

การหาคุณสมบัติของวัสดุสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเบนโทไนด์ สเลอรี่  
เพื่อใช้เป็นรอยต่อระหว่างผนังห้องใต้ดินในกรุงเทพมหานคร



นายชนะ พงษ์ไพฑูริกุล

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

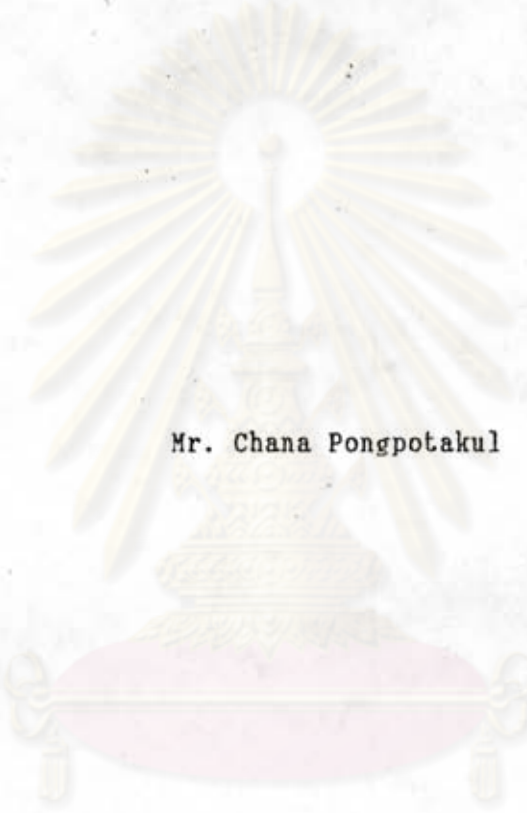
พ.ศ. 2534

ISBN 974-579-075-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

017308: 117267602

PROPERTY OF CEMENT-BENTONITE SLURRY MIXED FOR PERFORMING  
THE DIAPHRAGM WALL JOINT IN BANGKOK METROPOLIS



Mr. Chana Pongpotakul

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1991

ISBN 974-579-075-3



ชนะ พงษ์ไพธากุล : การหาคุณสมบัติของวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเบนโทไนต์ สเลอรรี่ เพื่อใช้เป็นรอยต่อระหว่างผนังห้องใต้ดินในกรุงเทพมหานคร (PROPERTY OF CEMENT-BENTONITE SLURRY MIXED FOR PERFORMING THE DIAPHRAGM WALL JOINT IN BANGKOK METROPOLIS) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.วันชัย เพชรักษ์, 137 หน้า ISBN 974-579-075-3

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนต์ เพื่อใช้เป็นรอยต่อระหว่างผนังห้องใต้ดินแบบ diaphragm wall โดยใช้เบนโทไนต์ สเลอรรี่ที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 5% โดยน้ำหนักผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างเบนโทไนต์ สเลอรรี่ กับปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่าง ๆ กัน จำนวน 5 อัตราส่วนผสมคือ 3 : 1, 3.5 : 1, 4 : 1, 4.5 : 1 และ 5 : 1

ผลการทดสอบได้ว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมกับเบนโทไนต์ สเลอรรี่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้วัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนต์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลง ค่าดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนตามระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างสำหรับอัตราส่วนผสม 3 : 1, 3.5 : 1, 4 : 1 แต่สำหรับอัตราส่วนผสม 4.5 : 1 และ 5 : 1 จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะสอดคล้องกับการเกิดของ calcium silicate hydrate ในตัวอย่าง ซึ่งตรวจสอบได้โดยวิธี X-ray diffraction และเมื่อเกิดเค้นการไหลของน้ำผ่านวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนต์ มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นด้วย

ในส่วนของการคาดคะเนความลึกของการซุกดินมากที่สุดที่กำลังของวัสดุผสมจะสามารถรับได้ จำเป็นต้องใช้หลักการชี้แจงกักของการสมดุลย์ และสมมุติฐานการกระจายของหน่วยแรงเสียดทานระหว่างวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนต์กับผนัง diaphragm wall ผลที่ได้สำหรับกรณีที่มี surcharge 5 ton/m<sup>2</sup> และค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.25 เป็นดังนี้

อัตราส่วนผสม	ความลึกของการซุกดิน, เมตร
3 : 1	20
3.5 : 1	11
4 : 1	6.5
4.5 : 1	4.0
5 : 1	2.5



ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา  
 สาขาวิชา ..... วิศวกรรมปฐพี  
 ปีการศึกษา ..... 2533

ลายมือชื่อผู้นิสิต ..... พ.น. ธรรมสาร  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
 งานผลิตสื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

CHANA PONGPOTAKUL : PROPERTY OF CEMENT-BENTONITE SLURRY MIXED FOR PERFORMING THE DIAPHRAGM WALL JOINT IN BANGKOK METROPOLIS. THESIS ADVISOR : Dr. WANCHAI THEPARAKSA, Ed.D 137 PP.

This thesis aims to study the properties of cement-bentonite for performing the diaphragm wall joint. The cement-bentonite is prepared by mixing the bentonite slurry that contains bentonite of 5% by weight with the ordinary portland cement type I. The mixing ratios by weight of bentonite slurry and cement are 3 : 1, 3.5 : 1, 4 : 1, 4.5 : 1 and 5 : 1.

The result shows that in case of cement ratio is increased, the strength of cement-bentonite is also increased while the coefficient of permeability is decreased. Both strength and coefficient of permeability are time dependent for the mixing ratio 3 : 1, 3.5 : 1 and 4 : 1 but are time independent for the ratio 4.5 : 1 and 5 : 1. This is related to the domination of calcium silicate hydrate in the samples inspected by X-ray diffraction technique. When the hydraulic gradient is increased, the coefficient of permeability of cement-bentonite is also increased.

In case of estimating the depth of excavation at the diaphragm wall joint, based on the assumptions of limit equilibrium and distribution of friction between contact surface of cement-bentonite and diaphragm wall, with surcharge of 5 ton/m<sup>2</sup> and safety factor of 1.25, the maximum excavation height is summarized as follow :

Mixing ratio	Height of excavation, meter
3 : 1	20
3.5 : 1	11
4 : 1	6.5
4.5 : 1	4.0
5 : 1	2.5

ภาควิชา .....  
 สาขาวิชา .....  
 ปีการศึกษา .....

ลายมือชื่อนิสิต .....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาช่วย .....



### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงลงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ดร.วันชัย เทพรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่าง ๆ เกี่ยวกับการวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบคุณกรรมการตรวจวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่มีประโยชน์อย่างมาก นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท โซเลตองซ์ จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านวัสดุคิป์ที่ใช้ในการวิจัยมา ๗ ชิ้นด้วย

ทำนุ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฉ
สัญลักษณ์	ก
บทที่	หน้า
1. บทนำ .....	1
1.1 คำนำ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย .....	4
2. ทฤษฎีและผลงานในอดีต .....	5
2.1 วัสดุผสมดิน-ซีเมนต์ .....	5
2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของดิน-ซีเมนต์ .....	8
2.3 เบนโทไนท์ .....	9
2.4 ปูนซีเมนต์ .....	10
2.5 การคำนวณแรงดันด้านข้างของดินที่กระทำต่อ diaphragm wall ..	13
3. ขั้นตอนและวิธีการวิจัย .....	18
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย .....	18
3.2 ขั้นตอนการวิจัย .....	18
3.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ .....	18

บทที่	หน้า
4. ผลการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย .....	31
4.1 การวิเคราะห์ทางด้านเคมี .....	31
4.2 การวิเคราะห์ทางด้านแร่โดยวิธี x-ray diffraction .....	33
4.3 คุณสมบัติทางด้านฟิลิกส์ของเบนโทไนท์ .....	38
5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	39
5.1 ระยะเวลาการก่อตัว .....	39
5.2 กำลังรับแรงอัดแบบ unconfine .....	39
5.3 การซึมผ่านของน้ำ .....	49
5.4 การวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางด้านแร่โดยวิธี x-ray diffraction .....	65
5.5 คุณสมบัติทางด้านฟิลิกส์และเคมี .....	72
5.6 การคายน้ำของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	76
5.7 การคาดคะเนความลึกของการซูดินที่กำลังของวัสดุผสม ซีเมนต์-เบนโทไนท์ จะสามารถรับได้ .....	77
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	87
เอกสารอ้างอิง .....	90
ภาคผนวก ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain ที่ได้จากการทดสอบ unconfine .....	94
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางด้านแร่โดยวิธี x-ray diffraction .....	120



