

ผลกระทบของการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำ
ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์



นาย ก้องเกียรติ วิเศษรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-820-8

ลิขสิทธิ์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**EFFECT OF HYDRAULIC FRACTURE ON ENGINEERING
PROPERTIES OF SAND-BENTONITE MIXTURE**



Mr. Kongkiat Visethrattana

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Graduate School Chulalongkorn University

Academic Year 1999

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์
 โดย นายก่อเกียรติ วิเศษรัตน์
 ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
 อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สุรพล จิวถักขันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
 (อ.ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

กองเกียรติ วิเชยรัตน์ : ผลกระทบของการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ (EFFECT OF HYDRAULIC FRACTURE ON ENGINEERING PROPERTIES OF SAND-BENTONITE MIXTURE) อ.ที่ปรึกษา : ดร. สุพจน์ เศรษฐินสกุล, 174 หน้า. ISBN 974-331-820-8

วัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ถูกผสมขึ้นภายใต้การตรวจสอบคุณภาพของวัสดุผสมทุกชั้นคอน เพื่อให้ได้ปริมาณเบนโทไนต์ ปริมาณความชื้น และความหนาแน่นแห้งตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยทรายที่ใช้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.07 ถึง 0.12 มม. ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64 วัสดุผสมที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 8, 10, 12, และ 14 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์ สามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะได้ประมาณ 2.64 และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดประมาณ 17.8 - 18.3 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ความชื้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 12.29 - 14.26 เปอร์เซ็นต์ วัสดุผสมถูกบดอัดลงในกระบอกเซดจ์โลหะที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบหารอยแตกร้าวโดยเฉพาะ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. แผ่นก่อรอยแตกร้าวถูกฝังไว้ที่กึ่งกลางของตัวอย่าง หลังจากที่ยัดตัวอย่างถูกบดอัดจนมีความหนาแน่นแห้งประมาณ 17.0 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรแล้ว ให้น้ำหนักกดทับตัวอย่าง 100, 250, และ 400 กิโลปาสคาล วัดอัตราการทรุดตัว ทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว และทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมของน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์ในการไหลซึมผ่านทรายเปล่าและวัสดุผสมอยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^{-7} และ 10^{-4} - 10^{-10} เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ในการทดสอบหาความสามารถในการก่อรอยแตกร้าวโดยใช้แรงดันน้ำสามารถสรุปได้ว่าความสามารถดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณเบนโทไนต์ที่ได้เป็นส่วนผสม น้ำหนักกดทับ และความหนาแน่นของตัวอย่าง โดยที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ก่อให้เกิดรอยแตกร้าวกับน้ำหนักกดทับมีค่าใกล้เคียง 1.0 และเพิ่มขึ้นเป็น 1.6 ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ และที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์แรงดันน้ำที่ก่อให้เกิดรอยแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 300 กิโลปาสคาล ทั้งนี้ น้ำหนักกดทับ 100 และ 250 กิโลปาสคาล ตัวอย่างที่เก็บหลังจากการทดสอบสิ้นสุดนำไปหาความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้ค่าอยู่ในช่วง 25 ถึง 60 กิโลปาสคาล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา2541.....

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

3970058621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: SAND-BENTONITE MIXTURE / HYDRAULIC FRACTURE / CLAY DETACHMENT

KONGKIAT VISETHRATTANA : EFFECT OF HYDRAULIC FRACTURE ON ENGINEERING PROPERTIES OF SAND-BENTONITE MIXTURE. THESIS ADVISOR : SUPOT TECHAVORRASINSKUL, D.Eng. 174 pp. ISBN 974-331-820-8

Hydraulic fracturing is frequently applied in the petroleum industry as a method of reservoir stimulation, and appearing to have useful environmental and geotechnical applications. The contaminants may be widespread to pollute larger area by the unintentionally formed hydraulic fracture. The injection of grout, in-situ permeability test, recharging of ground water, dam construction, etc., are the main causes forming the hydraulic fracture, only if the pressure using in the process is not properly controlled. In the present study, attempts have been paid in defining the effects of hydraulic fracture on the engineering properties of sand-bentonite mixture, which is often used as hydraulic barrier in the construction of earth dam, as the lining of waste disposal unit. In summary, hydraulic fracturing involves the injection of fluid(water) in to cylindrical blocks of compacted sand-bentonite mixture, under over burden pressure designed, at a rate that is sufficient to initiate a fracture. A fracture cell is a hollow steel section (inside diameter 30 cm) which upper movable side used for loading. The pressure of 50 kPa was used for vertical permeability tests. The coefficient of permeability, of sand and sand bentonite mixture, k_v is $10^{-4} - 10^{-7}$ and $10^{-4} - 10^{-10}$ m/s, respectively. Under over burden pressure is 100, 250 and 400 kPa, ratio of hydraulic pressure to overburden stress is 1.0 in 8, and 10 % bentonite, and more than 1.6 in 12 % bentonite. However, rate of hydraulic fracture to induce hydraulic fracture in 14 % bentonite, under overburden pressure 100 and 250 kPa is 300 kPa. The other engineering properties such as undrained shear strength, deformation characteristic, maximum dry density have been tested.



ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา.....2541

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.สุพจน์ เศรษฐินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด และทุนการวิจัยในครั้งนี้ได้รับมาจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยของมูลนิธิโทเร เพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นายก้องเกียรติ วิเศษรัตน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	iv
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	v
กิตติกรรมประกาศ.....	vi
สารบัญ.....	vii
สารบัญรูปภาพ.....	viii
สารบัญตาราง.....	ix
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2	
ทฤษฎีบทและทบทวนผลงานในอดีต.....	4
2.1 การเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำ.....	4
2.2 การกัดเซาะพัฒนาเม็ดดินขนาดเล็ก.....	5
2.3 วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์.....	5
2.4 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำ.....	6
2.5 ความสามารถในการรับแรงเฉือน.....	8
2.6 ความสามารถในการยุบอัดตัว.....	13
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดสอบ.....	16
3.1 การเตรียมวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์.....	16
3.2 เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบ.....	18
3.3 การบดอัดวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์.....	21
3.4 การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	23
3.5 การทดสอบหาแรงดันน้ำที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก.....	23
3.6 การเก็บตัวอย่าง.....	24
3.7 การทดสอบหาความสามารถในการรับแรงเฉือน.....	24
3.8 การทดสอบหาความสามารถในการยุบอัดตัว.....	25

3.9 การทดสอบหาคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของทรายและวัสดุผสม	25
3.9.1 การทดสอบหาขนาดกะของทราย.....	25
3.9.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ.....	26
3.9.3 การทดสอบหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม.....	26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์	27
4.1 ขนาดกะและค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายที่ใช้ในวัสดุผสม.....	27
4.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนด์.....	28
4.3 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความหนาแน่นแห้งที่เหมาะสม.....	30
4.4 ผลการทดสอบหาความเป็นเนื้อเดียว, ปริมาณความชื้น, และความหนาแน่น.....	32
4.5 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำ.....	36
4.6 การเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงคั้นน้ำ.....	40
4.7 ผลการทดสอบหาความสามารถในการรับแรงเฉือน.....	48
4.8 ผลการทดสอบหาความสามารถในการยุบอัดตัว	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการวิจัย	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง	63
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก รูปภาพแสดงผลการทดสอบ.....	64
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการทดสอบ.....	126
ภาคผนวก ค รูปเครื่องมือและขั้นตอนการทดสอบ.....	166
ประวัติผู้วิจัย.....	173

สารบัญรูปลูกภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1. โม้ผสมคอนกรีตที่ใช้ในการผสมตัวอย่าง.....	16
รูปที่ 3.2. ขั้นตอนที่ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษารอยร้าวที่เกิดขึ้นในวัสดุผสม.....	17
รูปที่ 3.3. เซลล์ที่ใช้ในการบดอัดตัวอย่างพร้อมอุปกรณ์ฝาปิดหัวท้าย.....	19
รูปที่ 3.4. แผ่นก่อรอยร้าวและท่อประคองทองเหลือง.....	19
รูปที่ 3.5 ระบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	20
รูปที่ 3.6 ระบบแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ.....	20
รูปที่ 4.1 แสดงขนาดคละของทราย	29
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะและปริมาณเบนโทไนต์.....	29
รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณเบนโทไนต์.....	31
รูปที่ 4.4 ค่าความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณเบนโทไนต์.....	31
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบหาปริมาณเบนโทไนต์ของทุกตัวอย่าง	34
รูปที่ 4.6 ปริมาณความชื้นที่วัดได้ทั้งหมดกับปริมาณเบนโทไนต์.....	34
รูปที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นแห้งที่วัดได้ทั้งหมดกับปริมาณเบนโทไนต์.....	35
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ในการไหลซึมผ่านกับเวลา.....	38
รูปที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ในการไหลซึมผ่านกับปริมาณเบนโทไนต์.....	38
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมของน้ำก่อนและ หลังการทดสอบการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำ.....	40
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250, และ 400 kPa.....	43
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณ เบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250, และ 400 kPa.....	43
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณ เบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250, และ 400 kPa.....	45
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณ เบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250, และ 400 kPa	45
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณเบน- โทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 250 kPa ความหนาแน่นแห้ง 17.0 และ 20.0 kN/m ³	46
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ก่อรอยแตกร้าว กับน้ำหนักรีดทับกับปริมาณเบนโทไนต์.....	47

รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบหาความสามารถในการไหลหลังจากเกิดรอยแตกร้าวในตัวอย่าง.....	47
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุผสมตัวอย่างที่ 1.....	49
รูปที่ 4.19 ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่ส่วนต่างๆของทุกตัวอย่าง.....	49
รูปที่ 4.20 ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่น้ำหนักกดทับ 100 kPa.....	51
รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบของตัวอย่างทั้งหมด และช่วงของน้ำหนักกดทับ 250 kPa.....	51
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักกดทับและความสูงของตัวอย่าง.....	53
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีตกับความลึก และปริมาณเบนโทไนต์.....	55
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ของความชันกับความลึก และปริมาณเบนโทไนต์.....	56



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	22
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาขนาดคละของทรายตัวอย่าง.....	27
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบหาความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	28
ตารางที่ 4.3 ผลของการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ.....	30
ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม.....	30
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบหาปริมาณเบนโทไนต์.....	32
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบหาปริมาณความชื้น.....	33
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบหาความหนาแน่นแห้ง.....	35
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการบันทึกระดับน้ำขณะทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	37
ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ในการไหลซึมกับปริมาณเบนโทไนต์.....	39
ตารางที่ 4.10 สรุปผลการทดสอบการก่อให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก.....	42
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบหาความสามารถในการรับแรงเฉือนของวัสดุผสมตัวอย่าง.....	48
ตารางที่ 4.13 แสดงน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาความสามารถในการยุบตัว.....	52
ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบหาค่าน้ำหนักกักตักสูงสุดในอดีตและค่าความชื้น.....	53