทำการเก็บค่าพิกเซลของพื้นที่ที่เกิดการหดตัว (สีขาว) ของวัสดุ โดยกดเลือกฟังก์ชัน Magic Wand Tool อีกครั้ง แล้วทำการคลิกไปที่พื้นที่สีขาว ก็จะได้ค่าจำนวนพิกเซลของช่องว่างที่หดตัวไป โดยในรายละเอียดจะแสดงดังรูปที่ 3.9



(a)



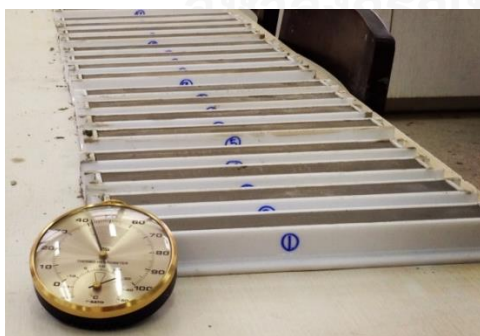
(b)



(c)



(d)

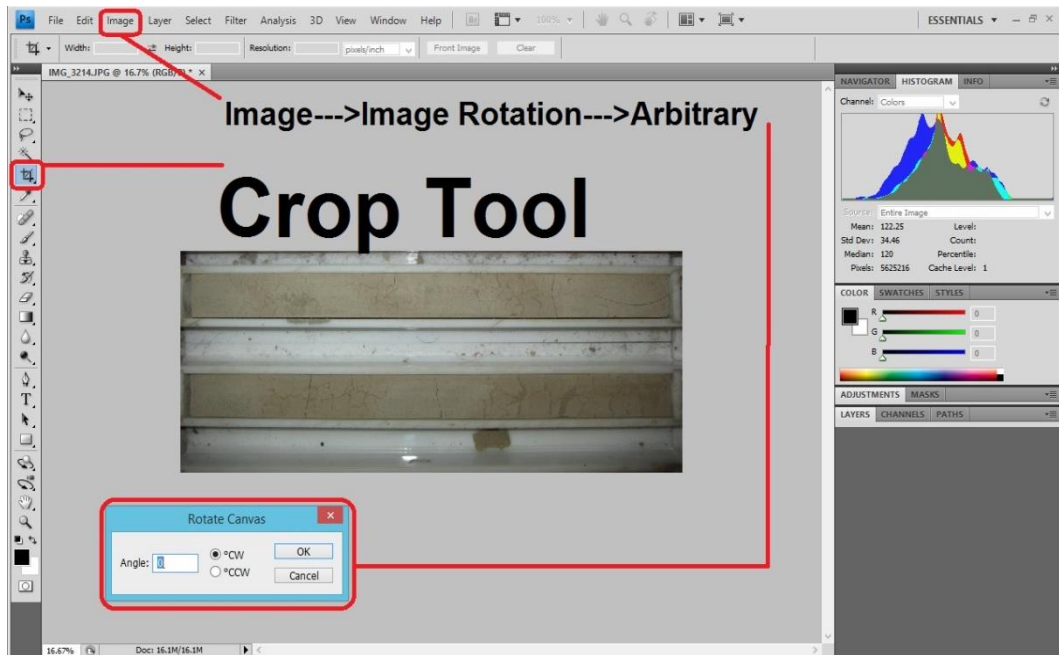


(e)

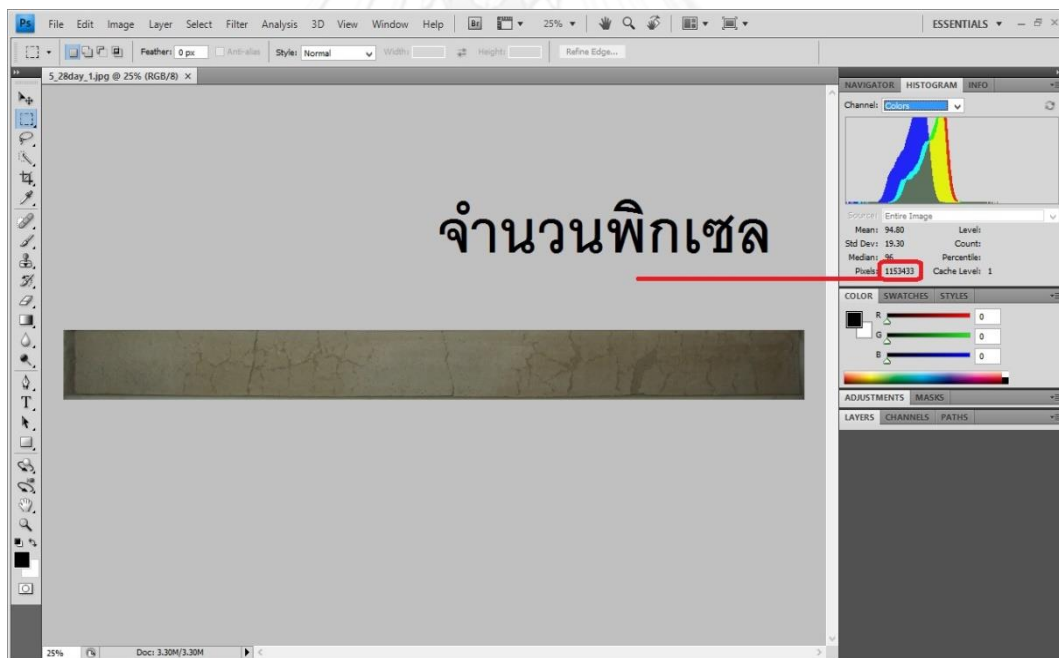


(f)

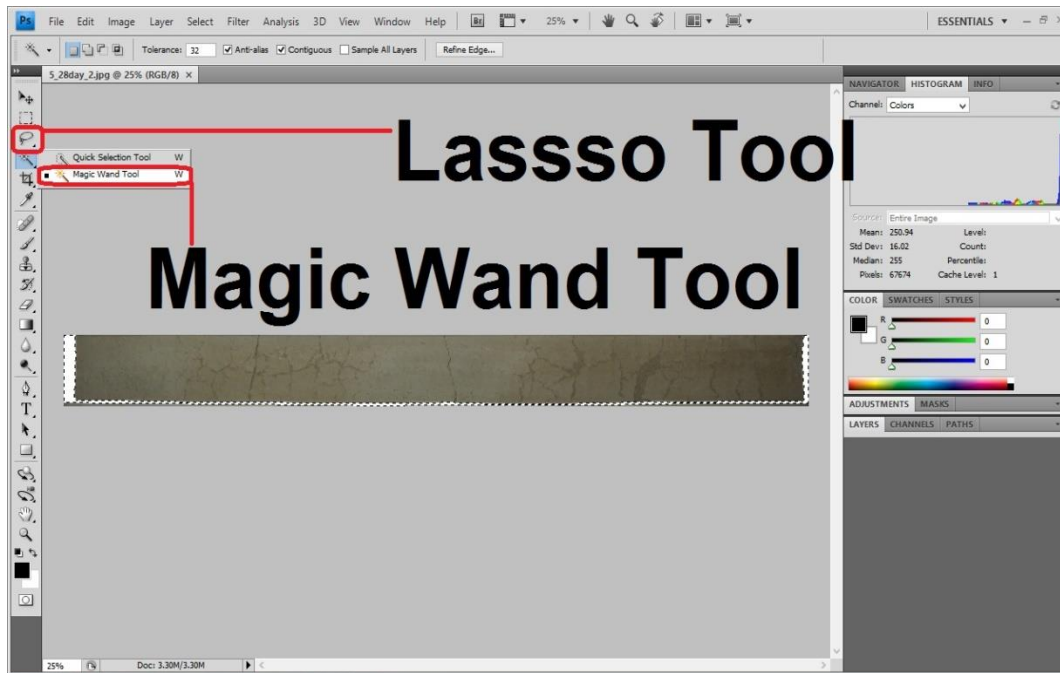
รูปที่ 3.8 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการหดตัวแห้ง (a) แบบหล่อตัวอย่าง (b) ผสมตัวอย่างดินซีเมนต์และเถ้าลอย (c) เทตัวอย่างลงแบบหล่อพร้อมตัดแต่งผิวหน้า (d) บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์ (e) หลังจากบ่มครบ 7 วัน ings ตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิและความชื้นที่ห้อง (f) ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง



(a)



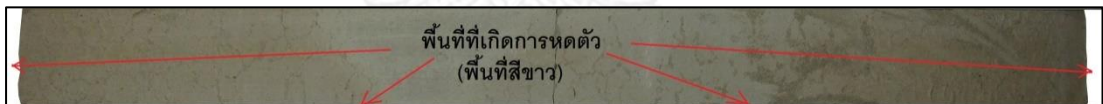
(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 3.9 วิธีการทางภาพถ่ายเพื่อหาจำนวนพิกเซลโดยโปรแกรม Photoshop CS4 ของตัวอย่างอายุ 28 วัน (a) ตัดแต่งภาพด้วยฟังก์ชัน Rotate Canvas และ Crop Tool (b) ตรวจสอบวัดจำนวนพิกเซลของตัวอย่างก่อนการหดตัวในหน้าต่าง Histogram (c) ตรวจสอบวัดจำนวนพิกเซลช่องว่างของตัวอย่างที่หดตัวไปด้วยฟังก์ชัน Lasso Tool และ Magic Wand Tool (d) ภาพตัวอย่างแสดงพื้นผิวทั้งหมดของแบบหล่อ (ก่อนการหดตัว) (e) ภาพตัวอย่างแสดงช่องว่างที่เกิดจากการหดตัวของตัวอย่าง

ตารางที่ 3.4 แผนการทดสอบการหดตัวของวัสดุมวลรวมดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

ลำดับที่	C/W_c	อัตราส่วนร้อยละปริมาณ เถ้าลอยต่อการแทนที่ ซีเมนต์ (FA)	จำนวนตัวอย่าง การทดสอบการหดตัว
1	0.3	0	2
2		15	2
3		30	2
4		45	2
5		60	2
6	0.4	0	2
7		15	2
8		30	2
9		45	2
10		60	2

หมายเหตุ ใช้เถ้าลอยสองชนิดคือเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ โดยทำการทดสอบตามตารางเหมือนกันทั้งสองชนิด

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะเป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆของวัสดุ ดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการทดสอบวัสดุผสมระหว่างดินเหนียว ซีเมนต์ และเถ้าลอย โดยดินเหนียวอ่อนที่นำมาใช้ถูกเก็บมาจากจังหวัดนนทบุรี เถ้าลอยถูกนำมาจากสองแหล่ง คือ จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ อำเภอม่วง จังหวัดราชบุรี ในส่วนของปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้คือพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ 1 ที่ใช้ทั่วไปในท้องตลาด

หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆของวัสดุที่นำมาใช้และวัสดุผสมแล้ว จะทำการนำผลต่างๆไปสร้างแบบจำลองโครงสร้างของถนนด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Program) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Plaxis 2D ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการสร้างแบบจำลองทางธรณีเทคนิค ในส่วนของรายละเอียดของแบบจำลองและผลการจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D จะแสดงในบทถัดไป

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ ดินเหนียวอ่อน ซีเมนต์ และเถ้าลอย ที่นำมาใช้

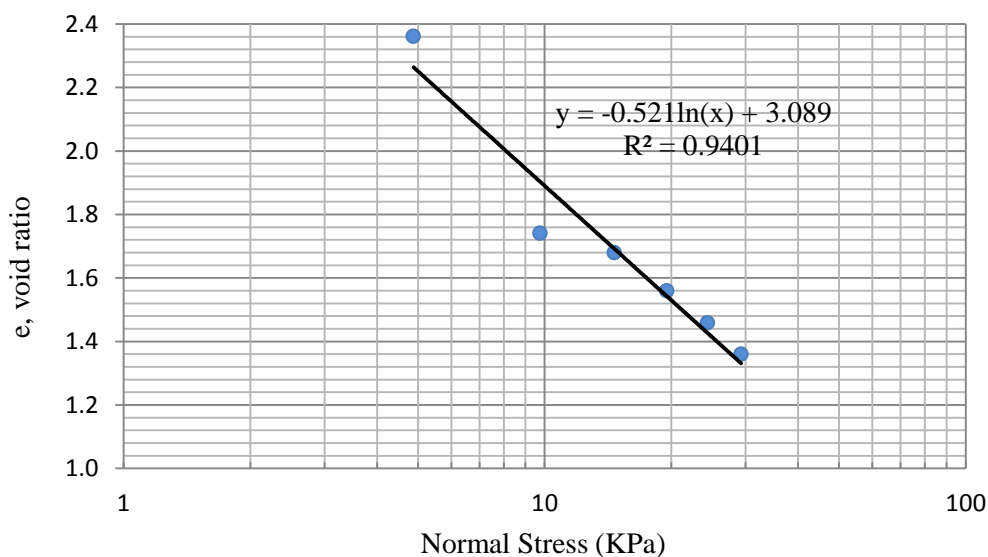
4.2.1 ผลการทดสอบดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstitute Clay Test)

การทดสอบนี้เป็นการสร้างดินเหนียวขึ้นมาใหม่ตามเงื่อนไขที่เราต้องการโดยในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองดินเหนียวอ่อนให้อยู่ในสภาพความลึกใกล้เคียงกับระดับความลึกของโครงสร้างถนนที่อยู่ในแถบที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย ที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร ก่อนทำการทดสอบพบว่าดินเหนียวที่เป็นวัสดุตั้งต้นมีค่าความชื้นธรรมชาติ (Natural Water Content) เท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการทดสอบได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างในมวลดิน (void ratio) กับค่าหน่วยแรงกดในแนวตั้ง (Normal Stress) แสดงดังรูปที่ 4.1 และจากความชันของกราฟจะได้ค่าดัชนีการยุบตัว (Compression Index, C_c) ของดินเหนียวสร้างใหม่เท่ากับ 0.52 ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าโดยทั่วไปของดินเหนียวอ่อน ซึ่งอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.5 (Prof. Juan M. Pestana-Nascimento, University of California, Berkeley)

4.2.2 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Test)

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวที่ได้จากการศึกษา ได้ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Average Specific Gravity at 20 °C) มีค่าเท่ากับ 2.64 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับดินเหนียวธรรมชาติในกรุงเทพมหานคร ในส่วนของเถ้า

ลอยที่มาจากอำเภอต่อม่วงจังหวัดราชบุรีนั้นมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.56 และถ้ำลอยที่มาจากอำเภอมะแมะจังหวัดลำปางมีค่าเท่ากับ 2.10



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio กับ normal stress

4.2.3 ผลการทดสอบ Atterberg's limits

ผลการทดสอบค่า Atterberg's limits ของดินเหนียวที่ศึกษาพบว่ามีขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage limit, SL) ดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) และดัชนีเหลว (Liquidity index, LI) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งจกตารางพบว่าค่าต่างๆนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าทั่วไปของดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งมีค่า Liquid limit อยู่ในช่วง 81-88% Plastic limit อยู่ในช่วง 33-36% Plasticity index อยู่ในช่วง 45-52% และ Liquidity index 72-96% อยู่ในช่วง (สมชาย อัครพงศ์พิสัย, 2513)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ Atterberg's limits

วัสดุ	Liquid limit % (LL)	Plastic Limit % (PL)	Shrinkage Limit % (SL)	Plastic Index % (PI)	Liquidity Index % (LI)
ดินเหนียวอ่อน	71.78	31.31	11.35	40.47	51.36
ถ้ำลอยแม่แมะ	Non-Plastic				
ถ้ำลอยราชบุรี	Non-Plastic				

4.2.4 ผลการทดสอบ XRF (X-ray fluorescence spectrometry)

พบว่าปริมาณแร่โดยส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในดินเหนียวและเถ้าลอยจะมีแร่ควอตซ์ (Quartz) ประปนอยู่จำนวนมาก และหลังจากการตรวจสอบด้วยวิธี XRF พบว่าสารประกอบในรูปออกไซด์ (Oxide) ที่มีอยู่ในแร่ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , SO_3 , K_2O , Na_2O , ZnO , P_2O_5 , BaO , และ MnO แต่ในส่วนของสารประกอบในปูนซีเมนต์จะใช้ค่าตามมาตรฐานจากผู้ผลิต โดยค่าปริมาณสารประกอบต่างๆ (Chemical Composition) แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณสารประกอบต่างๆจากการทดสอบ XRF

Chemical Composition	Percent of Composition			
	ดินเหนียวอ่อน	เถ้าลอยแม่เมาะ	เถ้าลอยราชบุรี	ปูนซีเมนต์
SiO_2	62.70	30.90	24.10	20.90
Al_2O_3	21.00	17.60	10.30	4.76
Fe_2O_3	7.50	14.80	3.58	3.41
CaO	0.87	23.24	49.80	65.41
MgO	1.86	2.12	2.44	1.25
SO_3	0.88	5.87	1.45	2.71
Na_2O	0.96	1.64	0.33	0.24
K_2O	2.79	2.73	0.60	0.35
TiO_2	1.05	0.42	1.69	-
MnO	0.27	-	-	-
P_2O_5	-	0.29	-	-
BaO	-	0.15	-	-
LOI	-	-	-	0.96
Cl	-	-	-	-
ZO			0.26	

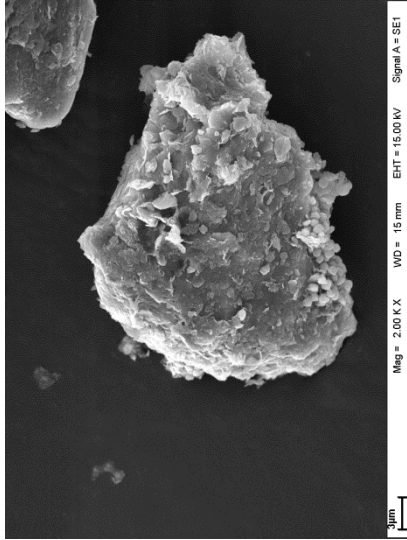
มาตรฐาน ASTM C618 ได้จัดแยกประเภทของเถ้าลอยไว้ 2 ชนิดคือ Class F และ Class C โดย Class F มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมกันแล้วมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และ Class C มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมกันแล้วอยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก และต้องมี Sulfur trioxide (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งสอง Class เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติย่อมมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ การที่เถ้าลอยจากแหล่งเดียวกันพบว่าเป็น Class C และ Class F เป็นเรื่องที่เป็นปกติ จากการทดสอบพบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมกันอยู่ร้อยละ 63.3 จึงถูก

จัดให้อยู่ใน Class C แถ้ลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ อำเภอท่าม่วง จังหวัดราชบุรี มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมกันอยู่ร้อยละ 37.98 ต่ำกว่ามาตรฐาน Class C อยู่ร้อยละ 12.02 ในส่วนของดินเหนียวอ่อนนั้นพบว่าปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมกันอยู่มากถึงร้อยละ 91.20

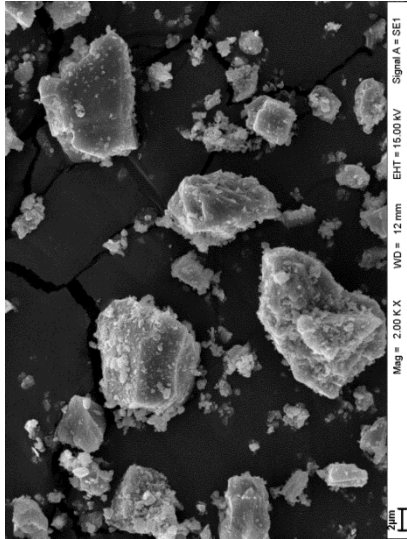
จากค่าปริมาณ Chemical Composition พบว่า แถ้ลอยจากแม่เมาะมีค่าปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) แต่สำหรับลอยแถ้ลอยจากอำเภอท่าม่วงอาจมีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างสมบูรณ์ แต่ก็อาจเป็นไปได้ว่าหลังจากผสมกับดินเหนียวอ่อนแล้วปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ที่มีอยู่ในดินเหนียวอาจจะมีมากพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างสมบูรณ์ สำหรับการตรวจสอบผลด้านการพัฒนา กำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากการเพิ่มแถ้ลอยแต่ละชนิดเข้าไปในดินซีเมนต์ จะอธิบายในหัวข้อการรับแรงอัดของดินเหนียวอ่อนที่ถูกพัฒนา กำลังด้วยซีเมนต์และแถ้ลอย

4.2.5 ผลการทดสอบ SEM (Scanning Electron Microscope)

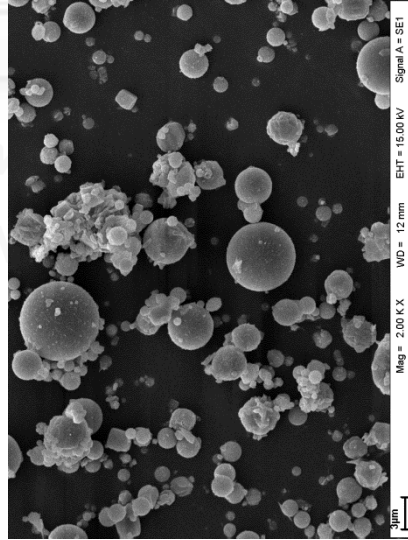
การทดสอบ SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อดูลักษณะทางกายภาพ รูปทรง และขนาดของอนุภาคของดินเหนียวอ่อน ซีเมนต์ แถ้ลอยจากแม่เมาะ และจากท่าม่วง จากการทดสอบพบว่าที่กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นขนาดของตัวอย่างค่อนข้างชัดเจน โดยตัวอย่างมีขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน พบว่าดินเหนียวมีขนาดอนุภาคประมาณเล็กกว่าหรือเท่ากับ $1 \mu\text{m}$ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีขนาดอนุภาคประมาณเล็กกว่าหรือเท่ากับ $8 \mu\text{m}$ แถ้ลอยจากแม่เมาะมีขนาดอนุภาคประมาณเล็กกว่าหรือเท่ากับ $4 \mu\text{m}$ และแถ้ลอยจากท่าม่วงมีขนาดอนุภาคประมาณเล็กกว่าหรือเท่ากับ $40 \mu\text{m}$ และในส่วนที่กำลังขยาย 7000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นลักษณะของผิวและรูปทรงของอนุภาคได้อย่างชัดเจน พบว่าดินเหนียวมีลักษณะของอนุภาคเป็นแบบแผ่นบาง พอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีลักษณะของอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมและอยู่เดี่ยวๆ แถ้ลอยแม่เมาะมีลักษณะของอนุภาคเป็นทรงกลมชัดเจน และแถ้ลอยจากราชบุรีมีลักษณะของอนุภาคเป็นผลึกเหลี่ยมมุมขนาดใหญ่



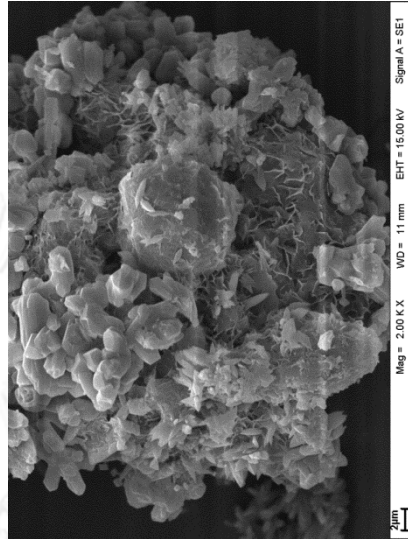
(a)



(b)

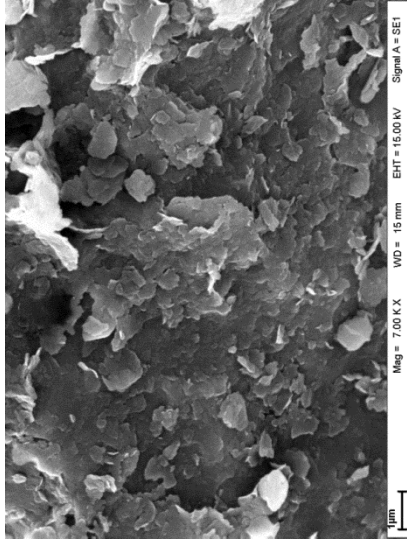


(c)

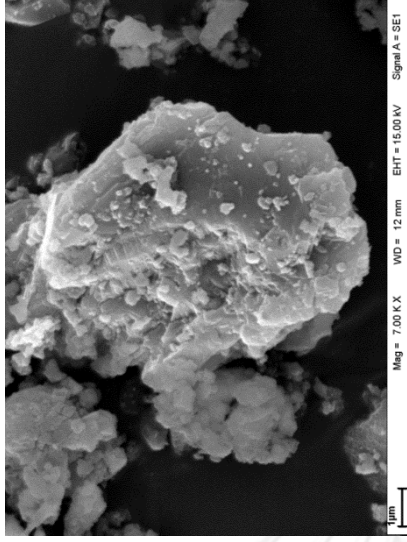


(d)

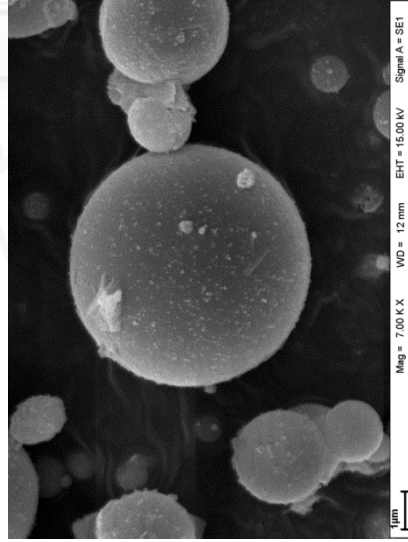
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (a) ดินเหนียวอ่อน (b) พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (c) เถ้าลอยแม่เมาะ (d) เถ้าลอยราชบุรี



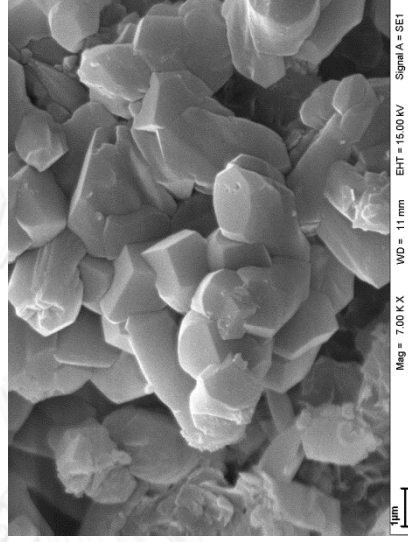
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 7000 เท่า (a) ดินเหนียวอ่อน (b) พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (c) เถ้าลอยแม่เมาะ (d) เถ้าลอยราชบุรี

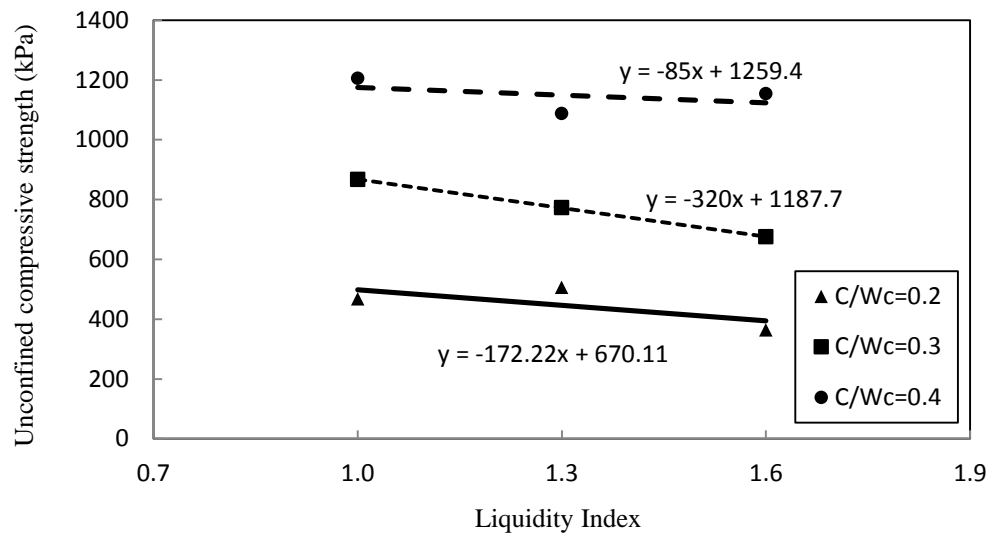
4.2.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test) จะได้ค่ากำลังอัดสูงสุดในแนวตั้งสูงสุด (Unconfined Compressive Strength, q_u) และค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด (Secant Young's modulus at 50% of strength, E^{50}) โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนคือ การทดสอบดินเหนียวผสมซีเมนต์ ดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ อำเภอนาทม จังหวัดราชบุรี

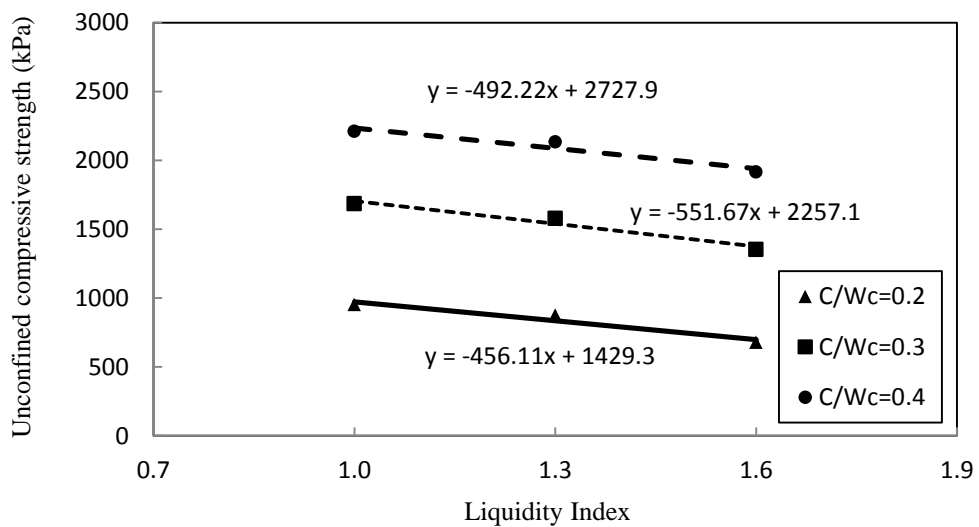
4.2.6.1 ผลการทดสอบดินเหนียวผสมซีเมนต์

จากการทดสอบหาลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน ได้ผลการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ ก-1 ในภาคผนวก ก และได้ผลการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ ก-2 ในภาคผนวก ก จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างเป็นไปตามปกติ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์ ในช่วง 28 วันแรกซึ่งเกิดจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวและมีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุ 28 วัน นอกจากนั้นยังพบว่าที่ค่า C/W_c เท่ากัน ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสซีแคน์จะลดลงอย่างคงที่ที่เล็กน้อยมาก หรืออาจประมาณได้ว่าไม่มีการลดลงตามการเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปในตัวอย่าง จึงกล่าวได้ว่าเมื่อค่า C/W_c เท่ากัน ในเงื่อนไขที่ค่า C/W_c อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.4 และค่าปริมาณน้ำอยู่ในช่วง $LI = 1.0$ ถึง $LI = 1.6$ จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากัน โดยแนวโน้มของกราฟค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4.4 และแนวโน้มของกราฟค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4.5