หน้า

ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณหาความลึกของการชุดดินที่ก้ำดังของวัสดุผสม ซีเมนต์-เบนโทไนท์จะสามารถรับได้ .....	134
ประวัติผู้เขียน .....	137



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทางด้าน Atterberg Limit ของดินเหนียวประเภท Montmorillonite .....	9
ตารางที่ 2.2	ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ตราช้าง .....	11
ตารางที่ 4.1	ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ .....	31
ตารางที่ 4.2	ส่วนประกอบทางเคมีของเบนโทไนท์ .....	32
ตารางที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางด้านแร่ของปูนซีเมนต์ .....	34
ตารางที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางด้านแร่ของเบนโทไนท์ .....	36
ตารางที่ 5.1	กำลังรับแรงอัดของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	42
ตารางที่ 5.2	Modulus of elasticity ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	47
ตารางที่ 5.3	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในแนวนอน ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	49
ตารางที่ 5.4	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินชนิดต่างๆ .....	50
ตารางที่ 5.5	ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำภายหลังการซึมผ่านวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	64
ตารางที่ 5.6	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางด้านแร่ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	65
ตารางที่ 5.7	คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	75
ตารางที่ 5.8	ค่า pH ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ ภายหลังการผสม .....	75
ตารางที่ 5.9	การคายน้ำของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	76
ตารางที่ ก.1	ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ (ความดันของน้ำก่อนผ่านกั้นตัวอ่าง (back pressure) = 0.3 ksc., ความดันของน้ำรอบตัวอ่าง (cell pressure) = 0.35 ksc., i=70) .....	120

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ (ความดันของน้ำก่อนผ่านก้นตัวอย่าง (back pressure) = 0.2 ksc., ความดันของน้ำรอบตัวอย่าง (cell pressure) = 0.25 ksc., i=50) ..... 121

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ (ความดันของน้ำก่อนผ่านก้นตัวอย่าง (back pressure) = 0.1 ksc., ความดันของน้ำรอบตัวอย่าง (cell pressure) = 0.2 ksc., i=25) ..... 122

ตารางที่ ข.1 Determination of interplanar spacing d from Bragg's law ..... 129

ตารางที่ ข.2 x-ray diffraction Data for Clay Minerals ..... 130

ตารางที่ ข.3 x-ray diffraction spacing obtained from (001) plane of layer-silicate species as related to sample treatment ..... 131

ตารางที่ ข.4 x-ray diffraction Data for Clay Minerals and Common Nonclay Minerals ..... 132

ตารางที่ ข.5 x-ray diffraction Data for Cement ..... 133

ตารางที่ ค.1 ค่า H และ Z ของวัสดุรอยต่อซีเมนต์-เบนโทไนท์ อีตราส่วนต่าง ๆ .. 136

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ลักษณะรอยต่อต่อประเภทซีเมนต์-เบนโทไนท์ ระหว่างผนัง diaphragm wall .....	2
รูปที่ 2.1	แผนภาพแสดงคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงของวัสดุผสม ซีเมนต์-เบนโทไนท์ที่มีอัตราส่วนผสมต่าง ๆ กัน .....	7
รูปที่ 2.2	ภาพแสดงขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์ .....	12
รูปที่ 2.3	ผลของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่มีต่อหน่วยแรงดัน ด้านข้างของดิน .....	14
รูปที่ 3.1	แผนภูมิการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของวัสดุคิป์ ที่ใช้ในการวิจัย .....	20
รูปที่ 3.2	แผนภูมิการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	21
รูปที่ 3.3	แผนภูมิศึกษาผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัด .....	22
รูปที่ 3.4	แผนภูมิศึกษาผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อการซึมผ่านของน้ำ .....	23
รูปที่ 3.5	แบบหล่อสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	27
รูปที่ 3.6	แบบหล่อสำหรับการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ .....	27
รูปที่ 3.7	เครื่องกวน .....	28
รูปที่ 3.8	เครื่องมือตกแต่งตัวอย่าง .....	28
รูปที่ 3.9	เครื่องมือทดสอบระยะเวลาการก่อตัวแบบ Vicat needle .....	29
รูปที่ 3.10	ภาพแสดงลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ .....	30
รูปที่ 4.1	x-ray diffraction pattern ของปูนซีเมนต์ .....	35
รูปที่ 4.2	x-ray diffraction pattern ของเบนโทไนท์ .....	37
รูปที่ 4.3	การกระจายขนาดคละของเบนโทไนท์ .....	38

รูปที่ 5.1	ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วนผสม 3 : 1 .....	40
รูปที่ 5.2	ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วนผสม 3.5 : 1 .....	41
รูปที่ 5.3	การพัฒนากำลังของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	43
รูปที่ 5.4	ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุ ซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	45
รูปที่ 5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับ water-cement ratio ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	46
รูปที่ 5.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง modulus of elasticity กับปริมาณ ปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม .....	48
รูปที่ 5.7	ผลของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ .....	52
รูปที่ 5.8	ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำ สำหรับอัตราส่วนผสม 3 : 1 .....	53
รูปที่ 5.9	ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำ สำหรับอัตราส่วนผสม 3.5 : 1 .....	54
รูปที่ 5.10	ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำ สำหรับอัตราส่วนผสม 4 : 1 .....	55
รูปที่ 5.11	ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำ สำหรับอัตราส่วนผสม 4.5 : 1 .....	56
รูปที่ 5.12	ผลของเกรเดียนต์การไหลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำ สำหรับอัตราส่วนผสม 5 : 1 .....	57
รูปที่ 5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำเมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 25 .....	58

รูปที่ 5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำเมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 50 .....	59
รูปที่ 5.15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำเมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 70 .....	60
รูปที่ 5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับ water-cement ratio เมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 25 .....	61
รูปที่ 5.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับ water-cement ratio เมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 50 .....	62
รูปที่ 5.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับ water-cement ratio เมื่อเกรเดียนต์การไหลเท่ากับ 70 .....	63
รูปที่ 5.19	x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 3 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน และ 28 วัน .....	67
รูปที่ 5.20	x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 3.5 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน และ 28 วัน .....	68
รูปที่ 5.21	x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 4 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน และ 28 วัน .....	69
รูปที่ 5.22	x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 4.5 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน และ 28 วัน .....	70
รูปที่ 5.23	x-ray diffraction pattern ของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 5 : 1 ที่เวลาบ่ม 7 วัน และ 28 วัน .....	71
รูปที่ 5.24	การกระจายขนาดผลของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 3 : 1 .....	72
รูปที่ 5.25	การกระจายขนาดผลของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 3.5 : 1 .....	73

รูปที่ 5.26	การกระจายขนาดผลของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 4 : 1 .....	73
รูปที่ 5.27	การกระจายขนาดผลของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 4.5 : 1 .....	74
รูปที่ 5.28	การกระจายขนาดผลของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ อัตราส่วน 5 : 1 .....	74
รูปที่ 5.29	การกระจายของหน่วยแรงดันด้านข้างของดินที่กระทำกับรอยต่อ .....	78
รูปที่ 5.30	การกระจายของแรงต้านทานของวัสดุผสมซีเมนต์-เบนโทไนท์ .....	78
รูปที่ 5.31	ความสัมพันธ์ระหว่าง adhesion factor กับ undrained shear strength .....	79
รูปที่ 5.32	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์ กับความลึกของการซูดิน (F.S = 1.0) .....	82
รูปที่ 5.33	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์ กับความลึกของการซูดิน (F.S = 1.25) .....	83
รูปที่ 5.34	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์ กับความลึกของการซูดิน (F.S = 1.5) .....	84
รูปที่ 5.35	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการซูดินกับส่วนประกอบตลอดภัย (F.S) อัตราส่วนผสม 3:1 .....	85
รูปที่ 5.36	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการซูดินกับส่วนประกอบตลอดภัย (F.S) อัตราส่วนผสม 3.5:1 .....	86
รูปที่ ก.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 3 วัน .....	94
รูปที่ ก.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน .....	95

รูปที่	ก.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน.....	96
รูปที่	ก.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน.....	97
รูปที่	ก.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน.....	98
รูปที่	ก.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 3 วัน.....	99
รูปที่	ก.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน.....	100
รูปที่	ก.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน.....	101
รูปที่	ก.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน.....	102
รูปที่	ก.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 3.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน.....	103
รูปที่	ก.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 4 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน.....	104
รูปที่	ก.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 4 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน.....	105
รูปที่	ก.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 4 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน.....	106
รูปที่	ก.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 4 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน.....	107



รูปที่ ก.15	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 4.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน.....	108
รูปที่ ก.16	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 4.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน.....	109
รูปที่ ก.17	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 4.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน.....	110
รูปที่ ก.18	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 4.5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน.....	111
รูปที่ ก.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน.....	112
รูปที่ ก.20	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน.....	113
รูปที่ ก.21	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน.....	114
รูปที่ ก.22	ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain จากการทดสอบ unconfine ของอัตราส่วนผสม 5 : 1 เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน.....	115
รูปที่ ก.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain (โดยเฉลี่ย) เมื่อระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7 วัน .....	116
รูปที่ ก.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain (โดยเฉลี่ย) เมื่อระยะเวลาบ่มเท่ากับ 14 วัน .....	117
รูปที่ ก.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain (โดยเฉลี่ย) เมื่อระยะเวลาบ่มเท่ากับ 28 วัน .....	118
รูปที่ ก.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain (โดยเฉลี่ย) เมื่อระยะเวลาบ่มเท่ากับ 60 วัน .....	119

รูปที่ ๓.1	Geometrical conditions for x-ray diffraction according to Bragg's law .....	125
รูปที่ ๓.2	x-ray diffraction pattern .....	128



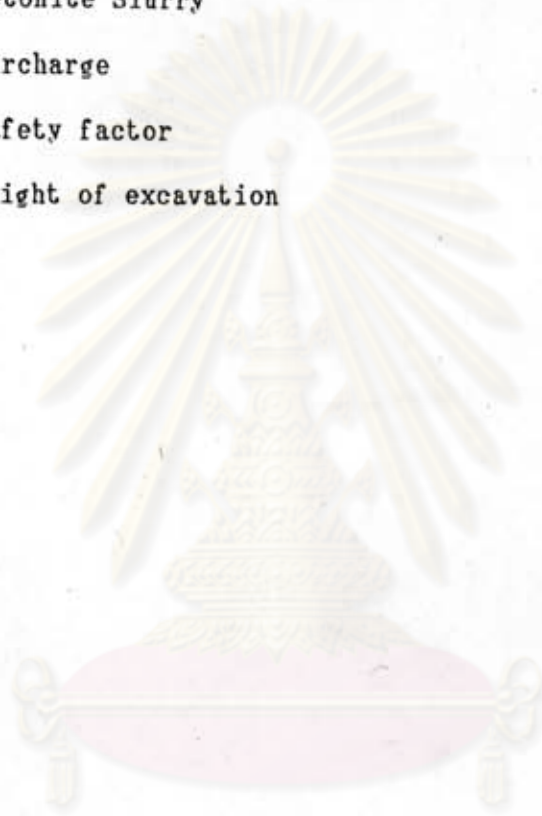
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สัญลักษณ์

$\Delta_h$	=	หน่วยแรงดันดินรวมด้านข้าง
$\Delta_{ho}$	=	หน่วยแรงดันดินด้านข้างในสภาพสถิตย์
$\bar{\Delta}_{ho}$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบในสภาพสถิตย์
$\bar{\Delta}_h$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ
$\Delta_v$	=	หน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง
$\bar{\Delta}_v$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง
u	=	แรงดันน้ำในโพรงดิน
$K_o$	=	สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันด้านข้างแบบสถิตย์
$\phi$	=	มุมต้านทานแรงเฉือนในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล
$\overset{\circ}{A}$	=	อังสตรอม
$\overset{\circ}{C}$	=	องศาเซลเซียส
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
d	=	ระยะห่างระหว่าง atomic plane
$\lambda$	=	ความยาวคลื่น
$\mu$	=	poisson's ratio
i	=	hydraulic gradient
$\alpha$	=	adhesion factor
k	=	coefficient of permeability
PL	=	Plastic Limit
LL	=	Liquid Limit
PI	=	Plasticity Index
$W_n$	=	water content
$\gamma$	=	unit weight
$G_s$	=	specific gravity
C	=	Cement

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

CB.	=	Cement-Bentonite
CSH	=	Calcium Silicate Hydrate
B.S	=	Bentonite Slurry
q	=	surcharge
F.S	=	safety factor
H	=	Height of excavation



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย