

การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน



นายพรมงคล ชิดชอบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974 - 638 - 024 - 9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2 8 5 2048

112919341

SCOUR AROUND BRIDGE PIERS

Mr. Pronmongkol Chidchob

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Water Resources Engineering
Department of Water Resources Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1997
ISBN 974 - 638 - 024 - 9

พรมงคล ชิดชอบ : การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน (SCOUR AROUND BRIDGE PIERS)
อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. เสรี จันทโรยธา , อ. ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร. นิวัติ ดารานันท์ , 161 หน้า
, ISBN 974-638-024-9

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อที่จะศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความลึก และปริมาตรหลุมกัดเซาะ อันประกอบด้วย คุณลักษณะของตอม่อสะพาน ตัวแปรการไหล และคุณลักษณะของวัสดุท้องน้ำ และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ กับความลึก และปริมาตรหลุมกัดเซาะ การศึกษานี้ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองชลศาสตร์ทางกายภาพ ซึ่งทำการทดลองโดยใช้รางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 0.60 ม. ยาว 18.0 ม. และสูง 0.75 ม. ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์ และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยให้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายจากลำน้ำธรรมชาติ นำมาคละกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานอันเนื่องมาจากวัสดุท้องน้ำที่มีลักษณะคละกัน กรณีการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้แบบจำลองตอม่อรูปทรงกระบอก 3 ขนาด ในการศึกษาที่สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และใช้แบบจำลองตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว 3 อัตราส่วน ในการศึกษาที่สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

จากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อหลุมกัดเซาะในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ได้แก่ รูปร่าง ขนาด มุมปะทะกับทิศทางการไหล ของตอม่อสะพาน ความลึกการไหล ความเร็วเฉลี่ยการไหล ขนาดของวัสดุท้องน้ำ และการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำ และในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อหลุมกัดเซาะ ได้แก่ รูปร่าง ขนาด มุมปะทะกับทิศทางการไหล ของตอม่อสะพาน และวัสดุท้องน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อวัสดุท้องน้ำมีลักษณะที่คละกันมาก และการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำมาก จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Amoring ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะลดลงไม่แน่นอน ทำให้ยากต่อการคาดคะเนความลึก และปริมาตรหลุมกัดเซาะ

ภาควิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ
สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C715266 ; MAJOR WATER RESOURCE ENGINEERING
KEY WORD: SCOUR / BRIDGE PIER SCOUR / BRIDGE PIER MODEL

PRONMONGKOL CHIDCHOB : SCOUR AROUND BRIDGE PIERS. THESIS ADVISOR :
SEREE CHANYOTHA , Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : PROF. NIWAT DARANANDANA ,
Ph.D. 161 pp. ISBN 974-638-024-9

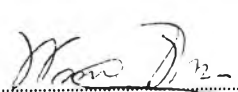
The purpose of this study is to investigate the significance of different variables/parameters which control the scour depth and volume of scour hole such as piers characteristics flow variables and bed materials characteristics, and to determine the relationship of such variables/parameters. This study is experimental work using a rectangular flume, 0.60 m. wide, 18.0 m. long and 0.75 m. deep and non-uniform sand from three uniform sand sizes of natural river as bed materials. The experiments were conducted at hydraulic and coastal model laboratory , Department of Water Resources Engineering , Chulalongkorn University. The study was performed under two different flow conditions including the clear water and live-bed scour. The effects of the angles of attack from an aligned pier were also investigated. Three cylindrical piers were tested in clear water and live-bed scour conditions, and three blunt-nosed piers with three length to width ratio were tested in clear water scour condition.

The results from this study shows that the factors influencing scour hole for the case of clear water scour are pier diameter , pier shape , angle of attack , flow depth , average flow velocity , mean particle size and particle size distribution of bed materials. In the case of live-bed scour the factors influencing scour hole are pier characteristics and bed materials. Furthermore , it has been found that graded bed materials cause armoring process resulting in the uncertainty in predicting the scour depth and volume of scour hole.

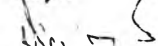
ภาควิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....

ปีการศึกษา.....2540.....

ลายมือชื่อผู้นิสิต..........

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..........

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..........

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รัทวิชัย ประธานกรรมการ อาจารย์ ชัยยุทธ สุขศรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์ กรรมการ ซึ่งได้เสียสละเวลาให้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศาสตราจารย์ ดร.นิวัตต์ ดารานันท์ ซึ่งเป็นกรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.เสรี จันทรโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยให้คำปรึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นต่าง ๆ ทั้งในด้านหลักวิชาการ และหลักการปฏิบัติจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ บรรดาคณาจารย์ในสาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำให้แก่ผู้เขียน

ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ คุณวิเชียร อนุตรโสทธิ หัวหน้างานออกแบบระบบชลประทาน 2 ที่สนับสนุนการทำวิจัย คุณปริญญา กมลสินธ์ รวมทั้งเจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสอบเทียบเครื่องมีวัดความเร็วกระแส น้ำ คุณสุเวทย์ ชลนันทน์ วิศวกรโยธา 8 สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลการวิบัติของสะพานของกรมทางหลวง และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในขณะที่ทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งใคร่ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำที่สนับสนุนสถานที่และทุนในการทำวิจัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุดหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีคุณความดีอยู่เพียงใด ผู้เขียนใคร่ขอมอบให้แก่บิดา มารดา ผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จทั้งหมดในชีวิตของผู้เขียน และบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ผู้เขียน ส่วนข้อบกพร่องทั้งหลายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

พรมงคล ชิดชอบ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	3
1.3 ขอบข่ายการศึกษา.....	3
1.4 การดำเนินงานการศึกษา.....	4
บทที่ 2 หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา	6
2.1 หลักการที่ใช้ในการศึกษา.....	6
2.2 การศึกษาที่ผ่านมา	9
บทที่ 3 แบบจำลองซลศาสตร์	38
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2 แบบจำลองต่อม่อสะพาน	39
3.3 วัสดุห้องน้ำ (bed material).....	39
3.4 การดำเนินการศึกษา.....	40
3.5 ผลการทดลอง	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	49
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางเรขาคณิตของตอม่อกับหลุมกัดเซาะ	50
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการไหลกับหลุมกัดเซาะ	50
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของวัสดุท้องน้ำที่ถูกกัดเซาะ กับหลุมกัดเซาะ	70
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหลุมกัดเซาะ กับความลึกหลุมกัดเซาะ	74
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 การดำเนินการศึกษาและทดลอง.....	79
5.2 ผลการศึกษา	80
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข	105
ภาคผนวก ค	126
ภาคผนวก ง	155
ประวัติผู้ศึกษา	161

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2-1	ความเร็ววิกฤตที่ทำให้วัสดุชนิดต่าง ๆ เคลื่อนที่..... 13
ตาราง 2-2	ค่าแรงเฉือนวิกฤต τ_c ที่ทำให้วัสดุต่าง ๆ เคลื่อนที่ 14
ตาราง 2-3	ค่าสัมประสิทธิ์ K สำหรับต่อม่อรูปทรงต่าง ๆ ที่ตั้งขนานกับทิศทางการไหล ของกระแสน้ำ (Neil, 1973)..... 27
ตาราง 2-4	ค่าสัมประสิทธิ์ K_1 สำหรับต่อม่อรูปทรงต่าง ๆ ที่ตั้งทำมุมกับทิศทาง การไหล 28
ตาราง 2-5	ค่าสัมประสิทธิ์ K_2 ที่สัมพันธ์กับค่าความเร็ว ขนาดต่อม่อ ความลึกน้ำ..... 28
ตาราง 2-6	ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ K_1 รูปร่างต่อม่อ 36
ตาราง 2-7	ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ K_2 มุมปะทะต่อม่อกับทิศทางการไหลของน้ำ..... 36
ตาราง 3-1	ตัวอย่างตารางบันทึกผลการวัดความเร็วหน้าตัด..... 44
ตาราง 3-2	ตัวอย่างตารางบันทึกความลึกหลุมกัดเซาะ 44
ตาราง 3-3	ตัวอย่างตารางบันทึกความลาดเอียงท้องน้ำ หรือความลาดเอียงผิวน้ำ..... 45
ตาราง 3-4	ตัวอย่างการคำนวณอัตราการพัดพาตะกอน..... 47
ตาราง 4-1	การวิเคราะห์การถดถอย พหุคูณเชิงเส้นโค้ง ใช้ประมาณหาความสัมพันธ์ ระหว่างลึกสมดุหลุมกัดเซาะ กับตัวแปรการไหล (Multiple Non-Linear Regression Results of Relative Scour Depth)..... 65
ตาราง 4-1	การวิเคราะห์การถดถอย พหุคูณเชิงเส้นโค้ง ใช้ประมาณหาความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่าง ๆ (Multiple Non-Linear Regression Results of Relative Volume Scour Depth)..... 78

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 กราฟแสดงการขยายของหลุมกัดเซาะ (H.Palmer (1970) จากอ้างอิง สมรักษ์, 1987).....	8
รูป 2.2 มิติและปริมาตรของหลุมกัดเซาะ (H.Palmer, (1970) จากอ้างอิง สมรักษ์, 1987).....	8
รูป 2.3 การกัดเซาะรอบตอม่อชนิดต่าง ๆ (จากอ้างอิง Simons,1977)	11
รูป 2.4 ค่า τ_c ในสมการของเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุท้องน้ำ (Leleavsky, (1955) จากอ้างอิง สมรักษ์, 1987).....	15
รูป 2.5 กราฟของ Shield แสดงค่า τ_c ในอัตราส่วนขนาดวัสดุต่อความหนาของ Laminar Layer (Leleavsky, (1955) จากอ้างอิงสมรักษ์,1987).....	15
รูป 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Q ต่อความกว้างผิวหน้า (Lacey, (1931) จากอ้างอิง Simons, 1971)	21
รูป 2.7 ความสัมพันธ์ความลึกการกัดเซาะกับความเร็วกระแสน้ำ (Chabert &Engeldinger (1956) จากอ้างอิง Raudkivi,1976)	21
รูป 2.8 ความลึกกัดเซาะแปรเปลี่ยนตามเวลา (Chabert & Engeldinger, (1956) จากอ้างอิง Raudkivi, 1976).....	21
รูป 2.9 ความลึกกัดเซาะสมมูล ณ ตอม่อสะพาน (Laurson,E.M. 1960).....	23
รูป 2.10 การกัดเซาะจุดที่ตั้งตอม่อริมฝั่งและตอม่อใกล้เคียง (Liu และคณะ 1961).....	23
รูป 2.11 กราฟการคำนวณการกัดเซาะตอม่อริมฝั่ง (Liu และคณะ 1961)	25
รูป 2.12 การลดค่ากัดเซาะสำหรับค่ามุมต่าง ๆ (Liu และคณะ 1961).....	25
รูป 2.13 ค่าคงที่สำหรับออกแบบของตอม่อที่ไม่ได้วางอยู่ในแนวทิศทางการไหลของ กระแสน้ำ (Laurson & Toch (1956) จากอ้างอิง Raudkivi, 1976)	29
รูป 2.14 ความลึกกัดเซาะสมมูลในค่าของความกว้างของตอม่อโดยสมมุติให้วางในแนว ทิศทางการกระแสน้ำ (Shen (1971) จากอ้างอิงสมรักษ์, 1987).....	29
รูป 2.15 ความลึกกัดเซาะต่อเวลา (Carstens (1966) จากอ้างอิง Simons 1977)	37
รูป 2.16 รูปร่างตอม่อแบบต่าง ๆ (Richardson และคณะ จากอ้างอิง FHWA,1987)	37

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 3.1	ร่างน้ำที่ใช้ในการทดลอง..... 42
รูป 3.2	แผนผังแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ และระบบการหมุนเวียนของน้ำ..... 43
รูป 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับรูปทรงเรขาคณิต ของตอม่อ..... 51
รูป 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับมุมปะทะของตอม่อ..... 51
รูป 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกการไหลของ ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ที่มุมปะทะต่าง ๆ..... 52
รูป 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกการไหลของ ตอม่อรูปทรงกระบอก 53
รูป 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกการไหลของ ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา..... 53
รูป 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกการไหลของ ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา..... 54
รูป 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกการไหลของ ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา..... 54
รูป 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกน้ำของตอม่อ รูปทรงกระบอก 55
รูป 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกน้ำของตอม่อ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา..... 55
รูป 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกน้ำของตอม่อ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา..... 56
รูป 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเขาะสมดุลกับความลึกน้ำของตอม่อ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา..... 56

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับความลึกน้ำของตอม่อรูปทรงกระบอกในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนของตะกอนที่องน้ำ	58
รูป 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกกัดเซาะสมดุลงับตอม่อรูปทรงกระบอก	58
รูป 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกกัดเซาะสมดุลงับตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา	59
รูป 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกกัดเซาะสมดุลงับตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา	59
รูป 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกกัดเซาะสมดุลงับตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา	61
รูป 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกกัดเซาะสมดุลงับตอม่อรูปทรงกระบอกในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนที่องน้ำ	61
รูป 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปทรงกระบอก สภาวะเงื่อนไข Clear water scour	62
รูป 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา	62
รูป 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา	63
รูป 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา	63
รูป 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปทรงกระบอก สภาวะเงื่อนไข Live-bed scour	64
รูป 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปทรงกระบอก	66

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล กับ Particle Shear (τ_0') ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา.....	66
รูป 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล กับ Particle Shear (τ_0') ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา.....	67
รูป 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล กับ Particle Shear (τ_0') ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา.....	67
รูป 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง F_r กับความลึกหลุมกัดเซาะ.....	69
รูป 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อรูปทรงกระบอก ในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะ Clear water.....	71
รูป 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากัดความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อรูปทรงกระบอก ในสภาวะเงื่อนไข Live-bed.....	72
รูป 4.30 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล จากการทดลองกับสูตรการทำนาย ความลึกหลุมกัดเซาะอื่น ๆ (Jones (1983) จากอ้างอิง FHWA, 1988).....	73
รูป 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับปริมาตรหลุมกัดเซาะตอม่อ รูปทรงกระบอก.....	75
รูป 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับปริมาตรหลุมกัดเซาะตอม่อ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา.....	75
รูป 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับปริมาตรหลุมกัดเซาะตอม่อ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา.....	77
รูป 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับปริมาตรหลุมกัดเซาะตอม่อ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา.....	77