

พฤติกรรมของการแตกเชิงลศาสตร์ของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์

นายก่อเกียรติ วิเศษรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4105-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

121559090

**BEHAVIOUR OF HYDRAULIC FRACTURE  
OF SAND-BENTONITE MIXTURES**

Mr.Kongkiat Visethrattana

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 2003

ISBN 974-17-4105-7


Thesis Title            BEHAVIOUR OF HYDRAULIC FRACTURE OF SAND-  
                                 BENTONITE MIXTURES.  
By                            KONGKIAT VISETHRATTANA  
Field of Study            CIVIL ENGINEERING  
Thesis Advisor          ASSISTANCE PROFESSOR SUPOT TEACHAVORASINSKUN


---


Accepted by the Faculty of Civil Engineering, Chulalongkorn University in Partial  
Fulfillment of the Requirements for the Doctor's Degree


  
..... Dean of Faculty of Engineering  
(Professor Direk Lavansiri, Ph.D.)


THESIS COMMITTEE


  
..... Chairman  
(Assistant Professor Surachat Sambhandharaksa, Sc.D.)

  
..... Thesis Advisor  
(Assistant Professor Supot Teachavorasinskun, D.Eng.)

  
..... Member  
(Associate Professor Supakij Nontananandh, D.Eng.)

  
..... Member  
(Assistant Professor Thavee Thanacharoengit, Dr.Eng.)

  
..... Member  
(Assistant Professor Boonchai Ukritchon, Sc.D.)

  
..... Member  
(Tirawat Boonyatee, D.Eng.)

ก้องเกียรติ วิเศษรัตน์ : พฤติกรรมของการแตกเชิงชลศาสตร์ของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์  
(BEHAVIOUR OF HYDRAULIC FRACTURE OF SAND-BENTONITE MIXTURES)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 167 หน้า, ISBN 974-17-4105-7

การศึกษาผลกระทบของการเกิดรอยแตกร้าวโดยอาศัยแรงดันน้ำมีมากในชั้นหิน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันดิบ โดยการก่อรอยร้าวช่วยเพิ่มอัตราการไหลของน้ำมันเข้าสู่บ่อสูบ นอกจากนั้นยังมีการนำการก่อรอยร้าวโดยแรงดันน้ำมาประยุกต์ใช้ด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ในกำจัดการปนเปื้อนของชั้นดิน และใช้ในการปรับปรุงชั้นดินเพื่อลดการทรุดตัวและยกระดับของโครงสร้างเหนือพื้นดิน การศึกษาการเกิดรอยแตกร้าวในดินเริ่มมีการสนใจมากขึ้นหลังจากมีการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของชั้นดินแล้ว ก่อให้เกิดรอยแตกร้าว หลังจากนั้นมีการศึกษาการเกิดรอยแตกร้าว และลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดในดินเหนียวทั้งในห้องปฏิบัติการ และในงานก่อสร้างจริง

วัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์นิยมใช้ในการก่อสร้างหลุมฝังกลบกากของเสียมีพิษ โดยทำการบดอัดเป็นชั้นทับน้ำเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของชั้นดินที่อาจเกิดขึ้นจากน้ำชะกากของเสีย นอกจากนั้นยังมีการประยุกต์ใช้ในงานวัสดุทับน้ำอื่น ๆ แต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสม เช่น ในการบดอัดก่อสร้างแกนเขื่อน, ในการก่อสร้างกำแพงดินเหนียวเป็นต้น การศึกษาพฤติกรรมของการแตกเชิงชลศาสตร์ของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ใช้เบนโทไนต์ที่ผลิตภายในประเทศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมที่สามารถนำมาใช้งานได้จริง ทั้งสามารถป้องกันอันตรายที่จะเกิดจากการเกิดรอยแตกร้าวภายในวัสดุผสมซึ่งอาจเกิดจากการทดสอบความสามารถการไหลซึมผ่านหลังจากทำการบดอัด หรือการก่อสร้างที่ใช้แรงดันน้ำสูงใกล้เคียงบริเวณชั้นทับน้ำ

จากการทำการศึกษาพบว่า วัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่มีปริมาณเบนโทไนต์ มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์ในการไหลซึมผ่านน้อยกว่า  $1 \times 10^{-7}$  ซม./วินาที ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของชั้นทับน้ำ และมีค่าความหนาแน่นแห้งประมาณ 1.88 ตัน/ลบ.ม. ค่าความชื้นเหมาะสมในการบดอัดประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณเบนโทไนต์นี้ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 200 และ 300 กิโลพาสคาล วัสดุผสมสามารถทนต่อแรงดันน้ำด้านข้างสูงสุดประมาณ 100, 180 และ 250 กิโลพาสคาลตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนักศึกษา.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมปฐพี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2546.....

# # 4271801321 : MAJOR CIVIL ENGINEER

KEYWORD: HYDRAULIC FRACTURE / SAND-BENTONITE MIXTURE / DETACHMENT /  
BREAKTHROUGH PRESSURE

KONGKIAT VISETHRATTANA : BEHAVIOUR OF HYDRAULIC FRACTURE OF  
SAND-BENTONITE MIXTURES. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. DR. SUPOT  
TEACHAVORASINSKUN, D.Eng. 167 pp. ISBN 974-17-4105-7

Barriers with a low hydraulic conductivity are used as part of waste contaminant system to prevent ground water contamination. Sand-bentonite mixtures has been increasing interest in the use as the mineral impervious layer in both landfill liners and vertical cut-off walls, partly because they are less susceptible to frost damage and desiccation cracking than compacted clay. This paper aimed to explore the possibility of hydraulic fracture formation in the compacted sand-bentonite mixture. The study was done by assessing the water pressure resistance of the compacted samples with varied bentonite contents and overburden stresses in a test chamber. The water pressure was applied through the starter slot which forced water to spread along the horizontal plane. Test results indicated the existence of a breakthrough pressure above which sudden increase in flow rate was observed. The overburden stress, density, water content and bentonite content strongly affected the breakthrough level. In order to induce rapid flow, water pressure had to overcome the overburden stress and the vertical tensile resistance.

Compacted mixture of 10 % of bentonite contents by weight has value of coefficient of permeability less than  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, and maximum unit weight of 18.8 kN/m<sup>3</sup> and optimum moisture content of 13 %. This mixture under overburden stress of 100, 200 and 300 kPa has breakthrough pressure of 100, 180 and 250 kPa, respectively.

Department..... Civil Engineering..... Student's signature.....  
Field of Study..... Civil Engineering..... Advisor's signature.....  
Academic Year..... 2003.....

## ACKNOWLEDGEMENTS

I am indebted to my thesis adviser Dr Supot Teachavorasinskun of Chulalongkorn University who provided chance and several helpful comments. He deserve special acknowledgement for his dedication and hard work.

The author appreciates the efforts of the following lecturer who, by their criticisms and helpful comments, have encouraged me in the preparation and finalization of the dissertation.

Dr Surachat Sambandaraksa, Chulalongkorn University

Dr Boonchai Ukritchon, Chulalongkorn University

and other thesis committee

Dr Thavee Thanakit, Chulalongkorn University

Dr Tirawat Boonyatee, Chulalongkorn University

Dr Supakit Nontananun, Kasetsat University

My thanks to my family and especially my mom Kallaya Visethrattana and my sister Supakanya Visethrattana deserve my appreciation and thanks for her support and encouragement.

## TABLE OF CONTENTS

	<b>PAGE</b>
ABSTRACT (THAI).....	iv
ABSTRACT (ENGLISH).....	v
ACKNOWLEDGEMENT.....	vi
CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	ix
LIST OF FIGURES.....	x
<b>CHAPTER 1 INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCTION.....	1
1.2 OBJECTIVES.....	3
1.3 LIMITATIONS.....	3
1.4 ADVANTAGES.....	4
<b>CHAPTER 2 LITERATURE REVIEWS AND THEORIES.....</b>	<b>5</b>
2.1 LITERATURE REVIEWS.....	5
2.2 THEORIES.....	11
2.2.1 Grain Size Distribution.....	11
2.2.2 Compaction and Proctor Compaction Test.....	12
2.2.3 Unconfined Compression Strength.....	13
2.2.4 Hydraulic Conductivity.....	14
2.2.5 Hydraulic Fracture.....	18
2.2.6 Detachment.....	22
<b>CHAPTER 3 EXPERIMENTATION PROGRAMME, APPARATUS AND MATERIALS.....</b>	<b>31</b>
3.1 EXPERIMENTATION PROGRAMME.....	31
3.2 APPARATUS.....	32
3.3 MATERIALS.....	33
3.3.1 Sand.....	33

## TABLE OF CONTENTS (CONT.)

	<b>PAGE</b>
3.3.2 Bentonite .....	33
3.3.3 Sand – Bentonite Mixtures .....	34
<b>CHAPTER 4 TEST RESULTS AND DISCUSSION</b> .....	<b>36</b>
4.1 INTRODUCTION.....	36
4.2 BASIC ENGINEERING PROPERTIES TEST RESULTS .....	36
4.2.1 Standard Compaction Test.....	36
4.2.2 Unconfined Compressive Strength.....	37
4.2.3 Hydraulic Conductivity.....	37
4.2.4 Quality Control.....	38
4.3 HYDRAULIC FRACTURE TEST RESULTS.....	39
4.4 DETACHMENT RESULTS.....	41
4.5 HYDRAULIC FRACTURE FORMS.....	42
4.6 DISCUSSIONS.....	42
<b>CHAPTER 5 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS</b> .....	<b>50</b>
5.1 CONCLUSIONS.....	51
5.2 RECOMMENDATIONS.....	52
<b>REFERENCES</b> .....	<b>53</b>
<b>TABLES</b> .....	<b>59</b>
<b>FIGURES</b> .....	<b>72</b>
<b>APPENDICES</b> .....	<b>104</b>
APPENDIX 1 RAW DATA RECORDS AND CALCULATUONS .....	105
APPENDIX 2 FIGURES OF FRACTURE FORM .....	142
<b>VITA</b> .....	<b>167</b>



## LIST OF TABLES

	<b>PAGE</b>
TABLE 1.1 List of samples. ....	59
TABLE 2.1 Engineering classifications of potential buffer materials (from Dixon and Woodcock, 1984) .....	59
TABLE 2.2 Soil-Separate Size Limits.....	59
TABLE 2.3 U.S. Standard sieve sizes. ....	60
TABLE 2.4 Typical values of coefficient of permeability for various soils .....	60
TABLE 3.1 Physical properties of Sing River Sand.....	61
TABLE 3.2 Chemical Properties of MAC-GEL Bentonite.....	61
TABLE 3.3 Physical Properties of MAC-GEL Bentonite.....	61
TABLE 4.1 Summaries of standard compaction tests.....	63
TABLE 4.2 Summaries of Undrained Shear Strength.....	63
TABLE 4.3 Summaries Direct shear test.....	63
TABLE 4.4 Summaries of hydraulic conductivity test.....	64
TABLE 4.5 Wet sieve analysis test results .....	65
TABLE 4.6 Summaries of hydraulic fracture test – Slow Rate Test.....	66
TABLE 4.7 Summary of hydraulic fracture test – Quick Rate Test.....	67
TABLE 4.8 Fracture form of hydraulic fracture test – Slow Rate Test.....	68
TABLE 4.9 Fracture form of hydraulic fracture test – Quick Rate Test. ....	69
TABLE 4.10 Empirical Values m and b from Normalized Pressure by $C_{DSS}$ . ....	70
TABLE 4.11 Empirical Values m and b from Normalized Pressure by $S_u$ . ....	70
TABLE 5.1 Conclusions of Engineering Properties of Sand – Bentonite Mixture. ....	71
TABLE 5.2 Empirical Values m and b from Normalized Pressure by $C_{DSS}$ . ....	71
TABLE 5.3 Empirical Values m and b from Normalized Pressure by $S_u$ . ....	71

## LIST OF FIGURES

	<b>PAGE</b>
FIGURE 2.1 Two possible planes of hydraulic fracture .....	72
FIGURE 2.2 Example of low-pervious top cover of solid waste. (from Pusch and Alstermark, 1985) .....	72
FIGURE 2.3 Granulometry of the till used as ballast in the till/bentonite mixture. (from Pusch and Alstermark, 1985) .....	73
FIGURE 2.4 Hydraulic conductivity of the till/bentonite mixture. (from Pusch and Alstermark, 1985) .....	73
FIGURE 2.5 The components of the Canadian nuclear fuel waste disposal vault concept. (from Dixon, Gray, and Thomas, 1985) .....	74
FIGURE 2.6 (a) Compaction curves for the backfill (Modified Proctor test). (from Nilsson, 1985) .....	74
FIGURE 2.7 Schematic picture of the production of backfill material and the backfilling process. (from Holopainen, 1985) .....	75
FIGURE 2.8 Development of Darcy's law. ....	75
FIGURE 2.9 Stress around a borehole. $P_m$ , borehole pressure; $r$ , radius from center of borehole. ....	76
FIGURE 3.1 General testing procedures. ....	77
FIGURE 3.2 The main apparatus. ....	78
FIGURE 3.3 A schematic view of the starter slot. ....	78
FIGURE 3.4 The grain size distribution of the Singh River sand. ....	79
FIGURE 3.5 Electronic mixing apparatus. ....	79
FIGURE 4.1 The compaction characteristics of sand-bentonite mixtures. ....	80
FIGURE 4.2 Summarized of Unconfined compressive strength test results .....	80
FIGURE 4.3 Relations between Bentonite content and cohesion (a) and internal friction angle (b) from Direct Shear Test. ....	81
FIGURE 4.4 The plot between bentonite content and the coefficient of permeability, $k$ , of the mixtures. ....	82

## LIST OF FIGURES (CONT.)

	PAGE
FIGURE 4.5 The measured flow rates of water in the starter slot plotted against the applied pressures obtained from sample SHF01. ....	82
FIGURE 4.6 The measured flow rates of water in the starter slot plotted against the applied pressures obtained from samples QHF01. ....	83
FIGURE 4.7 The Flow Rate and Water Pressure from Hydraulic Fracture Slow Rate Test on Horizontal Fracture Plane under 100 kPa of Overburden Pressure. ....	83
FIGURE 4.8 The Flow Rate and Water Pressure from Hydraulic Fracture Slow Rate Test on Horizontal Fracture Plane under 200 kPa of Overburden Pressure. ....	84
FIGURE 4.9 The Flow Rate and Water Pressure from Hydraulic Fracture Slow Rate Test on Horizontal Fracture Plane under 300 kPa of Overburden Pressure. ....	84
FIGURE 4.13 The Flow Rate and Water Pressure from Hydraulic Fracture Quick Rate Test on Horizontal Fracture Plane under 100 kPa of Overburden Pressure. ....	85
FIGURE 4.14 The Flow Rate and Water Pressure from Hydraulic Fracture Quick Rate Test on Horizontal Fracture Plane under 200 kPa of Overburden Pressure. ....	85
FIGURE 4.15 The Flow Rate and Water Pressure from Hydraulic Fracture Quick Rate Test on Horizontal Fracture Plane under 300 kPa of Overburden Pressure. ....	86
FIGURE 4.22 The Relations of Breakthrough and Overburden Pressure with Bentonite Content of Hydraulic Fracture Slow Rate Test on Horizontal Fracture Plane. ....	86
FIGURE 4.23 The Relations of Breakthrough and Overburden Pressure with Bentonite Content of Vertical Fracture Slow Rate Test on Horizontal Fracture Plane. ....	87
FIGURE 4.24 The Relations of Breakthrough and Overburden Pressure with Bentonite Content of Hydraulic Fracture Quick Rate Test on Horizontal Fracture Plane. ....	87
FIGURE 4.25 The Relations of Breakthrough and Overburden Pressure with Bentonite Content of Vertical Fracture Quick Rate Test on Horizontal Fracture Plane. ....	88
FIGURE 4.26 Show the detachment path with can observed from the outside of perpex. ....	88
FIGURE 4.27 Show the detachment path with can observed from the outside of perpex. ....	89

## LIST OF FIGURES (CONT.)

	<b>PAGE</b>
FIGURE 4.28 Show the fracture with can observed from the outside of perpex. ....	89
FIGURE 4.29 Show the fracture path with can observed from the outside of perpex. ....	90
Figure 4.30 Gently dipping forms. The surface form is smooth flat in horizontal plane. Detachment path appears at the edge of sample. ....	91
Figure 4.31 Gently dipping forms and detachment. The surface form is rough flat in horizontal plane with the detachment path. ....	92
Figure 4.32 Steeply dipping and detachment forms. The surface form is rough and shows the detachment path. ....	93
Figure 4.33 2 directions upper and lower of steeply dipping and detachment forms. The surface form is rough and shows the detachment path. ....	94
Figure 4.34 Vertical gently dipping and detachment forms of sample. The surface form is rough flat in vertical plane and shows detachment path. ....	95
Figure 4.35 Full detachment forms of sample. There are all surface detachment paths. ....	96
Figure 4.36 Vertical detachment forms of sample. There is one detachment at the end of sample. ....	97
FIGURE 4.37 Normalized Pressures with Cohesion of Slow Rate Test on Horizontal Fracture Plane. ....	98
FIGURE 4.38 Normalized Pressures with Cohesion of Slow Rate Test on Vertical Fracture Plane. ....	98
FIGURE 4.39 Normalized Pressures with Cohesion of Quick Rate Test on Horizontal Fracture Plane. ....	99
FIGURE 4.40 Normalized Pressures with Cohesion of Quick Rate Test on Vertical Fracture Plane. ....	99
FIGURE 4.41 Normalized Pressures with Undrained Shear Strength of Slow Rate Test on Horizontal Fracture Plane. ....	100



## LIST OF FIGURES (CONT.)

	<b>PAGE</b>
FIGURE 4.42 Normalized Pressures with Undrained Shear Strength of Slow Rate Test on Vertical Fracture Plane. ....	100
FIGURE 4.43 Normalized Pressures with Undrained Shear Strength of Quick Rate Test on Horizontal Fracture Plane. ....	101
FIGURE 4.44 Normalized Pressures with Undrained Shear Strength of Quick Rate Test on Vertical Fracture Plane. ....	101
FIGURE 4.45 Raw Test Results Plotted with Results from Equation 4.16, 4.18, 4.20. ....	102
FIGURE 4.46 Raw Test Results Plotted with Results from Equation 4.22, 4.24, 4.26. ....	102
FIGURE 5.1 Normalized breakthrough and overburden pressure by undrained shear strength. ....	103