สำหรับค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้นั้น จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มค่า C/W_c โดยในงานวิจัยส่วนนี้จะได้ค่าสูงสุดที่ค่า $C/W_c = 0.4$ โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 2212 kPa และค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 231 MPa และจะได้ค่าต่ำสุดค่า $C/W_c = 0.2$ โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 364 kPa และค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 56 MPa พบว่าที่ค่า $C/W_c = 0.2$ คุณสมบัติไม่เหมาะสมต่อการนำไปปรับปรุงคุณภาพชั้นทาง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำดินซีเมนต์ที่ค่า $C/W_c = 0.3$ และ 0.4 ไปศึกษาต่อเกี่ยวกับการเพิ่มเถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป



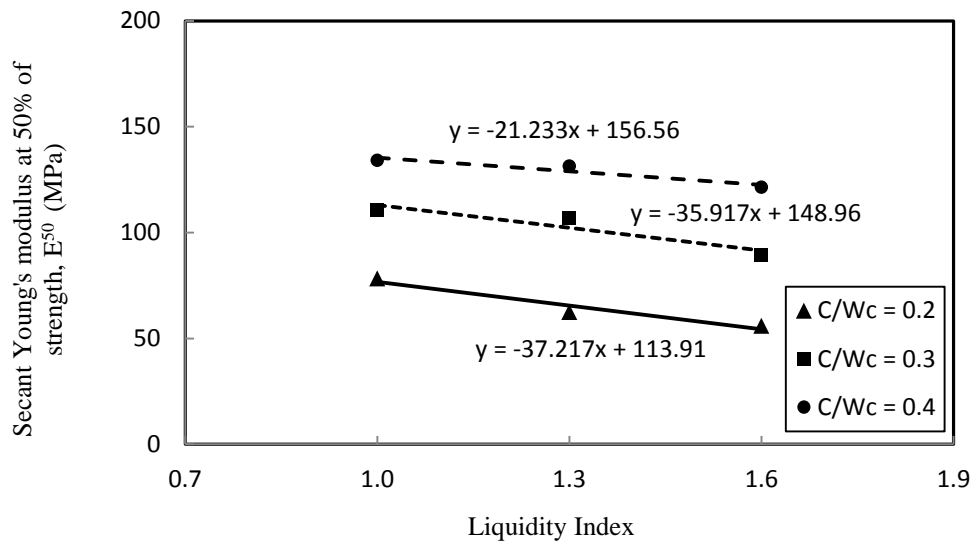
(a)



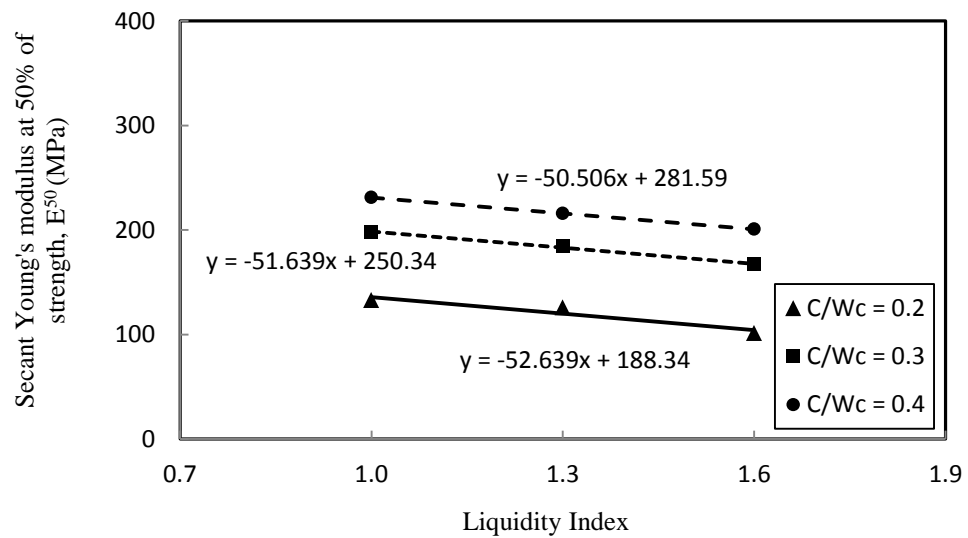
(b)

รูปที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามการเพิ่มปริมาณน้ำของดินซีเมนต์

(a) อายุบ่ม 7 วัน (b) อายุบ่ม 28 วัน



(a)



(b)

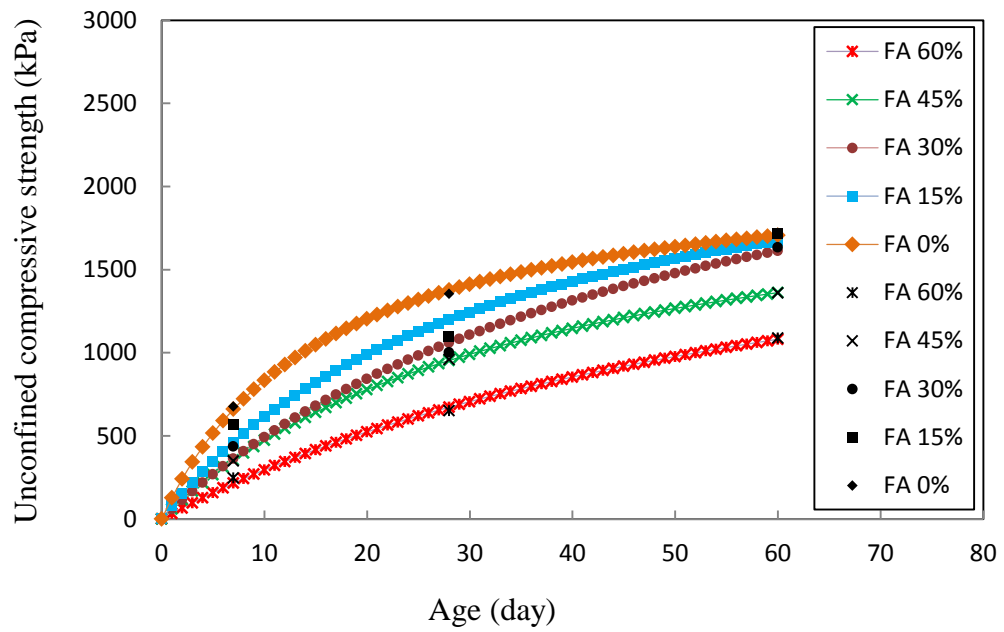
รูปที่ 4.5 โมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามการเพิ่มปริมาณน้ำของดินซีเมนต์ (a) อายุบ่ม 7 วัน (b) อายุบ่ม 28 วัน

4.2.6.2 ผลการทดสอบดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

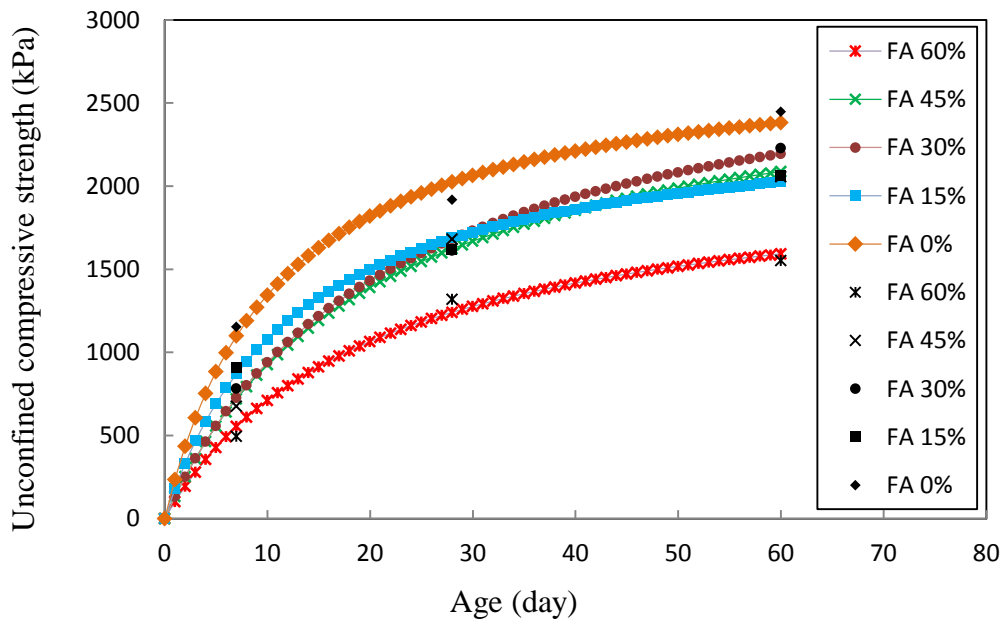
หลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test) ของดินเหนียวผสมซีเมนต์เสร็จ ก็ทำการทดสอบดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่อายุบ่ม 7, 28, และ 60 วัน โดยเลือกใช้ค่า $C/W_c = 0.3$ และ 0.4 ปริมาณน้ำที่ $LI = 1.6$ และแปรผันค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 0, 15, 30, 45, และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยจากการทดสอบหาลำกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง และค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ได้ผลการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ ข-1 ภาคผนวก ข ผลการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ ข-2 ภาคผนวก ข และผลการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ ข-3 ภาคผนวก ข

จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างเป็นไปตามปกติ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์ ในช่วง 28 วันแรก ซึ่งเกิดจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวและมีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุ 28 วัน และหลังจาก 28 วัน ค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนถึง 60 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยแนวโน้มของกราฟค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4.6 และแนวโน้มของกราฟค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4.7

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในตัวอย่างจะทำให้ทั้งค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 7, 28, และ 60 วัน จะค่อยๆลดลงทีละน้อยอย่างคงที่และต่อเนื่อง ทั้งที่ C/W_c เท่ากับ 0.3 และ 0.4 เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มเถ้าลอยเข้าไปในตัวอย่าง ปริมาณซีเมนต์ก็ลดน้อยลงตามไปด้วย ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยลง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในตัวอย่างจึงไม่สามารถช่วยพัฒนาลำกำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างได้ เนื่องจากสารประกอบที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่อยู่ในดินเหนียวเพียงพออยู่แล้ว โดยแนวโน้มของกราฟค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 4.8 และแนวโน้มของกราฟค่าโมดูลัสซีแคน์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 4.9

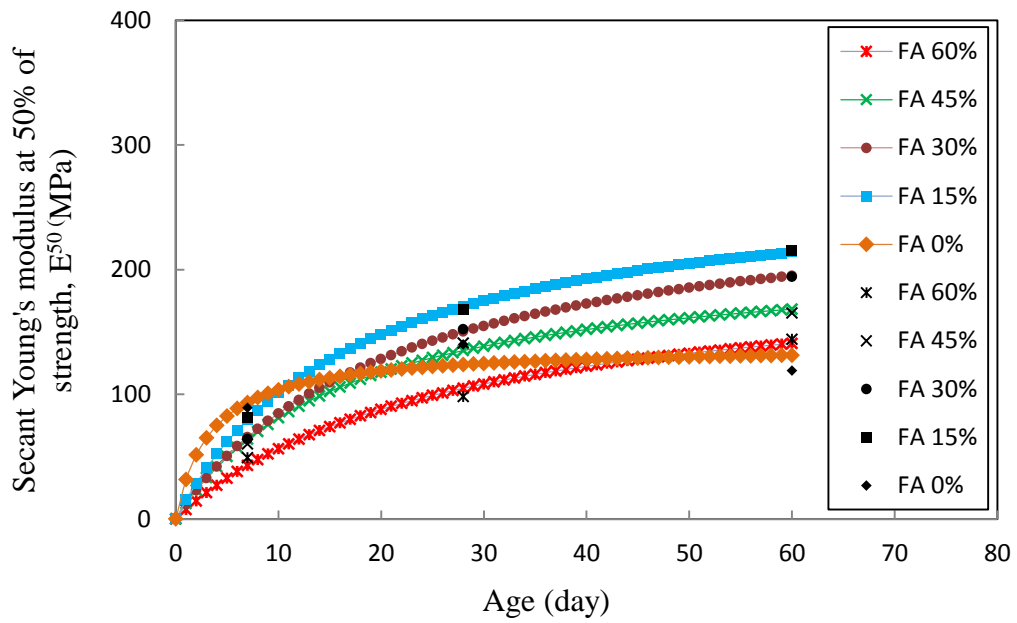


(a)

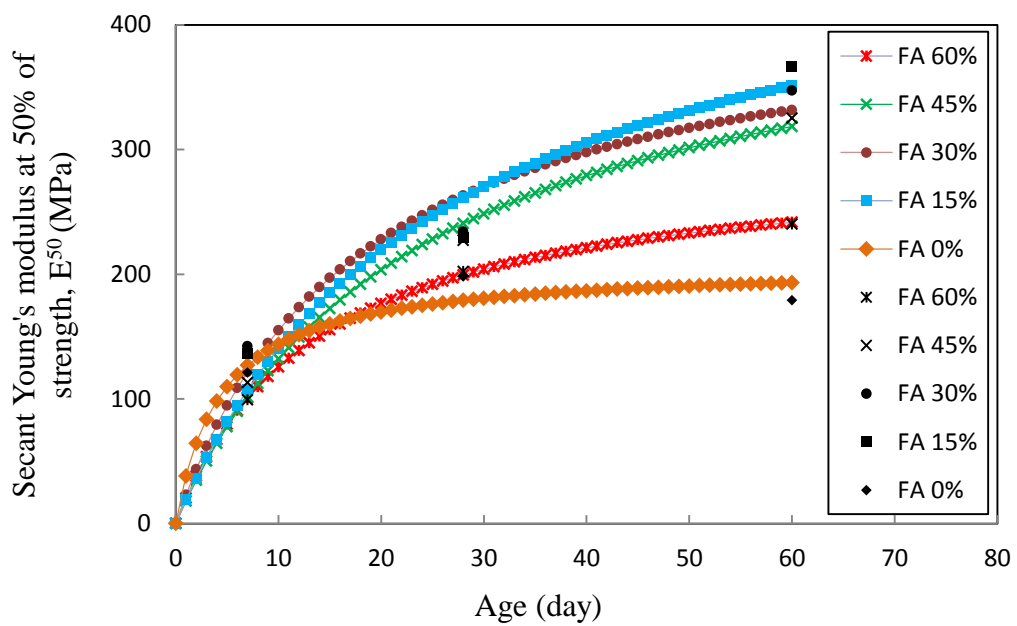


(b)

รูปที่ 4.6 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดตามอายุปมตัวอย่าง (a) $C/W_c = 0.3$ (b) $C/W_c = 0.4$

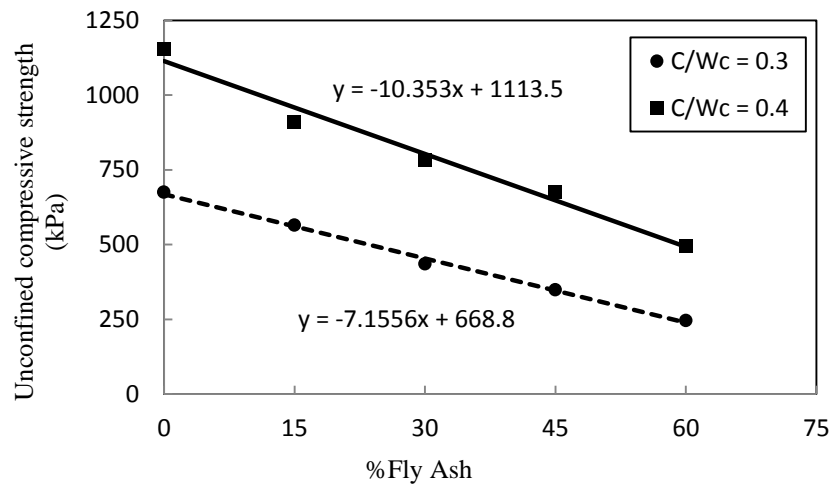


(a)

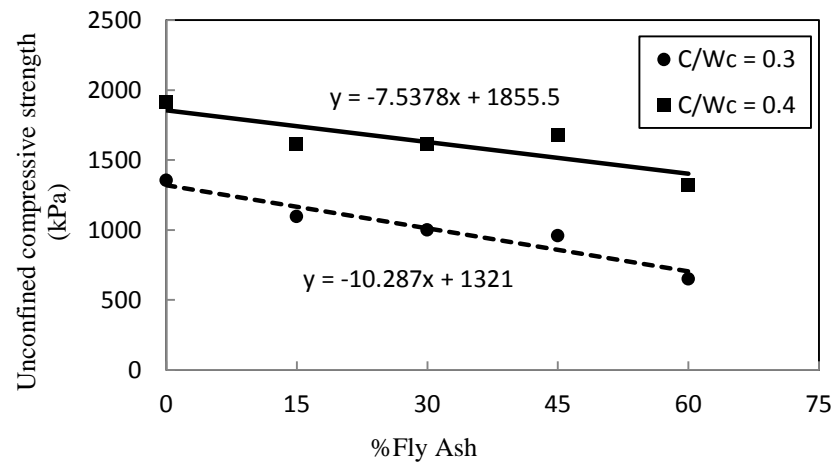


(b)

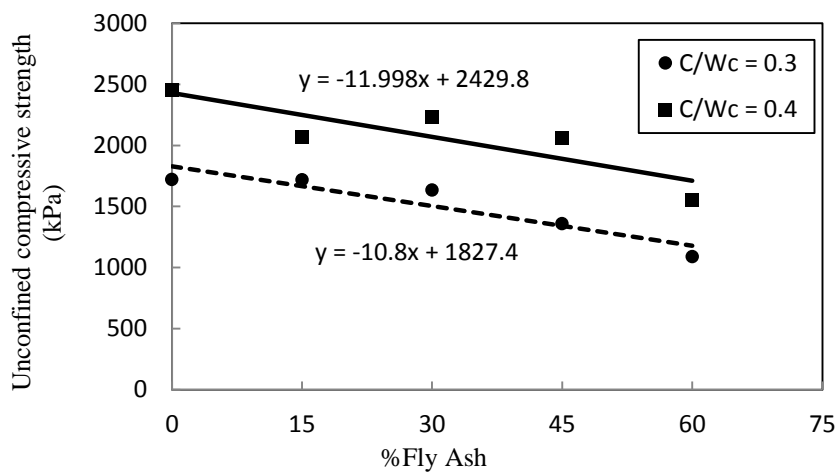
รูปที่ 4.7 การเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามอายุบ่ม
ตัวอย่าง (a) $C/W_c = 0.3$ (b) $C/W_c = 0.4$



(a)

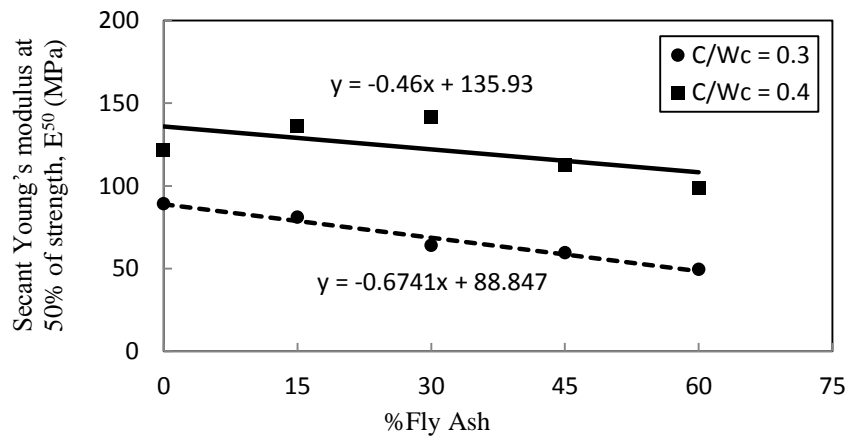


(b)

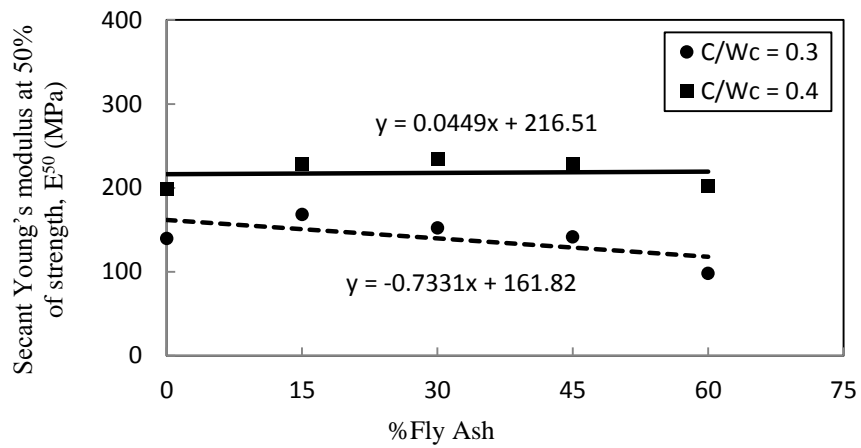


(c)

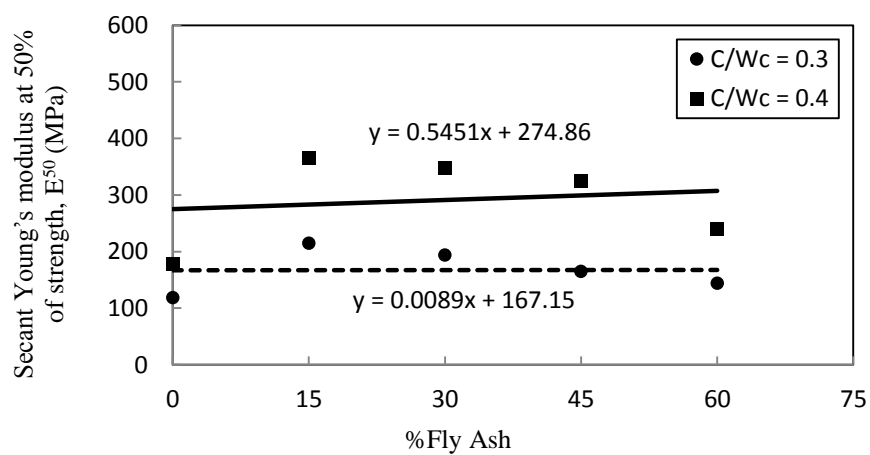
รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย (a) อายุ 7 วัน (b) อายุ 28 วัน (c) อายุ 60 วัน



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.9 ค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอย

(a) อายุ 7 วัน (b) อายุ 28 วัน (c) อายุ 60 วัน

4.2.6.3 ผลการทดสอบดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรม ผลิตกระดาษ จังหวัดราชบุรี

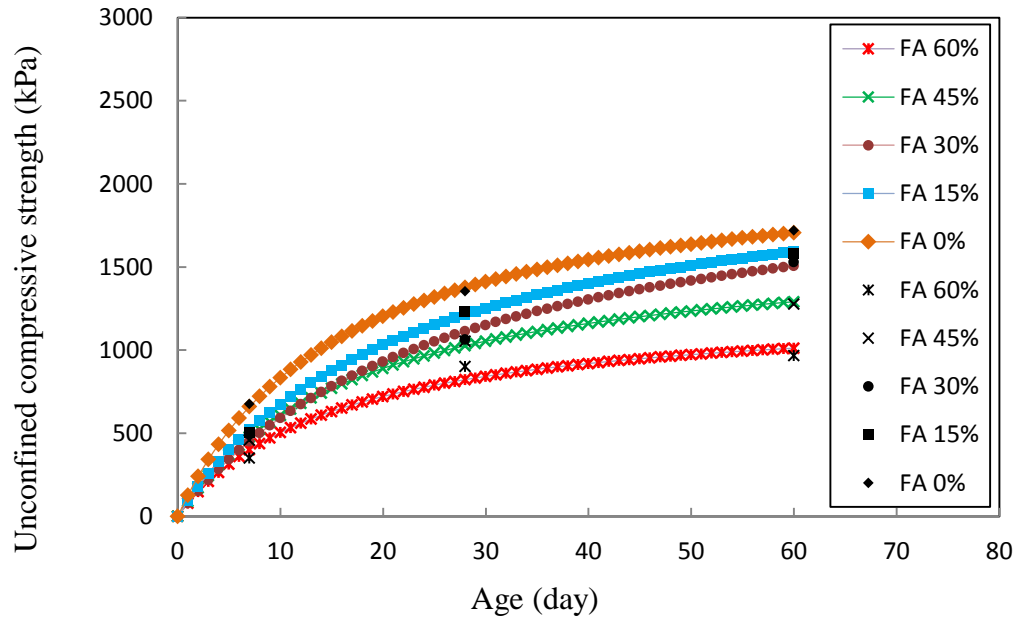
ทำการทดสอบที่อายุบ่ม 7, 28, และ 60 วัน โดยเลือกใช้ค่า $C/W_c = 0.3$ และ 0.4 ปริมาณน้ำที่ $LI = 1.6$ และแปรผันค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 0, 15, 30, 45, และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยจากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างและค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอย ได้ผลการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค ผลการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค และผลการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ ค-3 ภาคผนวก ค

จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามอายุของตัวอย่างเป็นไปตามปกติ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วง 28 วันแรกซึ่งเกิดจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวและมีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุ 28 วัน หลังจาก 28 วัน ค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนถึง 60 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยแนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4.10 และแนวโน้มค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4.11

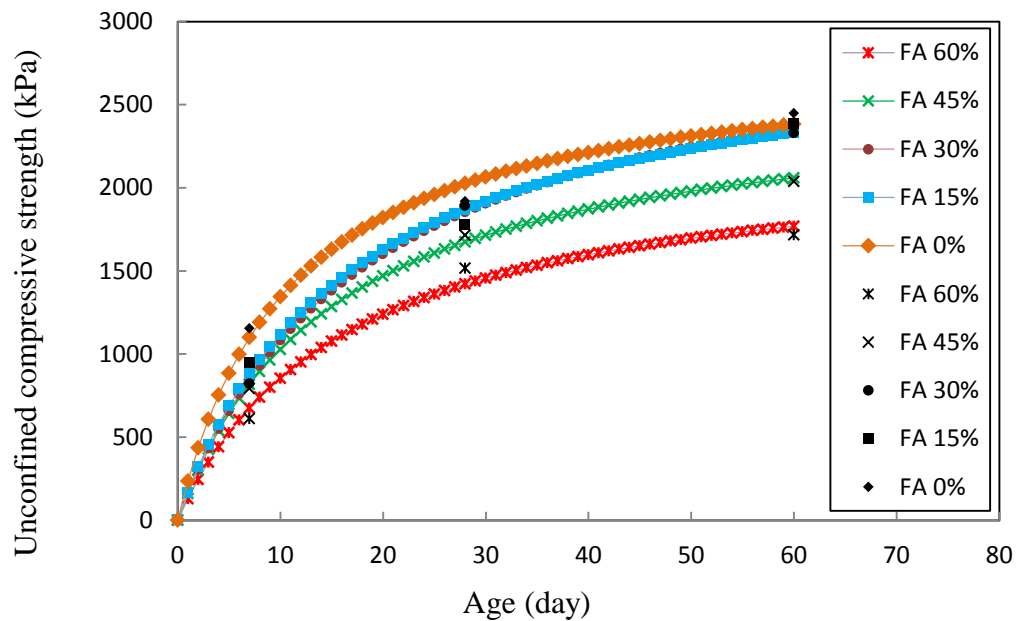
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์ พบว่าเมื่อเพิ่มเถ้าลอยเข้าไปในตัวอย่าง จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 7, 28, และ 60 วัน ค่อยๆลดลงทีละน้อยอย่างคงที่ ทั้งที่ C/W_c เท่ากับ 0.3 และ 0.4 เนื่องจากเมื่อเพิ่มเถ้าลอยเข้าไปในตัวอย่าง ปริมาณซีเมนต์ก็ลดน้อยลงตามไปด้วย ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยลง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในตัวอย่างจึงไม่สามารถช่วยพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างได้ เนื่องจากสารประกอบที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่อยู่ในดินเหนียวเพียงพออยู่แล้ว โดยแนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 4.12 และแนวโน้มค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 4.13

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยทั้ง 2 ประเภท พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษจะมีค่าสูงกว่าอยู่เล็กน้อยจนเกือบเท่ากัน ก็เนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยจากโรงงาน

อุตสาหกรรมกระดาษจะมีลักษณะที่เป็นเหลี่ยม แต่ในส่วนของแก้วลอยจากโรงไฟฟ้า
แม่เมาะจะเป็นรูปทรงกลม ส่งผลให้ลักษณะของพื้นผิวครากแตกต่างกัน

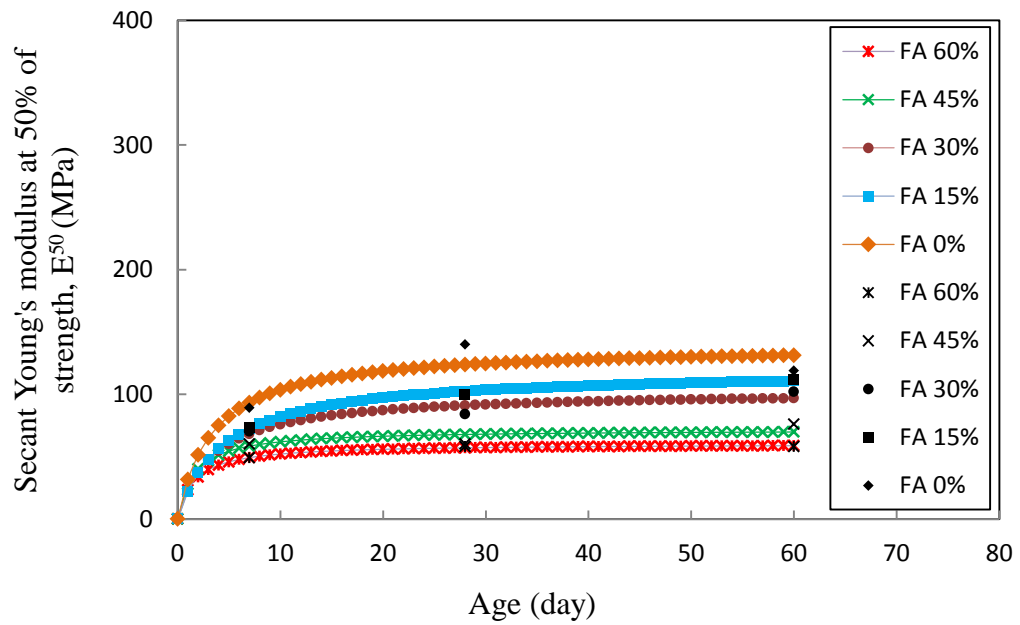


(a)

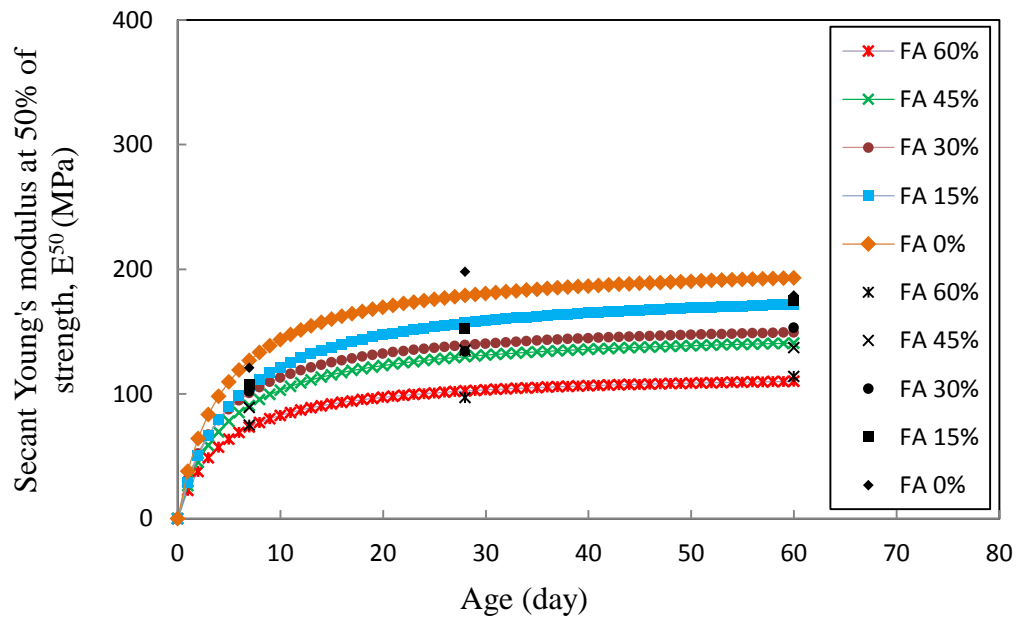


(b)

รูปที่ 4.10 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดตามอายุขุ่มตัวอย่าง (a) $C/W_c = 0.3$ (b) $C/W_c = 0.4$



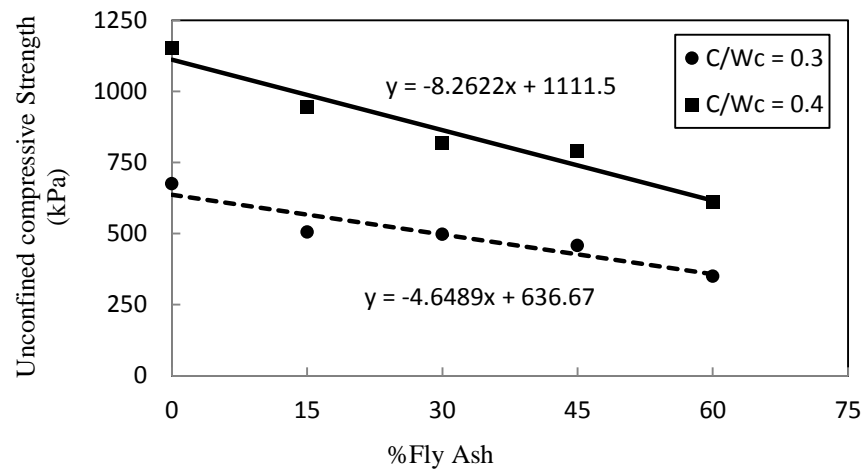
(a)



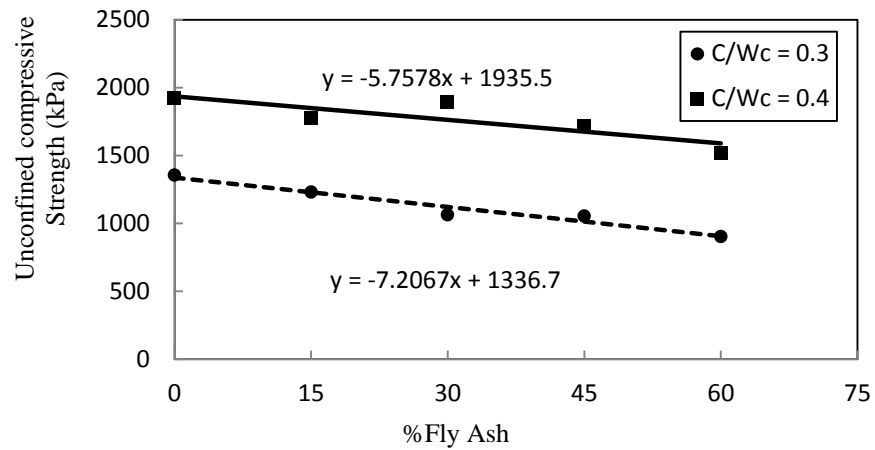
(b)

รูปที่ 4.11 ค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามอายุบ่มตัวอย่าง

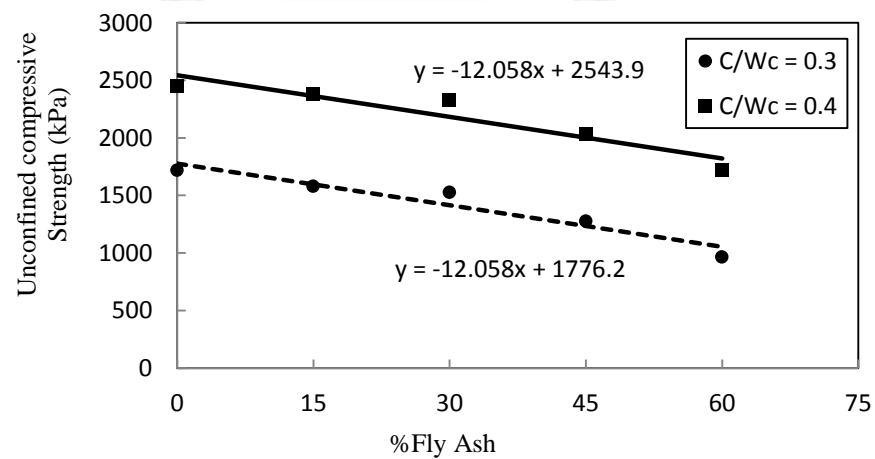
(a) $C/W_c = 0.3$ (b) $C/W_c = 0.4$



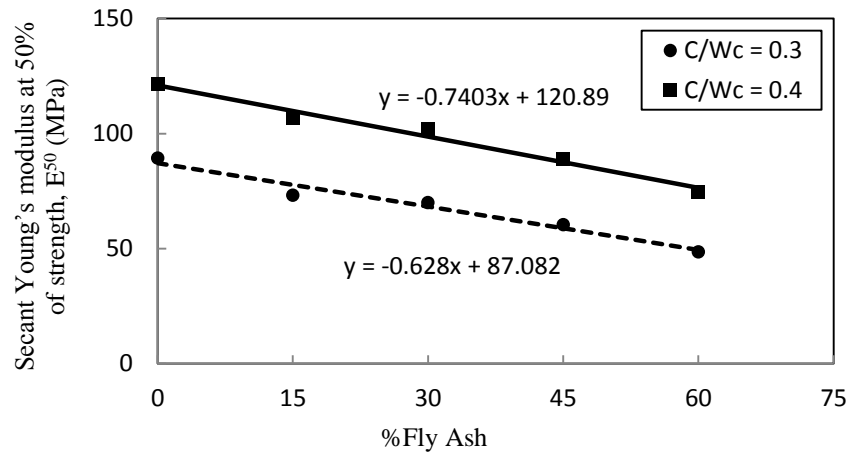
(a)



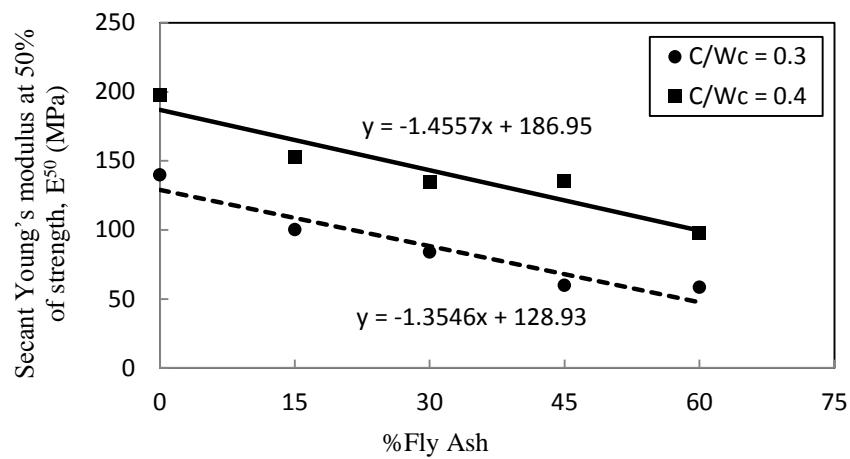
(b)



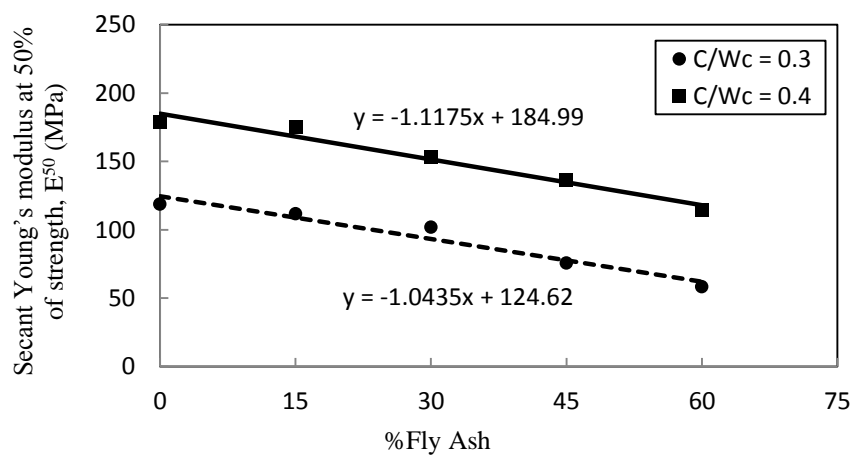
รูปที่ 4.12 กำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย (a) อายุ 7 วัน (b) อายุ 28 วัน (c) อายุ 60 วัน



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.13 ค่าโมดูลัสซีแค้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอย

(a) อายุ 7 วัน (b) อายุ 28 วัน (c) อายุ 60 วัน

4.2.7 ผลการทดสอบการหดตัวของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ (Shrinkage Test by Digital Image Processing)

ทดสอบการหดตัวของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ จะทำการทดสอบจะทดสอบที่อายุบ่ม 1 3 5 7 14 21 และ 28 วัน โดยเลือกใช้ค่า $C/W_c = 0.3$ และ 0.4 ปริมาณน้ำที่ $LI = 1.6$ และแปรผันค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 0, 15, 30, 45, และ 60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผลการทดสอบการหดตัวของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แสดงในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง และได้ผลการทดสอบการหดตัวของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ แสดงในตารางที่ ง-2 ภาคผนวก ง

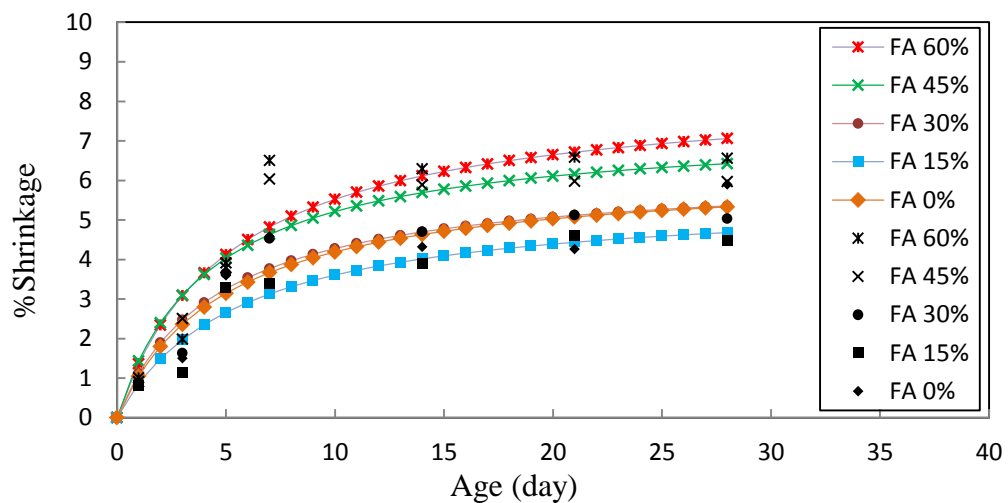
พบว่าในช่วงอายุประมาณ 7 วันแรกจะมีอัตราการหดตัวสูงมาก ประมาณ 4-8 เปอร์เซ็นต์ และหดตัวเพิ่มขึ้นทีละน้อยในช่วงหลัง 7 วัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดการระเหยที่ผิวค่อนข้างมาก สุดท้ายจะหดตัวเพิ่มขึ้นอีกประมาณไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ จนกระทั่งอายุครบ 28 วัน ของทุกๆอัตราส่วนผสม เนื่องจากหลัง 7 วันปริมาณน้ำภายในตัวอย่างเหลือน้อย จึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดการระเหยที่ผิวได้น้อย ส่งผลให้อัตราการหดตัวน้อยลงมาก โดยพฤติกรรมการหดตัวตามอายุของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแสดงดังรูปที่ 4.14 และพฤติกรรมการหดตัวตามอายุของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ แสดงดังรูปที่ 4.15

นอกจากนั้นยังพบอีกว่าค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของดินซีเมนต์และเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน จะมีค่าต่ำสุดที่เปอร์เซ็นต์เถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จะมีการหดตัวที่ค่า $C/W_c = 0.3$ เท่ากับ 4.46 เปอร์เซ็นต์ และ ที่ค่า $C/W_c = 0.4$ เท่ากับ 3.65 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับดินซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ จะมีการหดตัวที่ค่า $C/W_c = 0.3$ เท่ากับ 5.19 เปอร์เซ็นต์ และ ที่ค่า $C/W_c = 0.4$ เท่ากับ 3.80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับการไม่ใส่เถ้าลอย ($C/W_c = 0.3$ หดตัว 5.89 เปอร์เซ็นต์และ $C/W_c = 0.4$ หดตัว 4.14 เปอร์เซ็นต์) การใส่เถ้าลอยที่ 15 เปอร์เซ็นต์ จะช่วยให้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวลดลงประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ หากเทียบกับค่าหดตัวสูงสุดจะช่วยลดการหดตัวได้ถึงประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ แต่หลังจากเพิ่มเถ้าลอยเข้าไปเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวก็จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเถ้าลอย แสดงดังรูปที่ 4.16

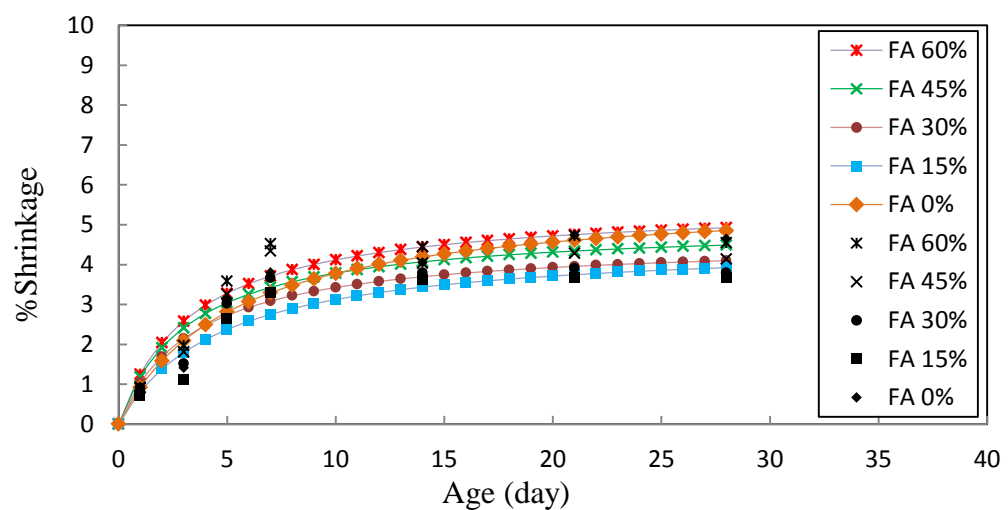
จากพฤติกรรมการหดตัวดังกล่าวนี้เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทำให้ดินที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยพัฒนากำลัง เนื่องจากต้องใช้น้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาค ทำให้เกิดซีเมนต์เจลและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันตามมา จึงทำให้เกิดช่องว่างในส่วนของน้ำที่หายไป และก่อให้เกิดการหดตัวเนื่องจากความเค้นดึงภายในจากแรงดูด (suction) และเข้าสู่สถานะสมดุลในที่สุด และพบว่าเมื่อใส่เถ้าลอยเข้าไปจะช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคมวลรวมทำให้ช่องว่างที่น้ำสามารถเข้าไปอยู่ได้มีขนาดเล็กส่งผลให้เกิดการหดตัวที่น้อยลงด้วย แต่เมื่อเพิ่มเถ้าลอยมากเกินไปกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคนั้นไม่ได้ทำให้

ช่องว่างที่น้ำสามารถเข้าไปอยู่ได้ลดน้อยลงไป ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์เข้าไปในตัวอย่างก็จะมีค่าการหดตัวลดน้อยลงเนื่องจากจะทำให้เกิดความแข็งและมีค่ากำลังมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานความเค้นดึงภายในระหว่างช่องว่างที่น้ำหายไปเพิ่มขึ้น ทำให้การหดตัวของตัวอย่างลดน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์เข้าไป

หากเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของระหว่างดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยทั้งสองชนิดพบว่าค่าการหดตัวที่ 15 เปอร์เซ็นต์ของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะน้อยกว่าเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ดังนั้นจึงเลือกใช้ดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ มาใช้ปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างทาง

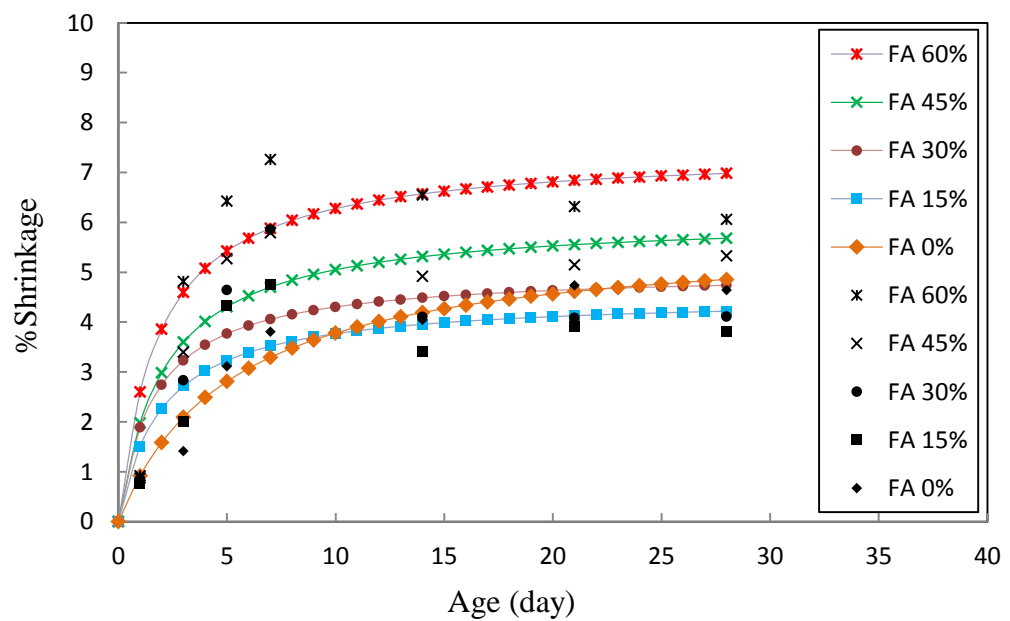
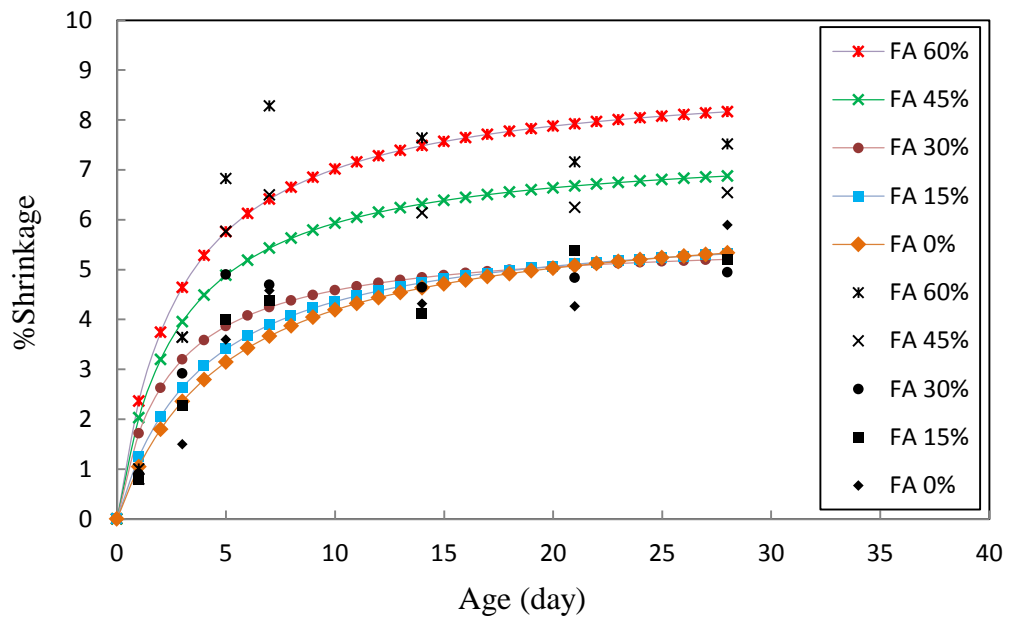


(a)

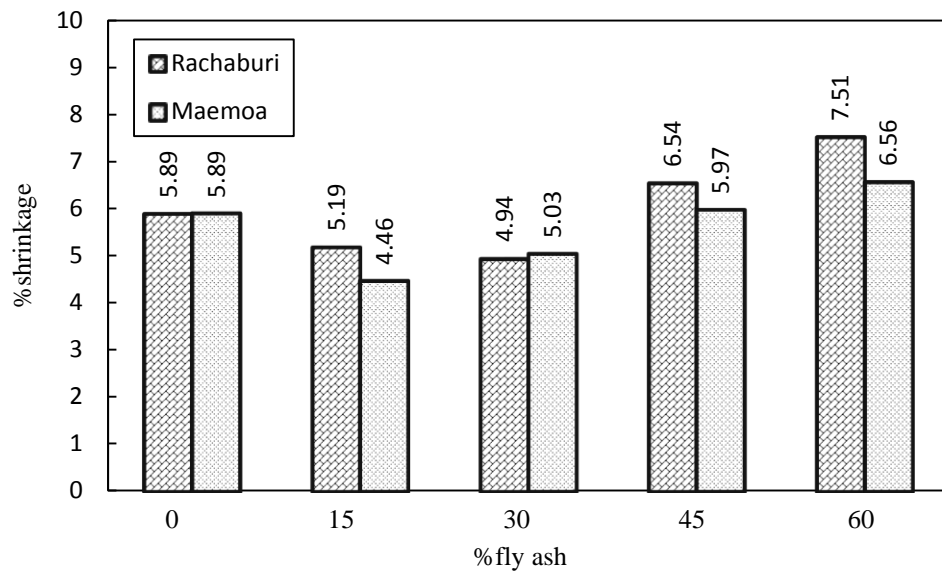


(b)

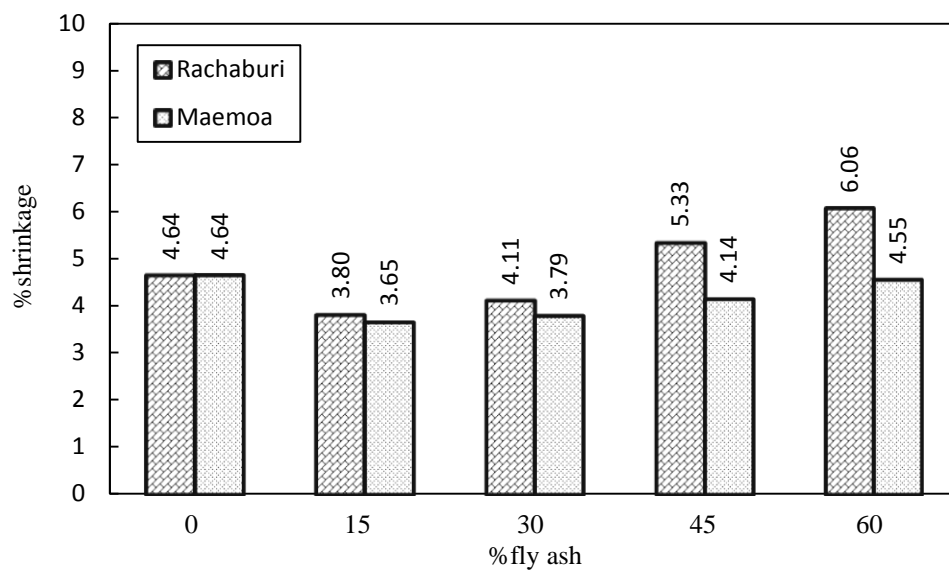
รูปที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างตามเวลาของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ (a) $C/W_c = 0.3$ (b) $C/W_c = 0.4$



รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างตามเวลาของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจาก
อำเภอต่อม่วง (a) $C/W_c = 0.3$ (b) $C/W_c = 0.4$



(a)



(b)

รูปที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์

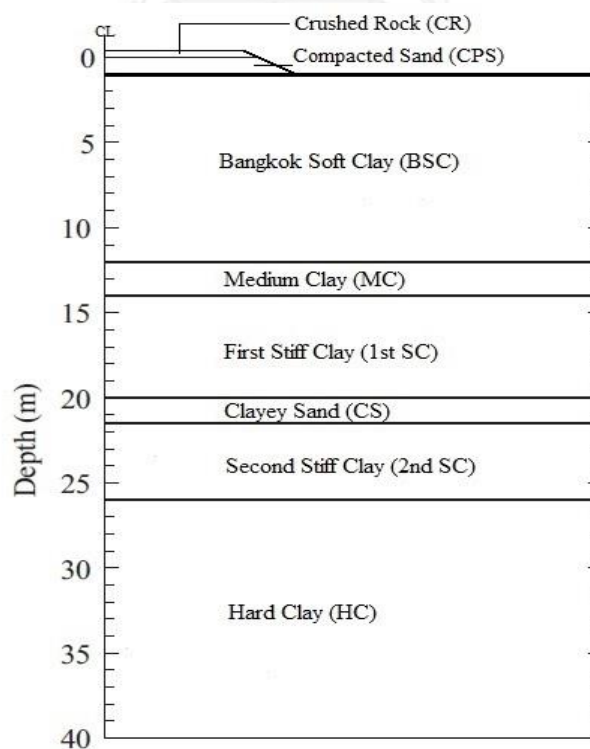
(a) $C/W_c = 0.3$ (b) $C/W_c = 0.4$

4.3 สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง

เนื่องจากมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างทางในประเทศไทย ได้มีการกำหนดคุณภาพของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างโครงสร้างทาง เช่น หินคลุกหรือดินลูกรังที่ใช้ทำชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง ให้เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาการก่อสร้างชั้นทางบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลาง ที่มีปัญหาการทรุดตัวของถนนเนื่องจากดินคันทาง (Subgrade layer) ซึ่งเป็นดินอ่อนที่มีกำลังค่อนข้างต่ำและค่าการยุบตัวสูง จึงทำให้ในปัจจุบันถนนบางสายยังเกิดการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการจำลองการก่อสร้างและการใช้งานของโครงสร้างถนนบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลาง

ในส่วนของชั้นดินเดิม (ดินคันทาง) จะใช้ลักษณะของชั้นดินและค่าตัวแปรต่างๆของชั้นดินกรุงเทพฯโดยทั่วไป เพราะจะสามารถจำลองสถานการณ์จริงของปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้างถนนจากชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯได้ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ S. Likitlersuang และคณะ เมื่อปี 2013 ซึ่งชั้นดินนี้คือชั้นดินบริเวณสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสุขุมวิท กรุงเทพมหานคร ในส่วนของโครงสร้างถนนจะอ้างอิงตามมาตรฐานของประเทศไทย โดยใช้ชั้นรองพื้นทางดินทรายบดอัดแน่นหนา 1 เมตร และชั้นพื้นทางหินคลุกหนา 0.5 เมตร โดยในงานวิจัยนี้จะไม่จำลองชั้นผิวทาง ซึ่งโครงสร้างทางลักษณะดังกล่าวถูกเรียกว่า Unpaved road (ทางมิได้ปูลาด) ลักษณะของชั้นดินและโครงสร้างทางแสดงดังรูปที่ 4.17

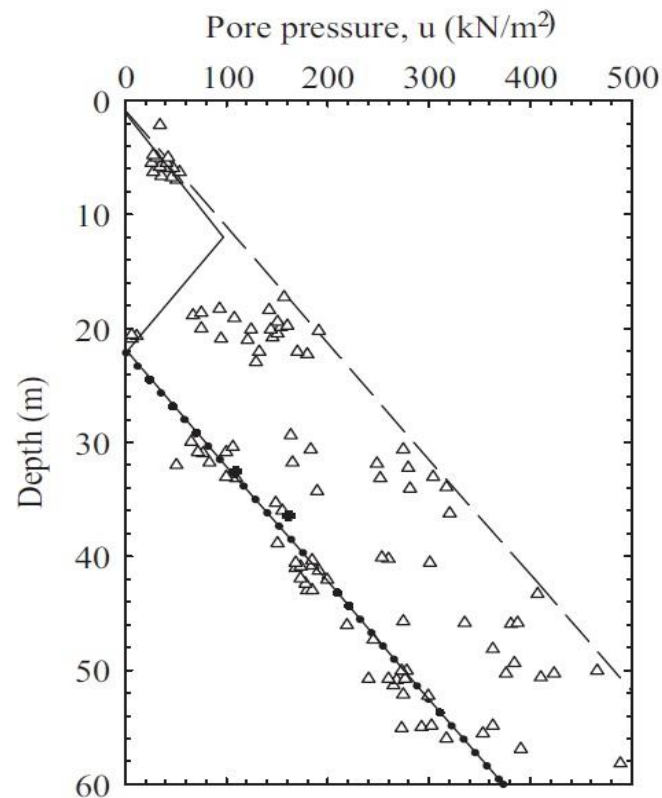


รูปที่ 4.17 ลักษณะของชั้นดินและโครงสร้างทาง

4.3.2 ค่าตัวแปร (Parameters) ที่ใช้ในแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรต่างๆที่เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะเฉพาะของวัสดุที่จะใช้บันทึกลงไปโปรแกรมเพื่อจำลองพฤติกรรมให้ได้สมจริงมากที่สุดตามความเหมาะสมของงาน โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าตัวแปรต่างๆแบ่งออกเป็นสองส่วนคือในส่วนแรกค่าตัวแปรของชั้นดินกรุงเทพฯนั้นจะใช้โมเดล Hardening soil อ้างอิงจากงานวิจัยของ S. Likitlersuang และคณะ (2013) และ งานวิจัยของ ขวัญ สุขคง (2006) แสดงดังตารางที่ 4.3 ในส่วนที่สองคือค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าซีแค้นโมดูลัสที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของโครงสร้างของถนนจะใช้โมเดล Mohr-Coulomb โดยหาค่าและทราบยอดอัดอ้างอิงจาก Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (GEOL 615), Stanford University และดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าลอยได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงดังตารางที่ 4.4

นอกจากนั้นยังมีอีกหนึ่งสิ่งที่สำคัญ คือ ในขั้นตอนจำเป็นต้องบ่งบอกถึงลักษณะของแรงดันน้ำภายในชั้นดิน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ระดับโดยทั่วไปในชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งระดับน้ำจะเกิด Drawdown คือระดับน้ำเดิมจะอยู่ที่ระยะลึกลงไป 1 เมตรจากผิวดิน และแรงดันน้ำในมวลดินจะเพิ่มขึ้นตามปกติ แต่พอถึงที่ระดับความลึก 11 เมตร แรงดันน้ำจะลดลงเรื่อยๆ อย่างคงที่จนมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ระดับความลึก 21 เมตร และแรงดันน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปกติตั้งแต่ระดับความลึก 21 เมตรลงไป โดยลักษณะแรงดันของน้ำแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แรงดันน้ำของชั้นดินกรุงเทพฯ (S. Likitlersuang และคณะ, 2013)

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรชั้นดินกรุงเทพฯ

Layer	Soil type	Depth (m)	γ_b (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	ν_{ur}	m	K_0^{nic}	R_f	Kx	Ky	Analysis type
1	BSC	1-12	16.5	1	23	0	0.8	0.85	8	0.2	1	0.7	0.9	4.32×10^{-4}	6.85×10^{-5}	Undrained
2	MC	12-14	17.5	10	25	0	1.65	1.65	5.4	0.2	1	0.6	0.9	8.64×10^{-4}	2.06×10^{-5}	Undrained
3	1st SC	14-20	19.5	25	26	0	8.5	9	30	0.2	1	0.5	0.9	8.64×10^{-4}	1.92×10^{-4}	Undrained
4	CS	20-21.5	19	1	27	0	38	38	115	0.2	0.5	0.55	0.9	8.64×10^{-3}	9.59×10^{-6}	Drained
5	2nd SC	21.5-26	20	25	26	0	8.5	9	30	0.2	1	0.5	0.9	1.73×10^{-4}	1.92×10^{-4}	Undrained
6	HC	26-40	20	40	24	0	30	30	120	0.2	1	0.5	0.9	1.73×10^{-4}	1.92×10^{-4}	Undrained

หมายเหตุ BSC = Bangkok Soft Clay, MC = Medium Clay, 1st SC = First Stiff Clay, CS = Clayey Sand, 2nd SC = Second Stiff Clay, HC = Hard Clay

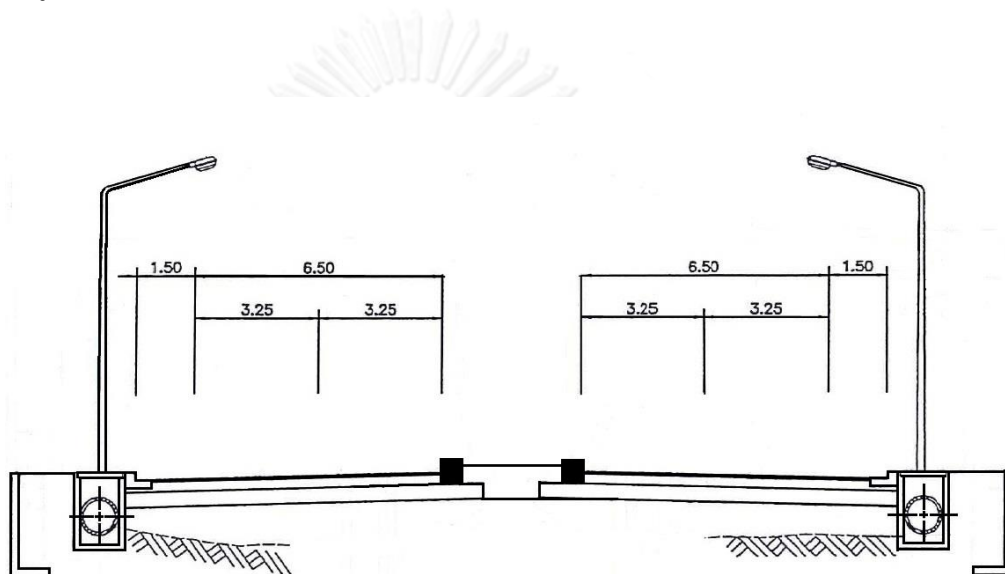
ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรชั้นโครงสร้างทาง

No.	Soil type	Thickness (m)	γ_b (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	ψ (°)	E_{50} (MPa)	ν_{ur}	K_0^{nic}	R_f	Kx	Ky	Analysis type
1	SCF	-	18	550	0	0	162	0.2	Auto	1	4.32×10^{-4}	6.85×10^{-5}	Undrained
2	CR	(หนา 0.5m)	19	120	40	0	170	0.2	Auto	1	8.64×10^{-3}	8.64×10^{-3}	Undrained
3	CPS	(หนา 1.0m)	16	1	37	0	40	0.3	Auto	1	8.64×10^{-1}	8.64×10^{-1}	Drained

หมายเหตุ SCF = Soil-Cement-Fly ash ($C/W_c = 0.3$, ใ้กลอยแม่เฆาะ = 15%), CR = Crushed Rock, CPS = Compacted Sand

4.3.3 กระบวนการจำลองการก่อสร้างและใช้งานโครงสร้างถนน Unpaved

หลังจากที่ได้ลักษณะทางกายภาพและค่า Parameters ต่างๆ ของแบบจำลองแล้ว ในขั้นถัดไปจำเป็นที่จะต้องจำลองสถานการณ์ให้สมจริงมากที่สุด ทั้งขั้นตอนการก่อสร้าง เปิดใช้งาน และการเปิดใช้งานในระยะยาว โดยในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองถนนสี่เลนที่มีขนาดความกว้างของช่องจราจรต่อหนึ่งช่องเท่ากับ 3.25 เมตร ไหล่ทางขนาดความกว้างเท่ากับ 1.50 เมตร และเกาะกลางถนนขนาด 1.00 เมตร โดยภาพหน้าตัดของโครงสร้างถนนแสดงดังรูปที่ 4.19

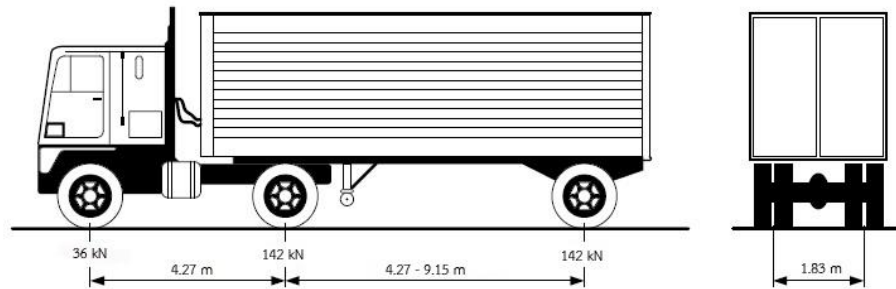


รูปที่ 4.19 ภาพหน้าตัดของโครงสร้างถนนแสดงดัง

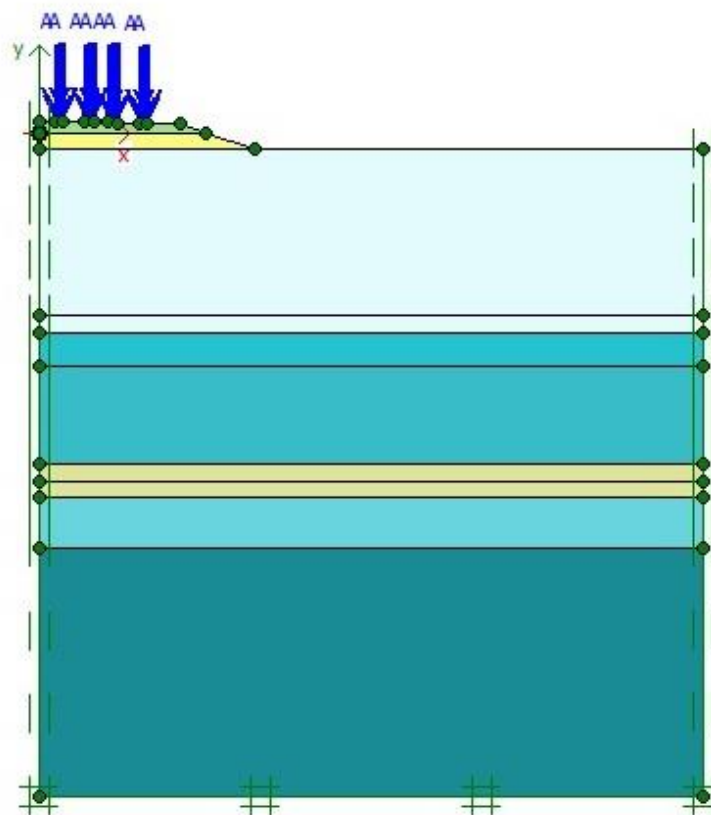
สำหรับแบบจำลองจะมีทั้งหมด 3 กระบวนการหลักๆ ก็คือ กระบวนการก่อสร้าง (Stage of Construction) การใช้งานในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (Stage of Short Term Loading) และการใช้งานในช่วงระยะเวลานาน (Stage of Long Term Loading) สำหรับกระบวนการแรกนั้นจะจำลองการก่อสร้างถนนในช่วงระยะเวลาสั้นๆ หนึ่งโดยยังไม่ได้ทำการจำลองน้ำหนักบรรทุกทุกจราจรลงไป หลังจากกระบวนการก่อสร้างแล้วเสร็จในขั้นที่สองก็เริ่มทำการจำลองการเปิดใช้งานถนนในช่วงแรกโดยทำการใส่น้ำหนักบรรทุกทุกจราจรลงไปในช่วงเวลาสั้น และในขั้นสุดท้ายทำการจำลองการใช้งานในระยะยาวของถนนโดยจะดูถึงพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำจนกระทั่งความดันน้ำส่วนเกินลดลงเข้าใกล้ศูนย์

ในรายละเอียดของน้ำหนักบรรทุกทุกรจราจรนั้น ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) โดยในส่วนที่นำมาอ้างอิงคือ ระบบ HS-20 ซึ่งได้ระบุไว้ว่าน้ำหนักบรรทุกทุกของเพลาคที่ใช้ ออกแบบจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 142 kN และพื้นที่ของหน้ายางที่กระจายแรงลงสู่ผิวทางมีขนาดความยาวในทิศทางขนานกับแนวการวิ่งของรถบรรทุกเท่ากับ 25.4 เซนติเมตร และใน

ทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการวิ่งของรถบรรทุกเท่ากับ 50.8 เซนติเมตร โดยในที่นี้จะสมมติให้รถบรรทุกวิ่งมาพร้อมๆกันเต็มทุกเลน แสดงลักษณะของรถบรรทุกและแรงที่กระทำดังรูปที่ 4.20 และแสดงลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.20 ลักษณะของรถบรรทุกและแรงที่กระทำ (AASHTO, HS-20)



รูปที่ 4.21 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D

สำหรับกรณีศึกษาจะแบ่งออกเป็น 6 กรณี โดยแบ่งกรณีศึกษาแบบจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D ดังตารางที่ 4.5

ในส่วนของการจำลองโครงสร้างทางโดยการปรับปรุงคุณภาพชั้นทางด้วยดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอย จะนำมาใช้ในกรณีที่ 2-6 โดยได้ทำการเลือกค่าตัวแปรต่างๆ ของดินที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่ปริมาณเถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์ (ต่อน้ำหนักพอร์ตแลนด์ซีเมนต์), $C/W_c = 0.3$ และอายุบ่ม 28 วัน มาใช้งาน เพราะประหยัดปูนซีเมนต์มากกว่าที่ค่า $C/W_c = 0.4$ โดยหากคิดปริมาณการใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ต่อดินเหนียวอ่อนธรรมชาติในแถบราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา (ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ) จะใช้ปริมาณซีเมนต์เพียง 17 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักนอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยที่ 15 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อยที่สุดด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.5 กรณีศึกษาในการจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D

กรณี	กรณีศึกษา
1	ชั้นทางที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยดินที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอย
2	ใช้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแทนที่ชั้น Compacted Sand, CPS (Subbase Layer) หนา 0.5 เมตร
3	ใช้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแทนที่ชั้น Compacted Sand, CPS (Subbase Layer) หนา 1.0 เมตร
4	ใช้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแทนที่ชั้น Soft Clay, BSC (Natural Subgrade Layer) หนา 1.0 เมตร
5	ใช้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแทนที่ชั้นชั้น Soft Clay, BSC (Natural Subgrade Layer) หนา 1.0 เมตร และชั้น Compacted Sand, CPS (Subbase Layer) หนา 0.5 เมตร
6	ใช้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแทนที่ชั้น Soft Clay, BSC (Natural Subgrade Layer) หนา 1.0 เมตร และชั้น Compacted Sand, CPS (Subbase Layer) หนา 1.0 เมตร

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ทั้งกระบวนการก่อสร้างและและการใช้งานจะแบ่งออกเป็น 6 กรณี โดยในแต่ละกรณีจะมี 1) ลักษณะการเคลื่อนตัว 2) จุดวิบัติ (Plastic point) คือจุดที่วัสดุเกิดการครากและวิบัติในที่สุด และ 3) ลักษณะของการวิบัติของโครงสร้างทาง ซึ่งจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละกรณี โดยแสดงผลการจำลองในช่วงการก่อสร้างรูปในภาคผนวก จ ช่วงการเปิดใช้งานระยะแรกรูปในภาคผนวก ฉ และเปิดใช้งานระยะยาวรูปในภาคผนวก ช และได้ค่าความปลอดภัยและระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดจากการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.6

พบว่า ในกระบวนการก่อสร้างและเปิดใช้งานของโครงสร้างทางมีค่าความปลอดภัยน้อยที่สุดในการเปิดใช้งานในช่วงแรก และค่าการทรุดตัวมากที่สุดจะเกิดในช่วงที่เปิดใช้งานในระยะยาว จึงกล่าวได้ว่ากระบวนการเปิดใช้งานในช่วงแรกเป็นกระบวนการวิกฤตสำหรับ

ค่าเสถียรภาพ (ค่าความปลอดภัย) ของโครงสร้างทาง และกระบวนการเปิดใช้งานในระยะยาวเป็นกระบวนการวิกฤตสำหรับค่าการทรุดตัวสูงสุด

สำหรับกรณีที่ 1 คือ โครงสร้างชั้นทางไม่มีการใช้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมาปรับปรุงคุณภาพ พบว่าเกิดการวิบัติหลังจากเปิดใช้งานตั้งแต่ช่วงแรกและสำหรับค่าความปลอดภัยในช่วงการก่อสร้างมีค่าเท่ากับ 1.47 ซึ่งพบว่าหลังจากใช้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมาช่วยปรับปรุงคุณภาพจะมีค่าความปลอดภัยในช่วงการก่อสร้างเพิ่มขึ้น 2-3 เท่าตัว ในทุกๆกรณี

สำหรับกรณีที่ 2 และ 3 ใช้ดินซีเมนต์และเถ้าลอยแทนที่ชั้นรองพื้นทางหนา 0.5 และ 1.0 เมตร ตามลำดับ พบว่าชั้นทางไม่วิบัติและมีค่าความปลอดภัยวิกฤตใกล้เคียงกันมาก โดยกรณีที่ 2 เท่ากับ 1.65 กรณีที่ 3 เท่ากับ 1.63 แต่พบว่ามีค่าการยุบตัววิกฤตลดลงมากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ (กรณีที่ 2 เท่ากับ 198.1 เซนติเมตร และกรณีที่ 3 เท่ากับ 61.56 เซนติเมตร)

สำหรับกรณีที่ 4 ใช้ดินซีเมนต์และเถ้าลอยแทนที่ชั้นดินคันทางมีความหนา 1.0 เมตร พบว่าโครงสร้างชั้นทางมีค่าความปลอดภัยวิกฤตเท่ากับ 3.04 ซึ่งมากกว่ากรณีที่ 2 และ 3 ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และค่าการยุบตัววิกฤตเท่ากับ 30.50 เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่ 3 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับค่าความปลอดภัยวิกฤต

สำหรับกรณีที่ 5 และ 6 ใช้ดินซีเมนต์และเถ้าลอยเข้าไปแทนที่ดินคันทางหนา 1.0 เมตร และใช้แทนที่ชั้นรองพื้นทางที่ความหนา 0.5 และ 1.0 เมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าโครงสร้างชั้นทางมีค่าความปลอดภัยวิกฤตเท่ากับ 3.14 สำหรับกรณีที่ 5 และเท่ากับ 3.32 สำหรับกรณีที่ 6 และค่าการยุบตัววิกฤตเท่ากับ 30.49 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่ 5 และ 20.49 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่ 3 ซึ่งพบว่าไม่ต่างจากกรณีที่ 4 มากนัก แต่ต้องใช้ดินซีเมนต์และเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้นซึ่งไม่คุ้มกับมูลค่าที่ต้องจ่ายให้กับค่าดินซีเมนต์และเถ้าลอย

ดังนั้นดินที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพของโครงสร้างทางได้ เพราะนอกจากจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างทางแล้วยังช่วยลดการยุบตัวอีกด้วย ซึ่งพบว่าในกรณีที่ 3 คือ ใช้ดินซีเมนต์และเถ้าลอยแทนที่ชั้นรองพื้นทางที่ความหนา 1.0 เมตร น่าจะเหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุดเพราะนอกจากจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพและลดการยุบตัวได้มากแล้ว ยังใช้ปริมาณดินซีเมนต์และเถ้าลอยไม่มากนัก

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D

กรณี	ระหว่างการก่อสร้าง		เปิดใช้งานในช่วงแรก		เปิดใช้งานในระยะยาว	
	การทรุดตัว (cm)	Safety factor	การทรุดตัว (cm)	Safety factor	การทรุดตัว (cm)	Safety factor
1	27.07	1.47	fail		fail	
2	22.16	2.29	8.166	1.65	198.1	1.84
3	10.90	2.23	7.425	1.63	61.56	2.06
4	5.562	4.51	3.113	3.04	30.50	3.91
5	5.783	4.57	3.024	3.14	30.49	4.02
6	5.870	4.79	2.978	3.32	29.49	4.12

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงโอบรัดของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน พบว่าที่ค่า C/W_c เดียวกัน จะได้ค่ากำลังเท่ากันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2011) และยังพบว่าค่าซีแค้นโมดูลัสที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน จะมีใกล้เคียงกันที่ C/W_c เดียวกันอีกด้วย

สำหรับผลของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงโอบรัดของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยพบว่าที่ 7 28 และ 60 วัน ทั้งค่ากำลังรับแรงอัดและค่าซีแค้นโมดูลัสที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดจะลดลงอย่างคงที่ตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์ (เถ้าลอย 0 15 30 45 และ 60 เปอร์เซ็นต์) ทั้งที่ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Class C) และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ (ต่ำกว่า Class C) พบว่าการเพิ่มเถ้าลอยนั้นไม่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดและค่าซีแค้นโมดูลัสที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทั้งที่ 7 28 และ 60 วัน เนื่องจากสารประกอบ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 ของแร่ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในดินเหนียวก็มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแล้ว เพราะในดินเหนียวมีปริมาณสารประกอบดังกล่าวจัดอยู่ใน Class F ซึ่งมากกว่าในเถ้าลอยทั้งสองชนิด

2) จากผลการทดสอบการหดตัวของดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอย ทั้งตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษพบว่าการหดตัวในช่วงอายุประมาณ 7 วันแรกมีอัตราการหดตัวสูงมาก ประมาณ 4-8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการระเหยที่ผิวมากซึ่งทำให้เกิดช่องว่างในส่วนของน้ำที่หายไป ส่งผลให้เกิดการหดตัวเนื่องจากความเค้นดึงภายในจากแรงดูด (suction) และจะหดตัวเพิ่มขึ้นอีกไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ จนอายุครบ 28 วัน (ของทุกๆอัตราส่วนผสม) เนื่องจากหลัง 7 วันปริมาณน้ำภายในตัวอย่างเหลือน้อย จึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดการระเหยได้น้อย ส่งผลให้อัตราการหดตัวน้อยลง

เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ด้วยการเพิ่มค่า C/W_c จาก 0.3 เป็น 0.4 (C/W_c เท่ากับ 0.3 ซีเมนต์เท่ากับ 28 เปอร์เซ็นต์ และ C/W_c เท่ากับ 0.4 ซีเมนต์เท่ากับ 38 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำหนักดินแห้ง) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวจะลดลงเนื่องจากทำให้เกิดความแข็งแรงและมีค่ากำลังระหว่างอนุภาคมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานความเค้นดึงภายในระหว่างช่องว่างที่น้ำหายไปมีมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดการหดและแตกตัวของตัวอย่างลดน้อยลง (Highway Research Board 292, 1961)

ยังพบอีกว่าการหดตัวของดินซีเมนต์และเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน (หดตัวแห้งสูงสุด) จะมีค่าต่ำสุดเมื่อใช้เถ้าลอยเข้าไปแทนที่ซีเมนต์ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จะมีการหดตัวที่ค่า $C/W_c = 0.3$ เท่ากับ 4.46 เปอร์เซ็นต์ และ ที่ค่า $C/W_c = 0.4$ เท่ากับ 3.65 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้เถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ จะมีการหดตัวที่ค่า $C/W_c = 0.3$ เท่ากับ 5.19 เปอร์เซ็นต์ และ ที่ค่า $C/W_c = 0.4$ เท่ากับ 3.80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับการไม่ใส่

แก้ลรอย ($C/W_c = 0.3$ หดตัว 5.89 เปอร์เซ็นต์และ $C/W_c = 0.4$ หดตัว 4.14 เปอร์เซ็นต์) การใส่แก้ลรอยที่ 15 เปอร์เซ็นต์ จะช่วยให้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวลดลงประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ หากเทียบกับค่าหดตัวสูงสุดจะช่วยลดการหดตัวได้ถึงประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ แต่หลังจากเพิ่มแก้ลรอยเข้าไปเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวก็จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มแก้ลรอย โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากผลของรูปร่างและขนาดที่เล็กกว่าของแก้ลรอย (ภาพถ่าย SEM) ที่ใส่เข้าไป ซึ่งจะเกิดจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคมวลรวมทำให้ให้ช่องว่างที่น้ำสามารถเข้าไปอยู่ได้มีขนาดเล็กกลงส่งผลให้เกิดการหดตัวที่น้อยลงด้วย แต่เมื่อเพิ่มแก้ลรอยมากเกินกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการจัดเรียงตัวของอนุภาคนั้นไม่ได้ทำให้ช่องว่างที่น้ำสามารถเข้าไปอยู่ได้ลดน้อยลงลงไป หากเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวระหว่างดินซีเมนต์ที่ผสมแก้ลรอยทั้งสองชนิดพบว่าค่าการหดตัวที่ 15 เปอร์เซ็นต์ของแก้ลรอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะน้อยกว่าแก้ลรอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ดังนั้นจึงเลือกใช้ดินซีเมนต์ที่ผสมแก้ลรอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ มาใช้ปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างทาง

3) แบบจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าดินซีเมนต์ที่ผสมแก้ลรอยสามารถปรับปรุงคุณภาพของโครงสร้างทางได้ เพราะทำให้เสถียรภาพเพิ่มขึ้นและลดการทรุดตัวได้ ซึ่งพบว่าโครงสร้างทางมีความปลอดภัยน้อยที่สุดในการเปิดใช้งานในช่วงแรก และค่าการทรุดตัวมากที่สุดในช่วงที่เปิดใช้งานในระยะยาว จึงกล่าวได้ว่ากระบวนการเปิดใช้งานในช่วงแรกเป็นกระบวนการวิกฤตสำหรับค่าเสถียรภาพ (ค่าความปลอดภัย) และกระบวนการเปิดใช้งานในระยะยาวเป็นกระบวนการวิกฤตสำหรับค่าการทรุดตัวสูงสุด โดยแนะนำให้ใช้วัสดุดินซีเมนต์ที่ผสมแก้ลรอย ($C/W_c = 0.3$ แก้ลรอย 15 เปอร์เซ็นต์) เข้าไปแทนที่ในชั้นรองพื้นทางหนา 1.0 เมตร (ทั้งหมดของชั้นรองพื้นทางเช่นเดียวกับกรณีที่ 3) เพราะนอกจากจะช่วยเพิ่มค่าความปลอดภัยและลดการยุบตัววิกฤตได้มากแล้ว (เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้ดินเหนียวผสมซีเมนต์และแก้ลรอยไปช่วยปรับปรุงคุณภาพ)

ยังพบอีกว่ากรณีที่ชั้นรองพื้นทางเป็นทรายบดอัดแน่น (กรณีที่ 1 ยังไม่ถูกปรับปรุงด้วยดินผสมซีเมนต์และแก้ลรอย) วัสดุรองพื้นทางมีราคาต่อหน่วยเท่ากับ 500 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และในกรณีที่ใช้ดินเหนียวผสมซีเมนต์และแก้ลรอย (กรณีที่ 3) วัสดุชั้นรองพื้นทางจะมีราคาต่อหน่วยเท่ากับ 487 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (ราคาซีเมนต์รวมแก้ลรอย) ซึ่งพบว่าราคาต่อหน่วยของดินเหนียวผสมซีเมนต์และแก้ลรอยนอกจากจะถูกกว่าแล้วยังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพและลดการทรุดตัวได้ด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) สำหรับการทดสอบการหดตัวด้วยวิธีทางภาพถ่ายหากมีกล้องที่คุณภาพสูงจะทำให้ปริมาณพิกเซลมากขึ้นส่งผลให้ได้ค่าความถูกต้องและแม่นยำมากกว่า

2) ในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะในห้องปฏิบัติการ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการนำไปใช้จริงในสนามต่อไป

3) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการใช้ค่าตัวแปรต่างๆของดินที่ผสมซีเมนต์และแก้ลรอยว่าสำหรับการใช้งานจริงในสนามนั้นมีพฤติกรรมเหมือนและแตกต่างกันอย่างไรจากห้องปฏิบัติการ และจะมีแนวทางการแก้ไขอย่างไรในอนาคต

รายการอ้างอิง

- 1 A. Atique et al., 'Analysis of Cracking Behavior of Drying Soil', in 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology (Singapore: IPCBEE, 2011), vol.6, p. 5.
- 2 Anand J. Puppala et al., 'Shrinkage Strain Characterization of Expansive Soils Using Digital Imaging Technology', Department of Civil and Environmental Engineering, University of Texas.
- 3 B. Ukritchon et al., 'Consolidation Behavior of Reconstituted Bangkok Clay', Southeast Asian Geotechnical Society, vol.37 (2006), p.121-129.
- 4 B.Sivakumar et al., Legal Truck Loads and Aashto Legal Loads for Posting (Transportation Research Board Washington, D.C., 2007).
- 5 C. Surarak et al., 'Stiffness and Strength Parameters for Hardening Soil Model of Soft and Stiff Bangkok Clays', Soil and Foundation (2012), p.682-697.
- 6 J. Swanson et al., AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (Loading and General Information). ed. by The University of Cincinnati. Vol. 4 (2007).
- 7 J. M. Kulicki et al., 'Evolution of Vehicular Live Load Models During the Interstate Design Era and Beyond', in Transportation Research Circular E-C104: 50 Years of Interstate Structures: Past, Present, and Future.
- 8 M. A. Aguilar Torres et al., 'Digital Image Analysis for the Estimation of Cracked Areas and the Soil Shrinkage Characteristic Curve in Clay Soils Amended with Composted Sewage Sludge', Spanish Journal of Agricultural Research, (2004), p.473-479.
- 9 S. Horpibulsuk et al., 'Analysis of Strength Development in Deep Mixing: A Field Study', in Ground Improvement (2004) (Thomas Telford Ltd, 2004), p. 10.
- 15 S. Horpibulsuk et al., 'Assessment of Strength Development in Blended Cement Admixed Bangkok Clay', Construction and Building Materials, 25 (2011), p.1521-1531.
- 10 S. Horpibulsuk et al., 'Clay-Water/Cement Ratio Identity for Cement Admixed Soft Clays', Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE) (2005), p. 6.
- 11 S. Horpibulsuk et al., 'Role of Fly Ash on Strength and Microstructure Development in Blended Cement Stabilized Silty Clay', Soil and Foundation, vol.49 (2009), p.85-98.
- 16 S. Horpibulsuk et al., 'Strength Development in Soil-Cement Columns', in International Symposium, Exhibition, and Short Course on Geotechnical and Geosynthetics Engineering:Challenges and Opportunities on Climate Change (Bangkok, Thailand: 2010), p. 22.

- 12 S. Horpibulsuk et al., 'Undrained Shear Behavior of Cement Admixed Clay at High Water Content', Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE) (2004), p.1096-1105.
- 13 S. Likitlersuang et al., 'Finite Element Analysis of a Deep Excavation: A Case Study from the Bangkok Mrt', Soil and Foundation, 5 (2013), p.756-773.
- 14 B.O.Hughes, Black and White in Photoshop Cs3 and Photoshop Lightroom. Vol. 1 (Focal Press, 2007).
- 17 AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).
- 18 "Soil Stabilization with Portland Cement", Highway Research Board 292, Washington, D.C., 1961.
- 19 Stanford University, 'Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic and Otherwise) Geol 615 '
<<http://web.stanford.edu/~tyzhu/Documents/Some%20Useful%20Numbers.pdf>>.
- 20 กรมทางหลวง, 'มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์', (2533), p. 11.
- 21 กองวิศวกรรมการจราจร กรมทางหลวง, 'มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์', (2532), p. 13.
- 22 กองวิศวกรรมการจราจร กรมทางหลวง, 'มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุผสมรวม', (2532), p. 8.
- 23 สำนักงานควบคุมน้ำหนัทยานพาหนะ กรมทางหลวง, 'น้ำหนักบรรทุกทุกที่อนุมัติให้วิ่งบนทางหลวง (ทางหลวงพิเศษและทางหลวงแผ่นดิน)', (กรมทางหลวงประเทศไทย, 2548).
- 24 'คู่มือการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยาง โดยวิธี Asphalt Institute Method', ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทา สำนักวิศวกรรมการจราจรและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง.
- 25 สุขสันต์ หอพิบูลสุข, ยุทธนา รักษาชนม์, 'ถ้ำลอย-วัสดุกระจายตัวดินซีเมนต์', การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: 2552).
- 26 ขวัญ สุขคง, 'การศึกษาปัญหาอุปสรรคและวิธีการแก้ไขทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล' (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549).
- 27 สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 'ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์บดอัดสำหรับงานถนน', (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548).



ภาคผนวก ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างที่อายุตัวอย่าง 7 วัน

C/W _c	Liquidity Index	Compressive Strength (kPa)	Average Compressive Strength (kPa)	E ⁵⁰ (MPa)	Average E ⁵⁰ (MPa)
0.2	1.6	353	364	58	56
		395		61	
		345		49	
	1.3	506	507	66	62
		479		60	
		535		61	
	1.0	449	468	60	78
		510		90	
		444		85	
0.3	1.6	709	675	79	89
		657		92	
		659		97	
	1.3	775	773	112	107
		775		109	
		769		100	
	1.0	867	867	123	111
		824		100	
		910		110	
0.4	1.6	1106	1154	102	121
		1224		141	
		1132		121	
	1.3	1108	1088	127	131
		1065		129	
		1090		138	
	1.0	1279	1205	130	134
		1043		137	
		1293		135	

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างที่อายุตัวอย่าง 28 วัน

C/W _c	Liquidity Index	Compressive Strength (kPa)	Average Compressive Strength (kPa)	E ⁵⁰ (MPa)	Average E ⁵⁰ (MPa)
0.2	1.6	609	679	107	101
		782		103	
		646		94	
	1.3	908	877	136	126
		898		155	
		826		86	
	1.0	922	953	121	133
		969		136	
		967		141	
0.3	1.6	1333	1354	148	167
		1365		174	
		1365		180	
	1.3	1611	1580	182	185
		1528		186	
		1601		186	
	1.0	1743	1685	176	198
		1622		200	
		1691		218	
0.4	1.6	1873	1917	155	201
		2005		278	
		1873		170	
	1.3	2090	2135	212	216
		2166		208	
		2148		227	
	1.0	2299	2212	248	231
		2072		226	
		2266		220	



ภาคผนวก ข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ
 เถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน

C/Wc	%Fly ash	Compressive Strength (kPa)	Average Strength (kPa)	E ⁵⁰ (MPa)	Average E ⁵⁰ (MPa)
0.3	0	1333	1354	131	140
		1365		144	
		1365		145	
	15	1062	1096	142	168
		1125		193	
		1101		169	
	30	965	1001	141	152
		1023		158	
		1016		158	
	45	969	959	141	141
		952		145	
		956		137	
	60	695	651	97	98
		632		100	
		627		97	
0.4	0	1873	1917	155	198
		2005		238	
		1873		200	
	15	1723	1617	239	229
		1489		222	
		1640		225	
	30	1758	1611	284	234
		1533		185	
		1543		232	
	45	1661	1681	245	227
		1768		215	
		1615		222	
	60	1345	1320	209	202
		1258		207	
		1356		189	

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ
เถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 60 วัน

C/Wc	%Fly ash	Compressive Strength (kPa)	Average Strength (kPa)	E ⁵⁰ (MPa)	Average E ⁵⁰ (MPa)
0.3	0	1843	1719	124	119
		1644		121	
		1669		111	
	15	1787	1718	225	215
		1564		195	
		1802		225	
	30	1766	1634	200	194
		1574		200	
		1561		181	
	45	1410	1359	167	165
		1377		174	
		1290		155	
60	1141	1088	135	144	
	1051		156		
	1072		142		
0.4	0	2456	2448	169	179
		2478		177	
		2410		190	
	15	2130	2064	363	366
		1933		385	
		2130		350	
	30	2344	2228	362	347
		2145		324	
		2195		355	
	45	2078	2057	311	325
		1964		300	
		2130		362	
60	1496	1552	217	240	
	1530		262		
	1629		241		



ภาคผนวก ค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ
 etailoyจากอำเภอกำม่วง ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 7 วัน

C/Wc	%Fly ash	Compressive Strength (kPa)	Average Strength (kPa)	E ⁵⁰ (MPa)	Average E ⁵⁰ (MPa)
0.3	0	709	675	79	89
		657		92	
		659		97	
	15	539	505	68	73
		479		89	
		498		62	
	30	488	497	74	70
		525		65	
		479		71	
	45	464	459	55	60
		448		62	
		464		64	
60	378	350	45	49	
	345		53		
	326		47		
0.4	0	1106	1154	102	121
		1224		141	
		1132		121	
	15	997	943	119	107
		870		95	
		962		105	
	30	814	820	91	102
		793		105	
		852		110	
	45	776	791	83	89
		776		89	
		821		95	
60	562	610	62	75	
	623		78		
	646		84		

ตารางที่ ค-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ
 etailoyจากอำเภอกำม่วง ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน

C/Wc	%Fly ash	Compressive Strength (kPa)	Average Strength (kPa)	E ⁵⁰ (MPa)	Average E ⁵⁰ (MPa)
0.3	0	1333	1354	131	140
		1365		144	
		1365		145	
	15	1129	1230	102	100
		1278		100	
		1283		98	
	30	1064	1063	80	84
		1045		77	
		1079		94	
	45	1023	1054	63	60
		1065		63	
		1073		53	
60	887	902	59	58	
	913		60		
	906		56		
0.4	0	1873	1917	155	198
		2005		238	
		1873		200	
	15	1678	1775	126	152
		1837		164	
		1811		167	
	30	1805	1892	143	134
		1976		120	
		1894		141	
	45	1663	1714	128	135
		1692		129	
		1788		147	
60	1510	1516	97	97	
	1506		96		
	1531		99		

ตารางที่ ค-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่ผสมซีเมนต์และ
 etailoyจากอำเภอทททำม่วง ที่อายุบ่มของตัวอย่างเท่ากับ 60 วัน

C/Wc	%Fly ash	Compressive Strength (kPa)	Average Strength (kPa)	E ⁵⁰ (MPa)	Average E ⁵⁰ (MPa)
0.3	0	1843	1719	124	119
		1644		121	
		1669		111	
	15	1590	1582	110	112
		1570		112	
		1585		113	
	30	1533	1529	104	102
		1562		106	
		1491		96	
	45	1260	1276	74	76
		1293		76	
		1276		77	
60	1012	967	60	58	
	952		52		
	937		63		
0.4	0	2456	2448	169	179
		2478		177	
		2410		190	
	15	2429	2382	176	175
		2399		166	
		2317		184	
	30	2372	2329	151	153
		2285		149	
		2329		158	
	45	1947	2036	127	137
		2037		145	
		2125		138	
60	1771	1716	121	114	
	1673		117		
	1705		104		



ภาคผนวก ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ง-1 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

		%shrinkage of soil-cement-fly ash						
C/W _c	%fly ash	1 day	3 day	5 day	7 day	14 day	21 day	28 day
0.3	0	0.93	1.50	3.60	4.58	4.31	4.26	5.89
	15	0.81	1.15	3.30	3.39	3.88	4.60	4.46
	30	0.87	1.63	3.64	4.53	4.69	5.12	5.03
	45	0.91	2.50	3.79	6.03	5.89	5.98	5.97
	60	1.01	1.98	3.91	6.50	6.30	6.58	6.56
0.4	0	0.87	1.41	3.11	3.80	4.05	4.74	4.64
	15	0.70	1.11	2.63	3.29	3.61	3.67	3.65
	30	0.90	1.52	3.03	3.66	3.79	3.90	3.79
	45	0.90	1.81	3.25	4.34	4.03	4.28	4.14
	60	0.92	1.97	3.58	4.53	4.44	4.73	4.55

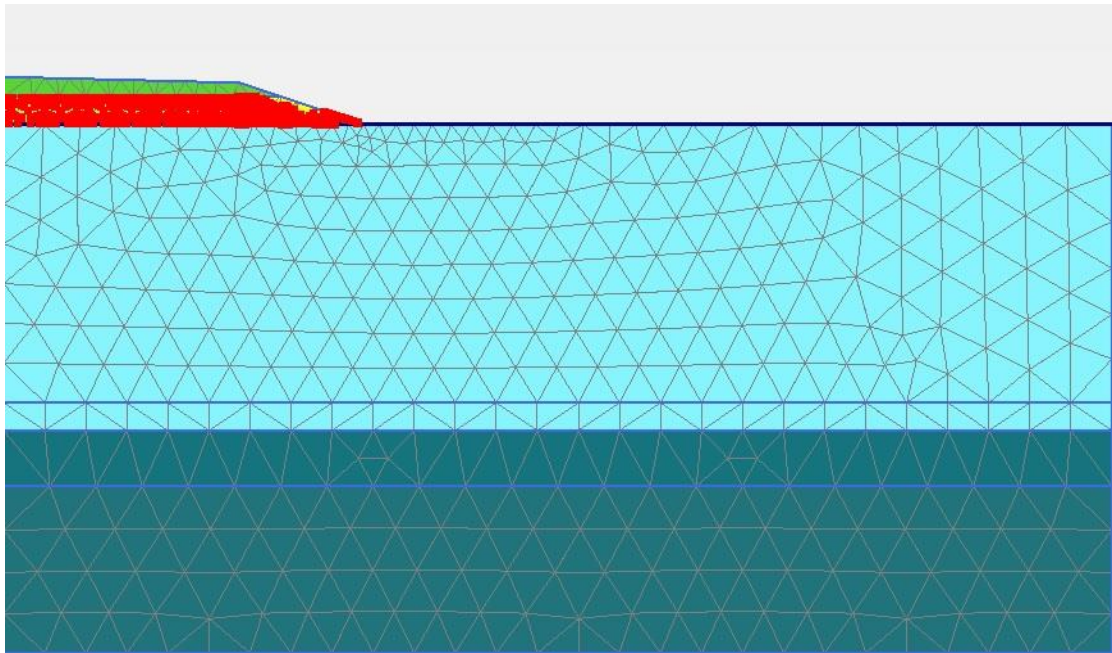
ตารางที่ ง-2 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

		%shrinkage of soil-cement-fly ash						
C/W _c	%fly ash	1day	3day	5day	7day	14day	21day	28day
0.3	0	0.93	1.50	3.60	4.58	4.31	4.26	5.89
	15	0.78	2.26	3.99	4.37	4.11	5.38	5.19
	30	0.90	2.92	4.90	4.69	4.64	4.83	4.94
	45	0.80	3.65	5.76	6.49	6.13	6.25	6.54
	60	1.00	3.64	6.83	8.28	7.64	7.16	7.51
0.4	0	0.87	1.41	3.11	3.80	4.05	4.74	4.64
	15	0.77	2.01	4.33	4.75	3.40	3.90	3.80
	30	0.85	2.83	4.64	5.86	4.10	4.08	4.11
	45	0.87	3.39	5.27	5.79	4.92	5.15	5.33
	60	0.92	4.81	6.42	7.26	6.55	6.32	6.06

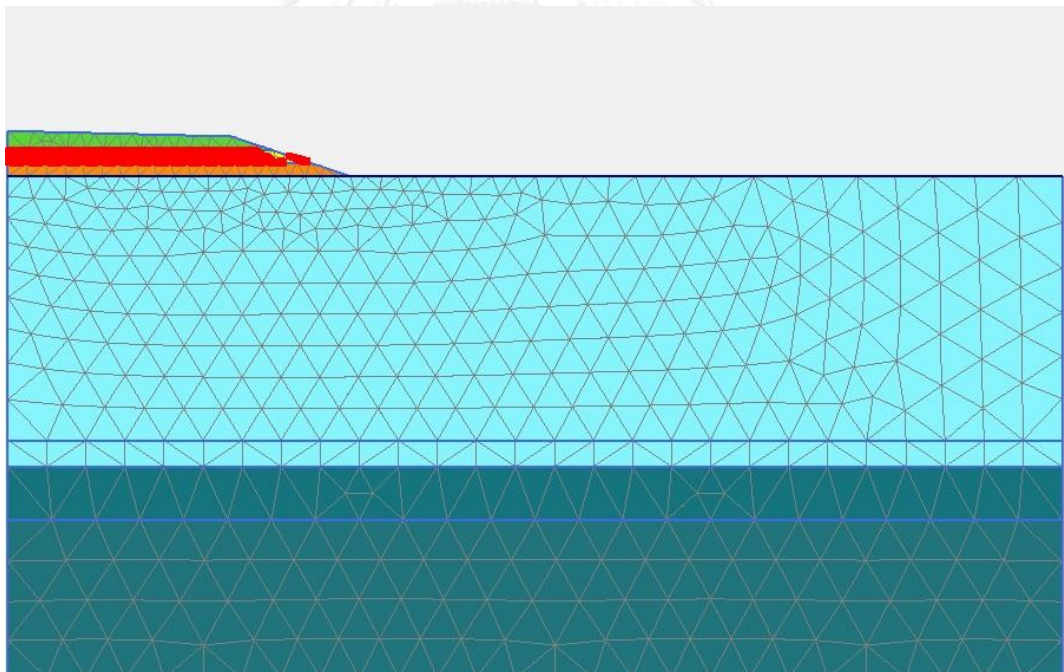


ภาคผนวก จ

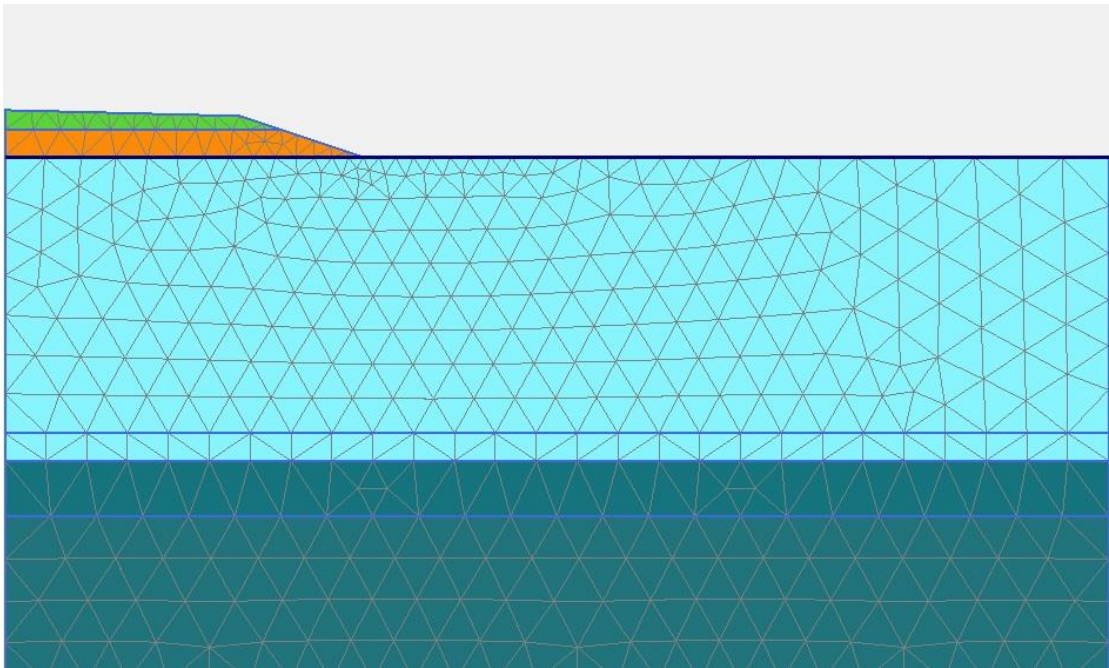
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



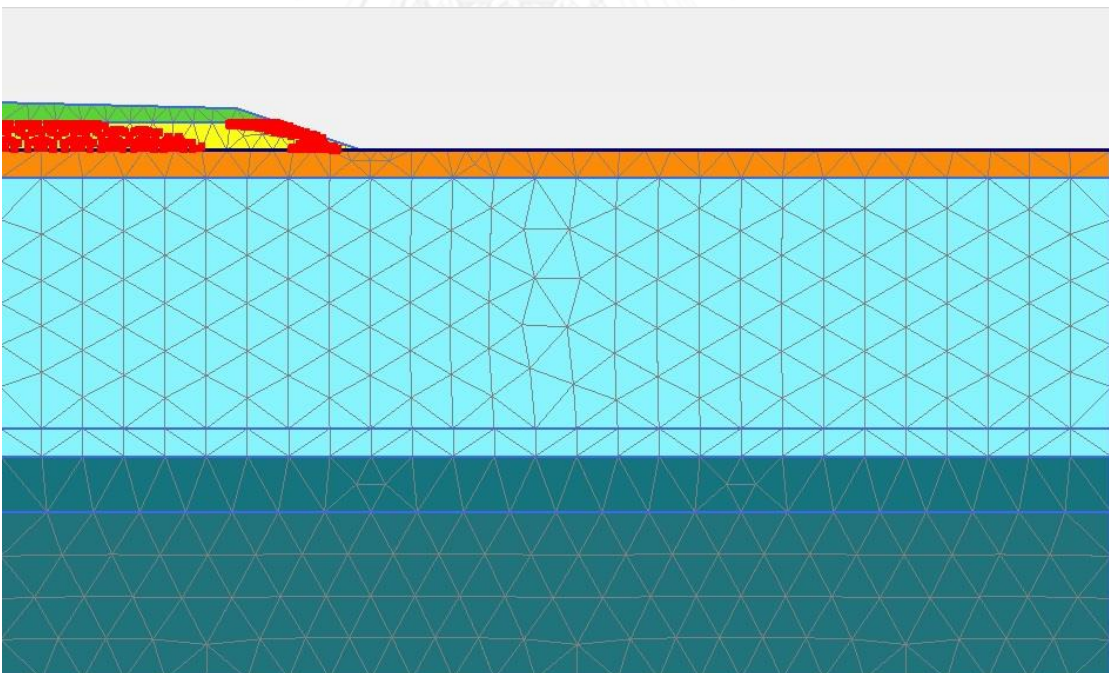
(a)



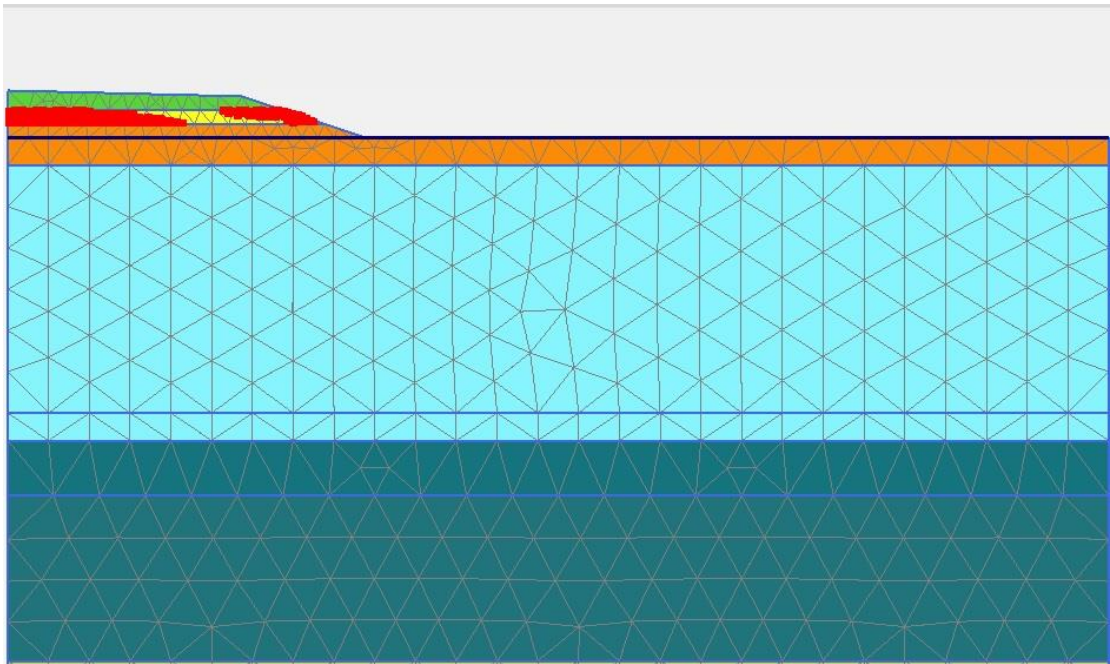
(b)



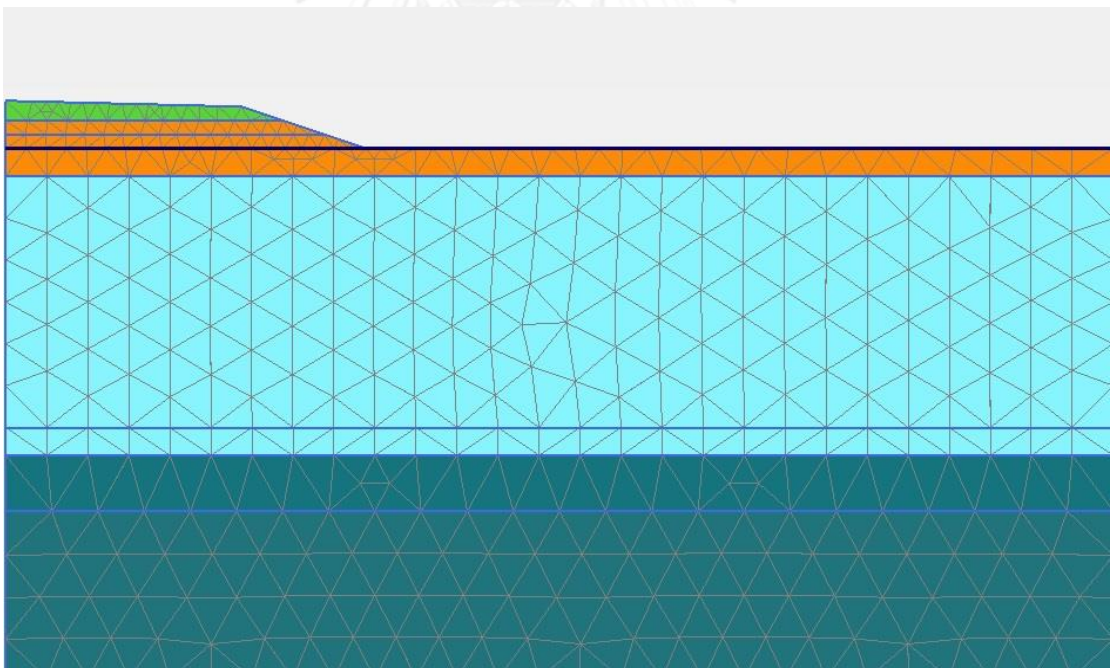
(c)



(d)

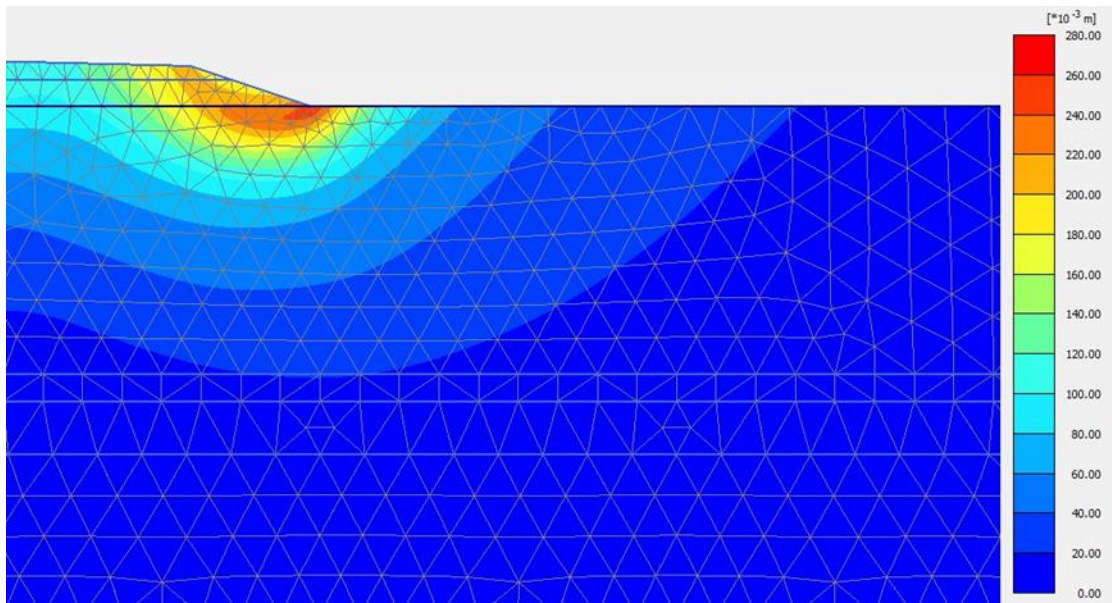


(e)

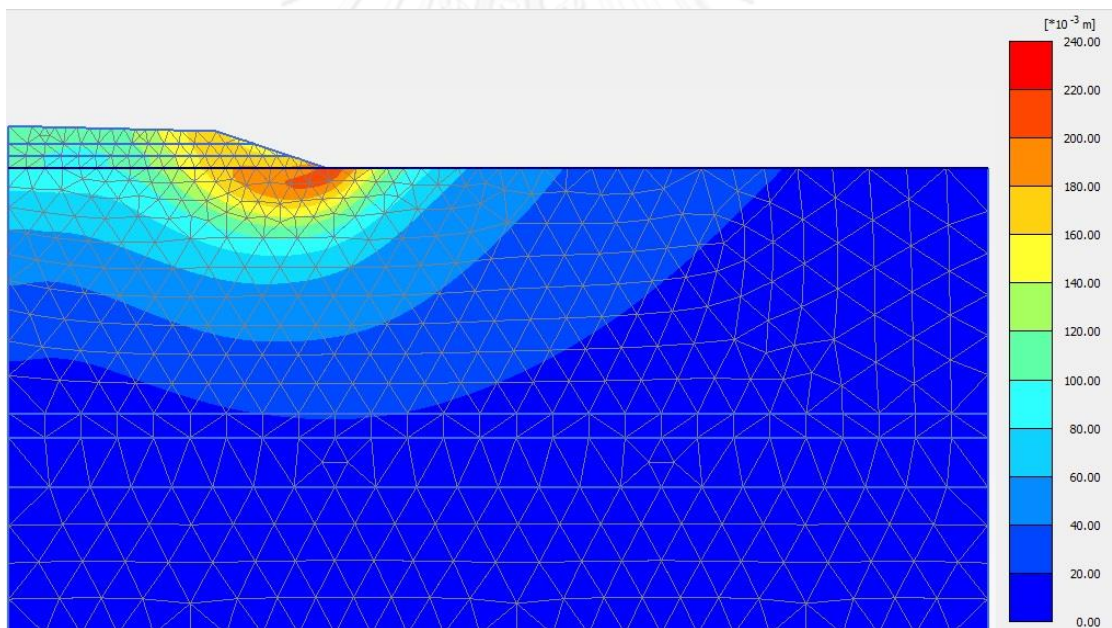


(f)

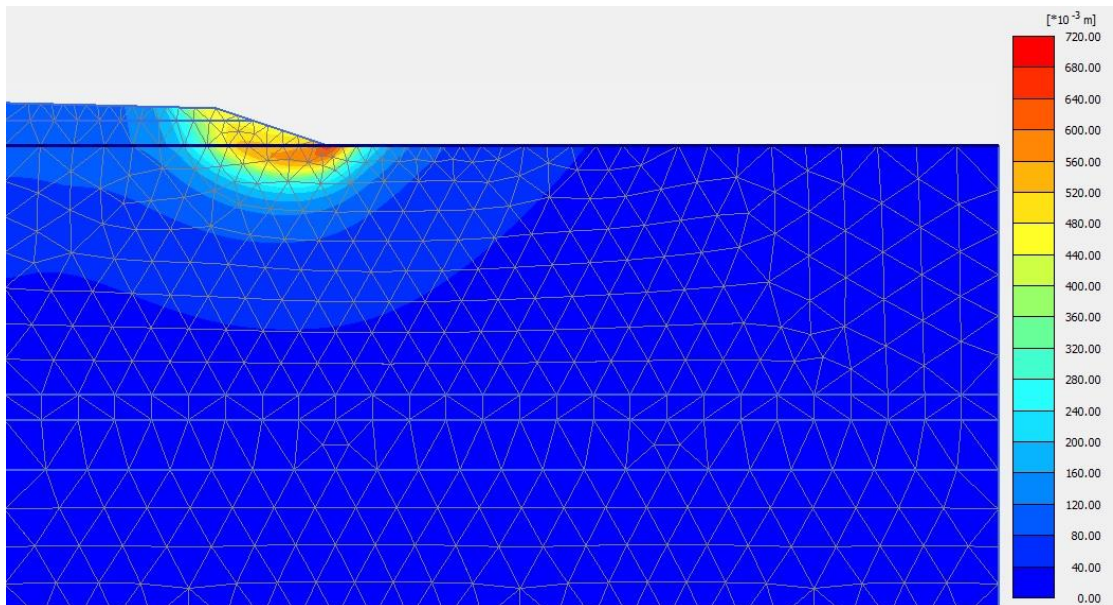
รูปที่ จ-1 จุดวิบัติ (Plastic point) ของช่วงการก่อสร้าง
 (a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4 (e) case 5 (f) case 6



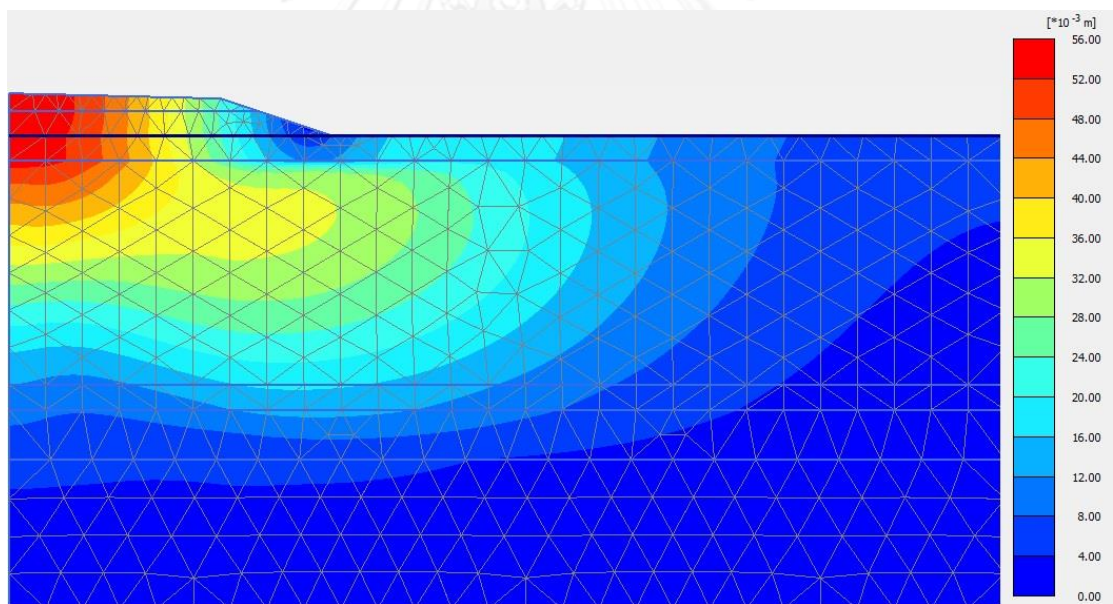
(a)



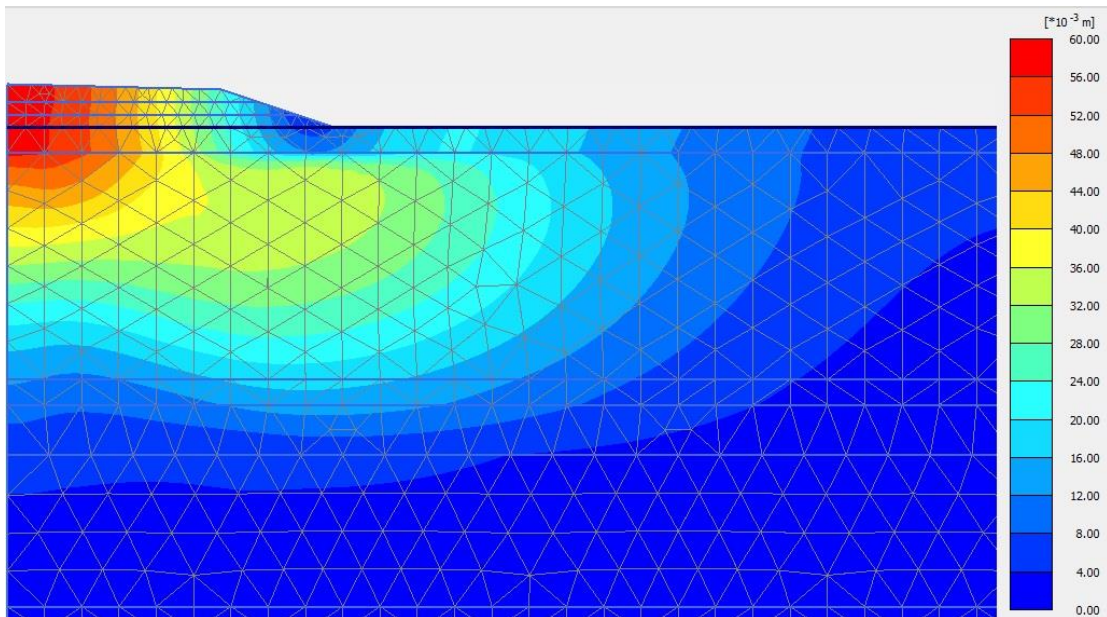
(b)



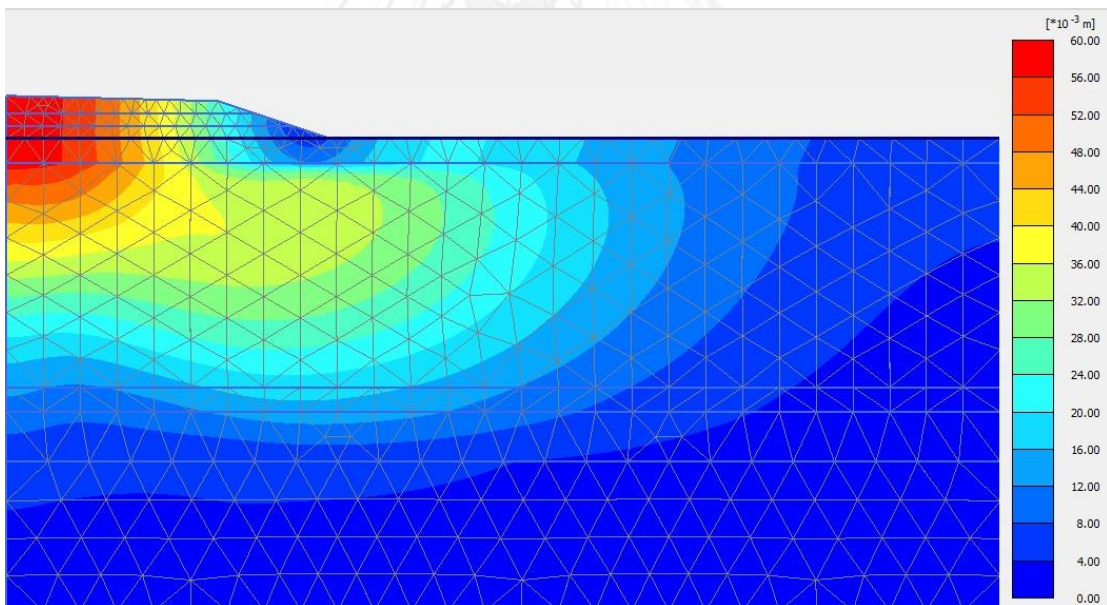
(c)



(d)

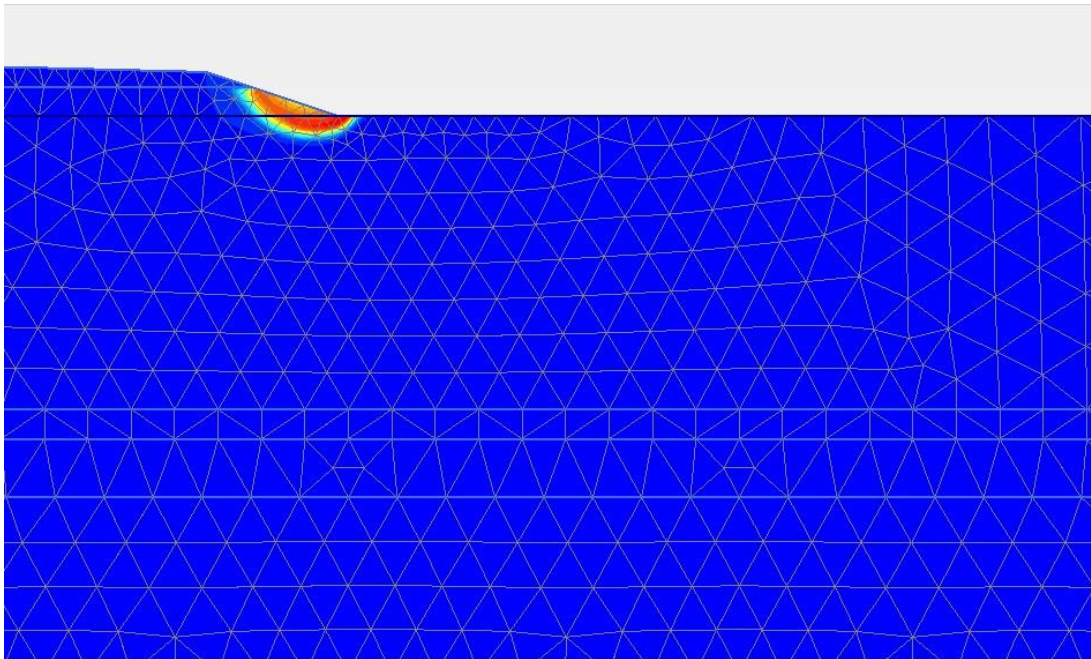


(e)

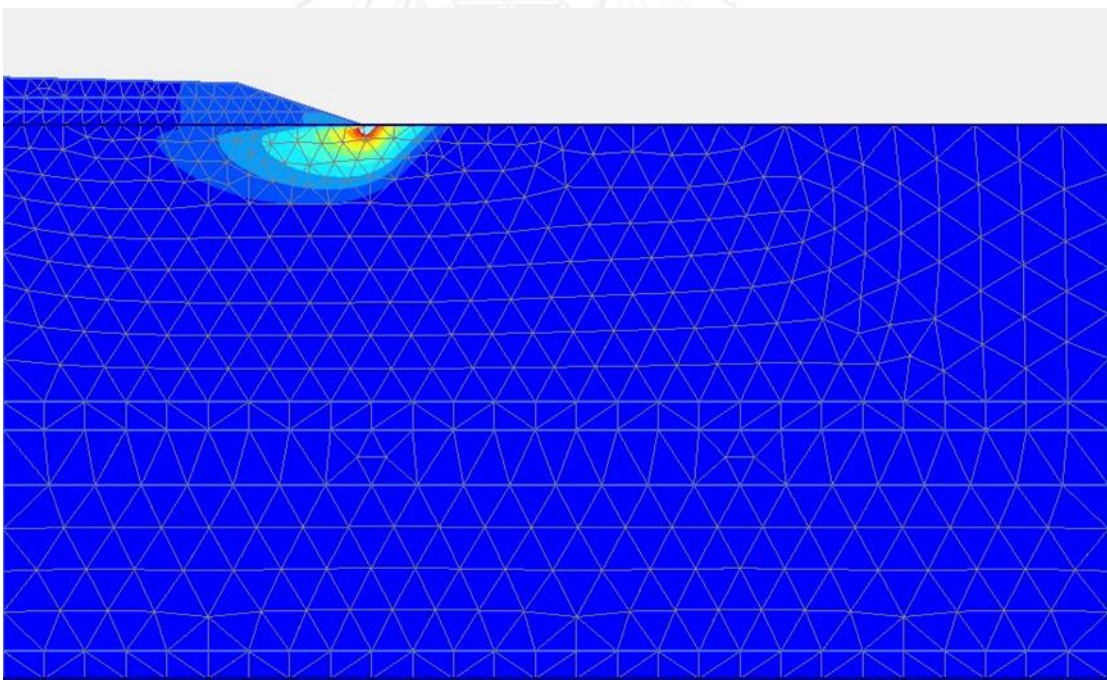


(f)

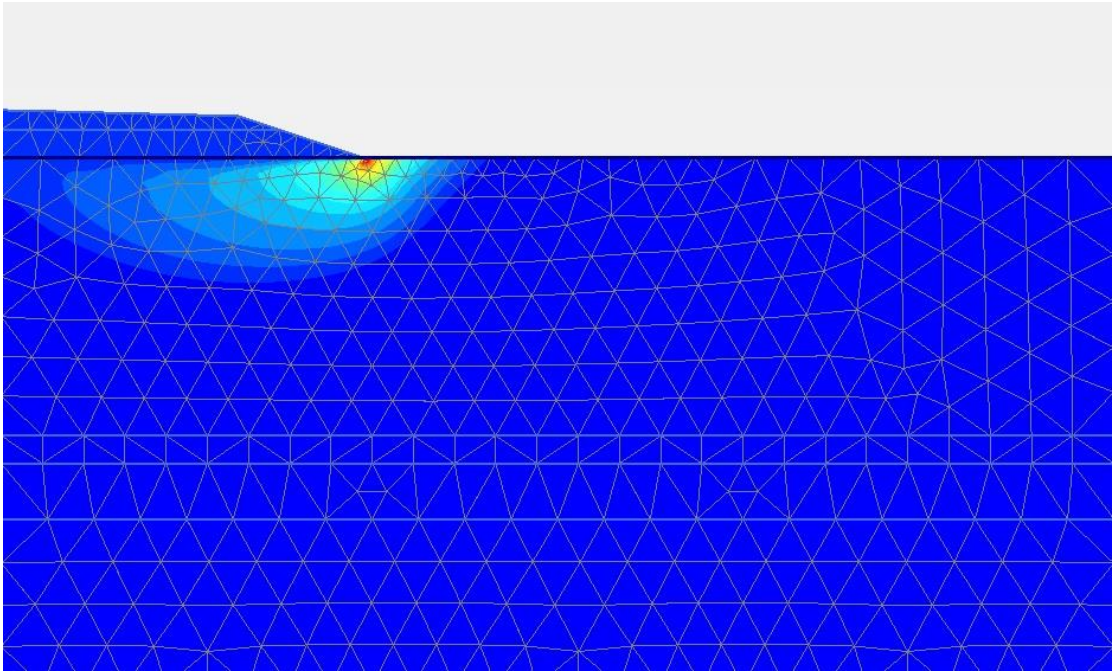
รูปที่ จ-2 ลักษณะการเคลื่อนตัว (Total displacement) ของช่วงการก่อสร้าง
 (a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4 (e) case 5 (f) case 6



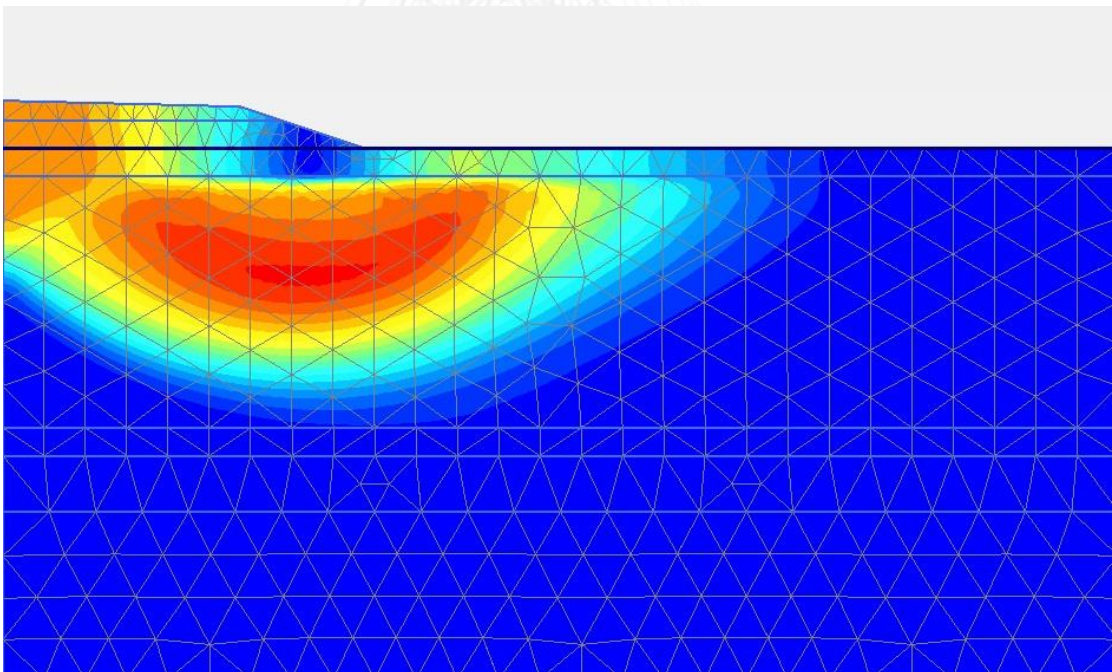
(a)



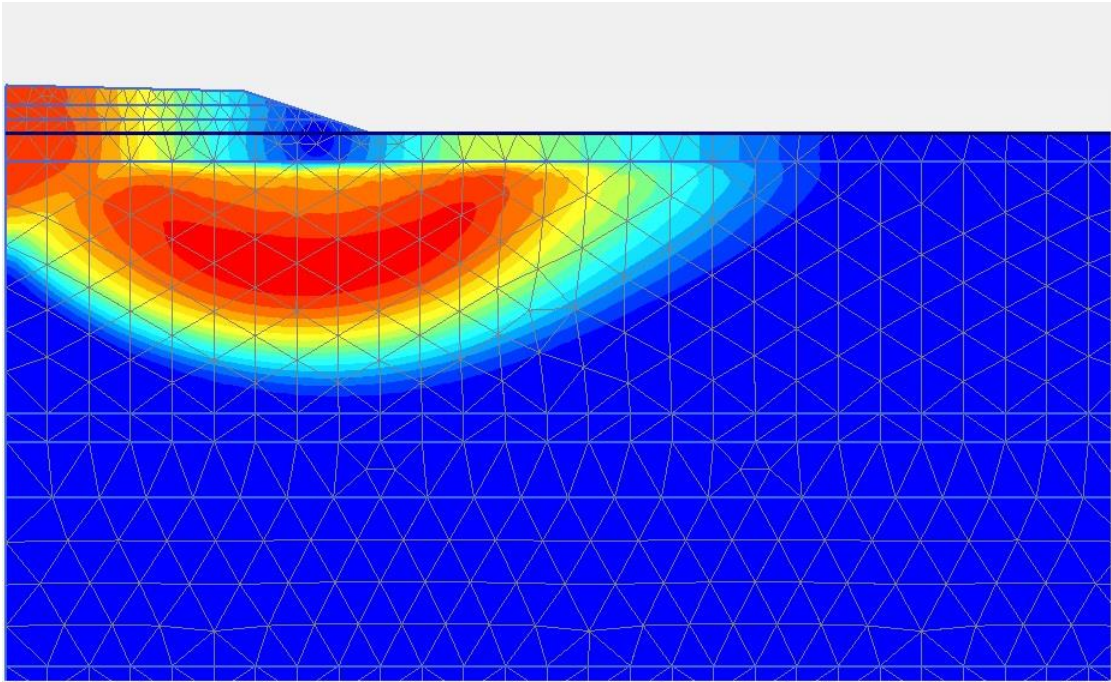
(b)



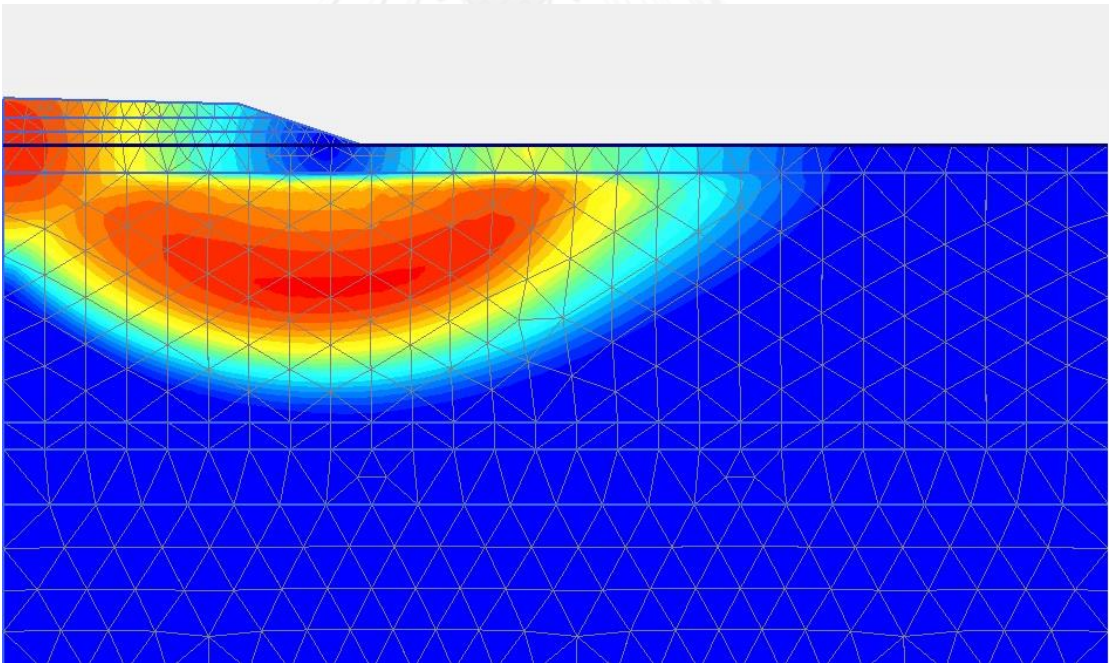
(c)



(d)



(e)



(f)

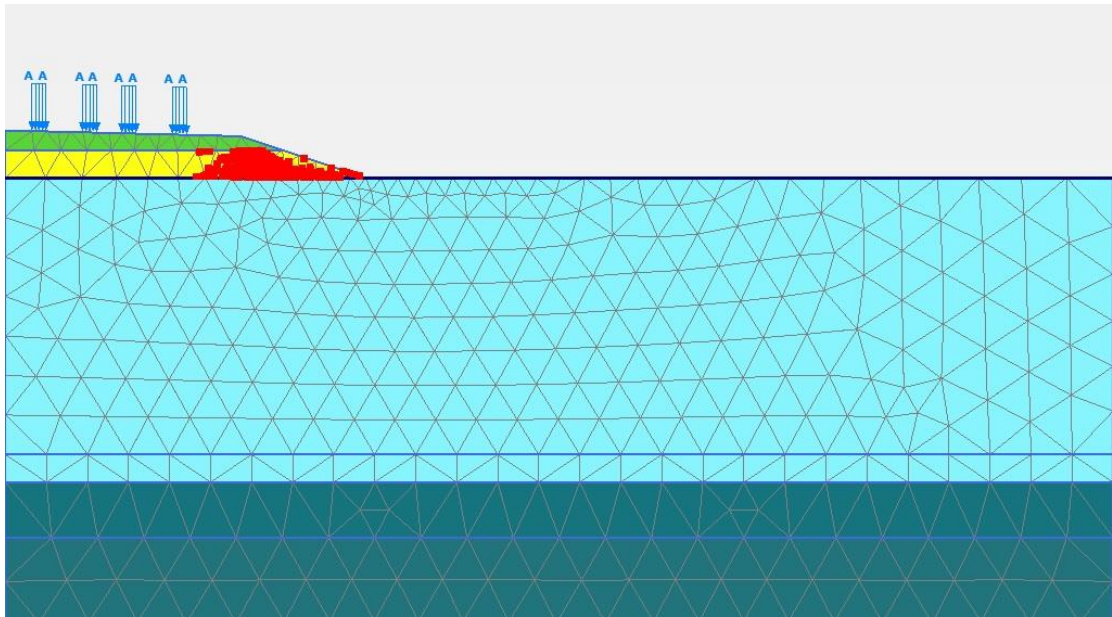
รูปที่ จ-3 ลักษณะการวิบัติของช่วงการก่อสร้าง

(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4 (e) case 5 (f) case 6

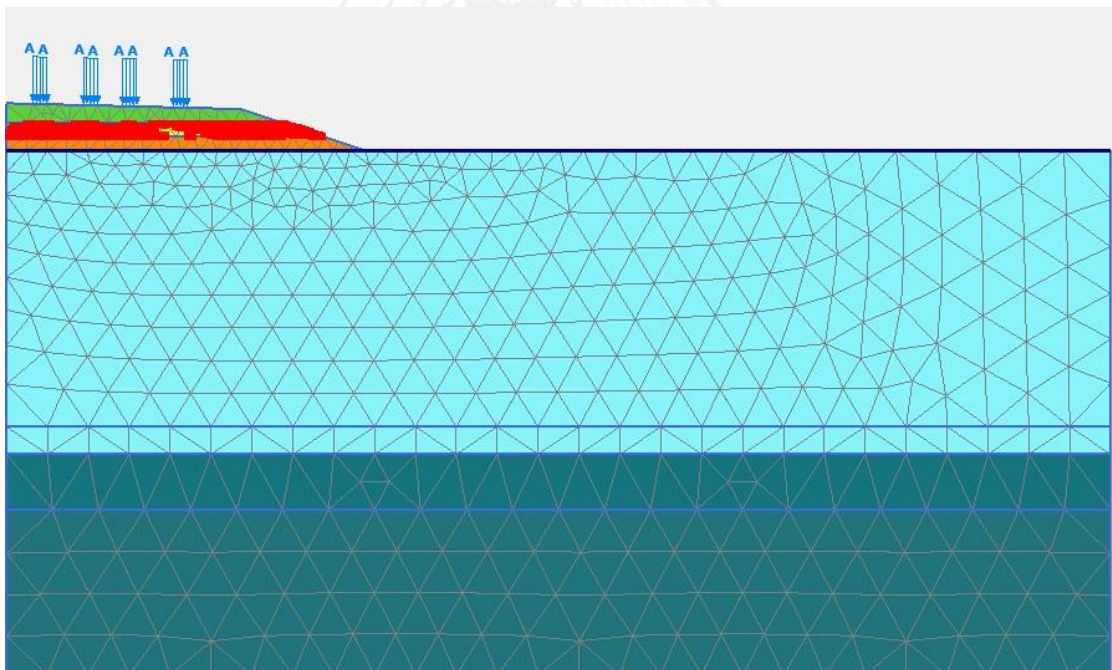


ภาคผนวก ฉ

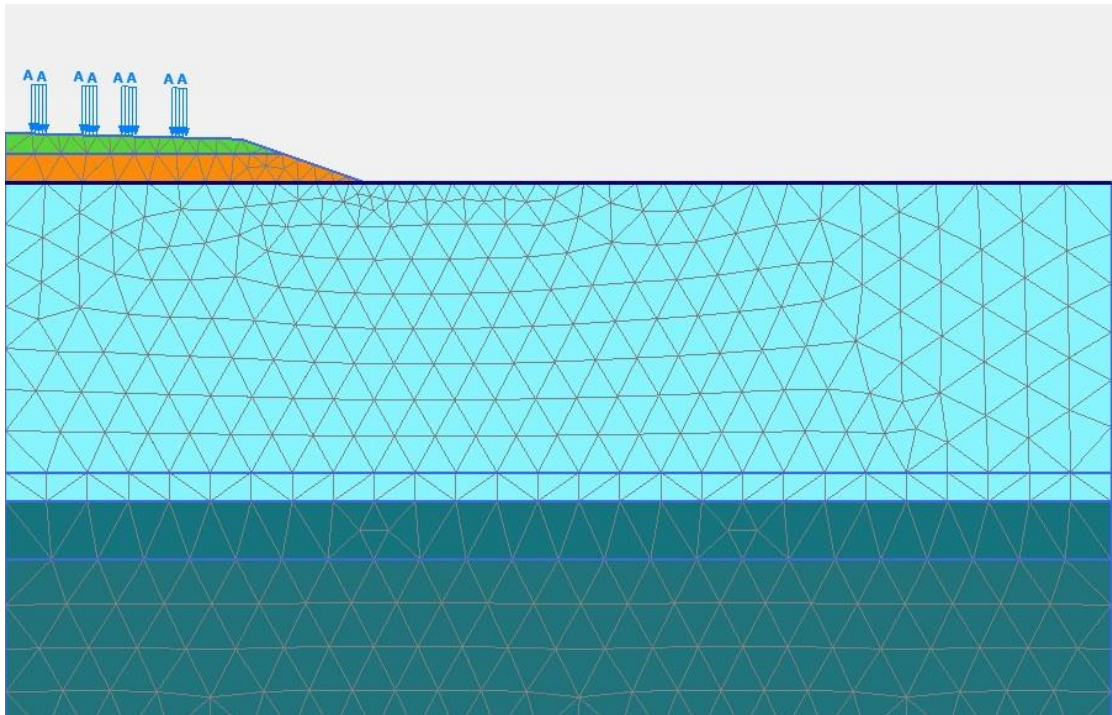
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



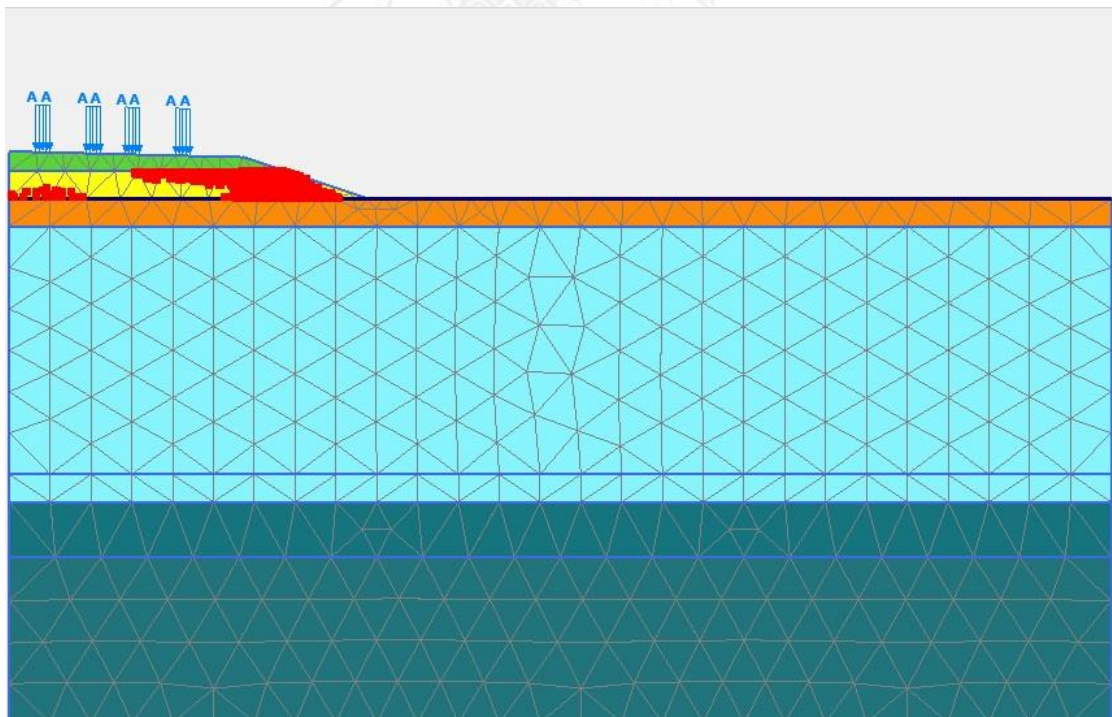
(a)



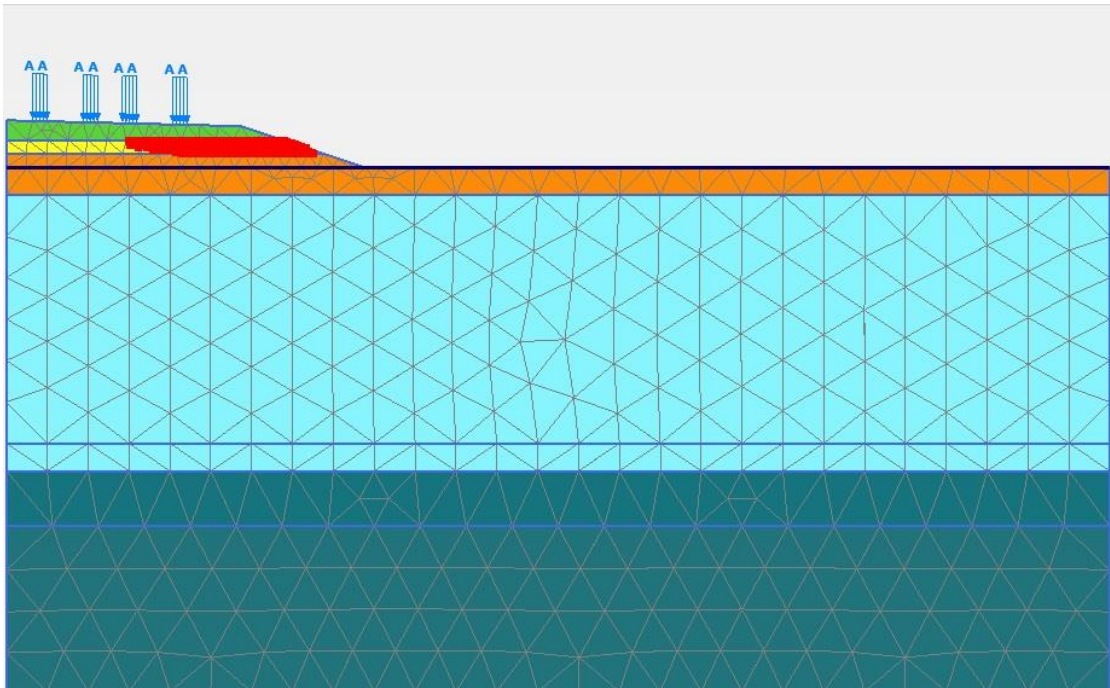
(b)



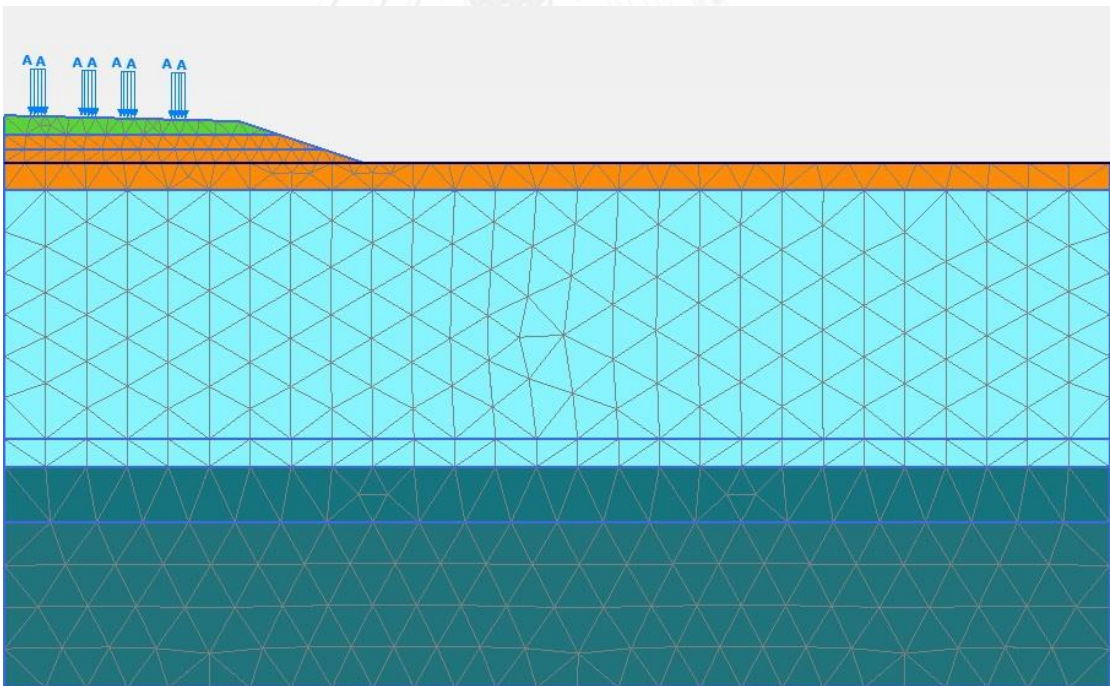
(c)



(d)

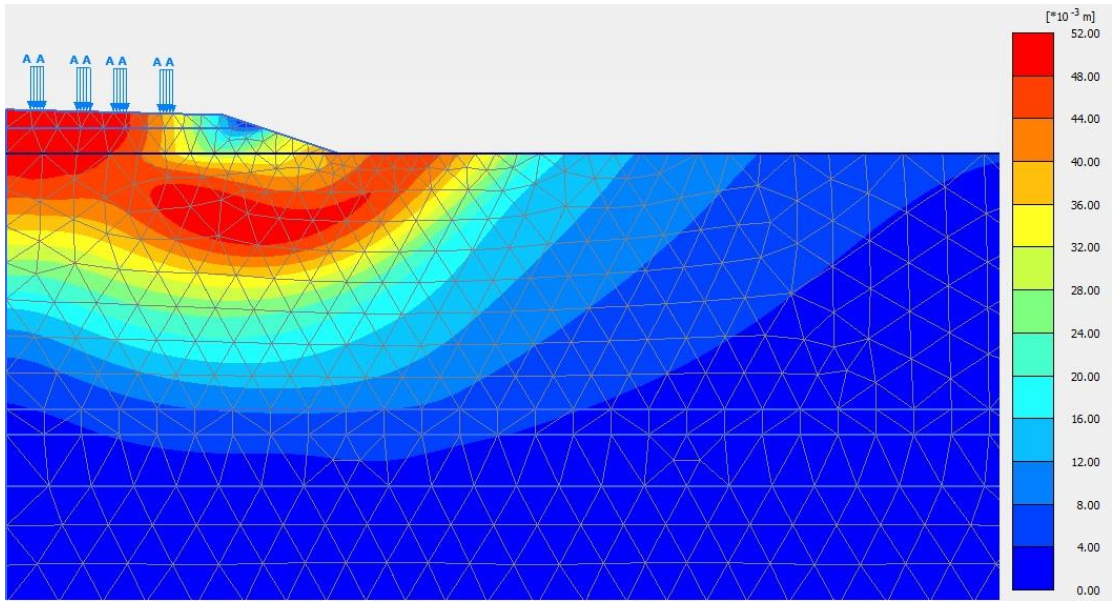


(e)

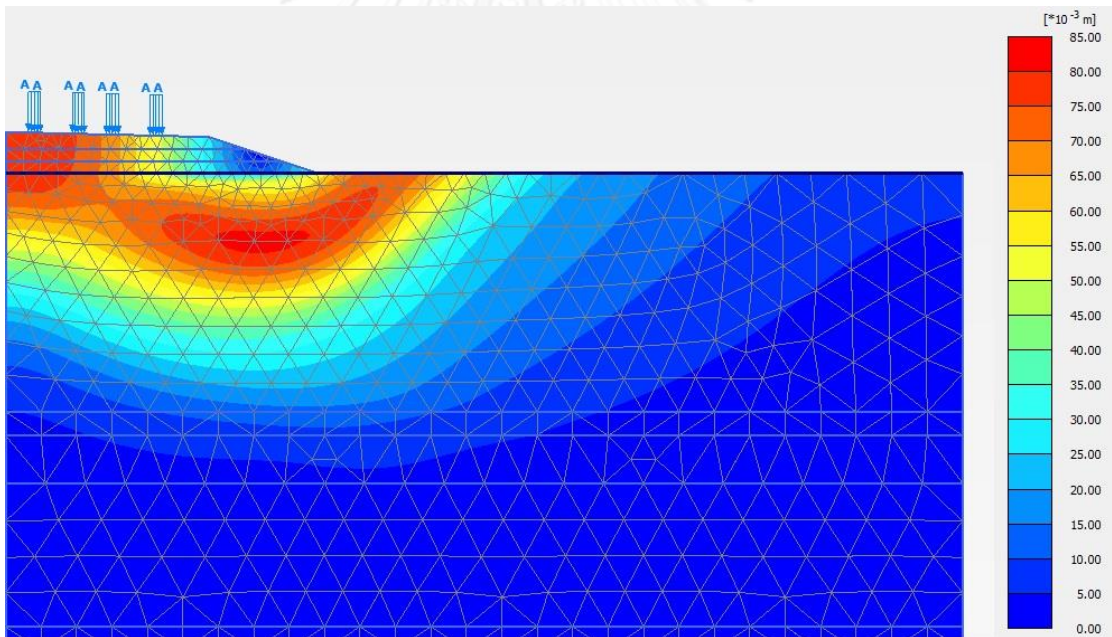


(f)

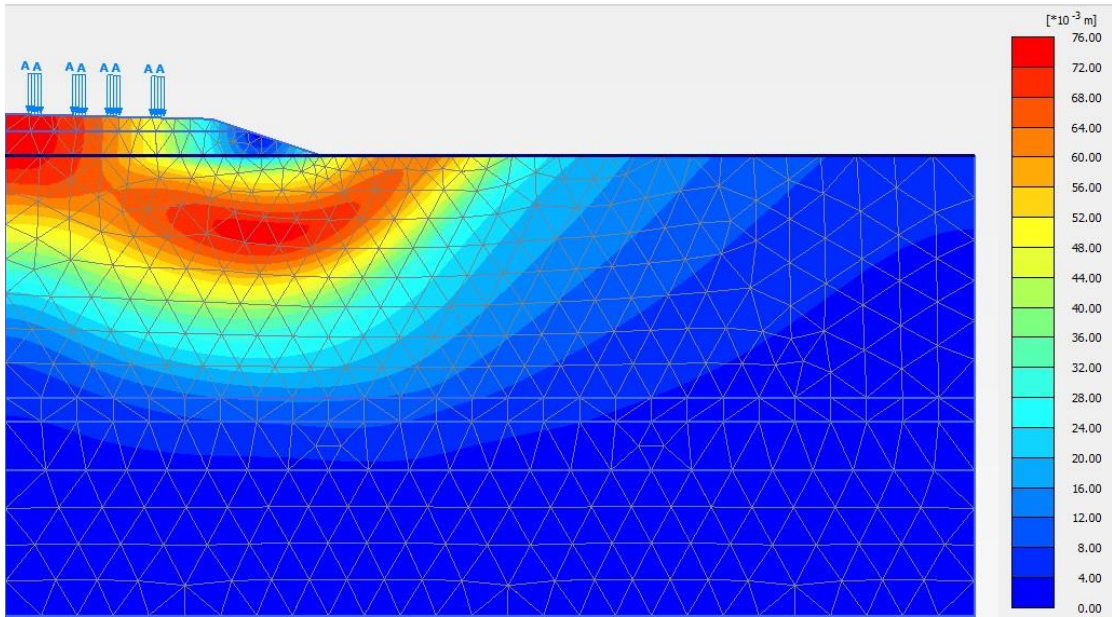
รูปที่ ๓-1 จุดวิบัติ (Plastic point) ของช่วงการใช้งานระยะแรก
 (a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4 (e) case 5 (f) case 6



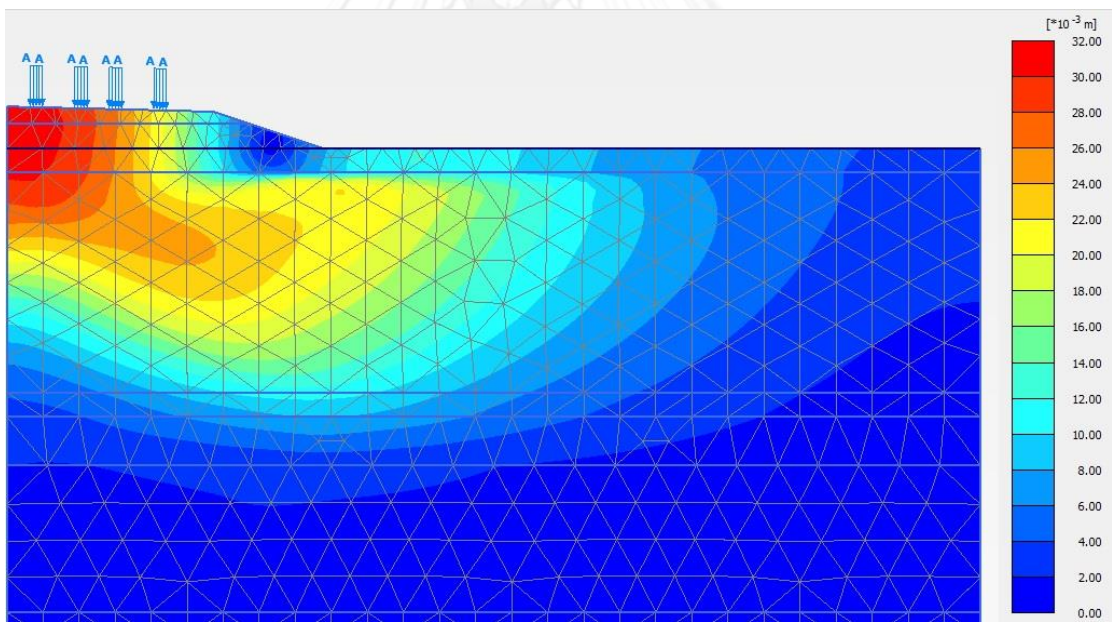
(a)



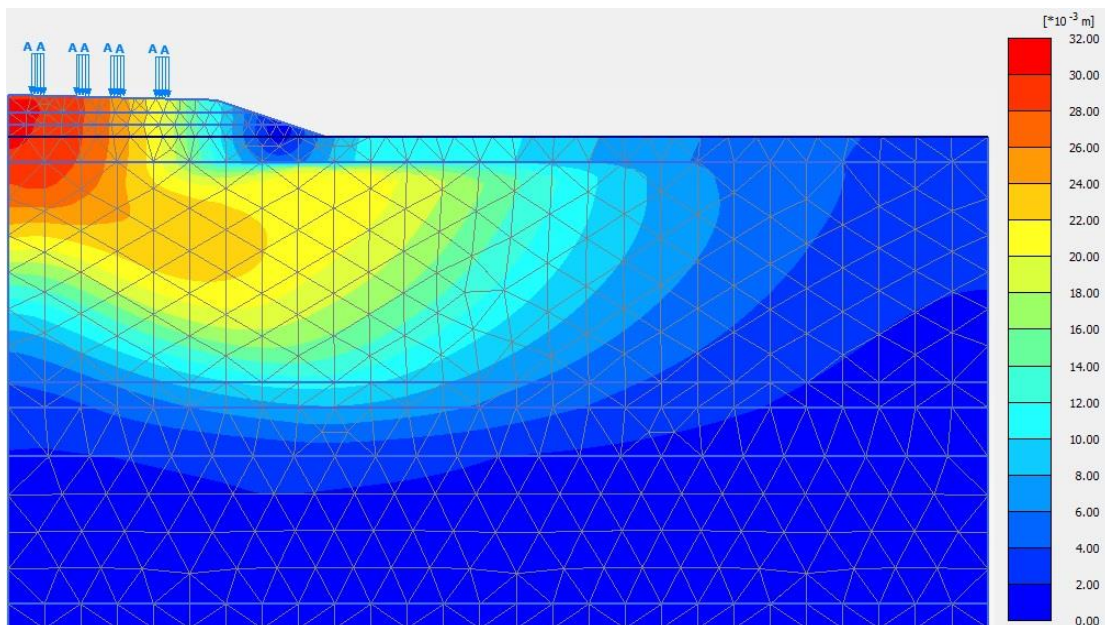
(b)



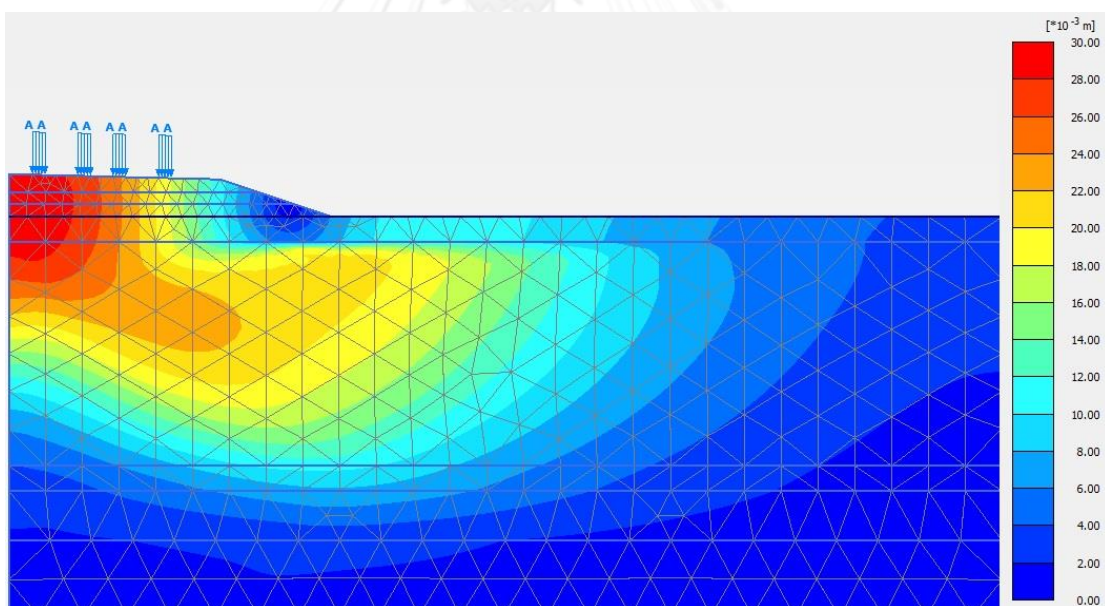
(c)



(d)



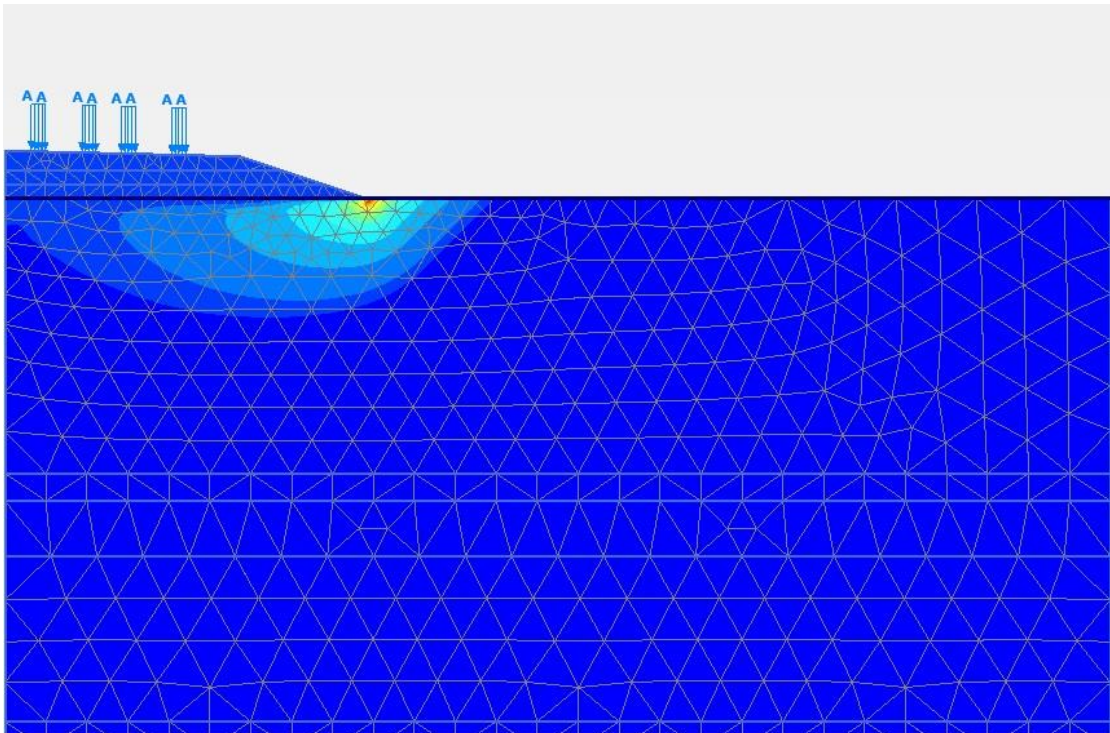
(e)



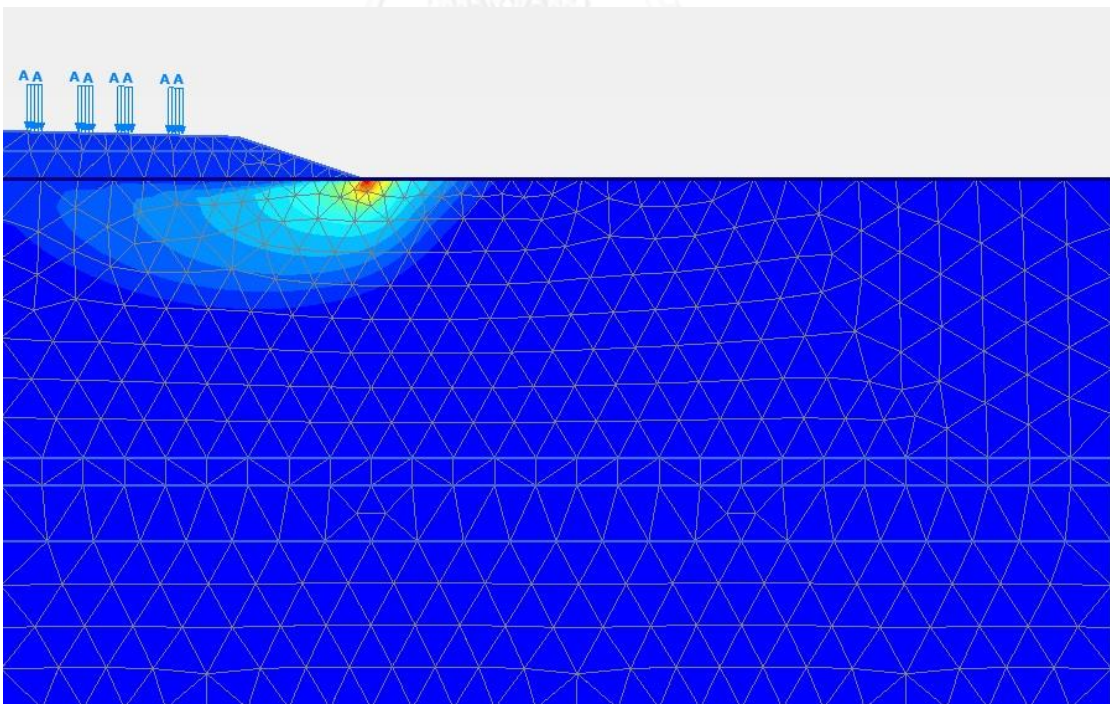
(f)

รูปที่ ฉ-2 ลักษณะการเคลื่อนตัว (Total displacement) ของช่วงการใช้งานระยะแรก

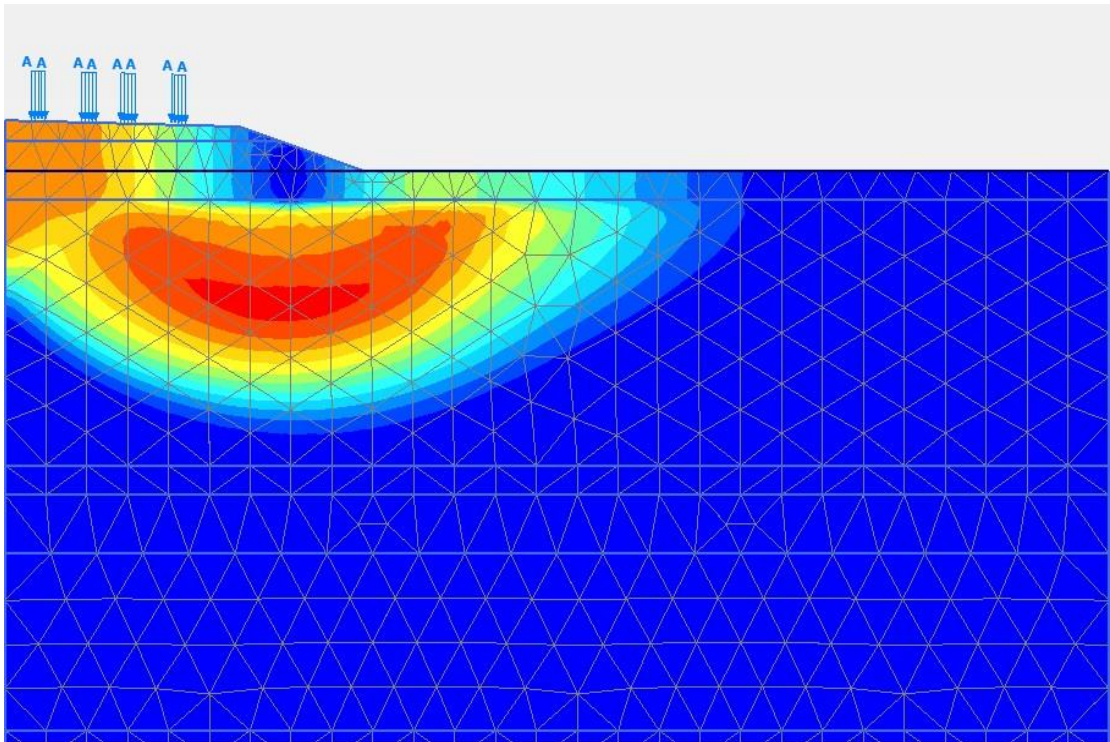
(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4 (e) case 5 (f) case 6



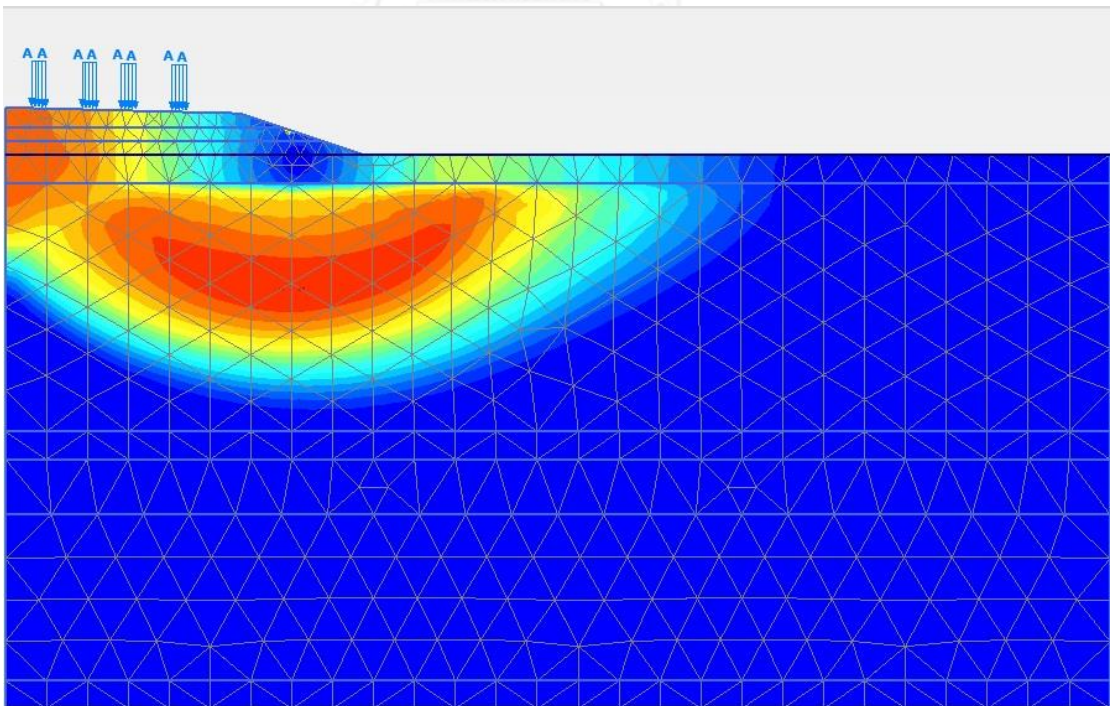
(a)



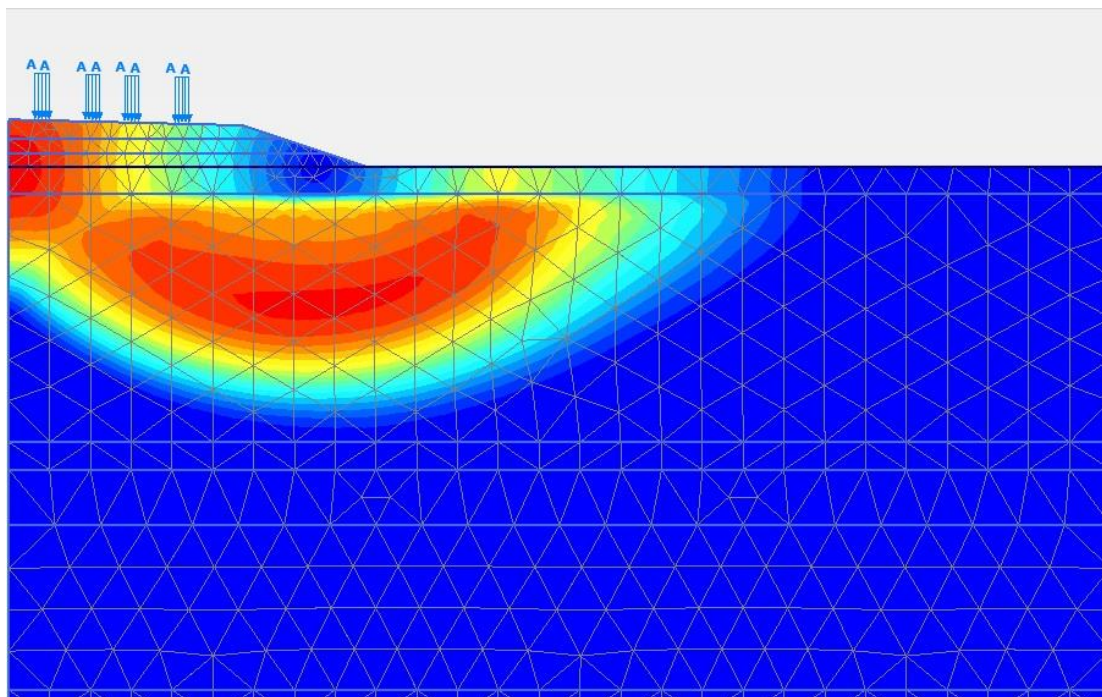
(b)



(c)



(d)



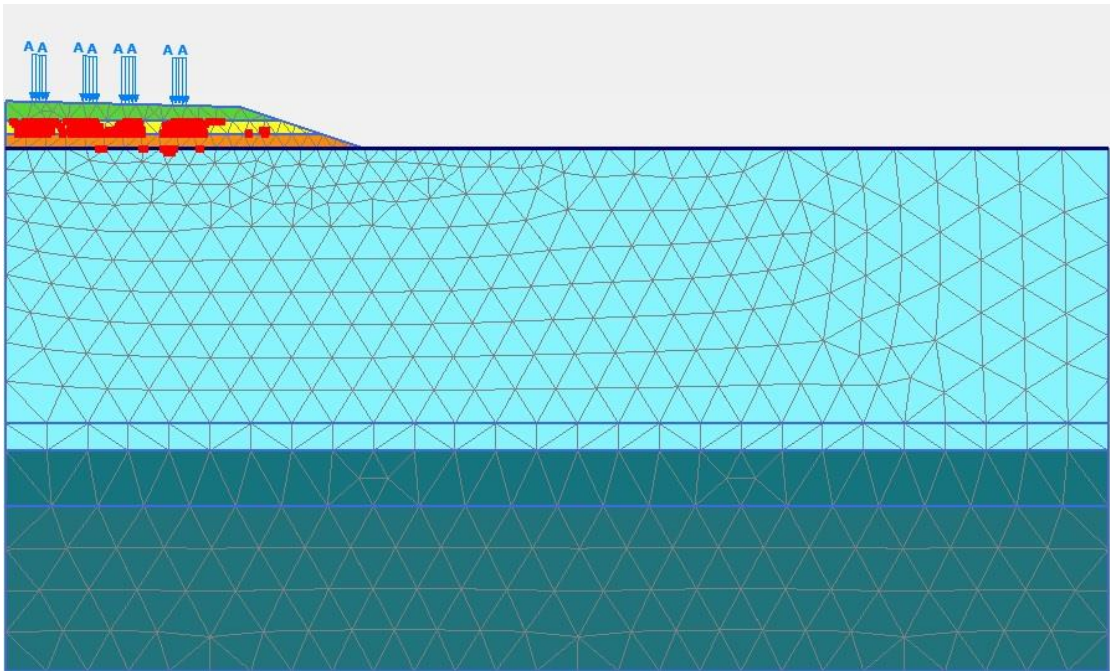
(e)

รูปที่ ฉ-3 ลักษณะการวิบัติของช่วงการใช้งานระยะแรก
(a) case 2 (b) case 3 (c) case 4 (d) case 5 (e) case 6

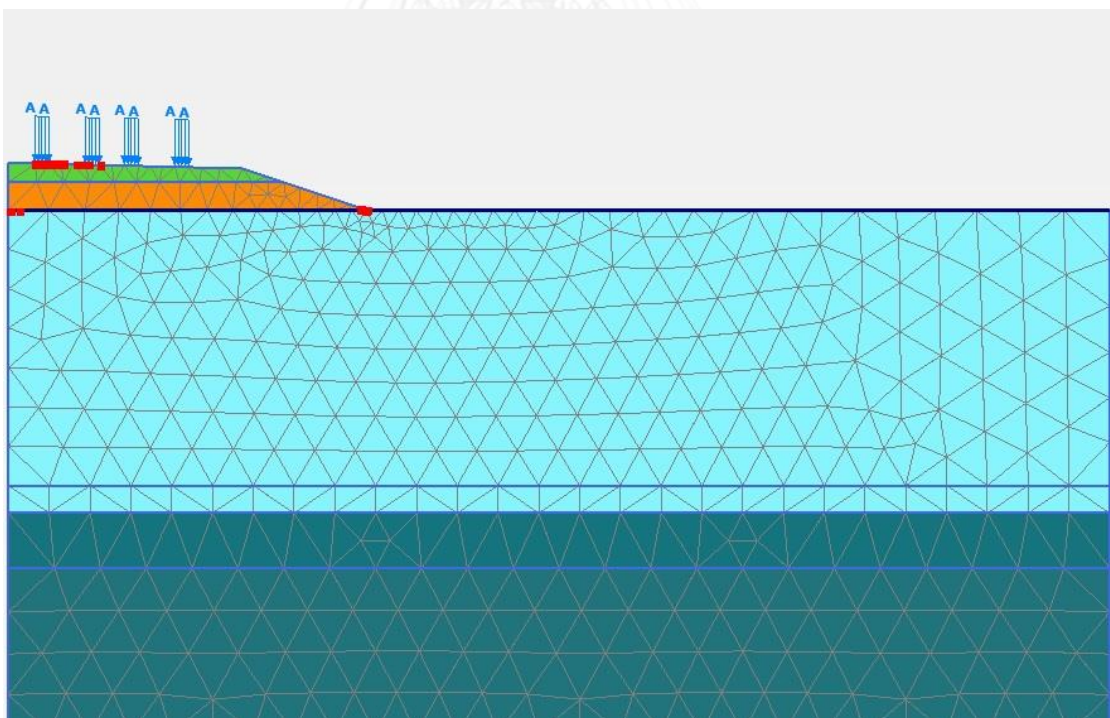


ภาคผนวก ช

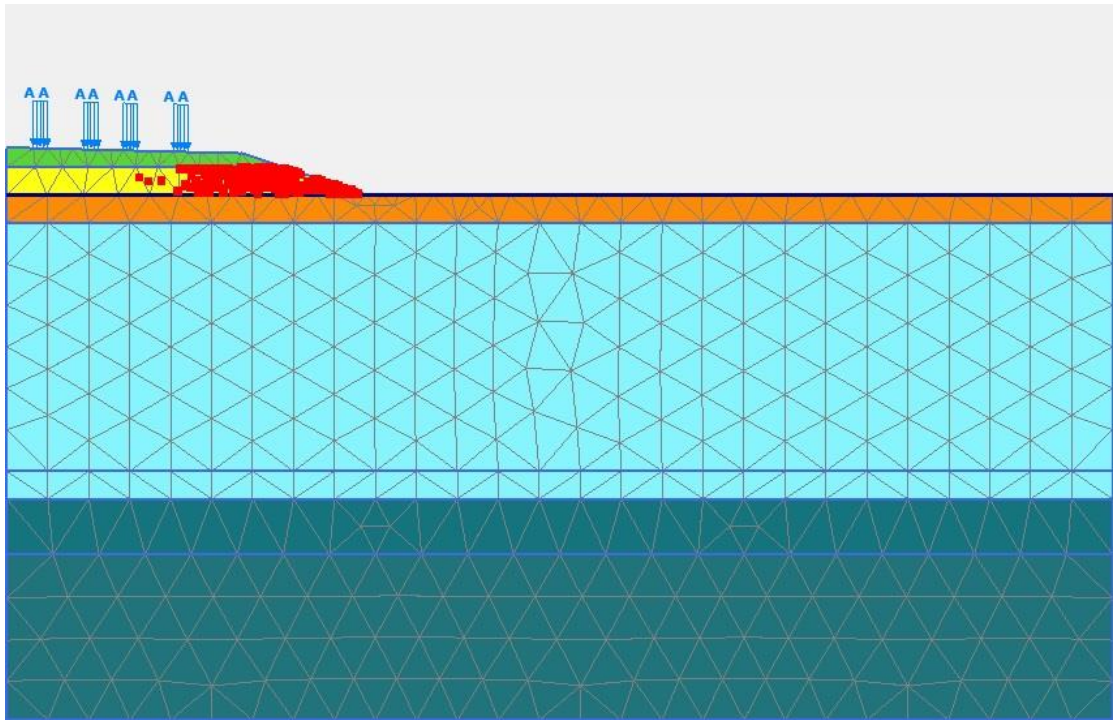
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



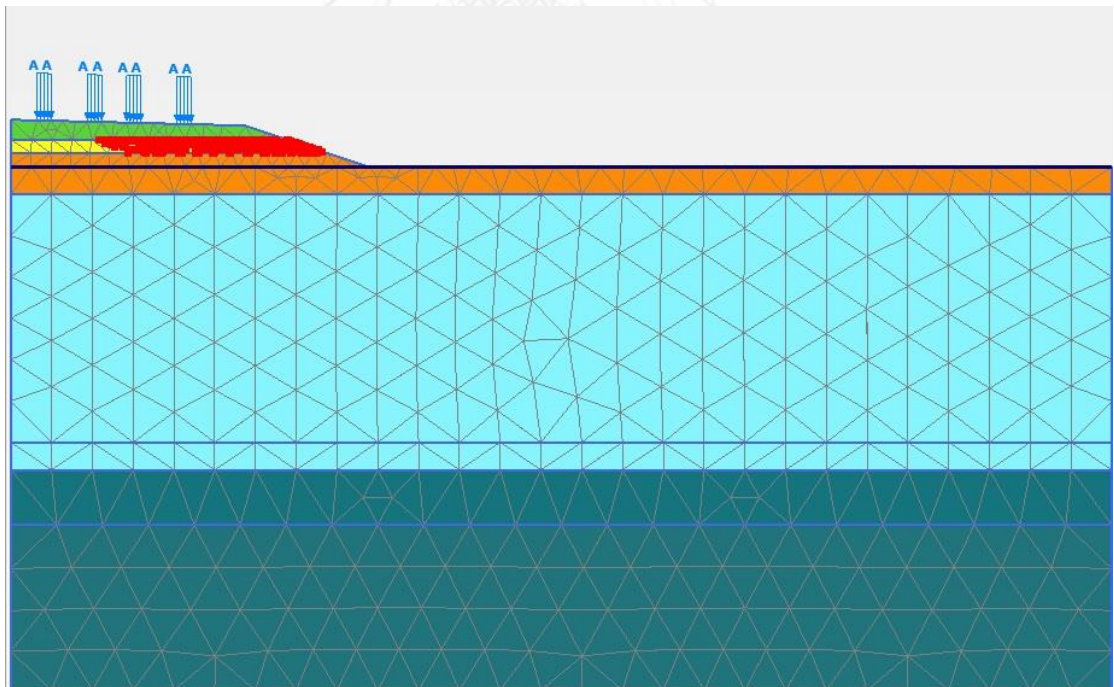
(a)



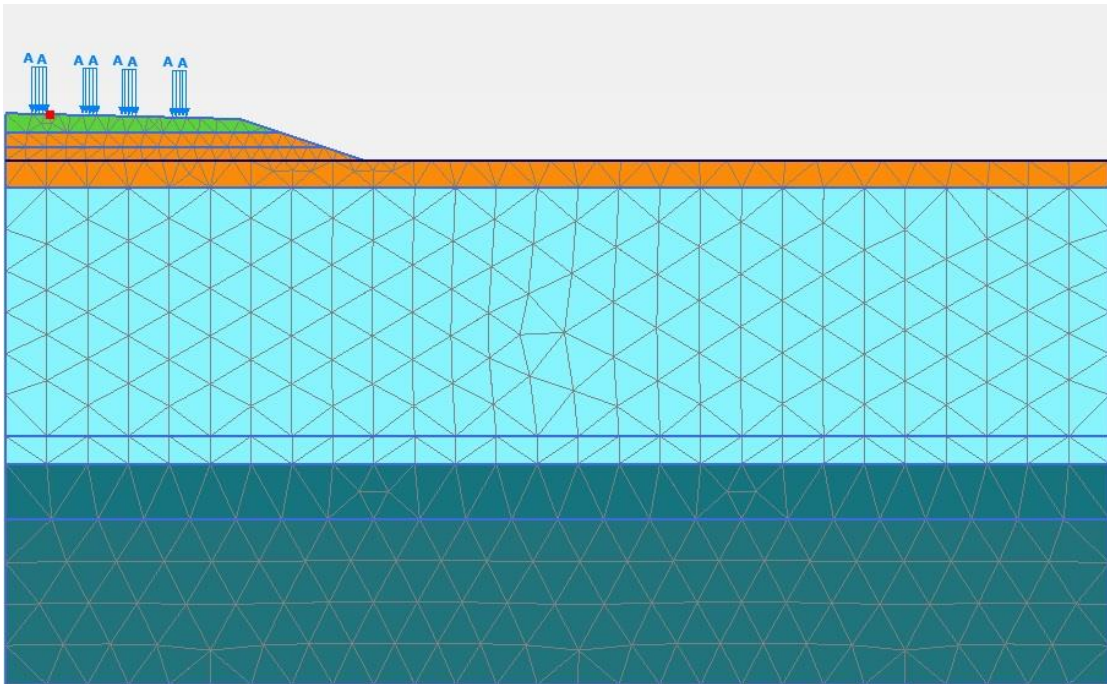
(b)



(c)

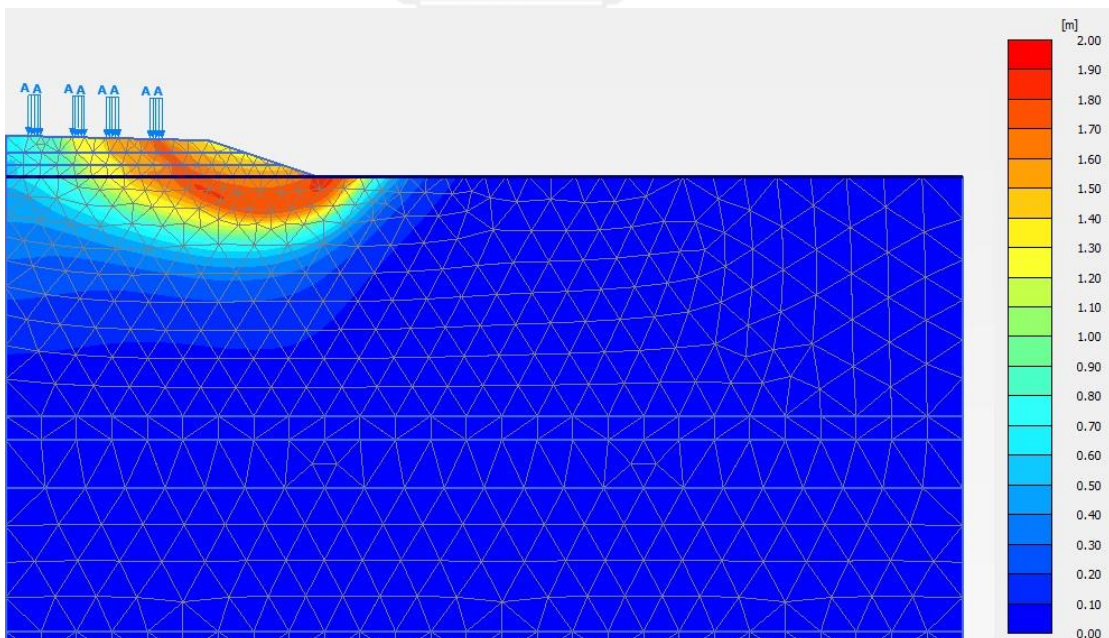


(d)

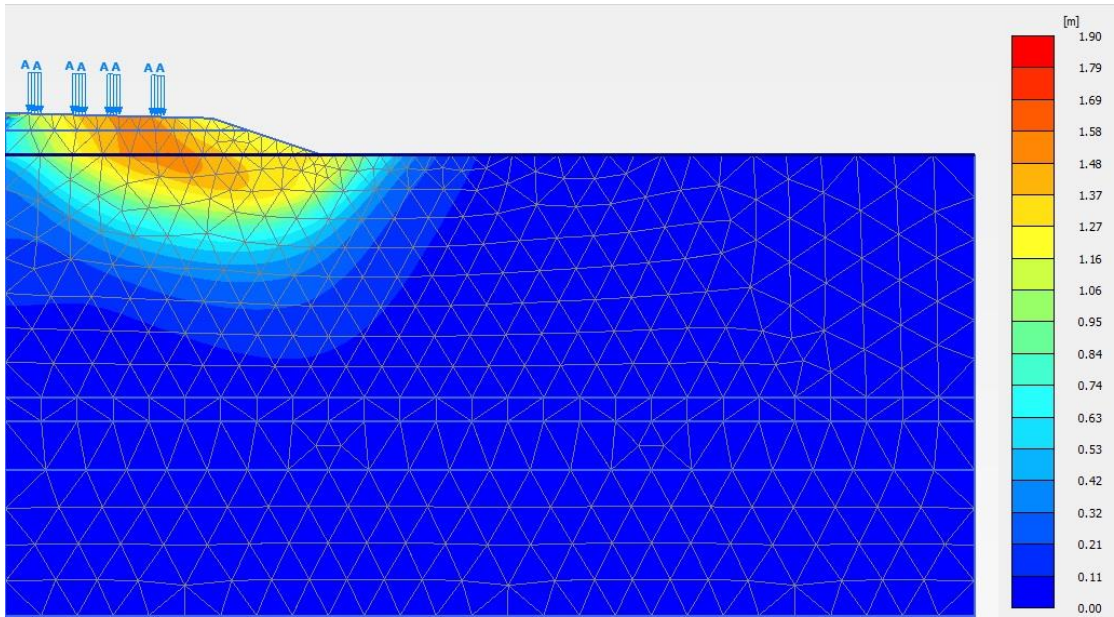


(e)

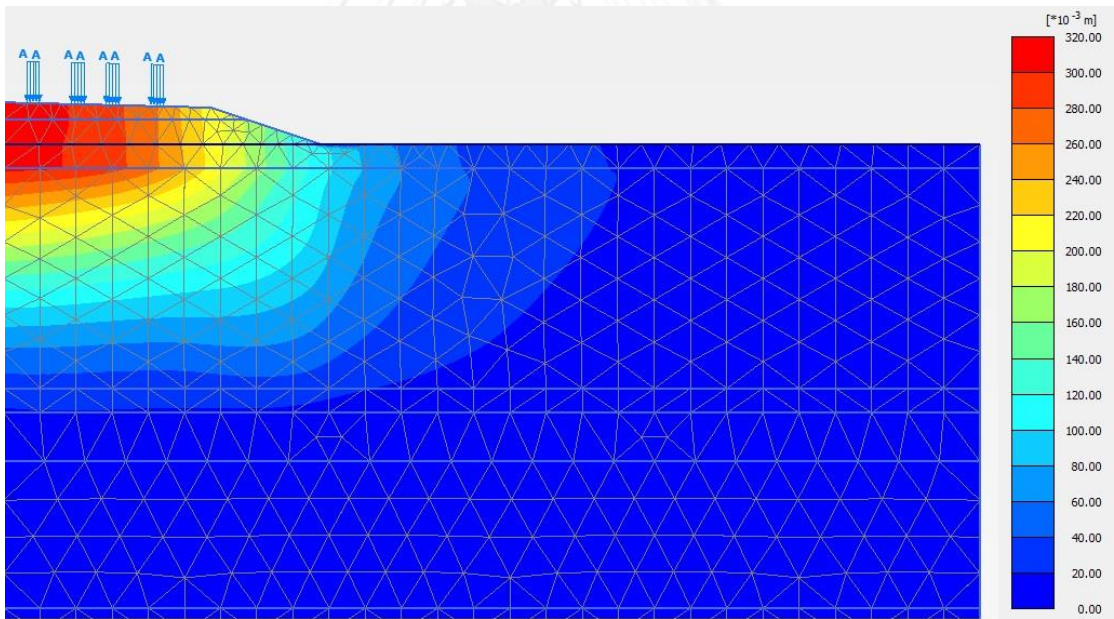
รูปที่ ข-1 จุดวิบัติ (Plastic point) ของช่วงการใช้งานระยะยาว
 (a) case 2 (b) case 3 (c) case 4 (d) case 5 (e) case 6



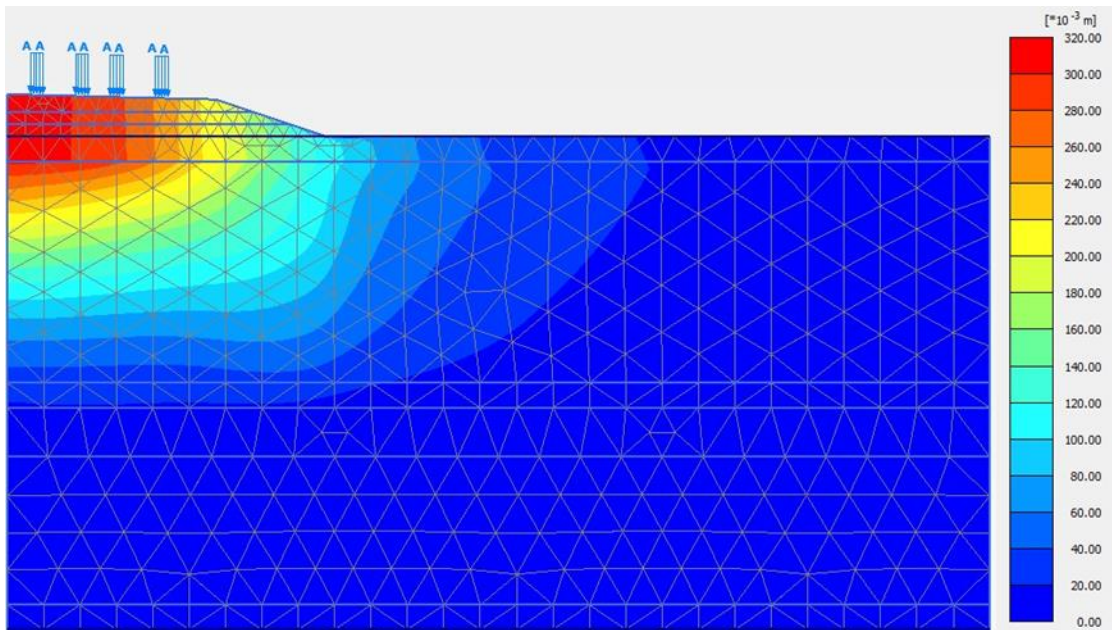
(a)



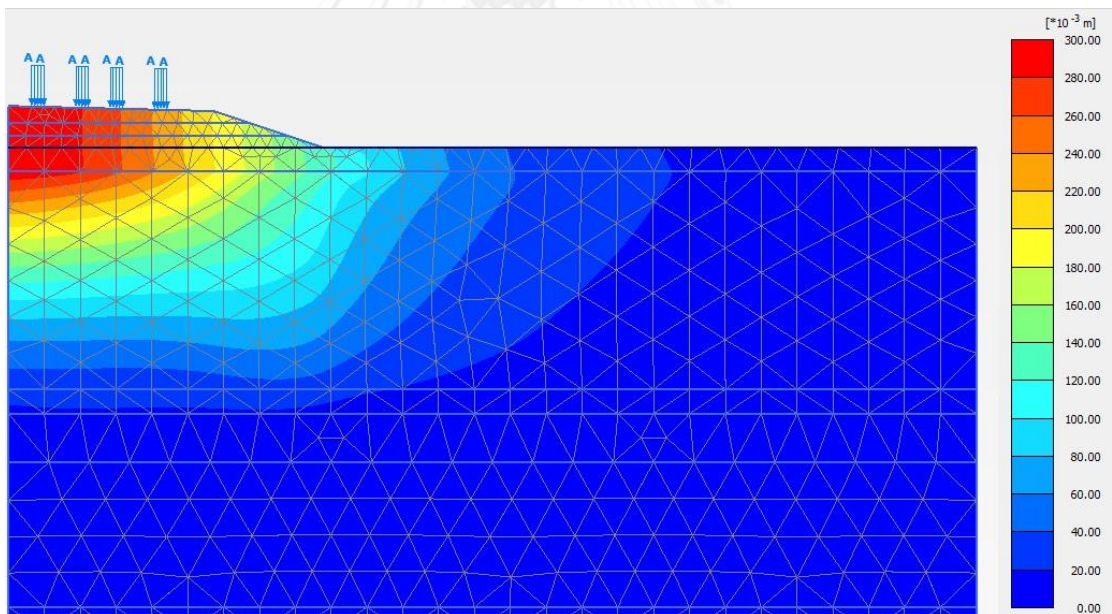
(b)



(c)

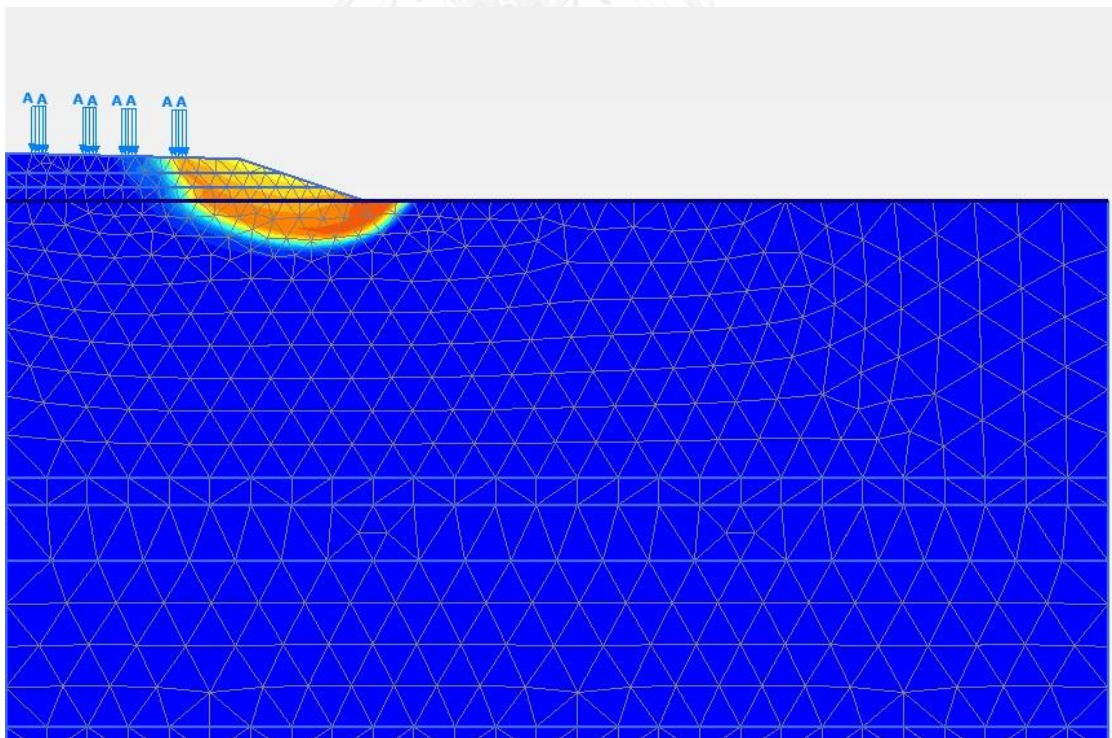
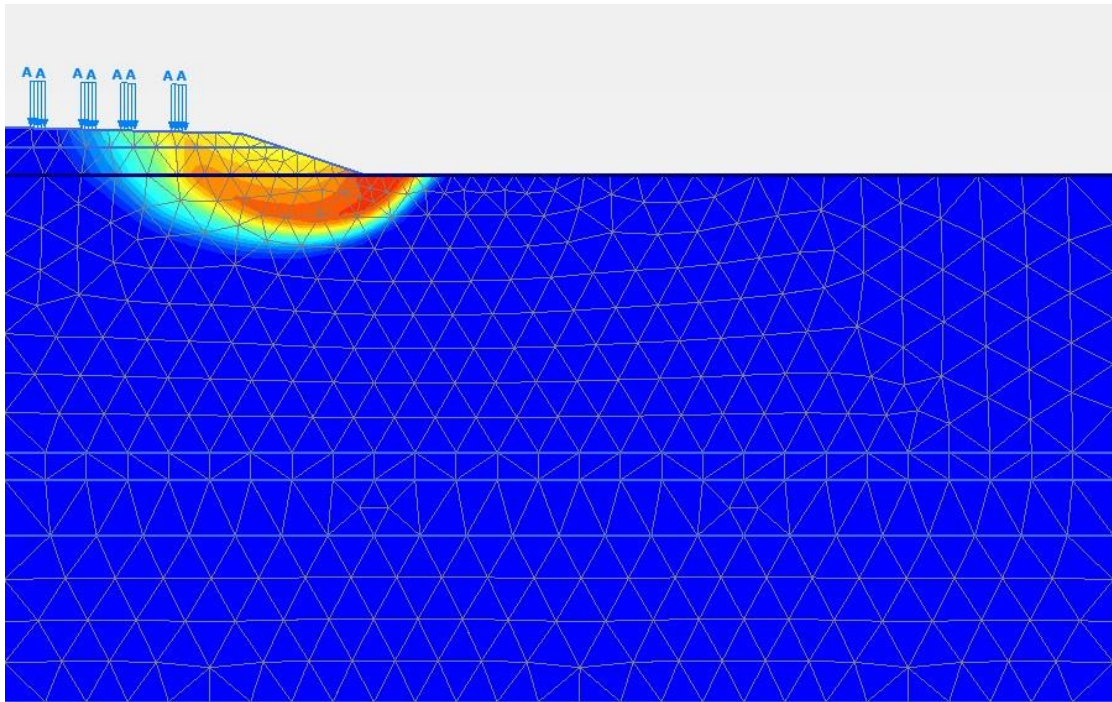


(d)

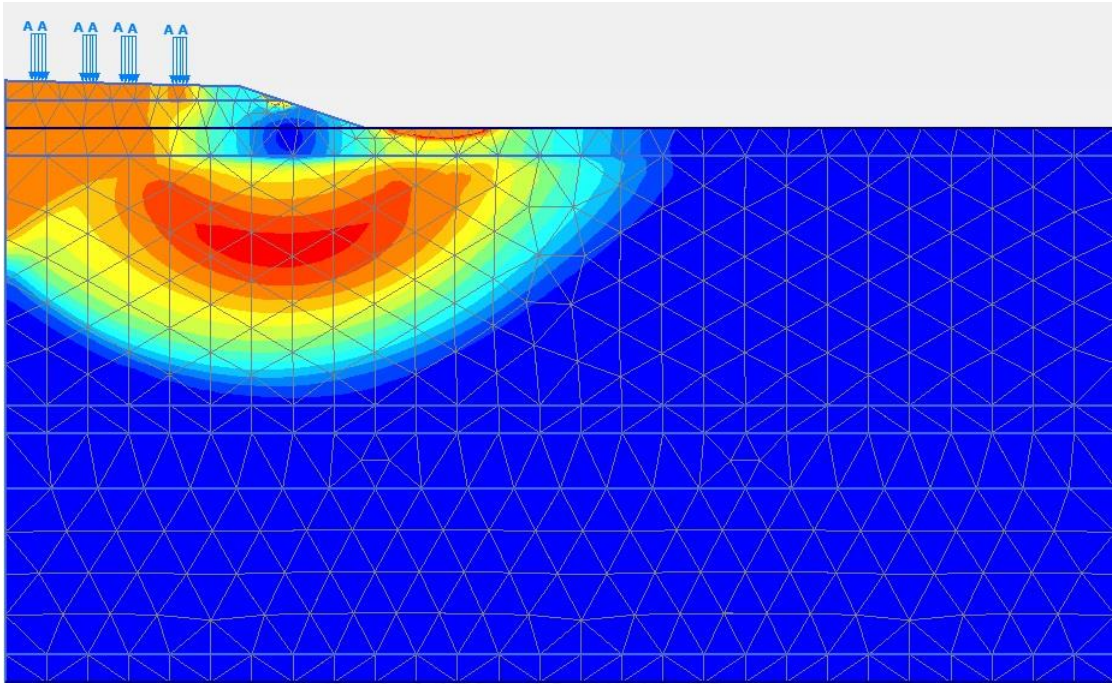


(e)

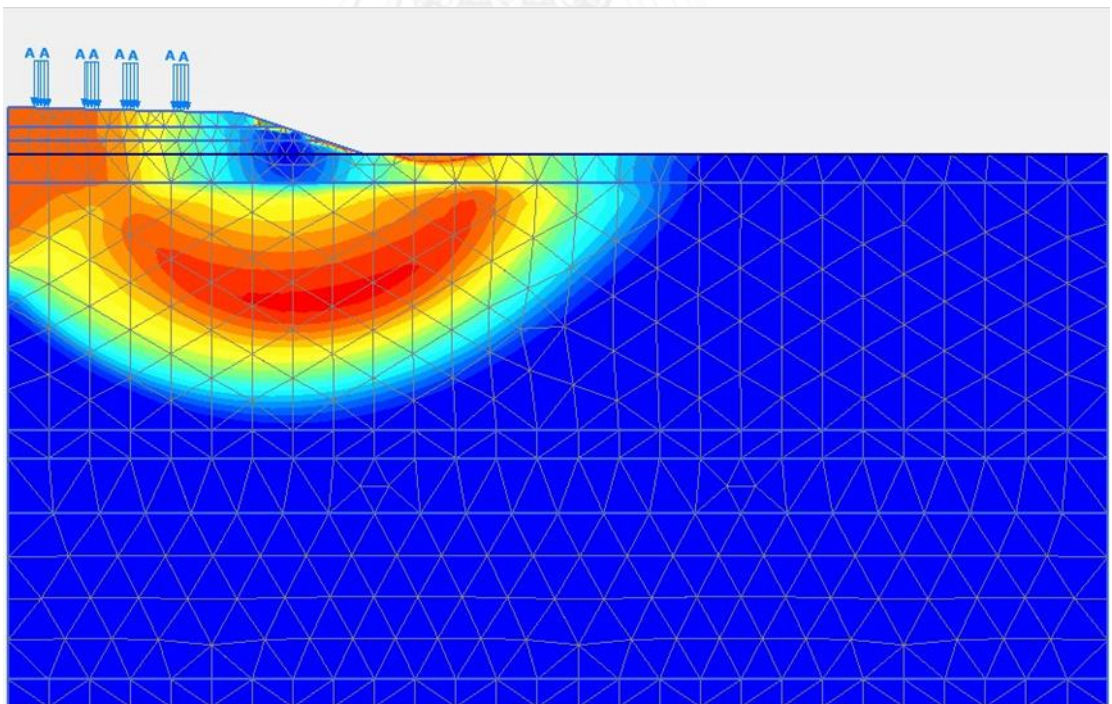
รูปที่ ข-2 ลักษณะการเคลื่อนตัว (Total displacement) ของช่วงการใช้งานระยะยาว
 (a) case 2 (b) case 3 (c) case 4 (d) case 5 (e) case 6



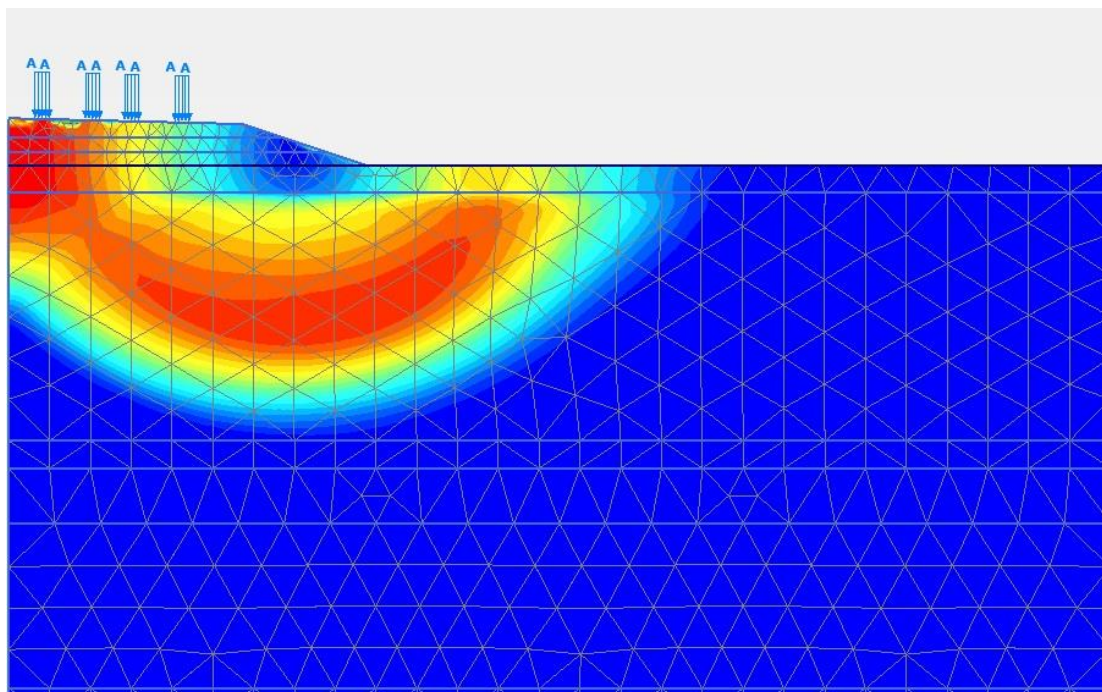
(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ ข-3 ลักษณะการวิบัติของช่วงการใช้งานระยะยาว
(a) case 2 (b) case 3 (c) case 4 (d) case 5 (e) case 6

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพนันท์ พรรณขาม

เกิดวันที่ 4 ธันวาคม 2532 จังหวัดจันทบุรี

การศึกษา

- ประถมศึกษา โรงเรียนเทศบาลเมืองจันทบุรี 1 (2539-2544)
- มัธยมต้น โรงเรียนเบญจมานุสรณ์จังหวัดจันทบุรี (2545-2547)
- มัธยมปลาย โรงเรียนเบญจมราชูทิศจังหวัดจันทบุรี (2548-2550)
- ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2551-2554)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY