

รายการอ้างอิง



ภาษาไทย

- ชัยพันธุ์ รักวิจัย . ชลศาสตร์ของทางน้ำเปิด . กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2526.
- ชูเกียรติ ทวีชีพไพศาล และไตรรัตน์ ศรีวัฒนา . การไหลในทางน้ำเปิด . กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2532.
- นัฐวุฒิ สนั่นพานิช . การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยใช้ทรายละเอียดเป็นวัสดุท้องน้ำ . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2535.
- มณฑิเยร กังคศิเทียม . กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม . พิมพ์ครั้งที่ 3 . กรุงเทพมหานคร : สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์ , 2533 .
- สมรักษ์ ต๋อวงศ์ไพชยนต์ . การกัดเซาะของน้ำต่อโครงสร้างสะพานและท่อ . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2527.
- สวัสดี ลูชัยชนะ . การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนในรางน้ำเปิดโดยใช้ทรายที่มีขนาดและการเรียงเม็ดที่กำหนดให้เป็นวัสดุท้องน้ำ . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2530.
- สันติ ทองพำนัก . การไหลในทางน้ำเปิด . นครปฐม : ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2528 .
- สุจจริต คุณธนกุลวงศ์ . แนวทางการประยุกต์ใช้โมเดลชลศาสตร์ ในการวางแผนและการจัดการแหล่งน้ำ . เอกสารประกอบการบรรยาย วิชา Seminar , วิทยาลัยการชลประทาน , 2539.

ภาษาอังกฤษ

- American Association of State Highway Officials.,1969, Standard Specifications for Highway Bridges , Tenth Edition
- Benedict Barry A., and Christensen, Bent A., 1972 , "Hydrodynamic Lift on A Stream Bed", Sedimentation (Einstein), Chapter 5, Edited and Published by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado U.S.A.

- Blaisdell, Fred W., and Anderson, Clayton L., 1981, " Scour Around Bridge Piers at High Flow Velocities", Journal of Hydraulics Division. ASCE, Vol.107, No. HY3, March.
- Breusers, H.N.C., 1965, "Scour Around Drilling Platforms" Bulletin, Hydraulic Research 1964 and 1965, International Association for Hydraulic Research. Vol.19, P.276
- Carstens, Marion R., 1966, "Similarity Laws for Localized Scour", Journal of Hydraulics Division. ASCE, Vol.92, No.HY3, May.
- Chang, Sin Zee, 1987, The Area of Scour Hole Around Bridge Piers . Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Chen, A-Han, 1980, Local Scour Around Circular Piers . Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Chih Ted Yang, 1996, "Theory and Practice", Sediment Transport. McGraw-Hill Company, Singapore.
- Chow, V.T., 1959, Open - Channel Hydraulics . McGraw-Hill Company, Chapter 17
- Einstein, H.A., 1950, The Bed - Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows . U.S.Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Bulletin No.1026
- Federal Highway Administration ., 1988, " Scour at Bridges " , Technical Advisory. United States of America : Office of Engineering Bridge Division
- Garde R.J. and Ranga Raju K.G., 1977, Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems. University of Roorkee, India, Wiley Eastern Limited.
- Graf, W.H., 1971, Hydraulics of Sediment Transport . Lehigh University, McGraw-Hill Book Company.
- Henderson F. M., 1966, Open Channel Flow . United States of America : Collier Macmillan Canada , Ltd. 1
- Inglis, C.C., Tomas, A.R., and Togleker, D.V., 1942 , The Protection of Bridge Piers Against Scour . India Central Irrigation and Hydrodynamic Research Station, Poona, Research Pub. No.5
- Jain, Subhrash C.C., 1981, "Maximum Clear - Water Scour Around Circular Piers", Journal of Hydraulics Division. ASCE, Vol.107, No.Hy5, May.

- Keutner, C., 1932, The Flow Around Bridge Piers of Different Shapes and Its Effects on The River Bed . Die Baut Ecknik, Vol.10, No.12, March 15 (Translated from The German by E.F. Wilsey, April 22, 1937, U.S.Bureau of Reclamation Report HYD-19, Translation No. 40)
- Kikkawa, H., Fukuoka, S., and Sogawa, H., 1973, "Study on Localized Scour Around a Bridge Pier and It Prevention", Sediment Transportation Proceeding Vol.I. Chapter 10, International Symposium on River Mechanics.
- Laursen, Emmett M., 1960 , "Scour at Bridge Crossings", Journal of Hydraulics Division. ASCE, Vol.86, No.Hy2, February.
- Laursen, Emmett M., 1963, "An Analysis of Relief Bridge Scour", Journal of Hydraulics Division. ASCE,Vol. 89, No.HY3, May.
- Liu, H.K., Chang, F.M., and Skinner, M.M., 1961 , Effect of Bridge Construction on Scour and Backwater . Colorado State University, Fort Collins, Colorado U.S.A.
- Maza Alvarez, J.A., and Achavarria Alfaro, F.J., 1973, "Contribution to The Study of General Scour", Sediment Transportation Proceeding Vol.I. Chapter 68, International Symposium on river mechanics.
- Neil, C.R., 1964 , River - Bed Scour . Tech. Pub. No.623, Canadian Good Roads Association, Ottawa, Canada.
- Neil, C.R., 1973 , Guide to Bridge Hydraulics . Road and Transportation Association of Canada,University of Toronto Press.
- Posey, C.J., 1949, "Why Bridges Fail in Floods" , Civil Engineering. Vol.19, Feb., pp. 42-90.
- Raudkivi, AJ., 1976, Loose Boundary Hydraulics. 2 nd Edition, University of Auckland, New Zealand, A.Wheaton & Co. Exeter, Great Britain.
- Selim Yalin M., and Finlayson, Graham D., 1972, "On The Velocity Distribution of The Flow Carrying Sediment in Suspension" Sedimentation (Einstein), Chapter 8, Edited and Published by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado U.S.A.
- Shen, H.W.,1971, "Scour Near Piers", River Mechanics. Chapters 23, Edited and Published by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado U.S.A., Vol.II

- Shen, H.W., Schneider, V.R., and Karaki, S., 1966 , Mechanics of Local Scour .
Colorado State University, CER 66 HWS-VRS-SK 22.
- Simons, D.B., 1971, "River and Canal Morphology" River Mechanics . Chapter 20,
Edited and Published by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado U.S.A., Vol.II
- Simons, D.B., Fuat Senturk, 1977, Sediment Transport Technology . Fort Collins,
Colorado, U.S.A.
- Steven A. Hughes , 1993, Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal
Engineering . World Scientific, Singapore.
- Victor, D.J., 1973, Essentials of Bridge Engineering . Oxford & IBIT Publishing, INDIA.
- Yen, B.C., 1972, "Spiral Motion in Curved Channels", Sedimentation (Einstein) Chapter
22, Edited and Published by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- Zhdankus N.T., 1973, "Scouring Capacity of Flow in Narrow Open Channels" Sediment
transportation Proceeding Vol. I. Chapter A-71, International Symposium on River
Mechanics.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แบบจำลองชลศาสตร์การกักเซาะรอบตอม่อสะพาน

ก.1 การจัดเตรียมแบบจำลองชลศาสตร์

การทดลองการกักเซาะรอบตอม่อสะพาน ซึ่งทำการศึกษาและทดสอบในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) ในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีถังเก็บน้ำขนาดความจุ 30 ลบ.ม. ตั้งอยู่บนดาดฟ้า อาคาร 5 ชั้น และมีระบบสูบน้ำหมุนเวียน โดยรักษาระดับน้ำความดันน้ำคงที่แบบจำลองติดตั้งอยู่ชั้น 1 ของอาคาร ซึ่งสรุปได้ดังนี้

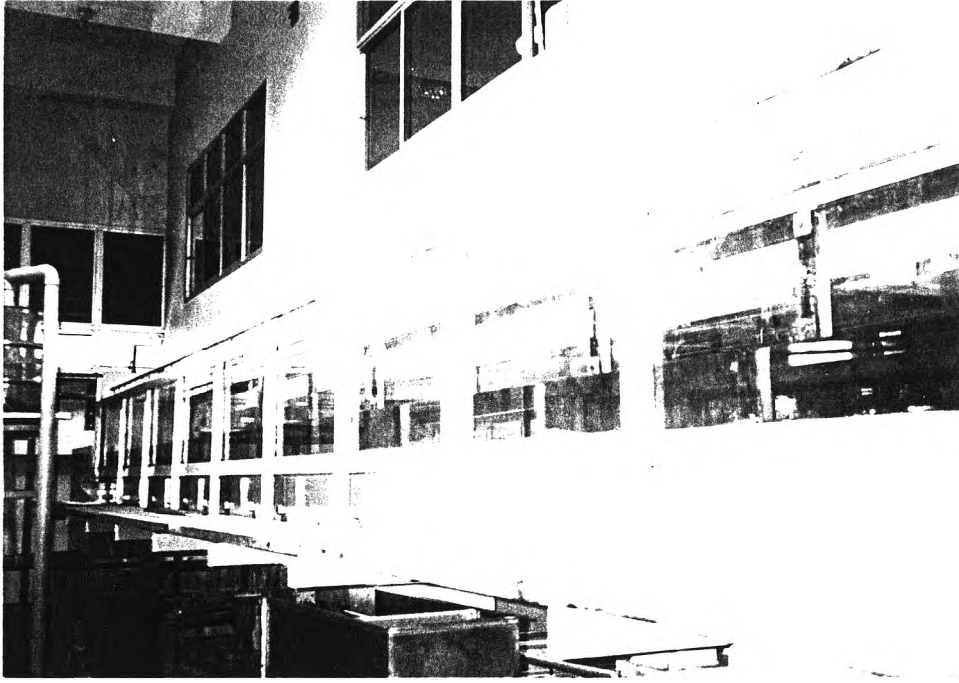
1) รางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) รางน้ำมีขนาดกว้าง 0.60 ม. ยาว 18.0 ม. สูง 0.75 ม. ผนังด้านข้าง (side wall) ทำด้วยกระจกใสหนา 1.20 ซม. ทั้ง 2 ข้าง พื้นรางทำจากแผ่นเหล็กหนา 6 มม. และความลาดเอียงท้องรางน้ำสามารถปรับได้โดยใช้แม่แรง (jack) การปรับแม่แรงจะควบคุมโดยมอเตอร์ไฟฟ้า ดังรูป ก.1 - ก.4

2) ประตูระบายน้ำที่ปลายรางน้ำ (tail gate) มีขนาดกว้าง 0.66 ม. สูง 0.76 ม. บานประตูเหล็กหนา 5 มม. ติดตั้งที่ปลายสุดของรางน้ำ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมความลึกการไหลของน้ำในรางน้ำ การปรับประตูระบายน้ำจะใช้แม่แรงในการยก โดยการปรับแม่แรงจะใช้กำลังคน ดังรูป ก.5

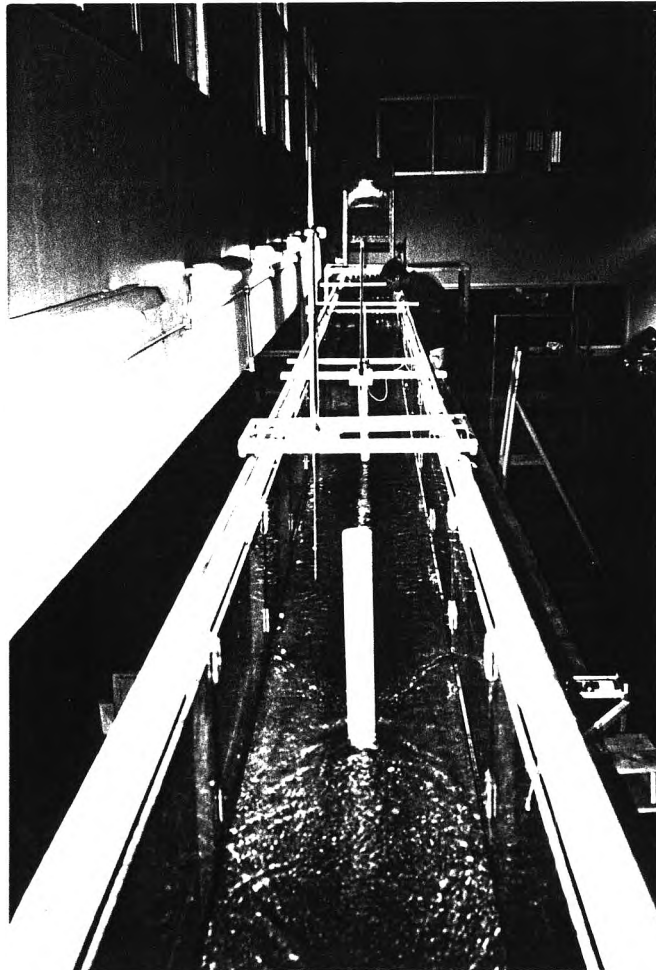
3) ตะแกรง (screens) และตะแกรงลดคลื่น (wave suppressors) ทำจากไม้ติดตั้งบริเวณบ่อด้านเหนือน้ำ (head box) เพื่อลดขนาดของคลื่นและความปั่นป่วนหมุนวนของกระแสน้ำดังรูป ก. 6

4) ถาดติดล้อเลื่อน ทำจากไม้และอะลูมิเนียม ซึ่งวิ่งไปตามรางขนานบนผนังของรางน้ำ (carriage) ใช้สำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดที่ใช้เก็บข้อมูลการทดลองต่างๆ เช่น เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ (current meter) เครื่องมือวัดความลึกของน้ำ (point gauge) เป็นต้น ดังรูป ก. 7

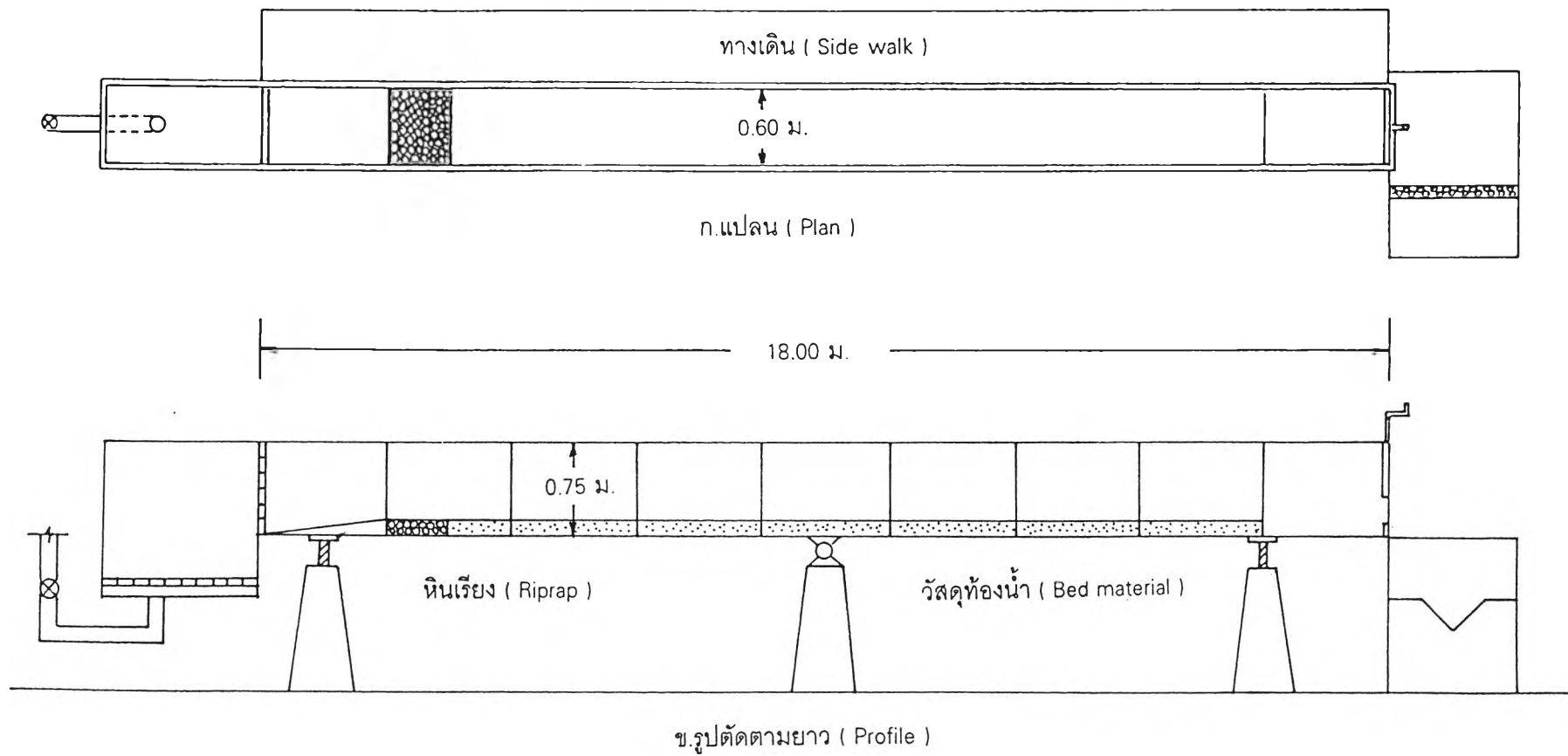
5) ระบบการหมุนเวียนของน้ำ ประกอบด้วย ถังเก็บน้ำ (constant head tank) ความจุ 30 ลบ.ม. เครื่องสูบน้ำขนาด 25 แรงม้า จำนวน 4 เครื่อง แต่ละเครื่องสามารถสูบน้ำได้สูงสุด 28 ลิตรต่อวินาที การหมุนเวียนของน้ำจะเริ่มจากปล่อยน้ำจากถังเก็บน้ำผ่านท่อเหล็กกล้า ผ่านวาล์วปิด-เปิด จนกระทั่งถึงบ่อด้านเหนือน้ำ (head box) น้ำจะไหลผ่านรางน้ำเปิดไปสู่ปลาย



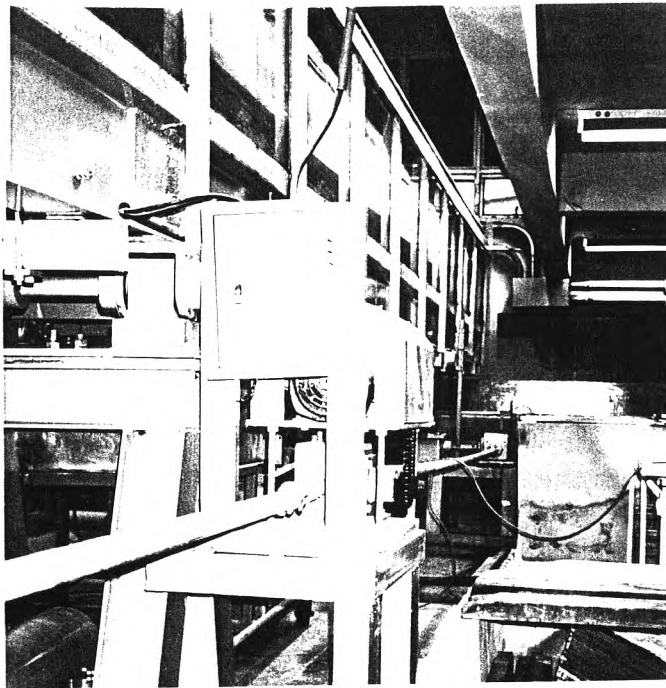
รูป ก.1 รางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume)



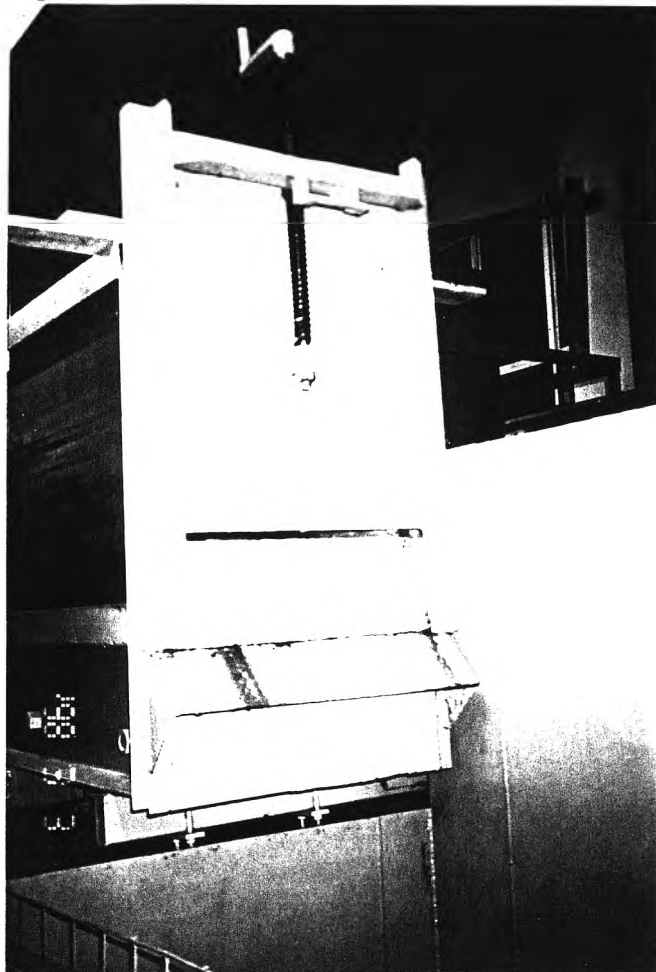
รูป ก.2 รางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume)



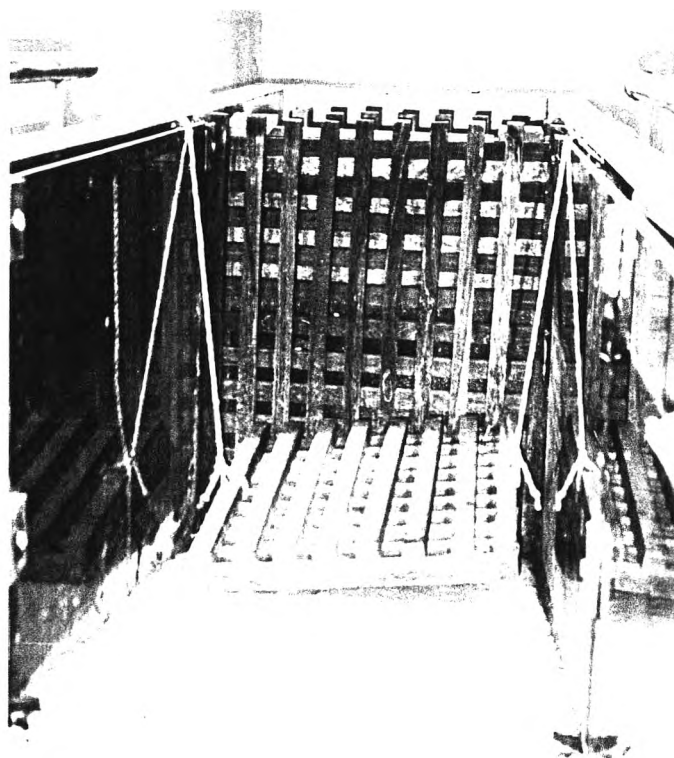
รูป ก.3 รางน้ำที่ใช้ในการทดลอง



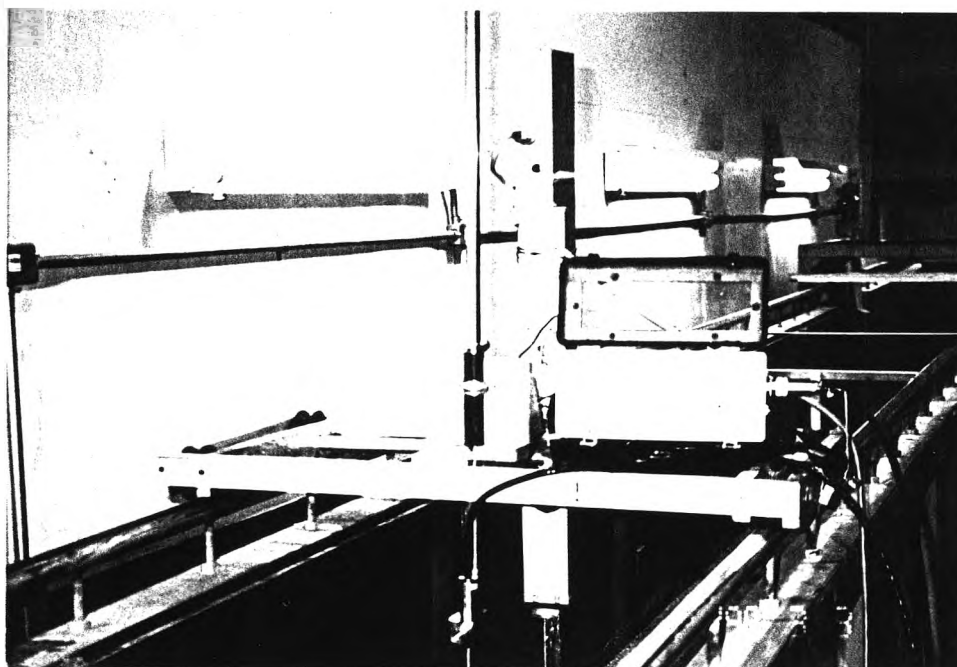
รูป ก.4 มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับปรับแม่แรง (jack)



รูป ก.5 ประตูระบายน้ำที่ปลายรางน้ำ (tail gate)



รูป ก.6 ตะแกรง (screens) และตะแกรงลดคลื่น (wave suppressors)



รูป ก.7 ถาดติดล้อเลื่อน

ทางด้านท้ายน้ำ แล้วไหลลงสู่อุปกรณ์ด้านท้ายน้ำ (sump) และถูกสูบกลับไปสู่ถังเก็บน้ำโดยเครื่องสูบน้ำอีกครั้งหนึ่ง ดังรูป ก. 8

ก.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัดข้อมูลต่างๆ ในการทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ประกอบด้วย

1) ฝ่ายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° v - notch weir) ขนาดกว้าง 1.53 ม. ยาว 2.60 ม. ด้านหน้าสูง 1.1 ม. ด้านหลังสูง 1.8 ม. ทำจากแผ่นเหล็กหนา 6 มม. สามารถวัดน้ำได้สูงสุด 48 ลิตรต่อวินาที ติดตั้งทางด้านท้ายน้ำของรางน้ำเปิด ใช้สำหรับวัดอัตราการไหล ภายในตัวฝ่ายติดตั้งตะแกรงลวดคั้น เพื่อลดขนาดของคลื่นและความปั่นป่วนหมุนวนของกระแสน้ำ ทำให้สามารถอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝ่ายได้ถูกต้อง ดังรูป ก. 9 - ก. 10

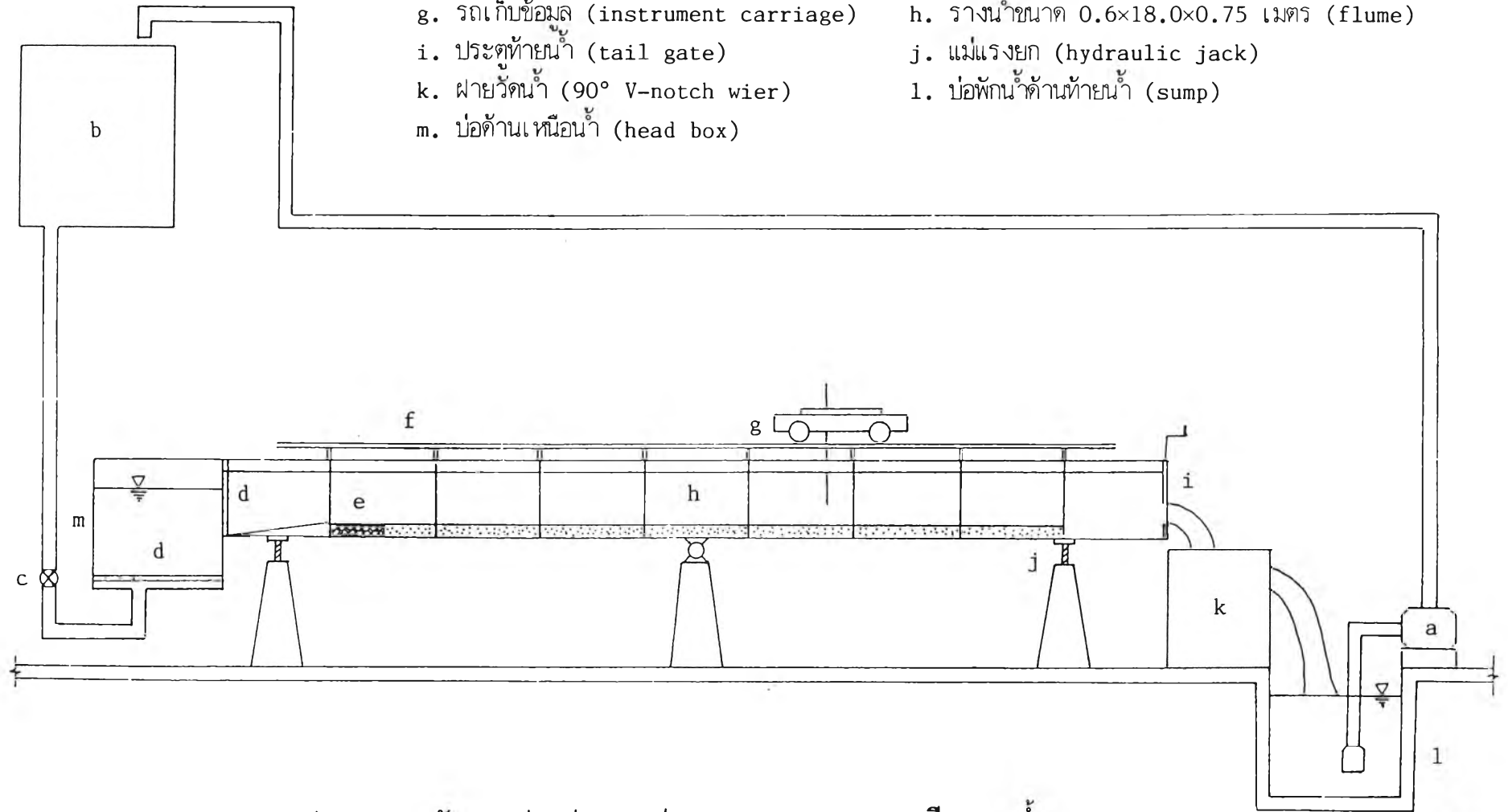
2) เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ (electromagnetic current meter) รุ่น ACM100 - D วัดความเร็วกระแสน้ำได้ในช่วง 0 ถึง ± 200 เซนติเมตรต่อวินาที แสดงผลความเร็วกระแสน้ำทาง LCD ดังรูป ก. 11

3) เครื่องมือวัดความเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำ (sandy surface measuring) สามารถใช้วัดระดับความลึกจากระดับอ้างอิงถึงระดับผิวน้ำ ระดับอ้างอิงถึงระดับท้องน้ำ หรือระดับผิวน้ำถึงระดับท้องน้ำ และสามารถติดตั้งเครื่องมือวัดได้ถึง 6 ช่องสัญญาณ และแสดงผลทางจอ LCD ของแต่ละช่องสัญญาณ หรือพิมพ์ออกมาด้วยเครื่องพิมพ์ที่ติดตั้งไว้ในเครื่อง และสามารถส่งข้อมูลไปสู่คอมพิวเตอร์รวมถึงควบคุมการทำงานโดยใช้คอมพิวเตอร์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถตั้งให้เครื่องมือทำงานอัตโนมัติได้อีกด้วย เครื่องมือวัดความเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำสามารถวัดความลึกได้สูงสุด 0.4 ม. ค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.5 มม. ดังรูป ก. 12

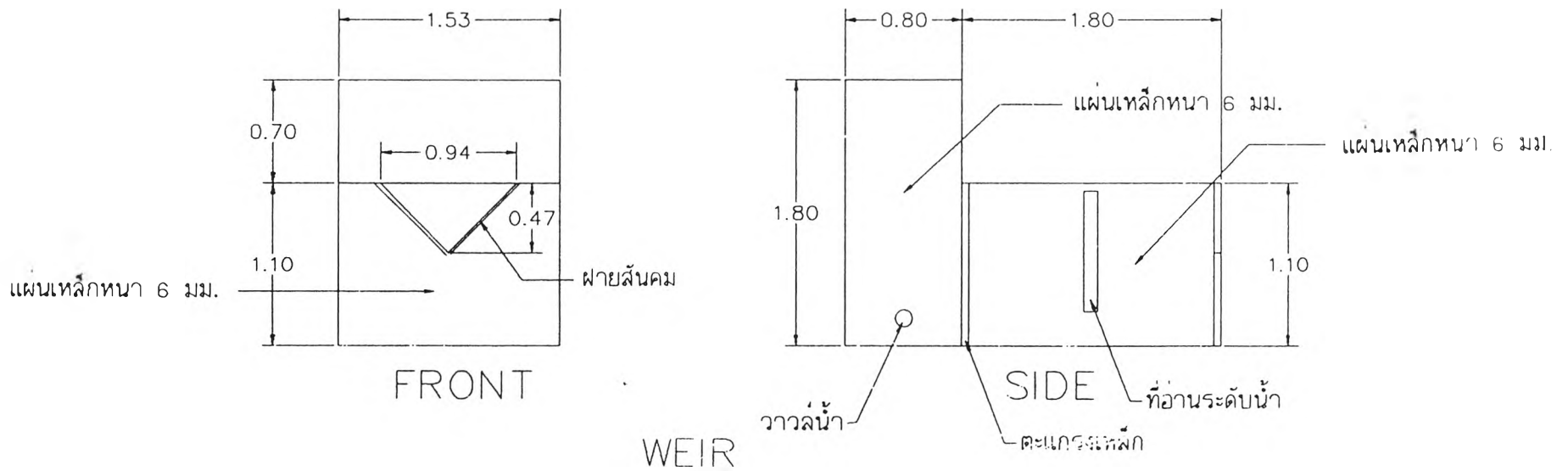
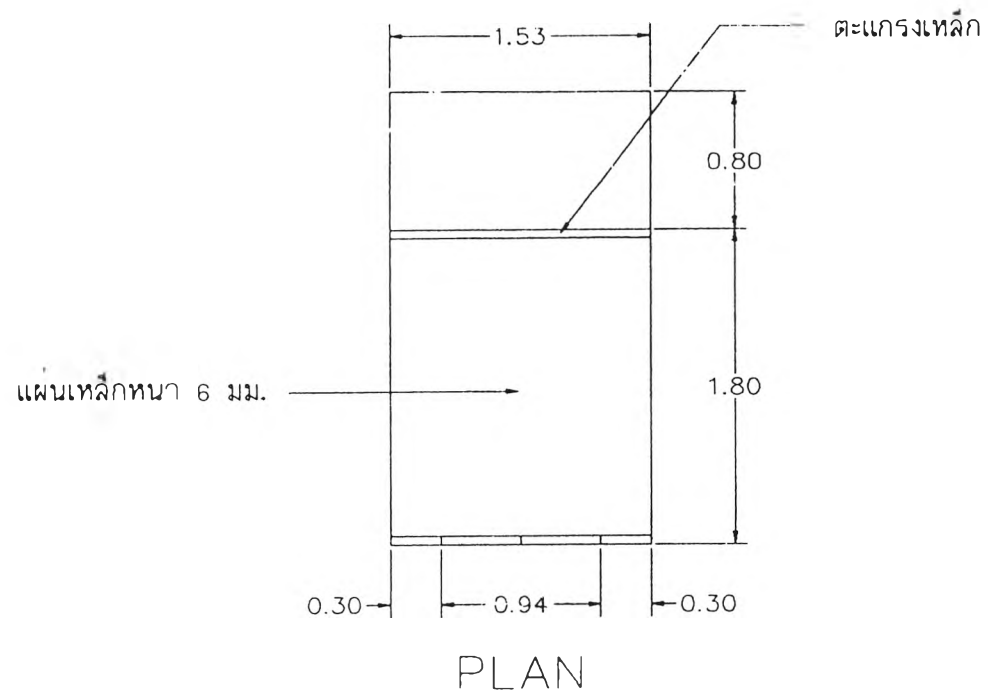
4) Point gauge ใช้สำหรับวัดความลึกการกัดเซาะ ดังรูป ก. 13

5) เครื่องโรยทรายอัตโนมัติ (sand feeder) ถังเก็บทราย (hopper) กว้าง 0.03 ม. ยาว 0.55 ม. สูง 0.825 ม. บริเวณถังเก็บทรายติดตั้งมอเตอร์เขย่า (vibration motor) ขนาด 0.5 แรงม้า 380 โวลต์ เครื่องโรยทราย (feeder) เป็นแบบลูกกลิ้ง (roller) หมุนโดยใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า 220/380 โวลต์ จำนวนรอบสูงสุดหมุนได้ 1,500 รอบต่อนาที การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ การแปลงกระแสไฟฟ้า ใช้เครื่องแปลงกระแสไฟ (AC inverter drive) ในการควบคุม ดังรูป ก. 14 - ก. 18

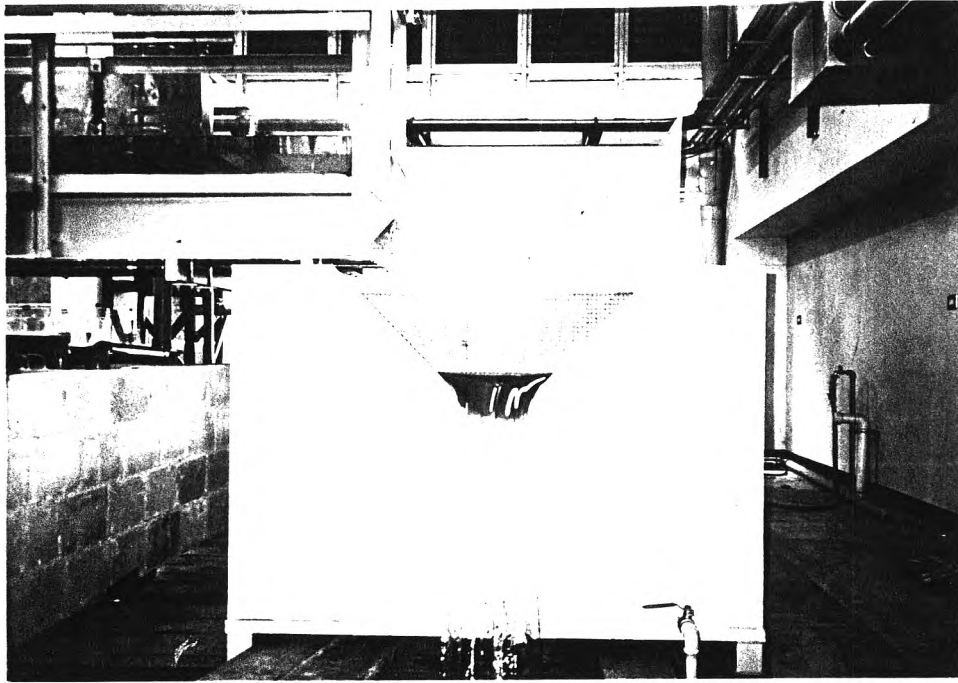
- | | |
|---------------------------------------|--|
| a. เครื่องสูบน้ำ (pumping unit) | b. ถังเก็บน้ำ (head tank) |
| c. วาล์ว (valve) | d. แผงกรองคลื่น (screen) |
| e. หินเรียง (riprap) | f. รางล้อเลื่อน (rail) |
| g. รถเก็บข้อมูล (instrument carriage) | h. รางน้ำขนาด 0.6×18.0×0.75 เมตร (flume) |
| i. ประตูท้ายน้ำ (tail gate) | j. แม่แรงยก (hydraulic jack) |
| k. ฝายวัดน้ำ (90° V-notch wier) | l. บ่อพักน้ำด้านท้ายน้ำ (sump) |
| m. บ่อด้านเหนือน้ำ (head box) | |



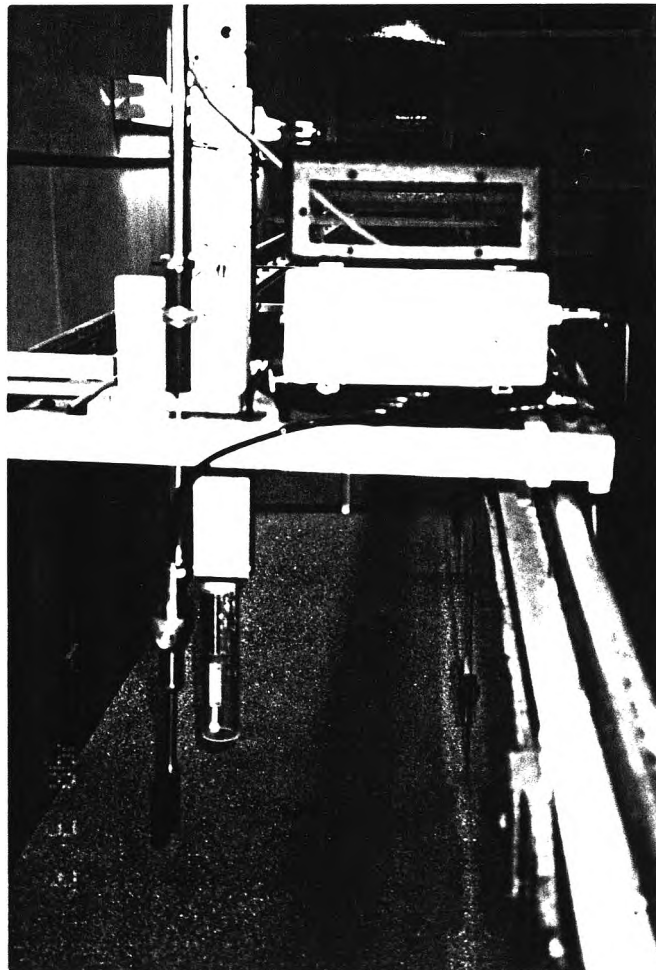
รูป ก.8 แผนผังแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ และระบบการหมุนเวียนของน้ำ



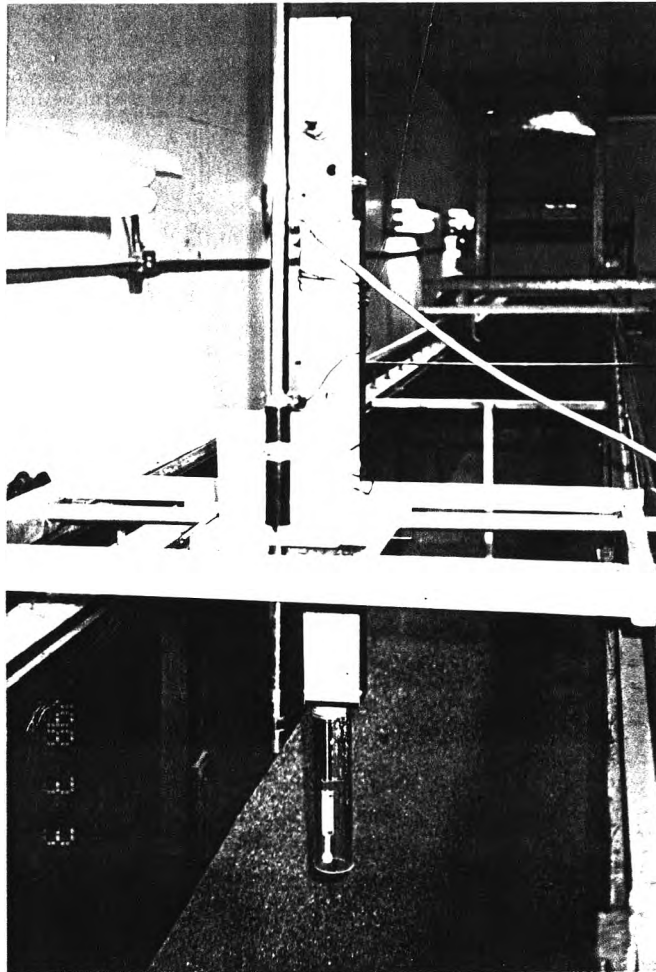
รูป ก.9 ฝ่ายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° V-notch weir)



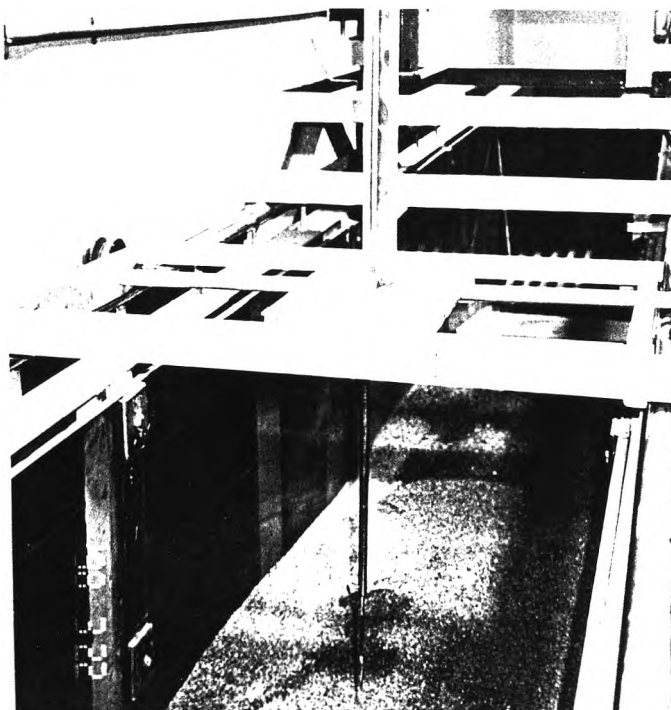
รูป ก.10 ฝ่ายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° V-notch weir)



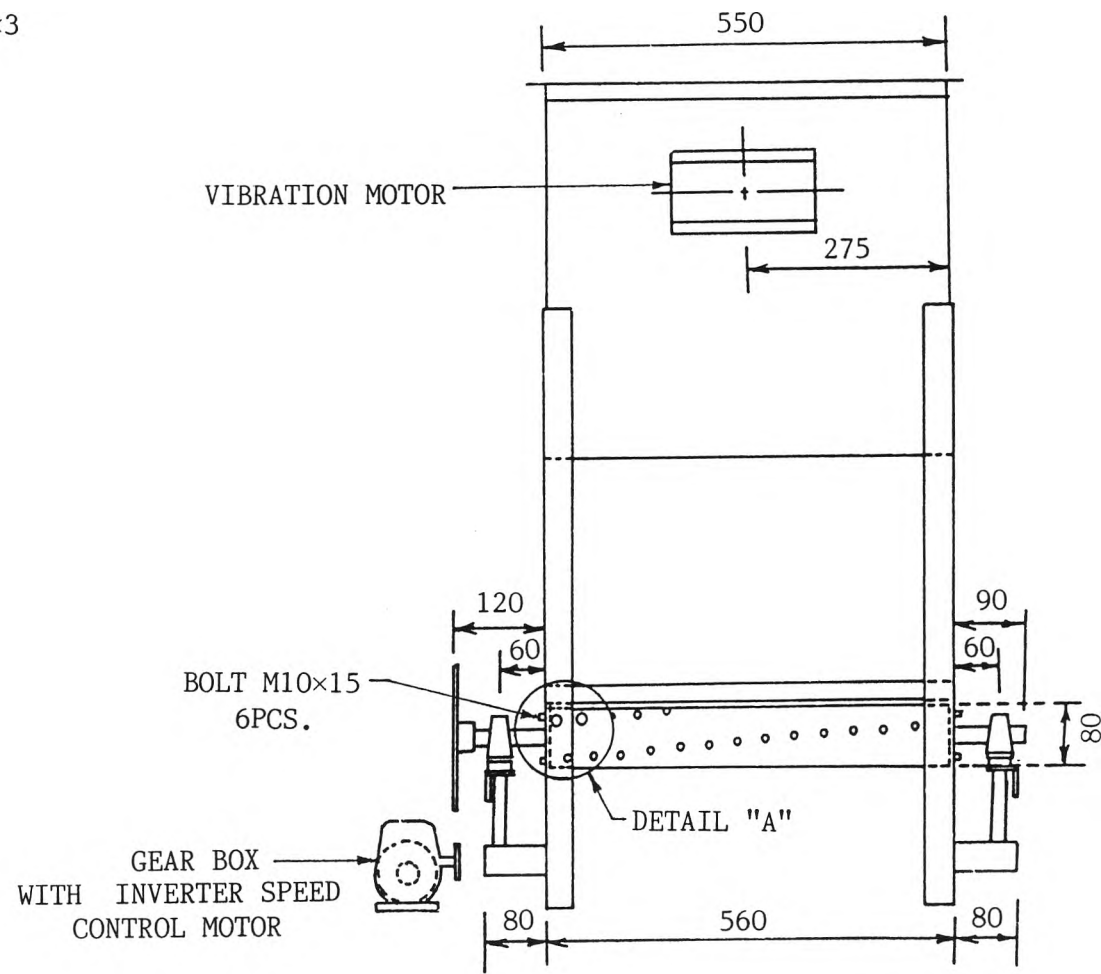
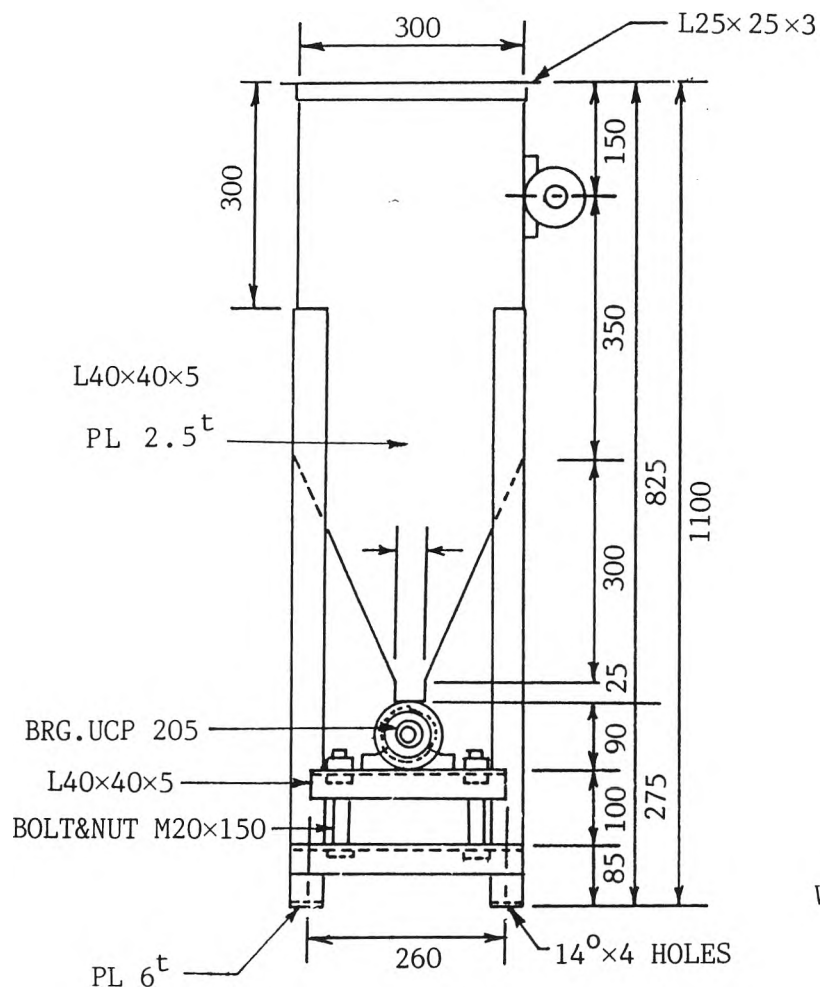
รูป ก.11 เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ (electromagnetic current meter)



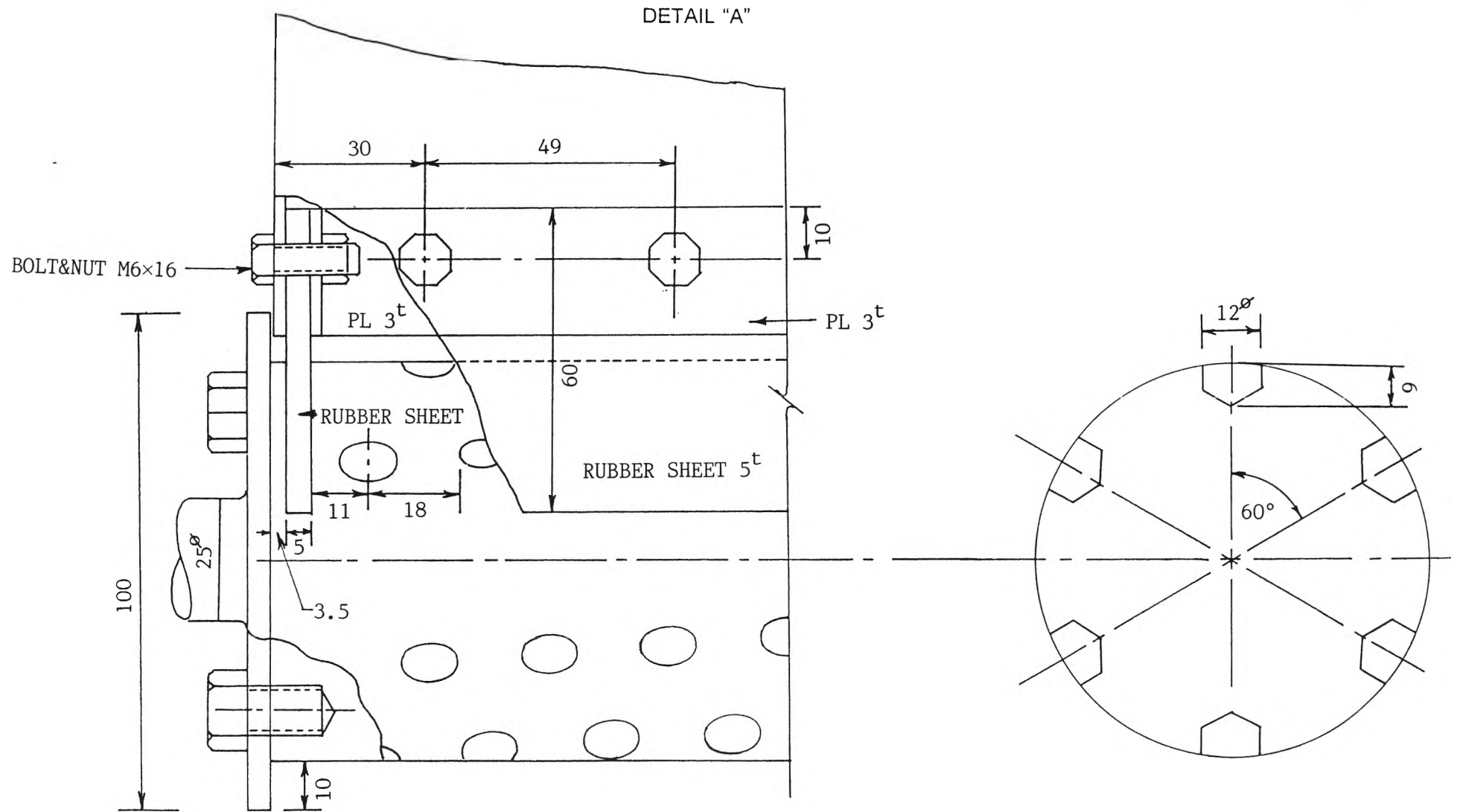
รูป ก.12 เครื่องมือวัดความเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำ (sandy surface measuring)



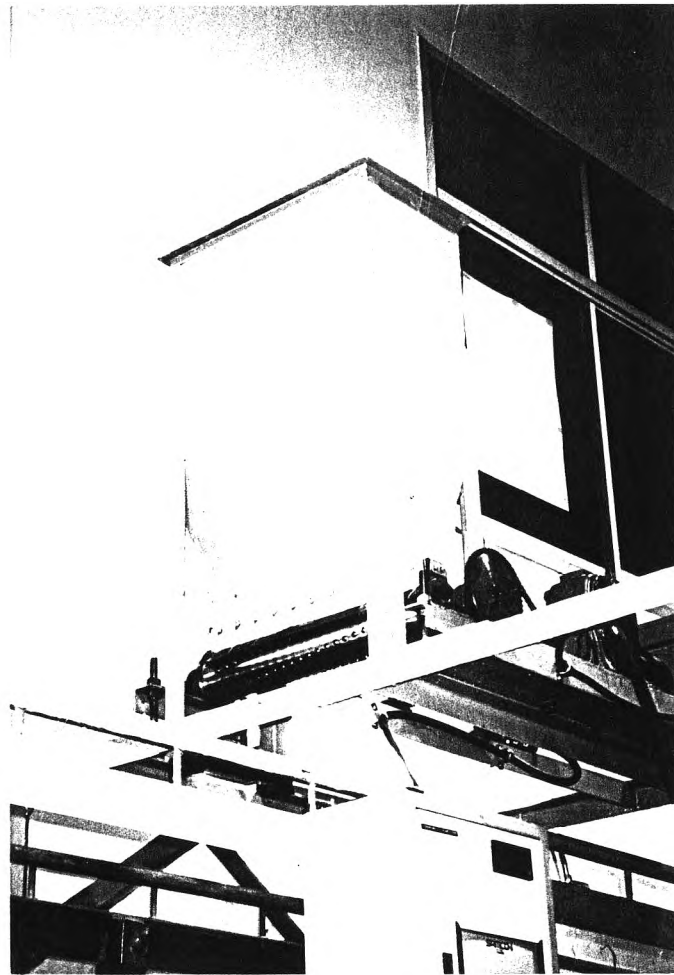
รูป ก.13 Point gate



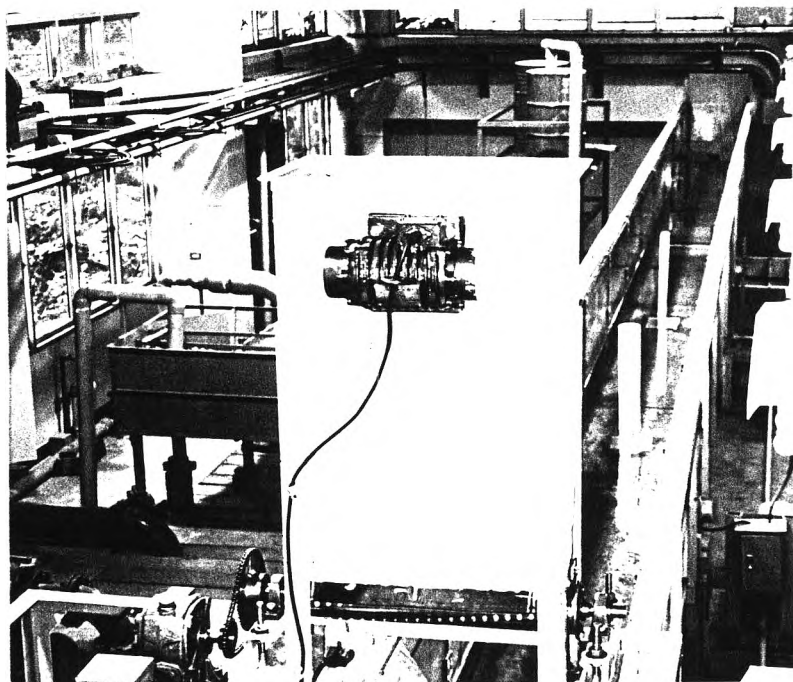
รูป ก.14 เครื่องโรยทรายอัตโนมัติ (sand feeder)



รูป ก.15 เครื่องโรยทรายแบบลูกกลิ้ง (roller)



รูป ก.16 ถังเก็บทราย (hopper)



รูป ก.17 มอเตอร์เขย่า (vibration motor)

6) ตะแกรงร่อนทราย (sand filter) ตะแกรงมีขนาด 1×1 ม. ประกอบด้วย ตะแกรงร่อนทราย 3 ขนาด ได้แก่ ตะแกรง 4.2 mech (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.75 มม.) ตะแกรง 9.2 mech (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.00 มม.) และตะแกรง 42 mech (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.35 มม.) ทำให้สามารถแยกทรายได้ 3 ขนาด คือ ทรายหยาบ (coarse sand) 4.75 - 2.00 มม. ทรายปานกลาง (medium sand) 2.00 - 0.35 มม. และทรายละเอียด (fine sand) 0.35 ลงไป การร่อนทรายใช้กำลังคนในการเขย่าตะแกรง ดังรูป ก.19 และ ก.20

7) เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ เพื่อใช้พิจารณาหาคุณสมบัติของน้ำขณะทดลอง เช่น ความหนืดของน้ำ (viscosity)

8) นาฬิกาจับเวลา

ก.3 แบบจำลองต่อม่อสะพาน

ในการทดลองการกัดเซาะรอบต่อม่อสะพาน ได้จัดทำแบบจำลองต่อม่อขึ้น 2 ลักษณะ จำนวน 6 ต่อม่อ คือ

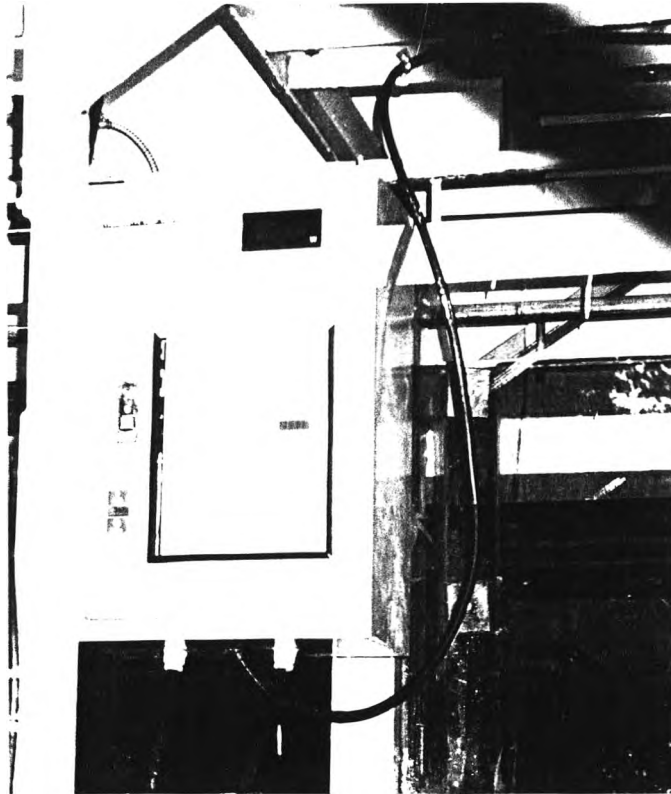
1) แบบจำลองต่อม่อสะพานรูปทรงกระบอก (cylindrical pier) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 5.0 และ 7.5 ซม.

2) แบบจำลองต่อม่อสะพานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunt-nosed piers) มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (b/l) 2.0/7.5 2.5/12.5 และ 5.0/15.0

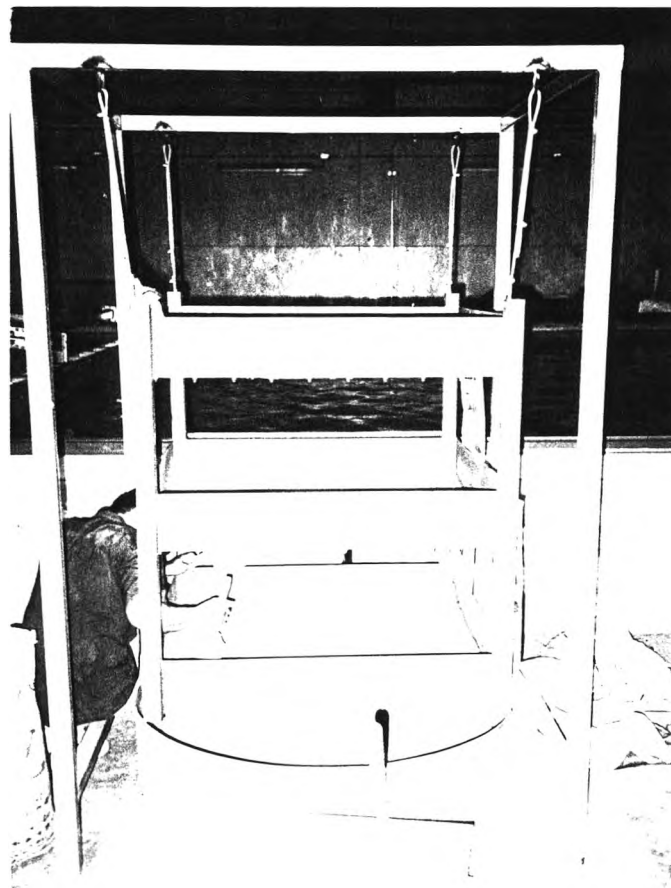
แบบจำลองต่อม่อสะพานทั้งหมด ทำจากไม้ทาด้วยสีขาว ที่ด้านข้างตามแนวตั้งมี Scale เพื่อเป็นเครื่องมือในการวัดความลึกของหลุมกัดเซาะ ดังรูป ก.21

ก.4 วัสดุท้องน้ำ (Bed material)

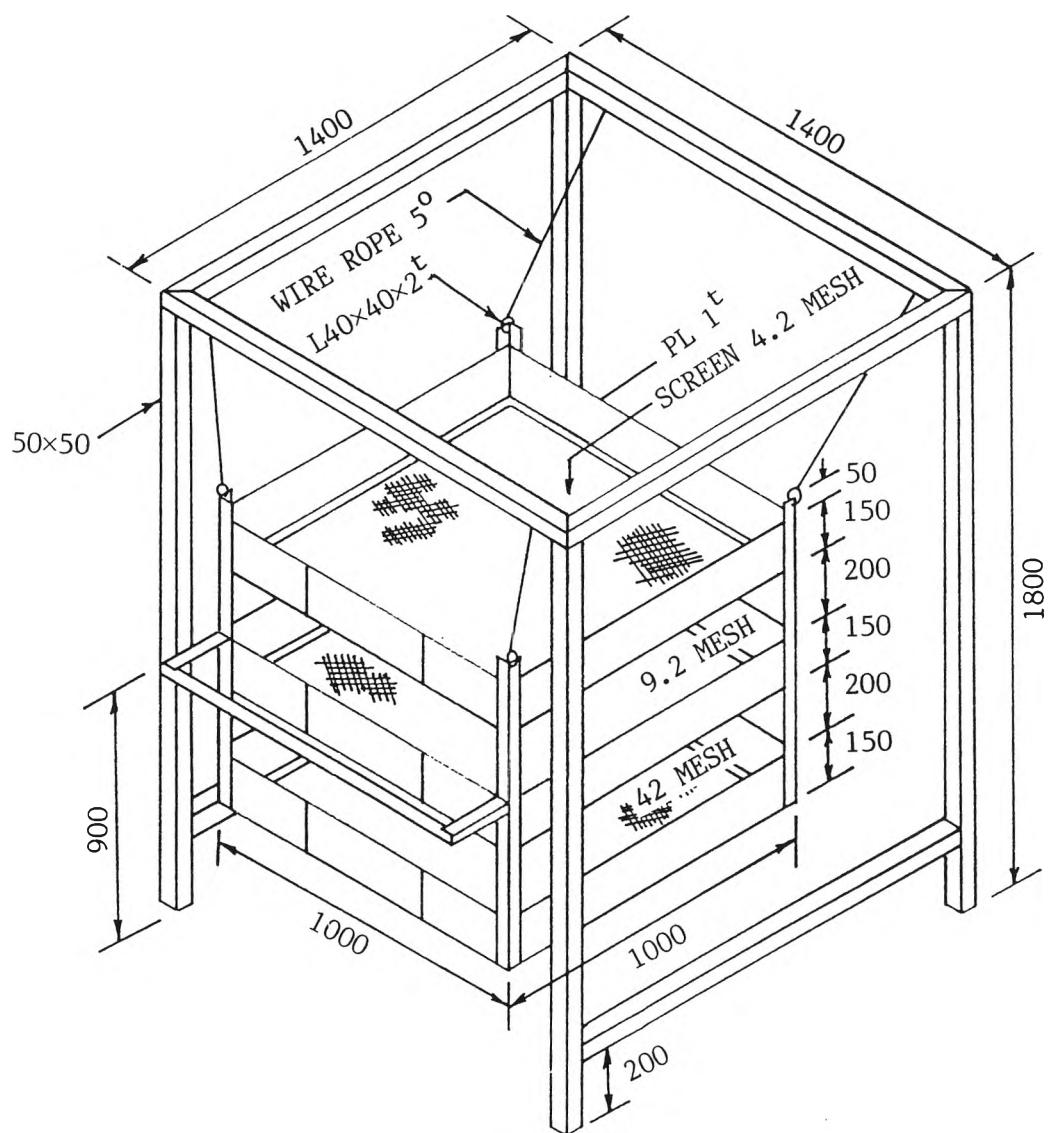
วัสดุท้องน้ำใช้ทรายจากลำน้ำธรรมชาตินำมาร่อนเพื่อแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่ ทรายหยาบ (coarse sand) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-5 มม. ทรายปานกลาง (medium sand) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4-2 มม. และทรายละเอียด (fine sand) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.075-0.4 มม. นำมาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก เพื่อจำลองลักษณะวัสดุท้องน้ำที่มีลักษณะคละกัน (nonuniform sand)



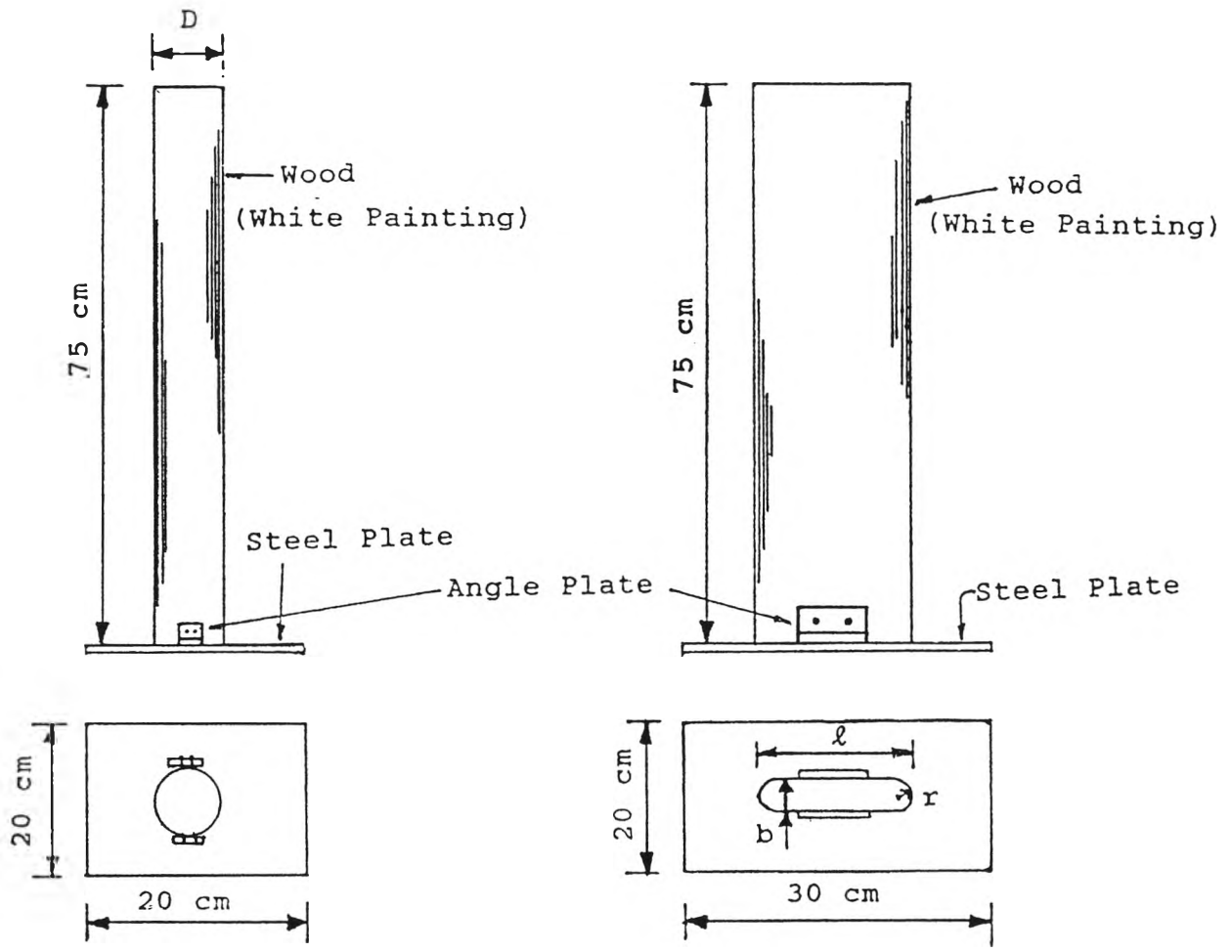
รูป ก.18 เครื่องแปลงกระแสไฟ (AC inverter drive)



รูป ก.19 ตะแกรงร่อนทราย (sand filter)



รูป ก.20 ตะแกรงร่อนทราย (sand filter)



(a) Cylindrical Pier Models

(b) Blunt-nosed Pier Models

$H = 75 \text{ cm}$

(Unit: cm)

$D = 2.5 \text{ cm}, 5.0 \text{ cm and } 7.5 \text{ cm}$

Three Types

b	2.0	2.5	5.0
l	7.5	12.5	15.0
r	1.25	1.25	2.5

ภาคผนวก ข

การสอบเทียบเครื่องมือ อุปกรณ์ และการวิเคราะห์วัสดุท้องถิ่น

ข.1 การสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์

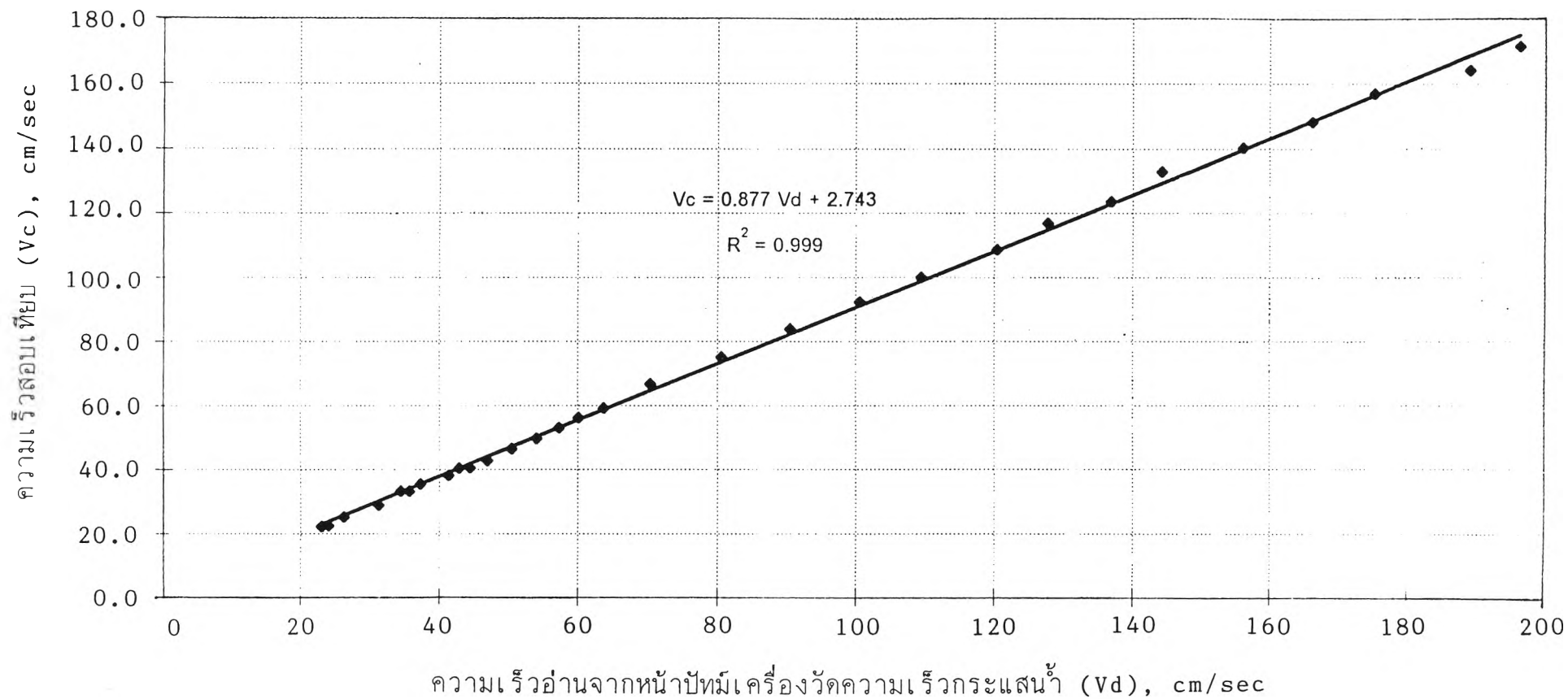
การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน จะต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 4 อย่าง ด้วยกัน คือ

1) การสอบเทียบเครื่องมือวัดความเร็วกระแสไฟฟ้า (current meter calibration) การสอบเทียบเครื่องมือวัดความเร็วกระแสไฟฟ้า แบบ Electromagnetic รุ่น ACM 100 - D ในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน ปากเกร็ด โดยนำเครื่องมือวัดความเร็วกระแสไฟฟ้า ติดตั้งไว้บนร่องรางที่สามารถควบคุมความเร็วได้ แล้วให้ร่องรางวิ่งไปในรางน้ำเปิดด้วยความเร็วคงที่ แล้วอ่านค่าความเร็วจากเครื่องมือวัดความเร็วกระแสไฟฟ้าที่นำไปสอบเทียบ นำค่าความเร็วที่อ่านได้มาเปรียบเทียบกับความเร็วร่องรางที่ตั้งไว้ ผลการสอบเทียบดังตาราง ข-1 และดังรูป ข.1

2) การสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° V - notch weir calibration) การสอบเทียบฝายวัดน้ำสันคม ทำในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยนำเครื่องมือวัดความเร็วกระแสไฟฟ้ามวัดความเร็วกระแสไฟฟ้าในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 60 ซม. โดยแบ่งพื้นที่หน้าตัดของรางน้ำออกเป็น ส่วนย่อย ๆ 8 ส่วน ตามความกว้างของรางน้ำเปิดคือ 0-5 5-10 10-20 20-30 30-40 40-50 50-55 และ 55-60 ซม. และวัดความเร็วในแต่ละส่วนย่อยที่มีความลึกต่าง ๆ คือ 3 5 10 และ 15 เป็นต้น จุดบันทึกความลึกน้ำ (depth, y) ของแต่ละส่วนย่อย แล้วนำมาคำนวณหาอัตราการไหล (discharge, Q) โดยใช้วิธีหน้าตัดเฉลี่ย (mean-section method) พร้อมทั้งจุดบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล (H-Q) แล้วนำมา Plot หา Rating curve ของฝายวัดน้ำสันคม เพื่อหาสูตรในการคำนวณอัตราการไหล ตัวอย่างตารางการคำนวณผลการสอบเทียบ แสดงในตาราง ข-2 และ ข-3 และดังรูป ข.2 และ ข.3

3) การสอบเทียบเครื่องโรยทรายอัตโนมัติ (sand feeder calibration) ทำในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการสอบเทียบเครื่องวัดความเร็วกระแสน้ำ
ประเภท Electromagnetic Current Meter รุ่น ACM100-D



รูป ข. 1 แสดงผลการสอบเทียบเครื่องวัดกระแสน้ำ

ตาราง ข.1 ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องวัดความเร็วกระแสน้ำ

ประเภท Electromagnetic current meter

รุ่น ACM100-D

จาก ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับที่	ระยะทาง (ม.)	เวลา (วินาที)	ความเร็วสอบเทียบ (vc) (ชม./วินาที)	ความเร็วที่อ่านจากปัทม์เครื่อง (vd) (ชม./วินาที)	Error (%)
1	12.01	53.28	22.5	24.1	7
2	12.01	54.12	22.2	23.1	4
3	12.01	47.53	25.3	26.3	4
4	12.01	41.53	28.9	31.3	8
5	12.01	36.19	33.2	34.5	4
6	12.01	36.19	33.2	35.7	8
7	12.01	33.81	35.5	37.3	5
8	12.01	31.44	38.2	41.4	8
9	12.01	29.62	40.5	44.5	10
10	12.01	29.69	40.5	42.9	6
11	12.01	28.10	42.7	47.0	10
12	12.01	25.87	46.4	50.5	9
13	12.01	24.22	49.6	54.1	9
14	12.01	22.69	52.9	57.3	8
15	12.01	21.41	56.1	60.1	7
16	12.01	20.28	59.2	63.8	8
17	12.01	18.03	66.6	70.5	6
18	12.01	16.00	75.1	80.6	7
19	12.01	14.33	83.8	90.6	8
20	12.01	13.03	92.2	100.6	9
21	12.01	12.00	100.1	109.5	9
22	12.01	11.06	108.6	120.4	11
23	12.01	10.28	116.8	127.8	9
24	12.01	9.72	123.6	137.0	11
25	12.01	9.03	133.0	144.3	8
26	12.01	8.56	140.3	156.2	11
27	12.01	8.10	148.3	166.2	12
28	12.01	7.65	157.0	175.3	12
29	12.01	7.32	164.1	189.2	15
30	12.01	7.00	171.6	196.5	15

ความสัมพันธ์ระหว่าง vd กับ vc คือ $vc = 0.877vd + 2.743$

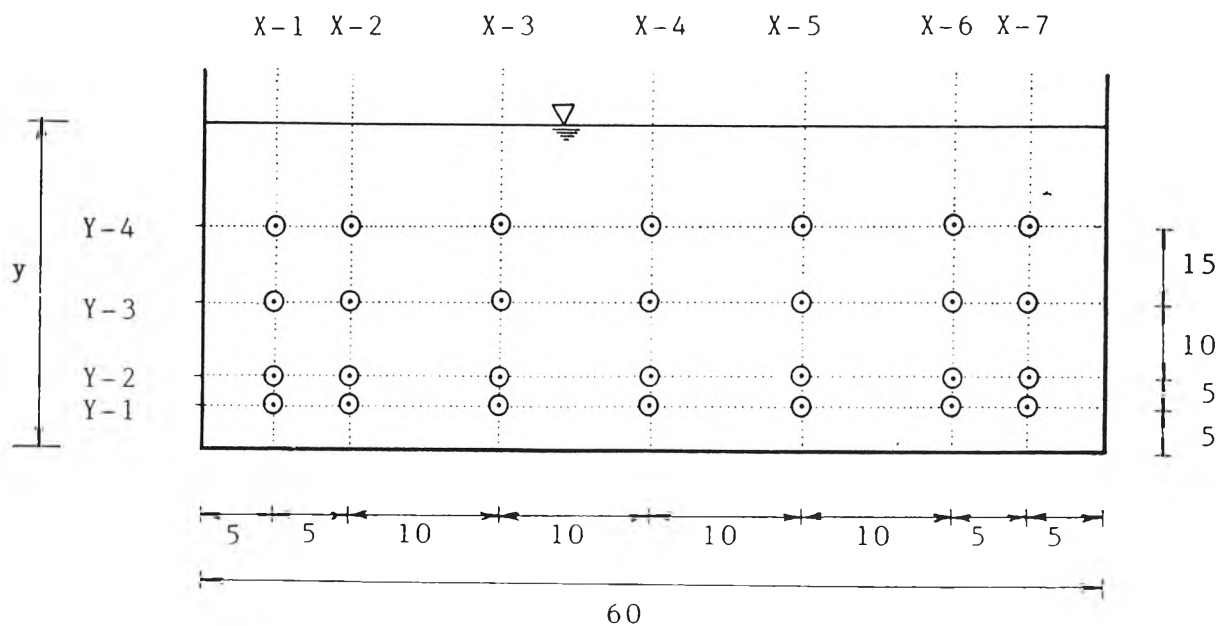
โดย $R^2 = 0.999$

vd คือ ความเร็วที่อ่านได้จากหน้าปัทม์ของเครื่องวัดกระแสน้ำ (ชม./วินาที)

vc คือ ความเร็วที่ได้จากการสอบเทียบ (ชม./วินาที)

ตาราง ข-2 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการวัดความเร็วกระแสน้ำ

X \ Y	5	10	20	30	40	50	55
3	21.9	21.6	20.6	20.9	24.3	24.2	22.3
5	29.3	28.7	26.1	26.8	30.5	29.7	27.5
10	31.2	30.8	27.5	27.6	30	31.3	30.9
15	30.8	29.4	28.1	27.1	29.9	31.5	31.3
20							
y (cm.)	23.15	23.6	23.45	23.4	23.45	24	23.8

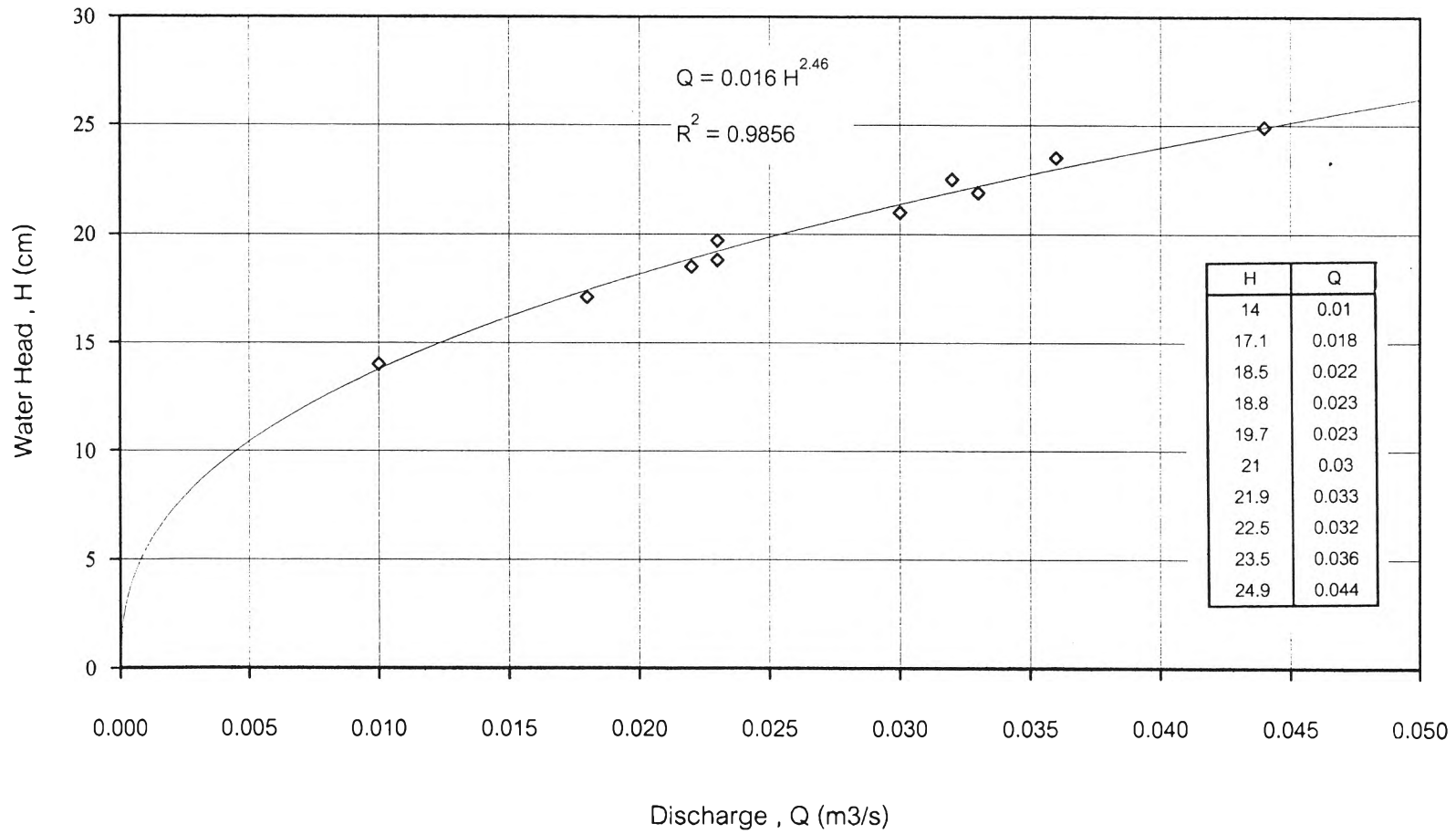


รูป ข.2 หน้าตัดที่กำหนดในการวัดความเร็วการไหล

ตาราง ข-3 ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการไหล โดยใช้วิธีหน้าตัดเฉลี่ย (Mean section method)

Distance (cm)	Depth (cm)	d_{av} (cm)	Point (cm)	V_d (cm/sec)	V_c (cm/sec)	V_{av}^* (cm/sec)	V_{av}^{**} (cm/sec)	Wide (cm)	Area (cm ²)	Q (cm ³ /sec)	Q (l/sec)	
0	23.15			0	0	0						
5	23.15	23.15	3	21.9	21.9	27.6	13.8	5	115.75	1595.16	1.60	
			5	29.3	28.4							
			10	31.2	30.1							
			15	30.8	29.8							
10	23.6	23.375	3	21.6	21.7	27.0	27.3	5	116.875	3186.73	3.19	
			5	28.7	27.9							
			10	30.8	29.8							
			15	29.4	28.5							
20	23.45	23.525	3	20.6	20.8	25.2	26.1	10	235.25	6133.25	6.13	
			5	26.1	25.6							
			10	27.5	26.9							
			15	28.1	27.4							
30	23.4	23.425	3	20.9	21.1	25.2	25.2	10	234.25	5899.17	5.90	
			5	26.8	26.2							
			10	27.6	26.9							
			15	27.1	26.5							
40	23.45	23.425	3	24.3	24.1	27.9	26.5	10	234.25	6217.60	6.22	
			5	30.5	29.5							
			10	30	29.1							
			15	29.9	29.0							
50	24	23.725	3	24.2	24.0	28.3	28.1	10	237.25	6669.15	6.67	
			5	29.7	28.8							
			10	31.3	30.2							
			15	31.5	30.4							
55	23.8	23.9	3	22.3	22.3	27.3	27.8	5	119.5	3323.80	3.32	
			5	27.5	26.9							
			10	30.9	29.8							
			15	31.3	30.2							
60	23.8	23.8		0	0.0	0	13.6	5	119	1624.29	1.62	
											34.65	
หมายเหตุ	d_{av} = ความลึกเฉลี่ยระหว่างหน้าตัด									Q_r (m ³ /s)	0.035	
	V_d = ความเร็วการไหลที่วัดได้จากเครื่อง ที่จุดต่าง ๆ											
	V_c = ความเร็วการไหลปรับแก้จากสูตรที่ได้จากการสอบเทียบ											
	V_{av}^* = ความเร็วเฉลี่ยในแนวตั้ง											
	V_{av}^{**} = ความเร็วเฉลี่ยในหน้าตัด											

Rating Curve of 90° V-notch Weir



รูป ข.3 แสดงผลการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° V-notch wier)

มีขั้นตอนการสอบเทียบ คือ นำทรายที่ใช้ในการทดลองใส่ในเครื่องโรยทราย ปรับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (AC inverter) ที่ความเร็วการหมุนต่าง ๆ เช่น 50 รอบต่อนาที 100 รอบต่อนาที ถึง 1400 รอบต่อนาที เป็นต้น แล้วเริ่มเดินเครื่อง จับเวลาเก็บตัวอย่างทรายที่โรยออกมาในแต่ละความเร็วที่ตั้งไว้ นำตัวอย่างทรายที่ได้ไปชั่งน้ำหนักแล้วนำ Plot กราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างรอบการหมุนกับน้ำหนักทรายที่โรยออกมาต่อเวลา (Rpm - kg/sec) ดังแสดงในตาราง ข-4 และดังรูป ข.4

4) การสอบเทียบรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (flume calibration) เพื่อหาค่าความลาดเอียงท้องน้ำ (Slope) และค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรางน้ำเปิด (manning "n") มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

4.1) การสอบเทียบเพื่อหาความลาดเอียงท้องน้ำ (slope) ทำโดยปล่อยน้ำเข้ารางน้ำเปิด ปิดประตูระบายน้ำที่ปลายรางน้ำ (tail gate) เมื่อน้ำเข้าไปได้ระดับหนึ่ง ปิดวาล์วทางเข้าน้ำ รอกจนน้ำนิ่ง วัดความลึกน้ำทุก ๆ 20 ซม. ตามความยาวของรางน้ำ แล้วนำมา Plot หาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและความลึกน้ำ แล้วคำนวณหาความลาดเอียงท้องน้ำ เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Scale บนไม้บรรทัด (Y) กับความลาดเอียงท้องน้ำ เพื่อให้ง่ายต่อการปรับค่าความลาดเอียงท้องน้ำ ดังรูป ข.5

4.2) การสอบเทียบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ โดยนำเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ วัดความเร็วกระแสน้ำที่หน้าตัดย่อย ๆ ของรางน้ำ จุดบันทึกการไหลที่ส่วนย่อยนั้น ๆ เช่นเดียวกับการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม หลังจากนั้นปิดวาล์วทางน้ำเข้า ปิดประตูระบายน้ำที่ปลายรางน้ำ ชั่งน้ำไว้รอกจนน้ำนิ่ง แล้ววัดความลึกน้ำทุก ๆ 20 ซม. ตามความยาวของรางน้ำ ทำเช่นเดียวกับการสอบเทียบเพื่อหาความลาดเอียงท้องน้ำ แล้วนำค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (v_{avg}) ความลึกการไหลเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (y_{avg}) และค่าความลาดเอียงท้องน้ำ (slope) มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) จากสูตรแมนนิง (Manning's formula)

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ ที่คำนวณได้จากค่าความเร็วเฉลี่ย ซึ่งคิดจากสมการต่อเนื่อง (continuity equation)

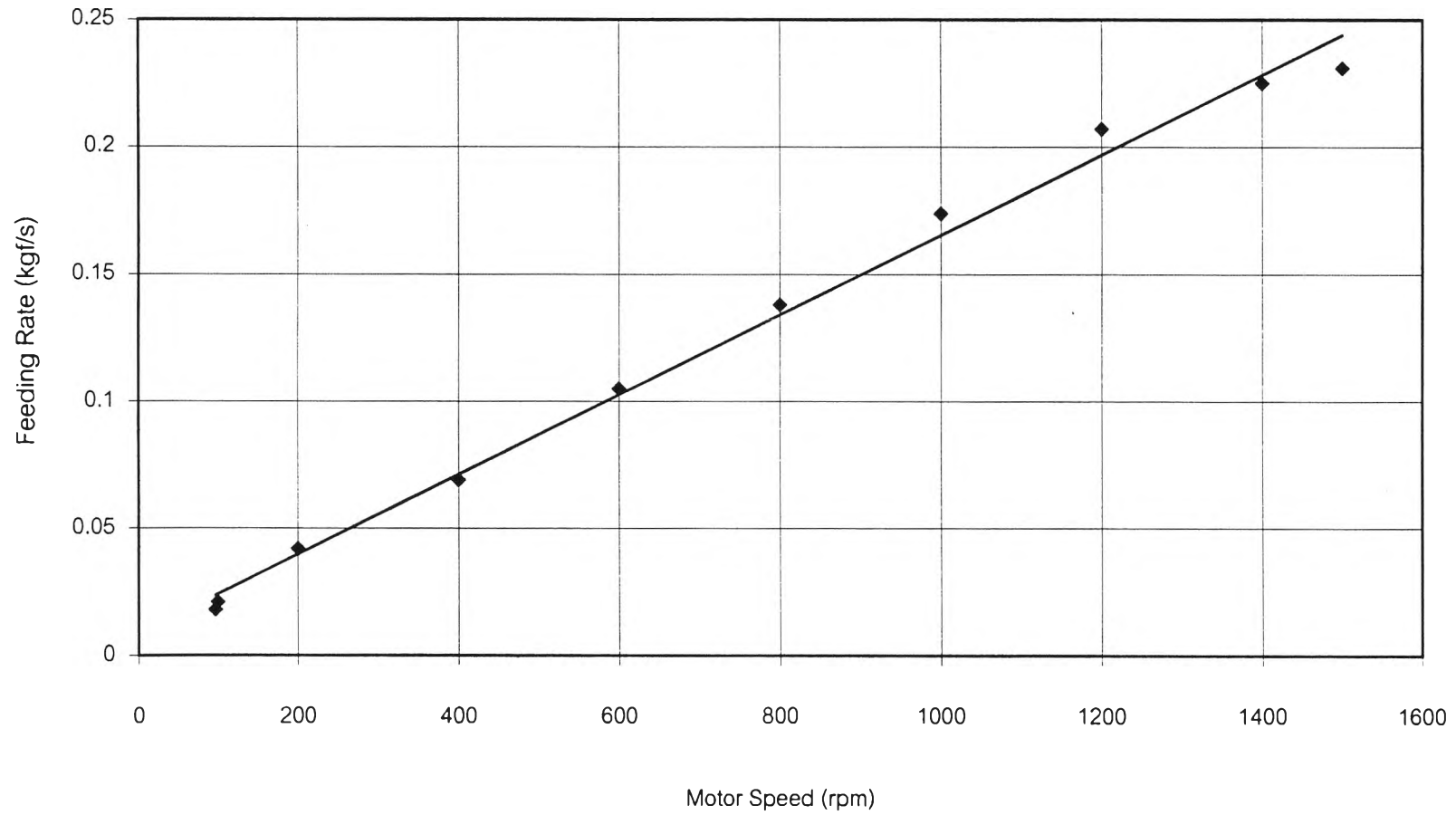
$$v = \frac{Q}{A}$$

ตาราง ข-4 ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องโรยทรายอัตโนมัติ

Specific gravity = 1800 Kg/m³

Morter Speed (rpm)	Frequency (Hz)	Weight (g)						Volume (m ³)	Time (min)	Feeding Rate (kg/sec)
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	Avg.			
97	3.25	2557	2701	3277	4002	3564	3220	0.0018	3	0.018
100	3.34	1319	1253	1120	-	-	1231	0.0007	1	0.021
200	6.69	2448	2589	2551	-	-	2529	0.0014	1	0.042
400	13.36	3997	4297	4393	-	-	4229	0.0023	1	0.069
600	20.03	6418	6162	6476	-	-	6352	0.0035	1	0.105
800	26.67	8143	8215	8401	-	-	8253	0.0046	1	0.138
1000	33.34	10417	10213	10510	-	-	10380	0.0058	1	0.174
1200	40	12687	11968	12411	-	-	12355	0.0069	1	0.207
1400	46.69	13268	13825	13192	-	-	13428	0.0075	1	0.225
1500	50	13414	14106	14196	-	-	13905	0.0077	1	0.231

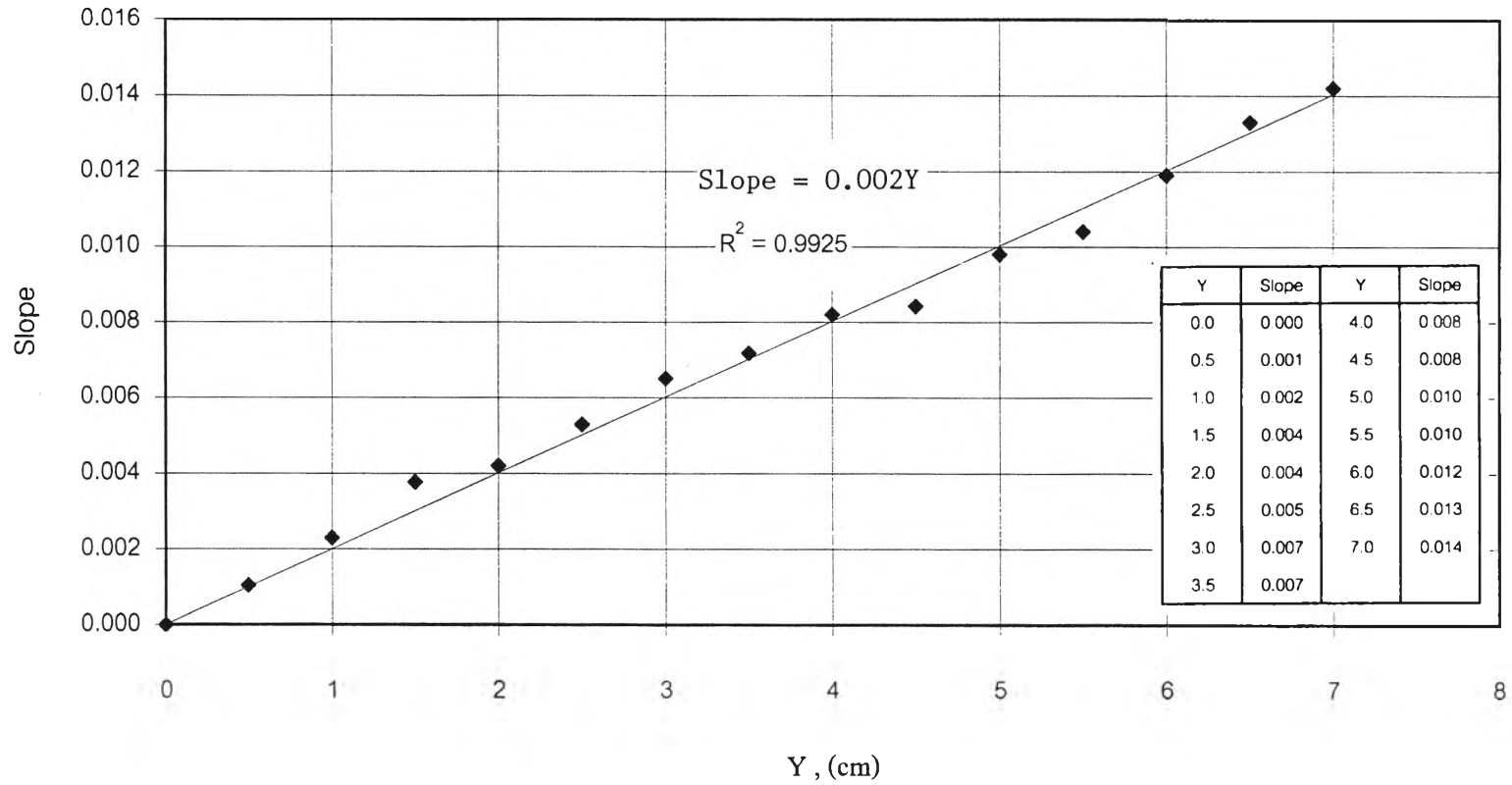
กราฟแสดงอัตราการโรยทรายของอุปกรณ์โรยทรายอัตโนมัติ



รูป ข.4 แสดงอัตราการโรยทรายของเครื่องโรยทรายอัตโนมัติ

Calibration of Flume Slope

$$\text{Adjust Scale} = 16.1 + Y$$



รูป ข.5 การสอบเทียบเพื่อหาความลาดเอียงท้องน้ำ

โดยอัตราการไหล (Q) หาจาก Rating curve ของฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม
ดังตัวอย่างการคำนวณ

Example Run No. S8

อัตราการไหล = 37 ลิตรต่อวินาที
= 0.037 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
Station = 1 + 220
Slope = 0.002

X \ Y	5	10	20	30	40	50	55
3	52.6	53.8	52.9	47.3	51.7	52.8	54.4
5	59.2	59.3	61.1	57.9	59.7	61.2	61.4
V_{avg} (cm/s)	55.9	56.55	57.0	52.6	55.7	57.0	57.9
y (cm)	10.0	10.50	9.7	9.95	10.05	10.0	9.7

$$\begin{aligned}
 \therefore \text{ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดจากการวัด} &= 56.093 && \text{ซม./วินาที} \\
 &= 0.561 && \text{ม./วินาที} \\
 \text{ความลึกเฉลี่ยตลอดหน้าตัด} &= 9.99 && \text{ซม.} \\
 \text{รางน้ำเปิดกว้าง} &= 60 && \text{ซม.} \\
 \therefore A &= 60 \times 9.99 \\
 &= 599.40 && \text{ซม.}^2 \\
 &= 0.060 && \text{ม.}^2 \\
 P &= 60 + 2(9.99) \\
 &= 79.88 && \text{ซม.}^2 \\
 &= 0.80 && \text{ม.}^2 \\
 R &= 0.060/0.80 \\
 &= .075 && \text{ม.} \\
 \therefore v &= \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}
 \end{aligned}$$

$$0.561 = \frac{1}{n} (0.075)^{2/3} (0.002)^{1/2}$$

$$\therefore n = 0.014$$

จาก $Q = Av$

$$v = 0.037/0.060$$

$$= 0.617 \quad \text{ม./วินาที}$$

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$0.617 = \frac{1}{n} (0.075)^{2/3} (0.002)^{1/2}$$

$$\therefore n = 0.013$$

Example Run No. S8

อัตราการไหล = 0.037 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

Station = 0 + 800

Slope = 0.002

X \ Y	5	10	20	30	40	50	55
3	51.40	55.90	54.60	47.10	52.60	54.60	54.00
5	54.50	56.10	51.70	47.20	54.30	53.60	52.30
V_{avg} (cm/s)	52.95	56.00	53.15	47.15	53.45	54.10	53.15
y (cm)	13.15	13.60	13.45	12.50	13.05	13.80	13.70

$$\therefore \text{ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดจากการวัด} = 0.529 \quad \text{ม./วินาที}$$

$$\text{ความลึกเฉลี่ยตลอดหน้าตัด} = 0.133 \quad \text{ม.}$$

$$\text{รางน้ำเปิดกว้าง} = 0.60 \quad \text{ม.}$$

$$\therefore A = 0.60 \times 0.133$$

$$= 0.080 \quad \text{ม.}^2$$

$$P = 0.60 + 2(0.133)$$

$$= 0.866 \quad \text{ม.}^2$$

$$R = 0.080/0.866$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.092 \quad \text{ม.} \\
 \therefore v &= \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \\
 0.529 &= \frac{1}{n} (0.092)^{2/3} (0.002)^{1/2} \\
 \therefore n &= 0.017 \\
 \text{จาก } Q &= AV \\
 v &= 0.037/0.080 \\
 &= 0.463 \quad \text{ม./วินาที} \\
 v &= \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \\
 0.463 &= \frac{1}{n} (0.092)^{2/3} (0.002)^{1/2} \\
 \therefore n &= 0.020
 \end{aligned}$$

Example Run No. S8

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการไหล} &= 0.037 \quad \text{ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที} \\
 \text{Station} &= 0 + 550 \\
 \text{Slope} &= 0.002
 \end{aligned}$$

X \ Y	5	10	20	30	40	50	55
3	49.00	51.30	48.50	43.90	53.10	54.00	52.50
5	58.60	59.70	54.10	50.40	60.30	59.40	55.90
V_{avg} (cm/s)	53.80	55.50	51.30	47.15	56.70	56.70	54.20
y (cm)	11.45	12.60	12.20	12.10	12.25	11.30	11.25

$$\begin{aligned}
 \text{ค่า "n" ที่ได้จากความเร็วที่วัด} &= 0.016 \\
 \text{ค่า "n" จากความเร็วที่คำนวณได้จากอัตราการไหล} &= 0.017
 \end{aligned}$$

Example Run No. S8

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการไหล} &= 0.037 \quad \text{ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที} \\
 \text{Station} &= 0 + 150 \\
 \text{Slope} &= 0.002
 \end{aligned}$$

X \ Y	5	10	20	30	40	50	55
3	59.50	58.90	57.90	53.40	57.20	58.50	61.00
5	56.80	56.20	52.40	52.60	57.20	61.60	62.70
V_{avg} (cm/s)	58.15	57.55	55.15	53.00	57.20	60.05	61.85
y (cm)	10.90	12.40	11.85	10.75	11.60	12.15	11.90

ค่า "n" ที่ได้จากความเร็วที่วัด = 0.015

ค่า "n" จากความเร็วที่คำนวณได้จากอัตราการไหล = 0.016

นำค่า "n" แต่ละหน้าตัดมาเฉลี่ย

ค่า "n" ที่ได้จากความเร็วที่วัด = $(0.014+0.017+0.016+0.015) / 4$
= 0.016

ค่า "n" จากความเร็วที่คำนวณได้จากอัตราการไหล

= $(0.013+0.020+0.017+0.016) / 4$
= 0.017

ในการทดลองนี้กำหนดให้ใช้ค่า $n = 0.015$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ อัตราการไหลหลาย ๆ ค่า

ข.2 การวิเคราะห์วัสดุท้องน้ำ

การทดลองการกักเซาะรอบตอม่อสะพาน วัสดุท้องน้ำให้ทรายจากลำน้ำธรรมชาตินำมา ร่อนเพื่อแยกขนาดโดยตะแกรงร่อนทราย (sand filter) ซึ่งจะได้ทราย 3 ขนาด คือ ทรายหยาบ (coarse sand) ทรายปานกลาง (medium sand) และทรายละเอียด (fine sand) โดยกำหนด ช่วงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทราย ตามมาตรฐาน USBR ได้แก่ ทรายหยาบ 2-5 มม. ทรายปานกลาง 0.4-2 มม. และทรายละเอียด 0.075-0.4 มม. ทรายขนาดดังกล่าวที่ได้จากการ ร่อนได้นำไปทำการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน (sieve analysis) ณ ห้องปฏิบัติการปฐพีวิทยา สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้ ทรายหยาบ $D_{50} = 2.20$ มม. ทรายปานกลาง $D_{50} = 1.2$ มม. และทรายละเอียด $D_{50} = 0.36$ มม. ซึ่งในค่า D_{50} อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตาราง ข-5 ข-6 และข-7 ดังรูป ข.6

ตาราง ข-6 ตารางผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน (Sieve analysis)

GRAIN SIZE ANALYSIS

Project _____ Thesis _____ Location Hydraulic Lab Date 17 March 1998

Sample ทรายละเอียด Test by Pronmongkol Chidchob

Sample ทรายละเอียด 700 g

ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักที่ค้าง อยู่บนตะแกรง (กรัม)	ค่าร้อยละที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ ลอดผ่านตะแกรง
4.760	0.00	0.00	0.00	100.00
2.360	0.00	0.00	0.00	100.00
1.190	0.29	0.04	0.04	99.96
0.590	0.76	0.11	0.15	99.85
0.300	507.39	72.48	72.63	27.37
0.149	151.18	21.60	94.23	5.77
0.074	31.25	4.46	98.70	1.30
Pan	9.13	1.30	-	-
รวม	700	100.00		

ตาราง ข-5 ตารางผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน (Sieve analysis)

GRAIN SIZE ANALYSIS

Project _____ Thesis _____ Location Hydraulic Lab Date 17 March 1998

Sample ทรายปานกลาง Test by Pronmonkol Chidchob

Sample ทรายปานกลาง 700 g

ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักที่ค้าง อยู่บนตะแกรง (กรัม)	ค่าร้อยละที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ ลอดผ่านตะแกรง
4.760	0.00	0.00	0.00	100.00
2.360	0.45	0.06	0.06	99.94
1.190	371.56	53.08	53.14	46.86
0.590	314.50	44.93	98.07	1.93
0.300	7.54	1.08	99.15	0.85
0.149	4.21	0.60	99.75	0.25
0.074	1.19	0.17	99.92	0.08
Pan	0.55	0.08	-	-
รวม	686.61	100.00		

ตาราง ข-7 ตารางผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน (Sieve analysis)

GRAIN SIZE ANALYSIS

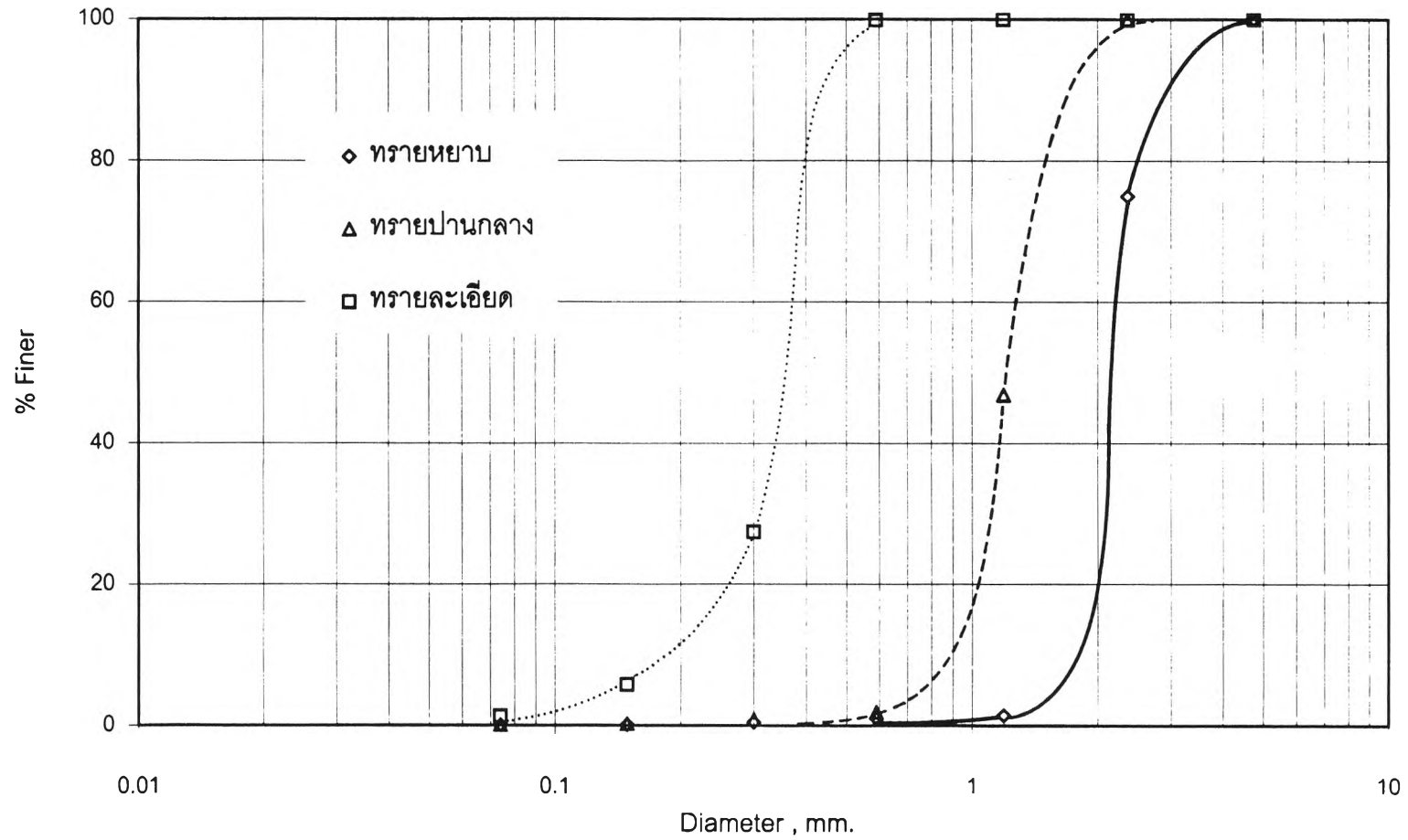
Project _____ Thesis _____ Location Hydraulic Lab Date 17 March 1998

Sample ทรายหยาบ Test by Pronmongkol Chidchob

Sample ทรายหยาบ 700 g

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักที่ค้าง	ค่าร้อยละที่ค้าง	ค่าร้อยละสะสมที่ค้าง	ค่าร้อยละสะสมที่
(มม.)	อยู่บนตะแกรง (กรัม)	บนตะแกรงแต่ละขนาด	บนตะแกรงแต่ละขนาด	ลอดผ่านตะแกรง
4.760	0.10	0.01	0.01	99.99
2.360	174.98	25.00	25.01	74.99
1.190	514.56	73.51	98.52	1.48
0.590	3.38	0.48	99.00	1.00
0.300	3.68	0.53	99.53	0.47
0.149	2.30	0.33	99.86	0.14
0.074	0.70	0.10	99.96	0.04
Pan	0.3	0.04	-	-
รวม	700	100.00		

Sieve Analysis



รูป ข.6 แสดงการวิเคราะห์ขนาดของทรายหยาบ ทรายปานกลาง และทรายละเอียด

การจำลองวัสดุท้องน้ำ เพื่อใช้ในการทดลองจะนำทรายที่แยกขนาดแล้วทั้ง 3 ขนาดมาผสมกันในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 โดยน้ำหนัก แล้วคละให้เข้ากันเพื่อจำลองให้วัสดุท้องน้ำมีลักษณะคละกัน จากนั้นได้นำตัวอย่าง 3 ตัวอย่างไปวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน ณ ห้องปฏิบัติการปฐพีวิทยา สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน ได้ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังตาราง ข-8 และ ข-9 และดังรูป ข.7

การหาค่ามุมเสียดรภาพอิมตัว (ϕ) กระทำได้โดยนำภาชนะที่บรรจุวัสดุท้องน้ำเทลงในน้ำจนกระทั่งอนุภาคของวัสดุท้องน้ำที่ผิวบนเคลื่อนที่ จึงหยุดเทแล้ววัดมุมที่กองวัสดุท้องน้ำกระทำกับแนวราบ

ตาราง ข-8 คุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการทดลอง

Sample	D ₅₀ (mm)	D ₈₄ (mm)	D ₁₆ (mm)	σ_g^*	U _c ^{**} (m/s)	ϕ (degree)
1	0.83	1.80	0.24	2.74	0.38	30
2	0.79	1.80	0.24	2.74	0.40	30
3	0.64	1.70	0.22	2.78	0.39	30
เฉลี่ย	0.753	1.77	0.233	2.75	0.39	30

หมายเหตุ *
$$\sigma_g = \left(\frac{D_{84}}{D_{16}} \right)^{1/2}$$

** U_c = ความเร็วเฉือนวิกฤติคำนวณจาก Shield's function

$$\gamma_s = 2.65$$

ตาราง ข-9 ตารางผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน (Sieve analysis)

GRAIN SIZE ANALYSIS

Project _____ Thesis _____ Location Hydraulic Lab Date 17 March 1998

Sample _____ No.1 700 g Test by Pommongkol Chidchob

ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักที่ค้าง อยู่บนตะแกรง (กรัม)	ค่าร้อยละที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ ลอดผ่านตะแกรง ตัวอย่าง 1
4.76	0.00	0.00	0.00	100.00
2.36	57.00	8.14	8.14	91.86
1.19	187.74	26.82	34.96	65.04
0.59	177.04	25.29	60.25	39.75
0.3	115.60	16.51	76.77	23.23
0.149	126.09	18.01	94.78	5.22
0.074	28.28	4.04	98.82	1.18
Pan	8.25	1.18	-	-
รวม	700	100.00		

Sample _____ No.2 700 g

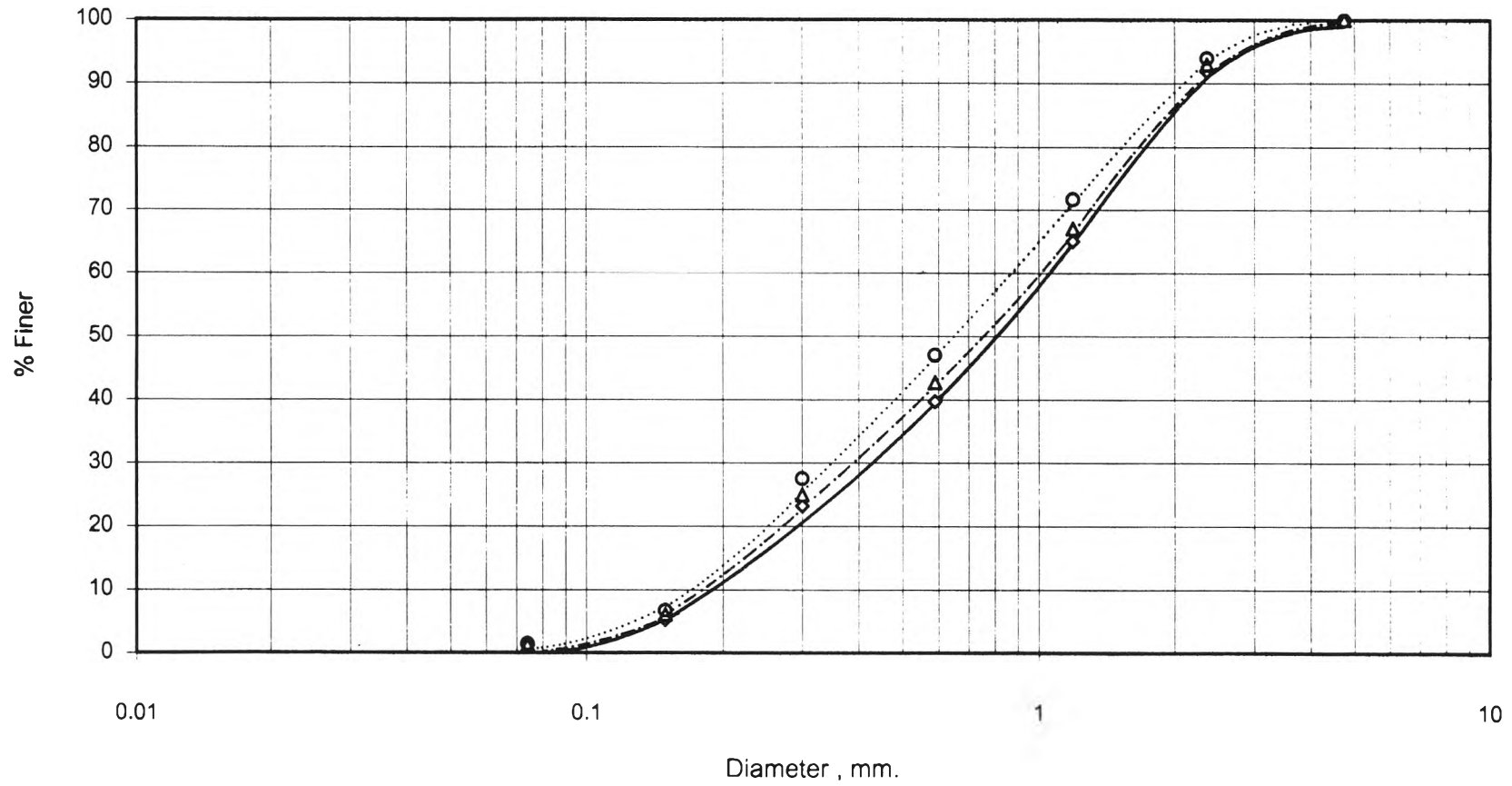
ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักที่ค้าง อยู่บนตะแกรง (กรัม)	ค่าร้อยละที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ ลอดผ่านตะแกรง
4.76	0.00	0.00	0.00	100.00
2.36	49.39	7.06	7.06	92.94
1.19	181.10	25.87	32.93	67.07
0.59	170.56	24.37	57.29	42.71
0.3	124.06	17.72	75.02	24.98
0.149	132.63	18.95	93.96	6.04
0.074	33.79	4.83	98.79	1.21
Pan	8.47	1.21	-	-
รวม	700	100.00		

Sample _____ No.3 700 g

ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักที่ค้าง อยู่บนตะแกรง (กรัม)	ค่าร้อยละที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด	ค่าร้อยละสะสมที่ ลอดผ่านตะแกรง
4.76	0.26	0.04	0.04	99.96
2.36	42.36	6.05	6.09	93.91
1.19	155.52	22.22	28.31	71.69
0.59	172.40	24.63	52.93	47.07
0.3	136.74	19.53	72.47	27.53
0.149	145.89	20.84	93.31	6.69
0.074	36.83	5.26	98.57	1.43
Pan	10	1.43	-	-
รวม	700	100.00		

Sieve Analysis

ตัวอย่าง 1,2,3



รูป ข.7 แสดงการวิเคราะห์ขนาดของทรายตัวอย่างที่ใช้เป็นวัสดุท้องน้ำ (bed material)

ภาคผนวก ค.

ผลการทดลอง

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน แบ่งกรณีศึกษาเป็น 3 แบบ คือ การกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอก (cylindrical piers) สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะน้ำใส (clear water) การกัดเซาะรอบตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunt-nosed piers) ที่มีมุมปะทะต่าง ๆ และการกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอก สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ข้อมูลต่าง ๆ ที่เก็บรวบรวมในการทดลอง ได้แก่

- (1) ความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s)
- (2) ความลึกน้ำ (y)
- (3) อุณหภูมิน้ำ (T_w)
- (4) ความเร็วเฉลี่ยการไหล
- (5) เวลาที่เกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล (t_e)
- (6) ลักษณะของหลุมกัดเซาะโดยแสดงเป็นเส้นชั้นความสูง (contour)
- (7) ปริมาณตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอย สำหรับการศึกษในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

ค.1 การกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอก (cylindrical piers) สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะน้ำใส (clear water scour)

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอก ใช้แบบจำลองตอม่อ 3 ขนาด คือ ตอม่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 5.0 และ 7.5 เซนติเมตร ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลและความลาดเอียงท้องน้ำ เพื่อหาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลกับค่าตัวแปรต่าง ๆ ข้อมูลต่าง ๆ ดังตาราง ค-1 และรูป ค.1 ถึง ค.3 และ รูป ค.17 ถึง ค.19

ค.2 การกัดเซาะรอบตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunt-nosed piers) สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะน้ำใส (clear water scour)

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมนใช้แบบจำลองตอม่อ 3 ขนาด ได้แก่ ตอม่อขนาดความกว้างต่อความยาว (b/l) 2.0/7.5 2.5/12.5 และ 5.0/15.0 ที่มีมุมปะทะ

กับทิศทางการไหล 0 30 และ 60 องศา ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล และความลาดเอียงท้องน้ำเช่นเดียวกับการกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอก ข้อมูลทั้งหมดดังตาราง ค-2 และรูป ค.4 ถึง ค.12 และรูป ค.20 ถึง รูป ค.28

ค.3 การกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอก ในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (live-bed scour)

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอก ใช้แบบจำลองตอม่อ 3 ขนาดเช่นเดียวกับการศึกษาในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะน้ำใส ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล ความลาดเอียงท้องน้ำ และอัตราการโรยทราย ข้อมูลทั้งหมด ดังตาราง ค-3 และรูป ค.13 ถึง ค.16 และรูป ค.29 ถึง ค.31

ตาราง ค-1 สรุปข้อมูลผลการทดลอง กรณีสภาวะน้ำใสสำหรับตอม่อรูปทรงกระบอก

Run No.	D (cm.)	y (cm)	Q (l/s)	T_w (°C)	v (cm/s)	t_e (min)	d_s at t_e (cm)	V (cm ³)
1	2.5	6.90	11.70	29.0	28.3	210	1.0	8.9
2	2.5	6.70	11.90	29.5	29.6	60	1.3	21.3
3	2.5	8.45	16.00	29.5	31.6	30	1.9	52.5
4	2.5	12.30	21.00	28.5	28.5	30	0.5	17.3
5	2.5	13.65	24.00	29.5	29.3	90	1.0	15.55
6	2.5	13.75	27.00	29.0	32.7	120	1.8	19.7
7	2.5	15.50	28.00	29.0	30.1	120	1.4	17.6
8	2.5	15.15	33.00	29.5	36.3	260	1.9	43.7
9	2.5	20.30	41.00	29.5	33.7	230	1.4	19.6
10	2.5	20.50	42.00	29.5	34.1	160	1.7	15.9
11	5.0	7.15	11.70	29.0	27.3	240	1.4	174.9
12	5.0	6.40	11.90	29.5	31.0	160	2.7	298.7
13	5.0	7.50	16.00	29.5	35.6	90	6.4	103.62
14	5.0	12.30	21.00	28.5	28.5	150	1.5	118.03
15	5.0	12.80	24.00	29.5	31.3	130	3.4	163.5
16	5.0	13.50	27.00	29.0	33.3	210	5.0	457.7
17	5.0	15.70	28.00	29.0	29.7	140	1.7	103.97
18	5.0	16.00	33.00	29.5	34.4	280	4.7	416.18
19	5.0	20.25	41.00	29.5	33.7	270	3.5	167.68
20	5.0	21.45	42.00	29.5	32.6	140	3.7	368.6
21	7.5	5.10	8.00	29.5	26.1	210	2.4	320.79
22	7.5	7.20	11.70	29.0	27.1	250	2.2	484.7
23	7.5	6.45	11.90	29.5	30.7	140	3.4	279.2
24	7.5	7.70	16.00	29.5	34.6	120	7.7	388.98
25	7.5	12.30	21.00	28.5	28.5	150	2.6	205.79
26	7.5	13.35	24.00	29.5	30.0	130	2.5	319.111
27	7.5	13.60	27.00	29.0	33.1	190	4.5	27.15
28	7.5	16.90	28.00	29.0	27.6	170	1.8	159.06
29	7.5	16.10	33.00	29.5	34.2	280	5.5	323.5
30	7.5	20.65	41.00	29.5	33.1	270	5.0	323.71
31	7.5	21.95	42.00	29.5	31.9	160	4.3	268.776

ตาราง ค-2 สรุปข้อมูลผลการทดลอง กรณีสภาวะน้ำใส สำหรับตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
ปลายมนที่มุมปะทะต่าง ๆ

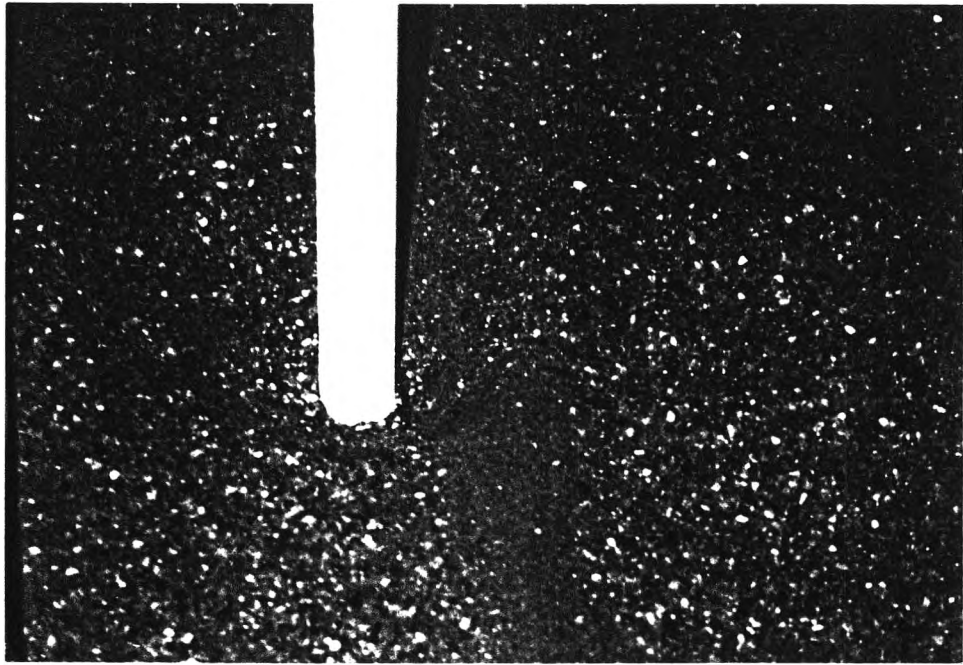
Run No.	b (cm.)	b/l	θ	y (cm)	Q (l/s)	T_w ($^{\circ}$ C)	v (cm/s)	t_e (min)	d_s at t_e (cm)	V (cm ³)
32	2	2.0/7.5	0	7.50	14.0	29.5	31.1	120	1.5	7.5
33	2	2.0/7.5	0	7.15	15.0	29.7	35.0	90	1.5	11.24
34	2	2.0/7.5	0	8.70	17.0	29.0	32.6	140	1.7	6
35	2	2.0/7.5	0	10.70	21.0	29.5	32.7	130	1.4	18.83
36	2	2.0/7.5	0	14.10	30.0	29.0	35.5	160	2.0	12.52
37	2	2.0/7.5	0	14.95	32.0	29.0	35.7	120	1.4	12.65
38	2	2.0/7.5	0	16.60	34.0	29.5	34.1	150	1.6	14.18
39	2	2.0/7.5	0	18.75	37.0	29.5	32.9	120	1.1	4.26
40	2	2.0/7.5	0	17.40	40.0	29.0	38.3	140	1.6	6
41	2	2.0/7.5	0	20.90	46.0	29.5	36.7	90	1.7	15.9
42	2.5	2.5/12.5	0	8.05	14.0	29.5	29.0	120	1.1	11.1
43	2.5	2.5/12.5	0	8.40	15.0	29.7	29.8	30	1	11.24
44	2.5	2.5/12.5	0	9.05	17.0	29.0	31.3	120	1.5	16.77
45	2.5	2.5/12.5	0	11.50	21.0	29.5	30.4	90	1.6	8.397
46	2.5	2.5/12.5	0	15.15	30.0	29.0	33.0	140	2.1	14
47	2.5	2.5/12.5	0	15.90	32.0	29.0	33.5	120	1.5	12.2
48	2.5	2.5/12.5	0	17.35	34.0	29.5	32.7	120	2	22
49	2.5	2.5/12.5	0	18.75	37.0	29.5	32.9	90	1.2	10.966
50	2.5	2.5/12.5	0	18.15	40.0	29.0	36.7	120	1.7	20.9
51	2.5	2.5/12.5	0	21.65	46.0	29.5	35.4	120	1.2	17.95
52	5.0	5.0/15.0	0	7.50	14.0	29.5	31.1	90	2.8	25.3
53	5.0	5.0/15.0	0	7.65	15.0	29.7	32.7	120	2.9	21.18
54	5.0	5.0/15.0	0	8.65	17.0	29.0	32.8	90	2.7	33.85
55	5.0	5.0/15.0	0	10.90	21.0	29.5	32.1	120	2.8	21.97
56	5.0	5.0/15.0	0	15.20	30.0	29.0	32.9	140	3.1	30.48
57	5.0	5.0/15.0	0	15.10	32.0	29.0	35.3	140	3.4	32.9
58	5.0	5.0/15.0	0	17.00	34.0	29.5	33.3	130	2.8	26.18
59	5.0	5.0/15.0	0	18.75	37.0	29.5	32.9	150	2.7	37.79
60	5.0	5.0/15.0	0	17.20	40.0	29.0	38.8	160	4.4	34.35
61	5.0	5.0/15.0	0	21.90	46.0	29.5	35.0	120	2.8	20.6
62	2	2.0/7.5	30	7.90	11.0	29.5	23.2	120	0.8	19.8
63	2	2.0/7.5	30	10.70	17.0	29.5	26.5	120	1.2	17.13
64	2	2.0/7.5	30	12.60	21.0	29.5	27.9	130	1.5	15.83
65	2	2.0/7.5	30	13.20	22.0	29.0	27.8	170	1.6	19.63
66	2	2.0/7.5	30	15.70	25.0	29.5	26.6	120	1.3	13.12
67	2	2.0/7.5	30	16.70	29.0	29.0	28.9	120	1.7	35.1

ตาราง ค-2 (ต่อ) สรุปข้อมูลผลการทดลอง กรณีสภาวะน้ำใสสำหรับตอม่อรูปสี่เหลี่ยม
ผืนผ้าปลายมนที่มุมปะทะต่าง ๆ

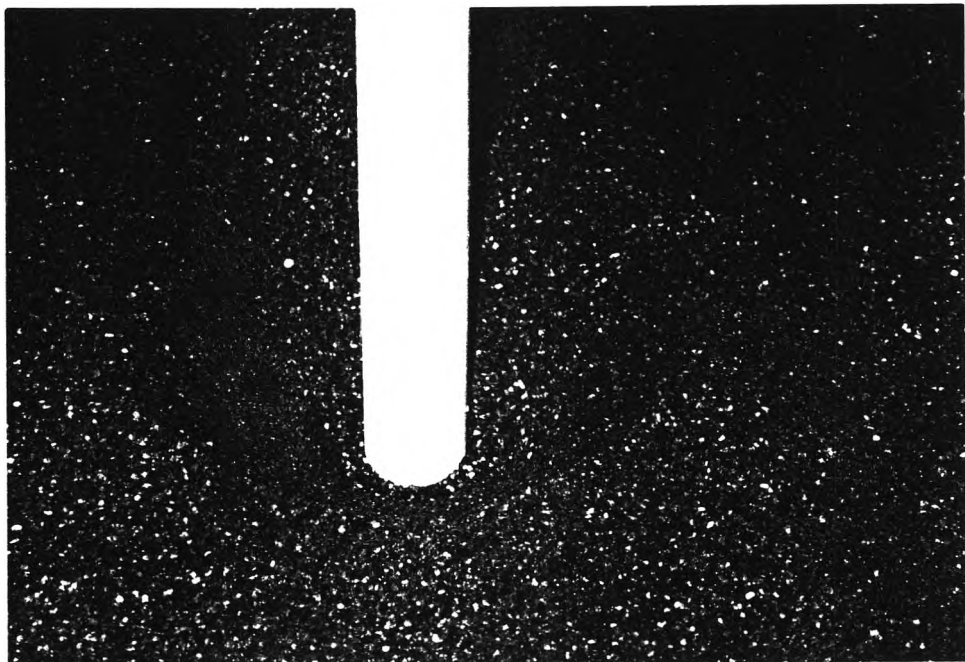
Run No.	b (cm.)	b/l	θ	y (cm)	Q (l/s)	T_w ($^{\circ}$ C)	v (cm/s)	t_e (min)	d_s at t_e (cm)	V (cm^3)
68	2	2.0/7.5	30	18.00	32.0	29.5	29.6	130	1.7	18.93
69	2	2.0/7.5	30	19.30	34.0	29.5	29.4	90	1.8	23.4
70	2	2.0/7.5	30	23.00	44.0	29.0	31.9	130	2.2	12.7
71	2	2.0/7.5	30	23.70	38.0	29.5	26.7	90	1.2	37.9
72	2.5	2.5/12.5	30	7.90	11.0	29.5	23.2	90	1.2	25.4
73	2.5	2.5/12.5	30	9.20	17.0	29.5	31.0	120	3.5	35.5
74	2.5	2.5/12.5	30	13.10	21.0	29.5	26.8	130	2.7	13.78
75	2.5	2.5/12.5	30	11.50	22.0	29.0	32.0	160	3.6	28.42
76	2.5	2.5/12.5	30	16.00	25.0	29.5	26.0	130	1.9	32.79
77	2.5	2.5/12.5	30	17.30	29.0	29.0	28.0	120	2.5	26.13
78	2.5	2.5/12.5	30	18.30	32.0	29.5	29.2	120	2.9	51.73
79	2.5	2.5/12.5	30	19.60	34.0	29.5	29.0	140	3.0	37.4
80	2.5	2.5/12.5	30	23.80	38.0	29.0	26.7	140	1.7	17.2
81	2.5	2.5/12.5	30	22.40	44.0	29.5	32.8	90	3.6	19.6
82	5.0	5.0/15.0	30	7.40	11.0	29.5	24.8	90	1.9	14.4
83	5.0	5.0/15.0	30	9.80	17.0	29.5	28.9	120	3.6	20.135
84	5.0	5.0/15.0	30	13.20	21.0	29.5	26.5	130	3.2	33.1
85	5.0	5.0/15.0	30	11.80	22.0	29.0	31.2	160	4.1	30.96
86	5.0	5.0/15.0	30	15.50	25.0	29.5	26.9	140	3.0	29.93
87	5.0	5.0/15.0	30	16.80	29.0	29.0	28.9	130	3.7	39.3
88	5.0	5.0/15.0	30	17.10	32.0	29.5	31.3	130	4.0	22.1
89	5.0	5.0/15.0	30	18.50	34.0	29.5	30.7	140	4.5	23.5
90	5.0	5.0/15.0	30	22.60	38.0	29.0	28.0	150	3.2	28.31
91	5.0	5.0/15.0	30	20.90	44.0	29.5	35.2	90	5.7	44.6
92	2	2.0/7.5	60	7.30	15.0	29.5	34.5	60	4.8	294.8
93	2	2.0/7.5	60	10.30	23.0	29.5	37.2	60	6.8	416.5
94	2	2.0/7.5	60	14.70	33.0	30.0	37.4	90	7.5	243.1
95	2	2.0/7.5	60	17.80	42.0	29.5	39.3	130	9.7	270.4
96	2	2.0/7.5	60	17.70	37.0	29.5	34.9	90	8.2	492
97	2.5	2.5/12.5	60	9.00	15.0	29.5	27.9	90	5.6	248.2
98	2.5	2.5/12.5	60	13.20	23.0	29.5	29.0	90	8.8	155.2
99	2.5	2.5/12.5	60	16.70	33.0	30.0	32.9	120	11.5	92.747
100	2.5	2.5/12.5	60	18.10	42.0	29.5	38.7	120	14.5	149.414
101	2.5	2.5/12.5	60	19.00	37.0	29.5	32.5	120	11.7	99.413
102	5.0	5.0/15.0	60	9.00	15.0	29.5	27.9	60	5.5	275.867
103	5.0	5.0/15.0	60	12.60	23.0	29.5	30.5	90	9.3	378.645
104	5.0	5.0/15.0	60	16.30	33.0	30.0	33.7	90	11.7	157.859
105	5.0	5.0/15.0	60	17.80	42.0	29.5	39.4	130	16.0	285.305
106	5.0	5.0/15.0	60	19.20	37.0	29.5	32.1	130	13.7	79.839

ตาราง ค-3 สรุปข้อมูลผลการทดลอง กรณีสภาวะการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของ
ตะกอนท้องน้ำ สำหรับต่อม่อรูปทรงกระบอก

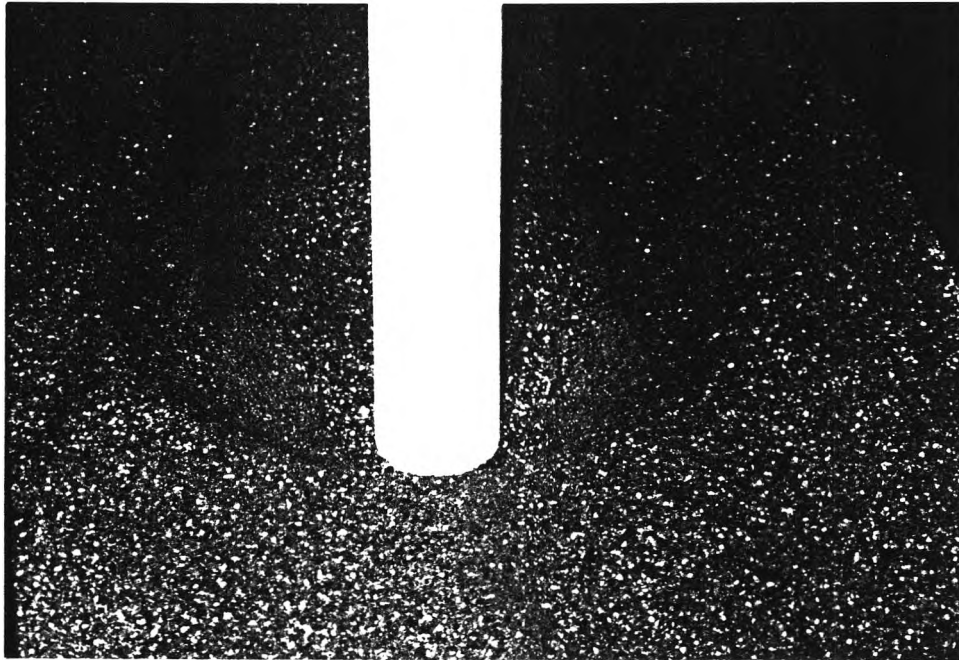
Run No.	D (cm.)	y (cm.)	Q (l/s)	T _w (°C)	v (cm/s)	Slope (m/m)	Q _{sus} (%)	d _s at t _e (cm.)
107	2.5	10.23	34	29.0	55.39	0.0014	14	2.9
108	2.5	10.94	37	29.0	56.37	0.0014	14	3.0
109	2.5	11.56	40	29.0	57.67	0.0014	14	4.0
110	2.5	9.31	34	29.5	60.87	0.0018	14	2.3
111	2.5	10.5	37	29.5	58.73	0.0018	14	2.0
112	2.5	11.46	40	29.5	58.17	0.0018	14	2.5
113	2.5	13.34	48	29.5	59.97	0.0018	15	2.0
114	2.5	9.99	37	29.8	61.73	0.0022	14	2.0
115	2.5	10.08	40	30.0	66.14	0.0022	15	1.3
116	2.5	12.03	48	30.0	66.50	0.0022	16	1.5
117	2.5	9.81	48	30.0	81.55	0.0080	30	1.7
118	2.5	11.96	48	30.5	66.89	0.0040	21	3.6
119	2.5	11.03	48	32.0	72.53	0.0050	25	3.0
120	5	10.27	34	29.0	55.18	0.0014	14	6.3
121	5	12.01	37	29.0	51.35	0.0014	14	6.3
122	5	12.84	40	29.0	51.92	0.0014	14	6.3
123	5	9.93	34	29.5	57.07	0.0018	14	5.5
124	5	10.40	37	29.5	59.29	0.0018	14	5.0
125	5	12.26	40	29.5	54.38	0.0018	14	5.6
126	5	14.56	48	29.5	54.95	0.0018	15	6.0
127	5	12.13	37	29.8	50.84	0.0022	14	4.6
128	5	10.15	40	30.0	65.68	0.0022	15	4.5
129	5	12.64	48	30.0	63.29	0.0022	16	5.5
130	5	9.67	48	30.0	82.73	0.0080	30	4.0
131	5	11.89	48	30.5	67.28	0.0040	21	6.3
132	5	11.19	48	32.0	71.49	0.0050	25	6.0
133	7.5	11.08	34	29.0	51.14	0.0014	14	9.6
134	7.5	11.56	37	29.0	53.34	0.0014	14	10.0
135	7.5	11.79	40	29.0	56.55	0.0014	14	8.7
136	7.5	10.83	34	29.5	52.32	0.0018	14	8.9
137	7.5	12.86	37	29.5	47.95	0.0018	14	8.0
138	7.5	12.38	40	29.5	53.85	0.0018	14	8.0
139	7.5	15.00	48	29.5	53.33	0.0018	15	10.0
140	7.5	11.81	37	29.8	52.22	0.0022	14	8.0
141	7.5	11.18	40	30.0	59.63	0.0022	15	8.3
142	7.5	14.13	48	30.0	56.62	0.0022	16	8.4
143	7.5	9.76	48	30.0	81.97	0.0080	30	7.2
144	7.5	11.79	48	30.5	67.85	0.0040	21	9.3
145	7.5	11.13	48	32.0	71.88	0.0050	25	7.0



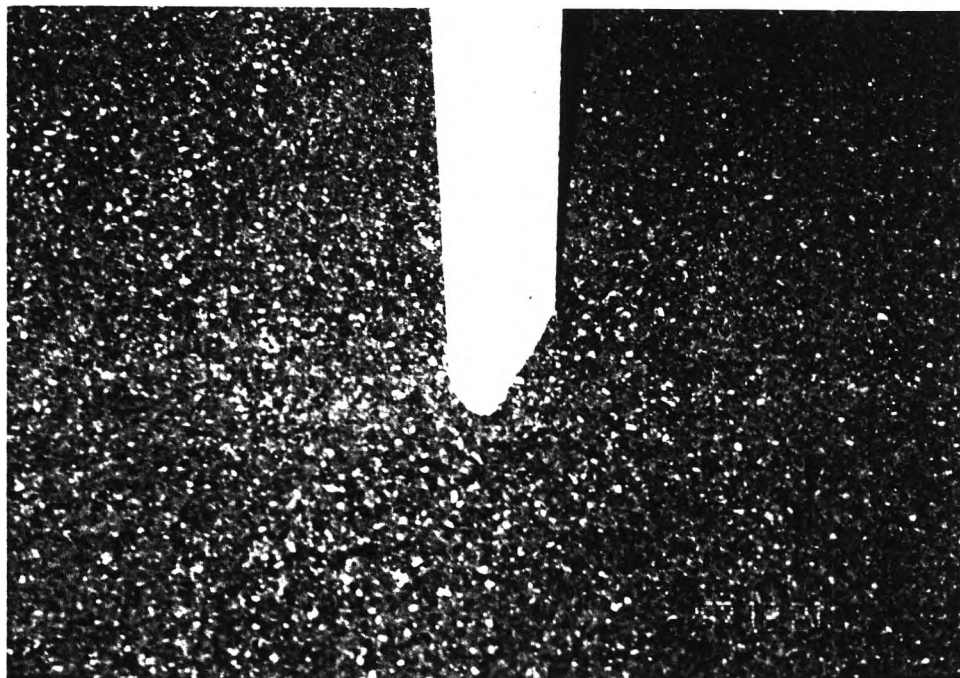
รูป ค.1 หลุมกัดเซาะต่อม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



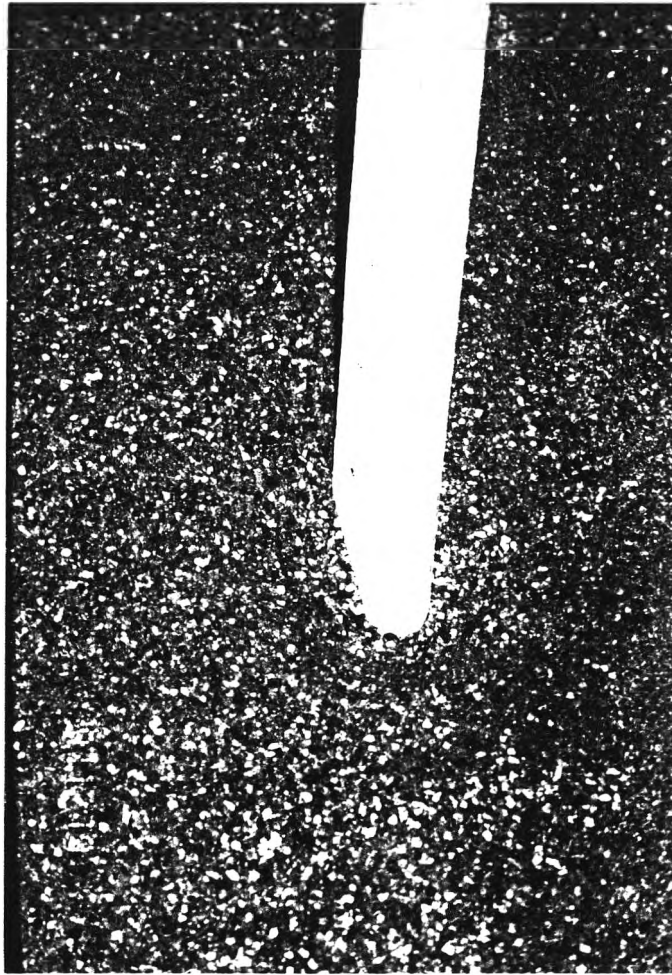
รูป ค.2 หลุมกัดเซาะต่อม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.0 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



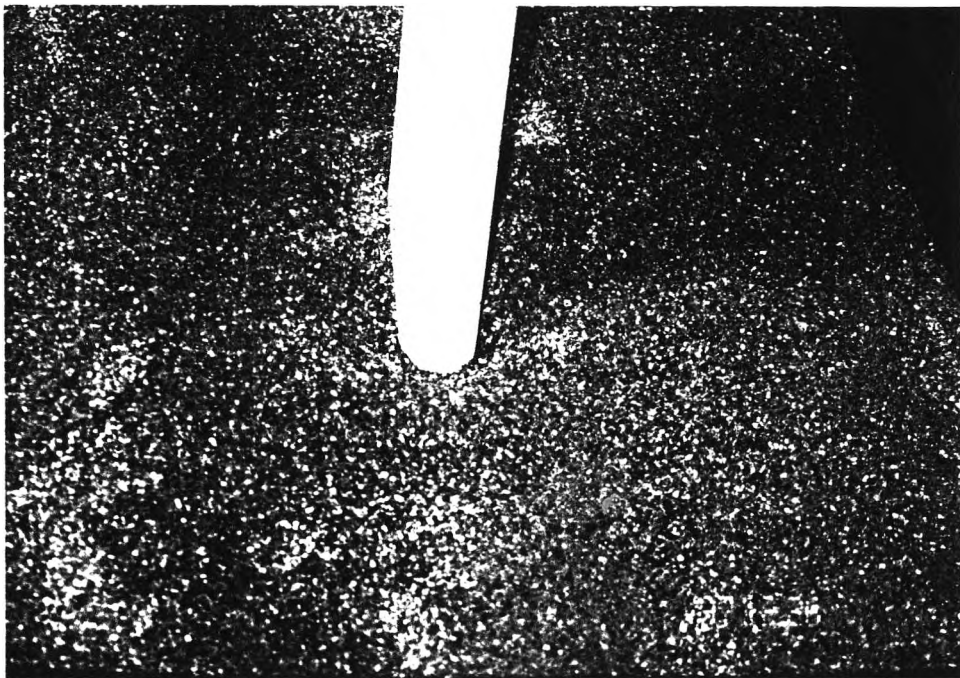
รูป ค.3 หลุมกัดเซาะต่อม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



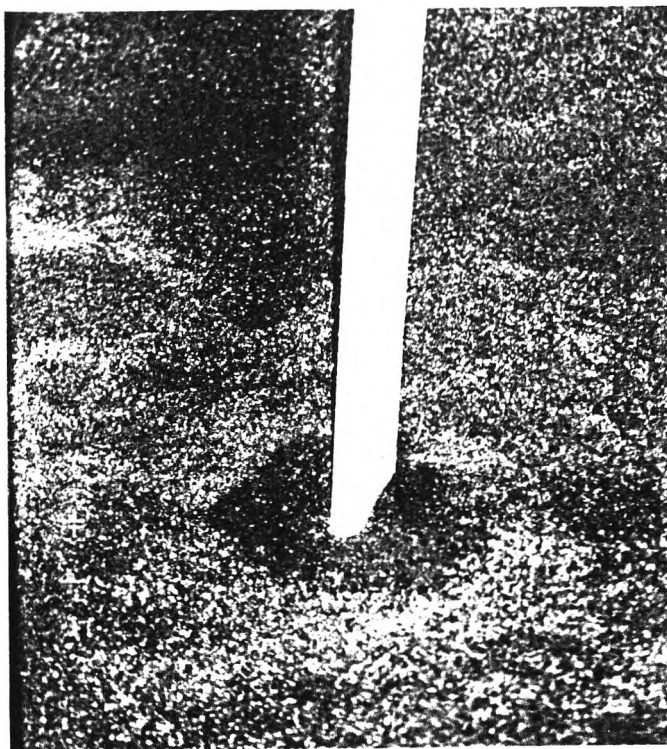
รูป ค.4 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier ขนาด 2.0/7.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



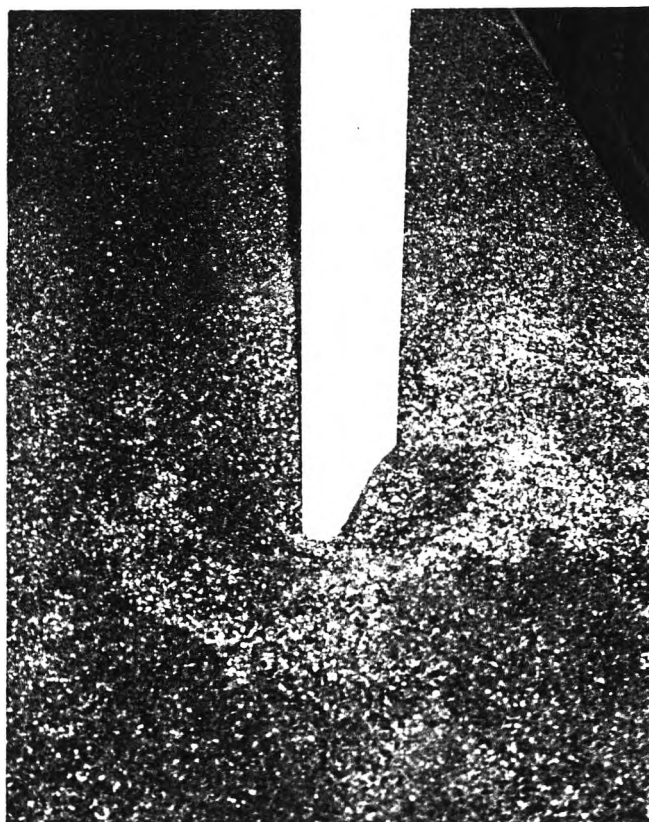
รูป ค.5 หลุมกััดเซาะ Blunt-nosed pier ขนาด 2.5/12.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



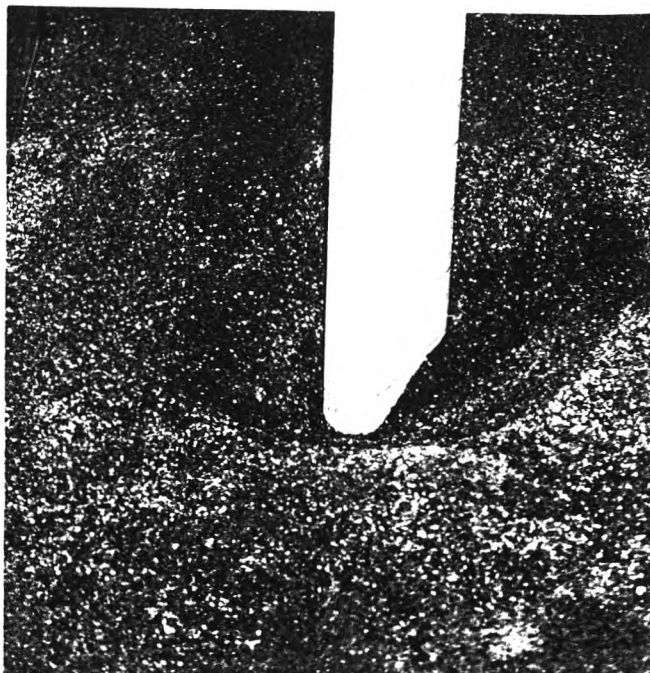
รูป ค.6 หลุมกััดเซาะ Blunt-nosed pier ขนาด 5.0/15.0 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



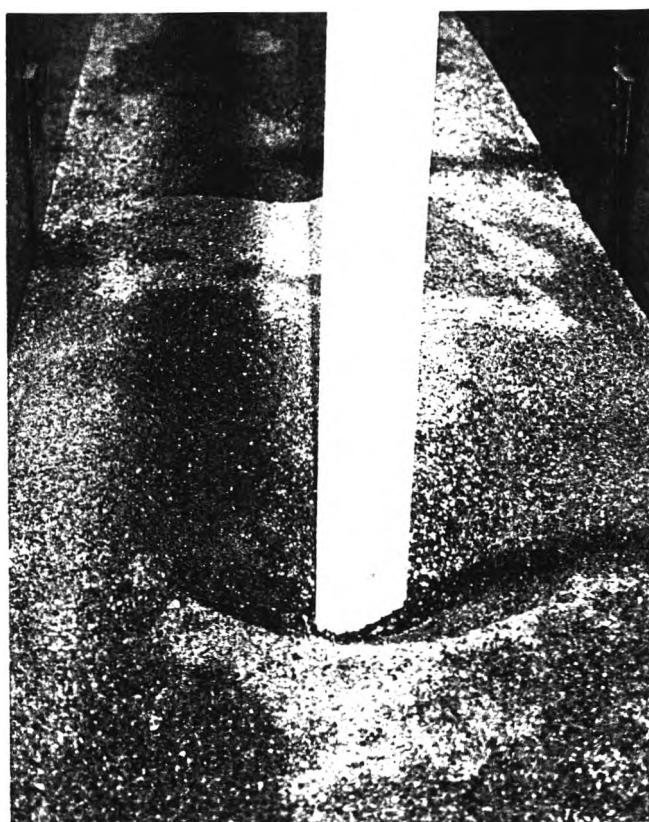
รูป ค.7 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 30 degree ขนาด 2.0/7.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



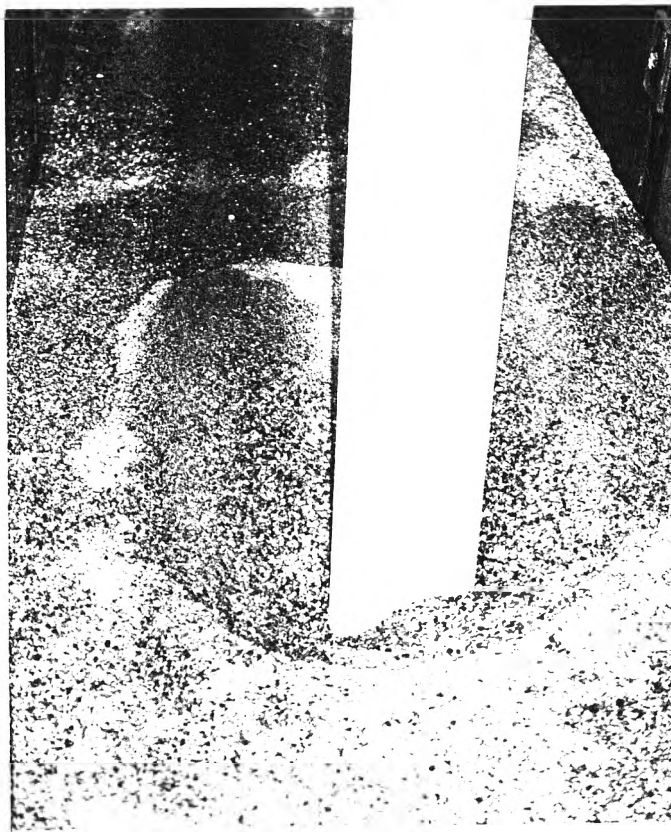
รูป ค.8 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 30 degree ขนาด 2.5/12.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



รูป ค.9 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 30 degree ขนาด 5.0/15.0 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



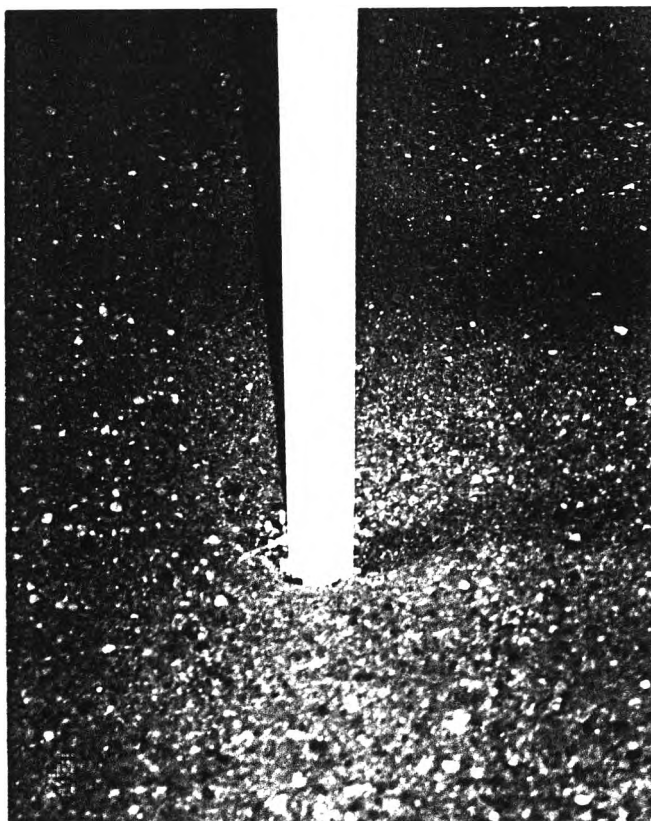
รูป ค.10 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 60 degree ขนาด 2.0/7.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



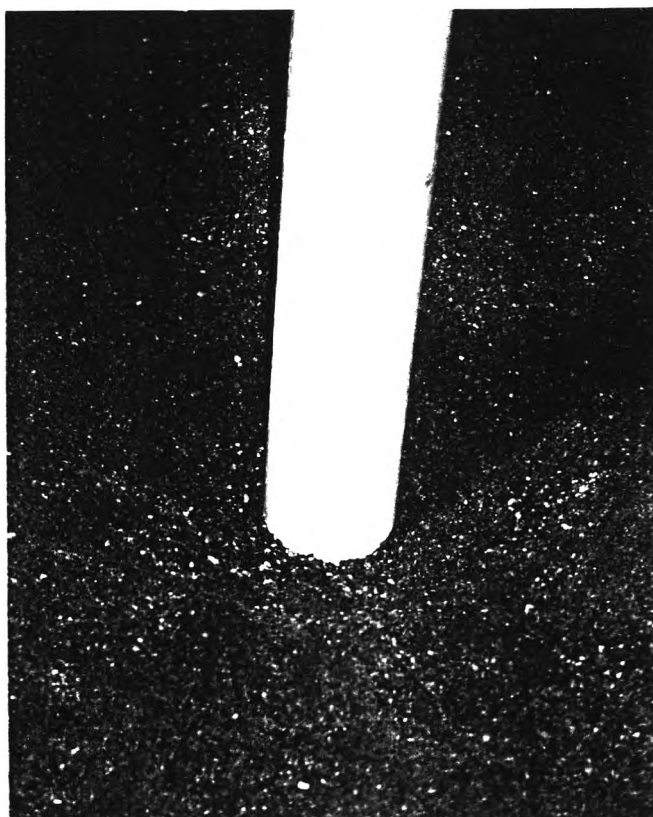
รูป ค.11 หลุมกััดเซาะ Blunt-nosed pier 60 degree ขนาด 2.5/12.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



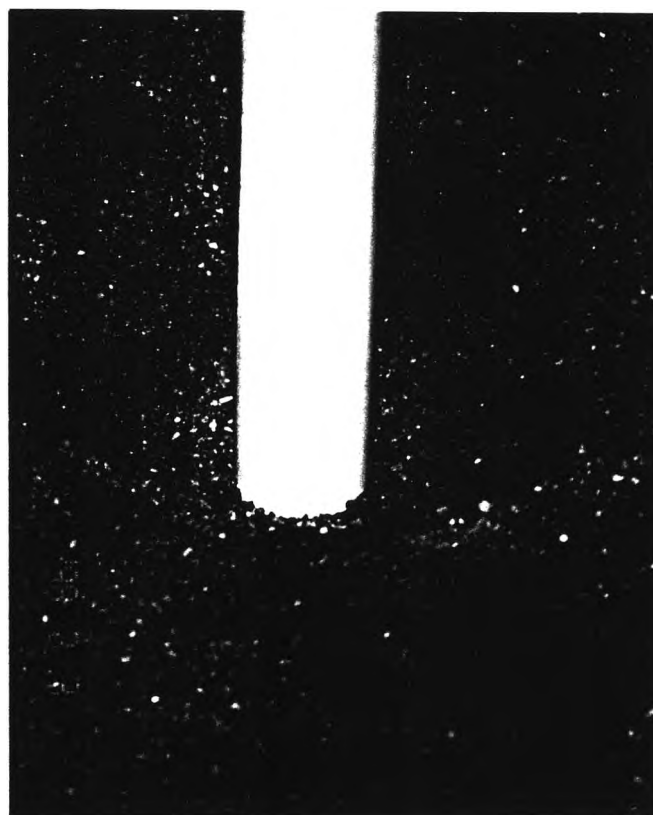
รูป ค.12 หลุมกััดเซาะ Blunt-nosed pier 60 degree ขนาด 5.0/15.0 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



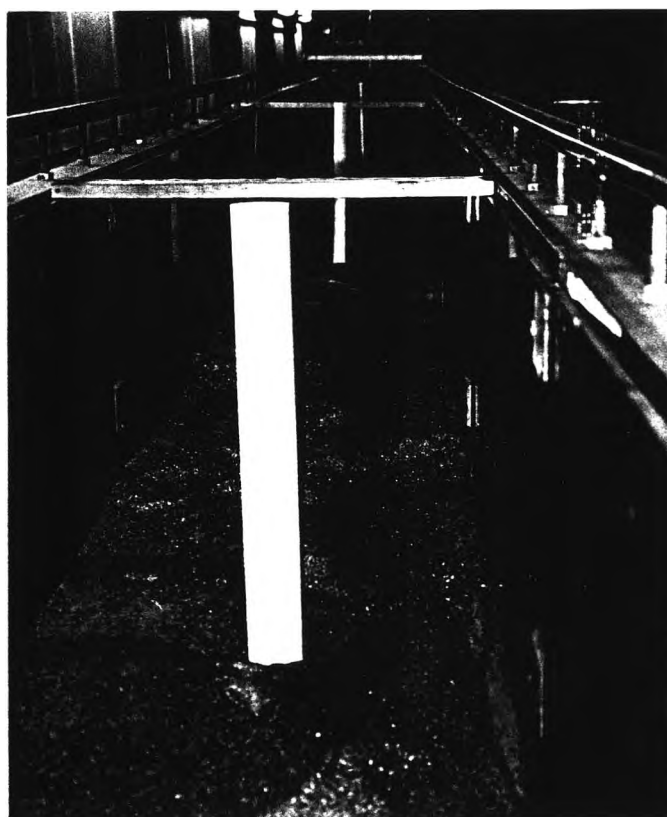
รูป ค.13 หลุมกัดเซาะต่อม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Live-bed scour



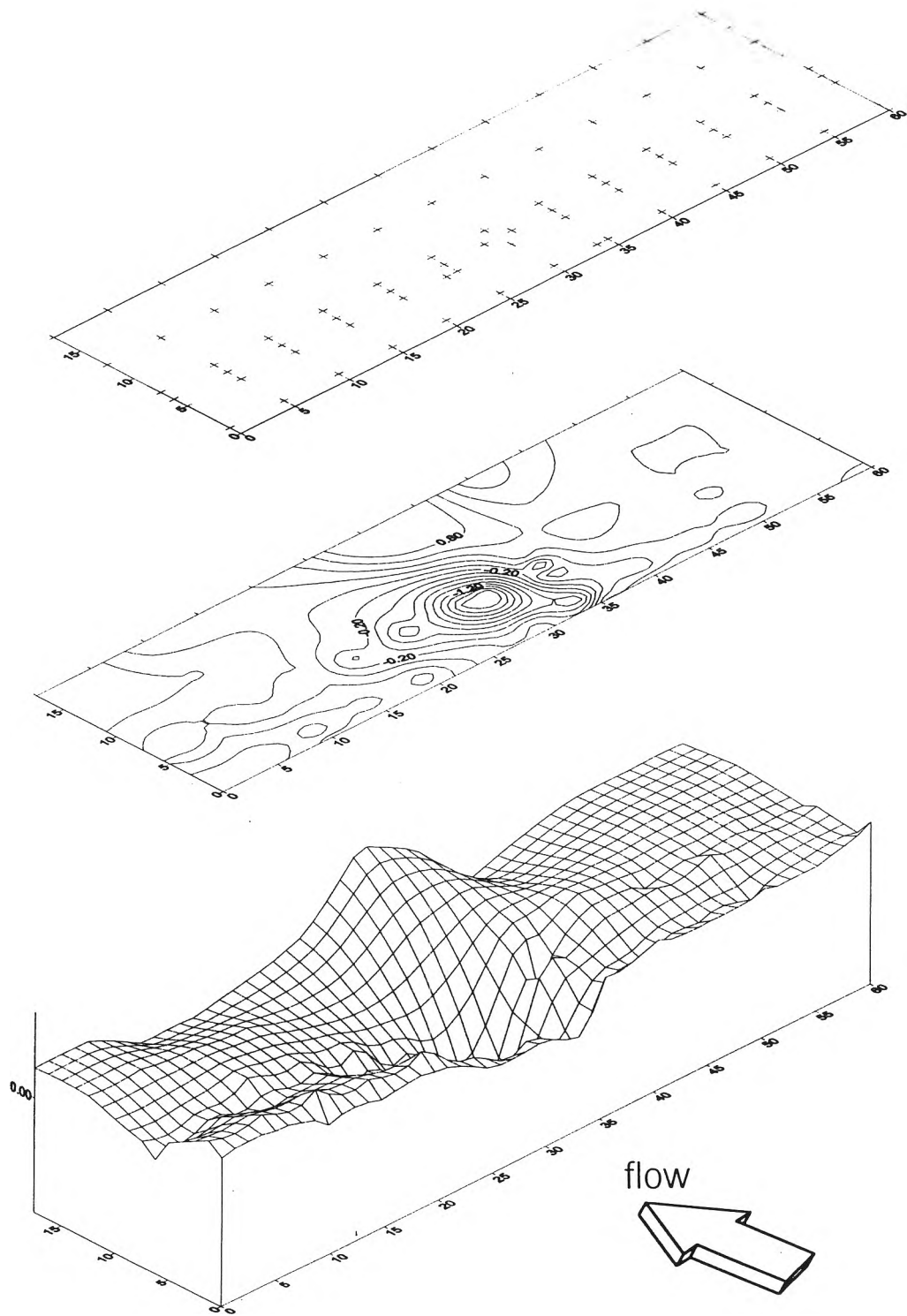
รูป ค.14 หลุมกัดเซาะต่อม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.0 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Live-bed scour



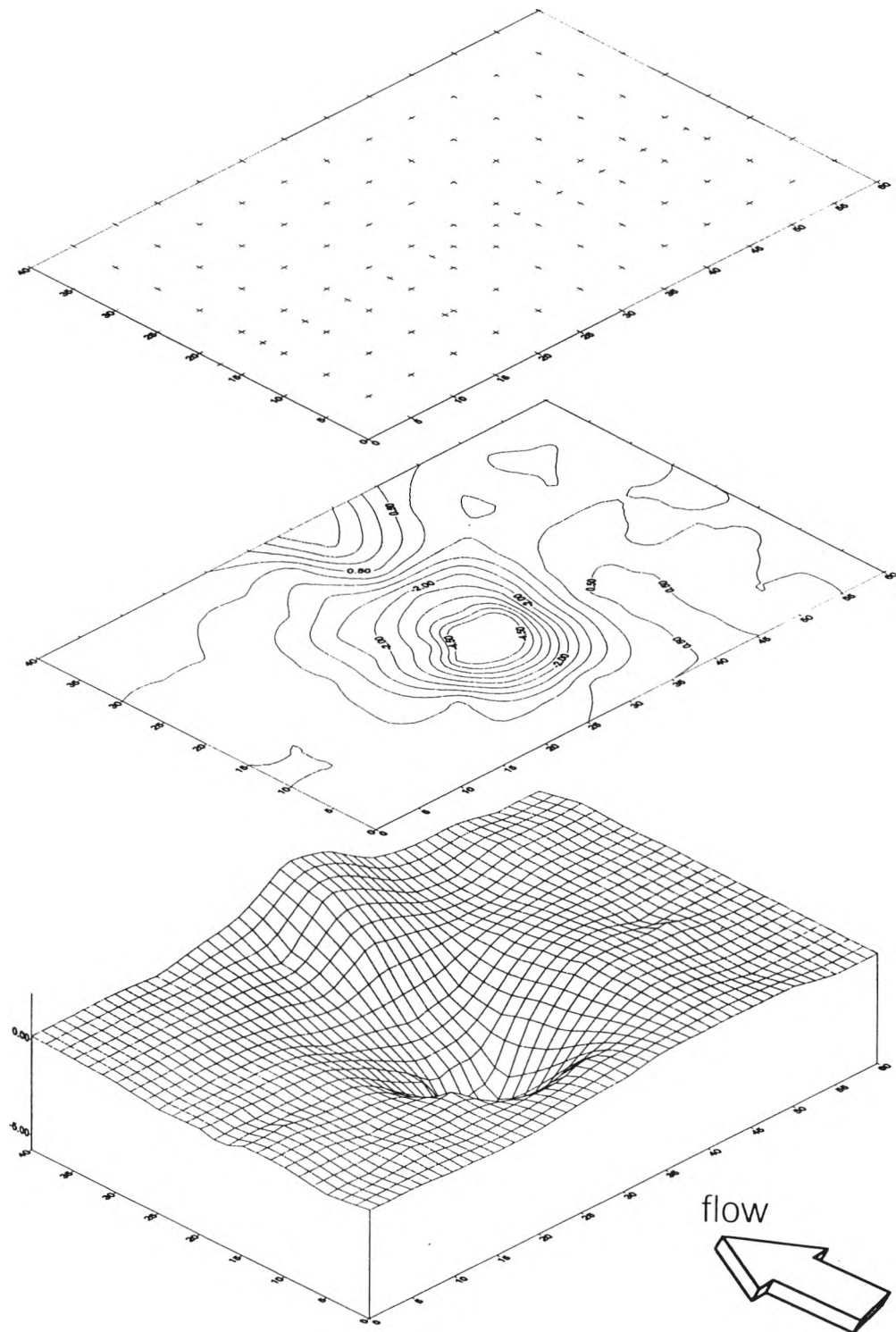
รูป ค.15 หลุมกัดเซาะต่อม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Live-bed scour



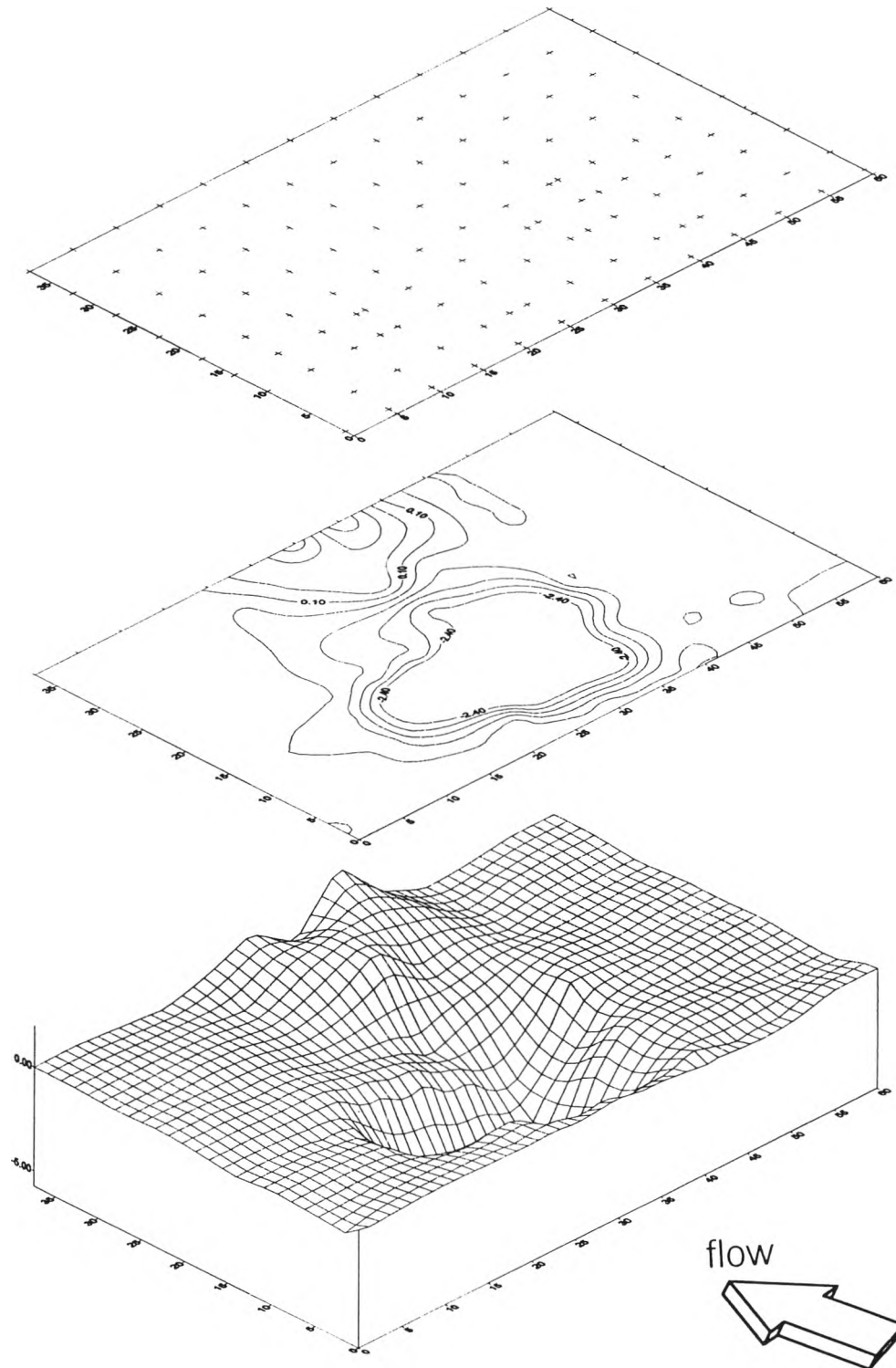
รูป ค.16 สภาพท้องน้ำของสภาวะเงื่อนไข Live-bed scour



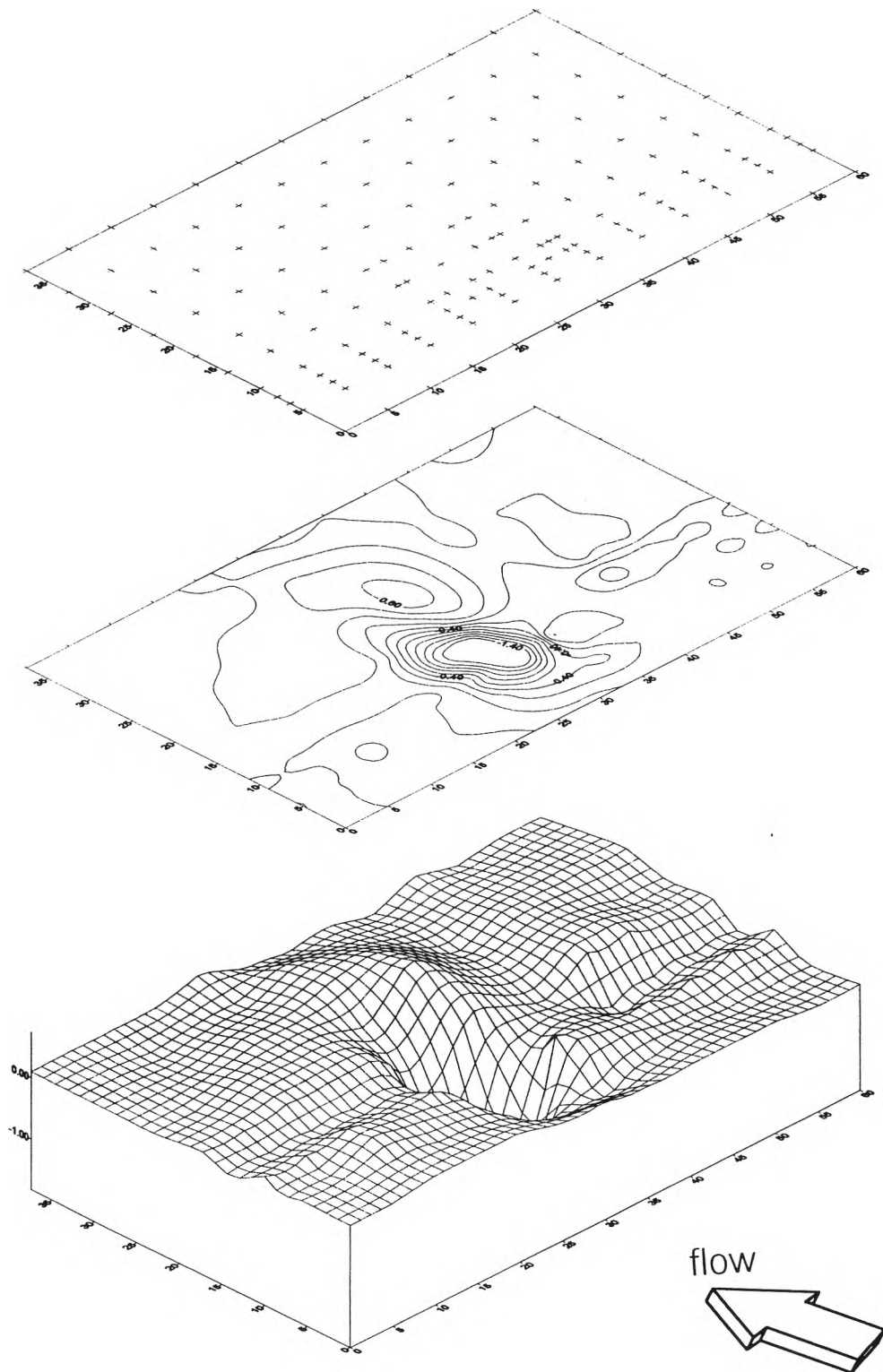
รูป ค.17 หลุมกัดเซาะตอม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม.
 สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



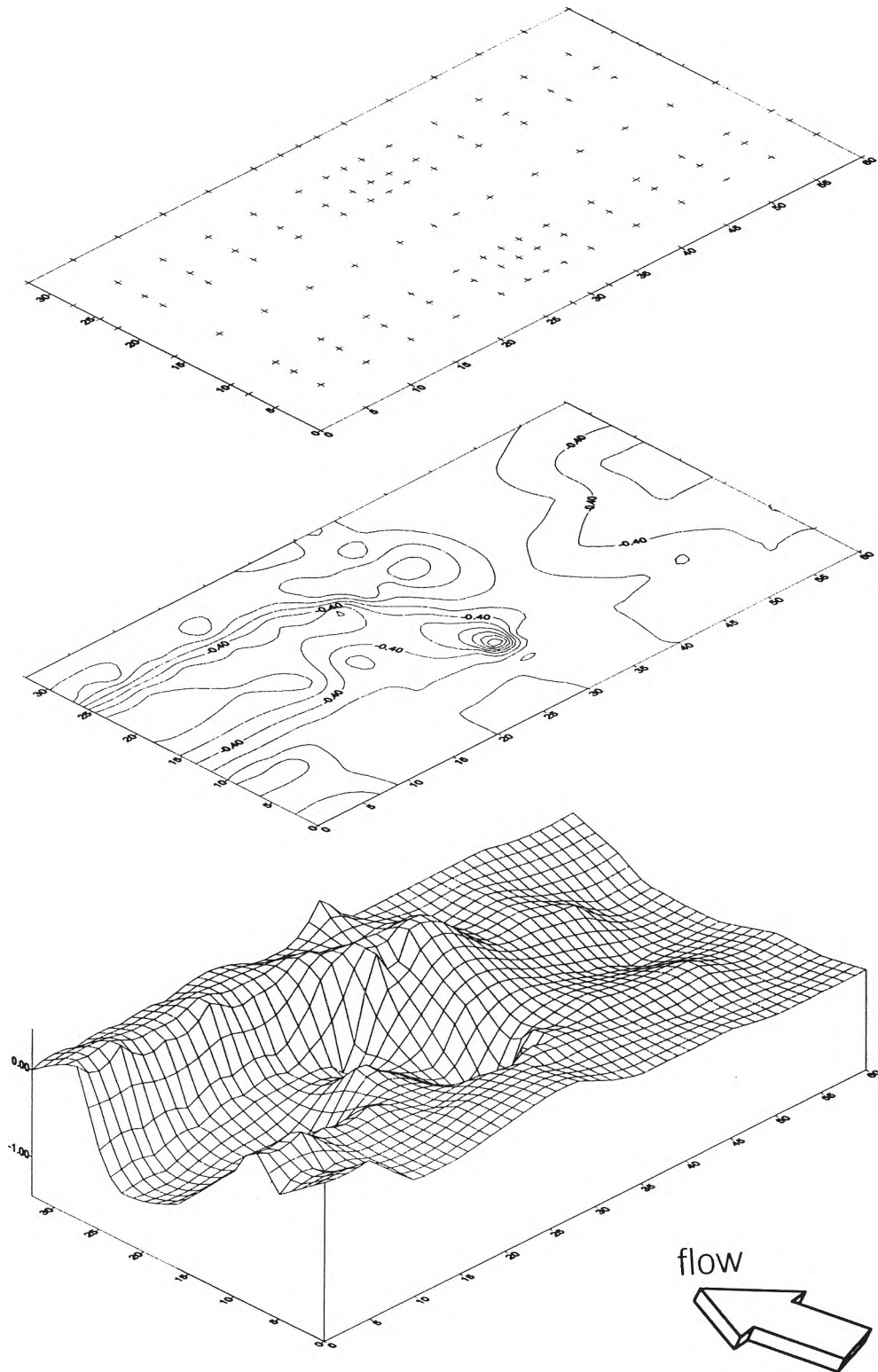
รูป ค.18 หลุมกัดเซาะตอม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.0 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



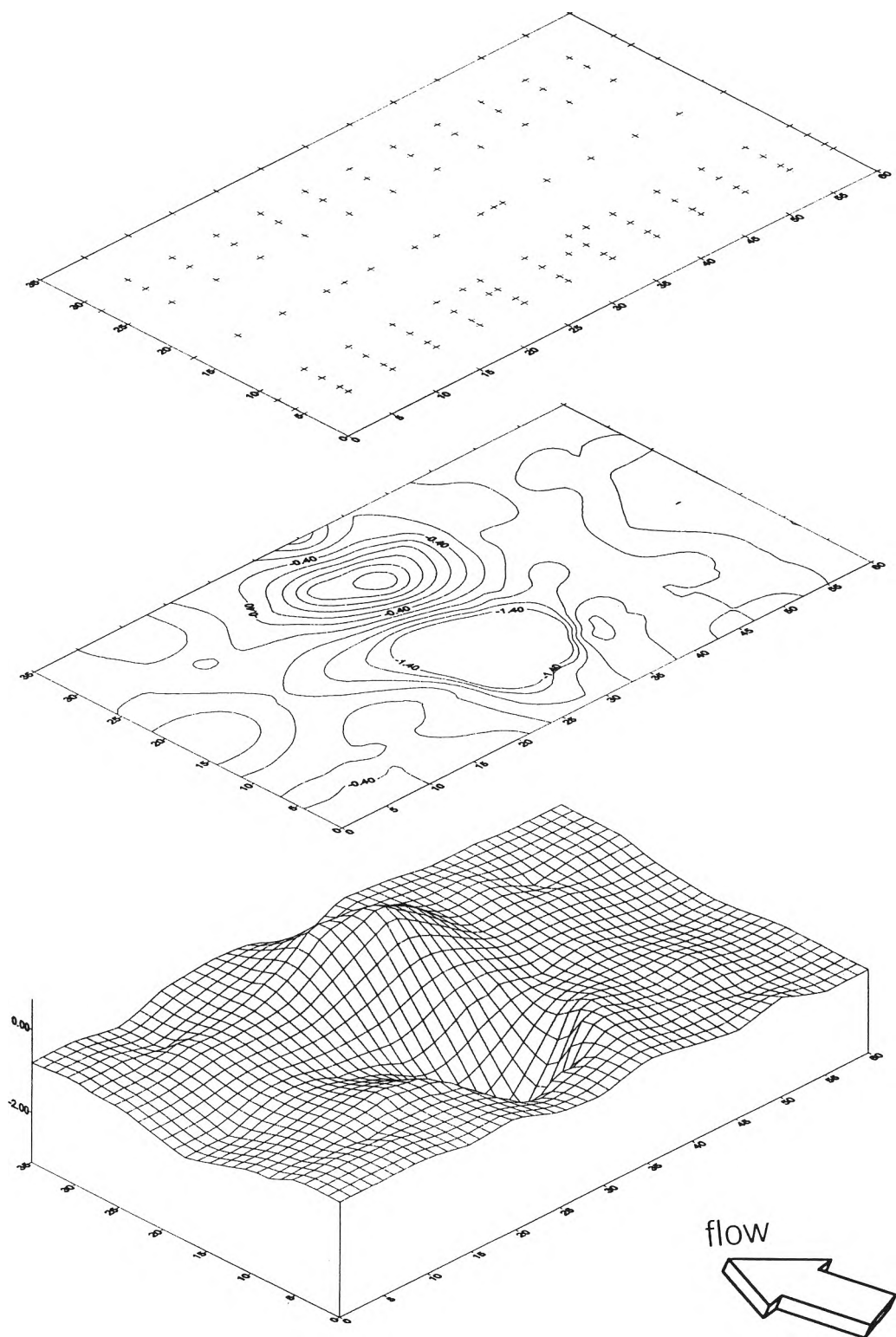
รูป ค.19 หลุมกัดเซาะตอม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



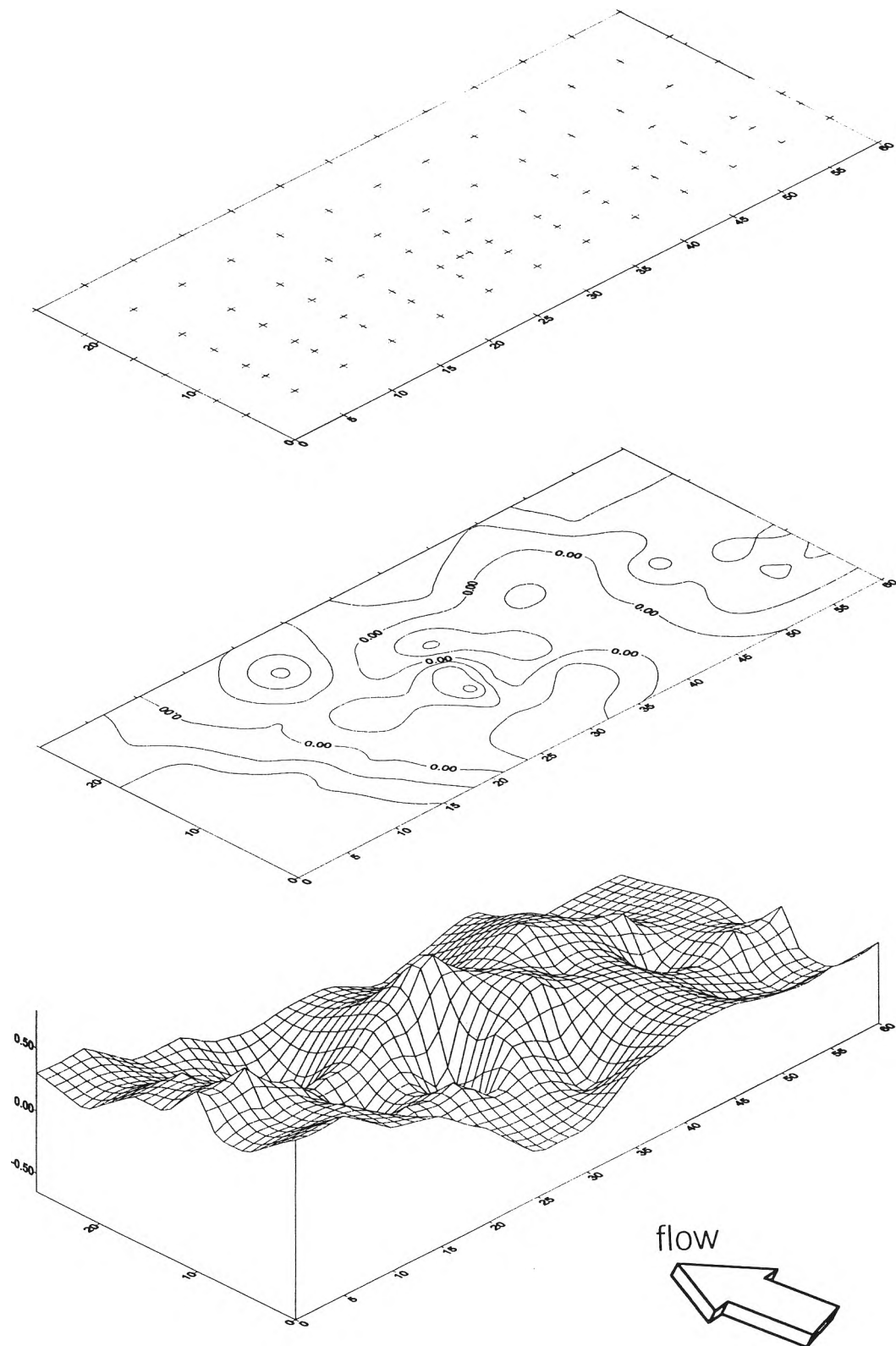
รูป ค.20 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier ขนาด 2.0/7.5 ซม.
 สภาวะเงื่อนไข Clear water scour มุมปะทะ 0 องศา



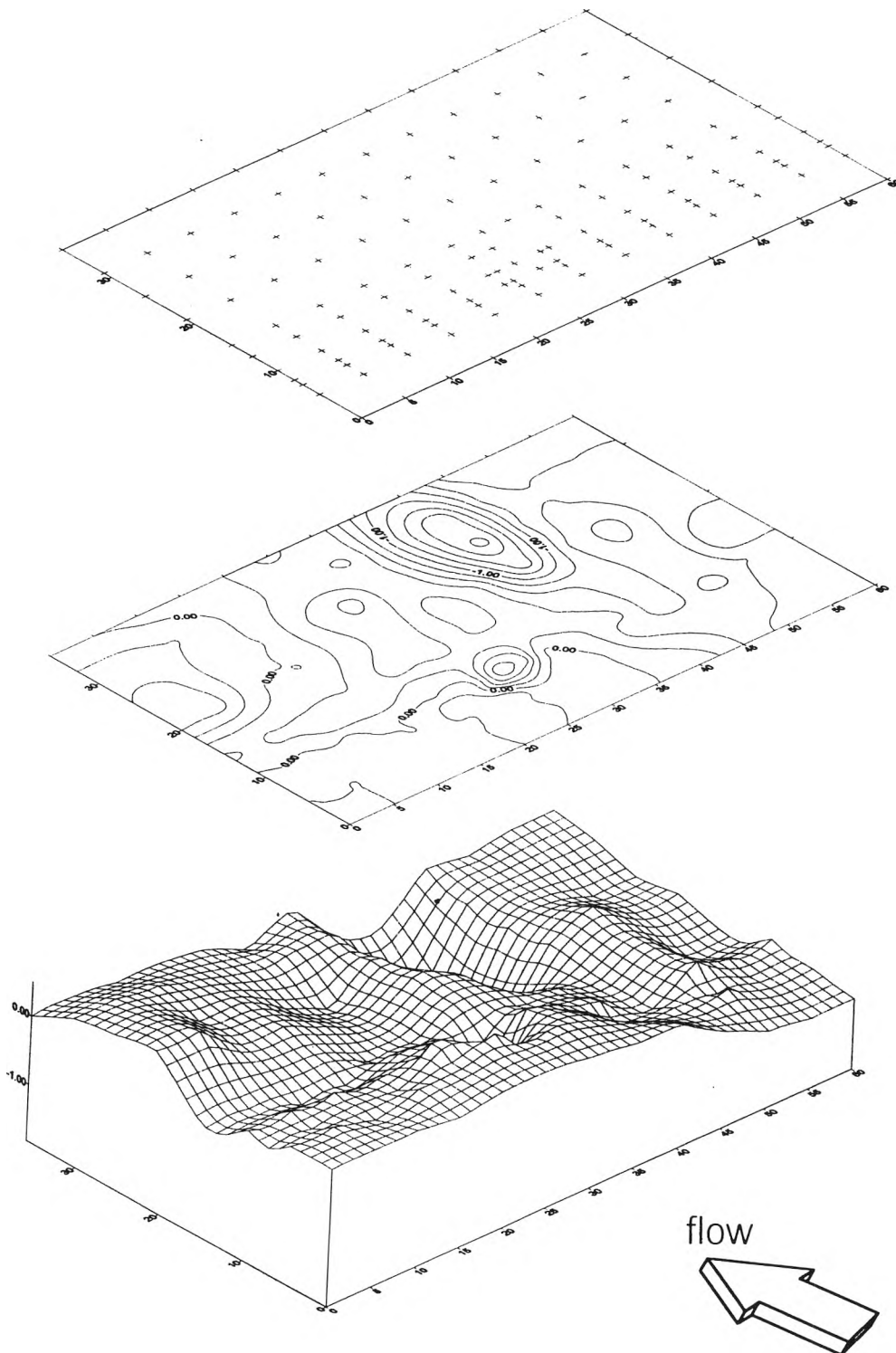
รูป ค.21 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier ขนาด 2.5/12.5 ซม.
 สภาวะเงื่อนไข Clear water scour มุมปะทะ 0 องศา



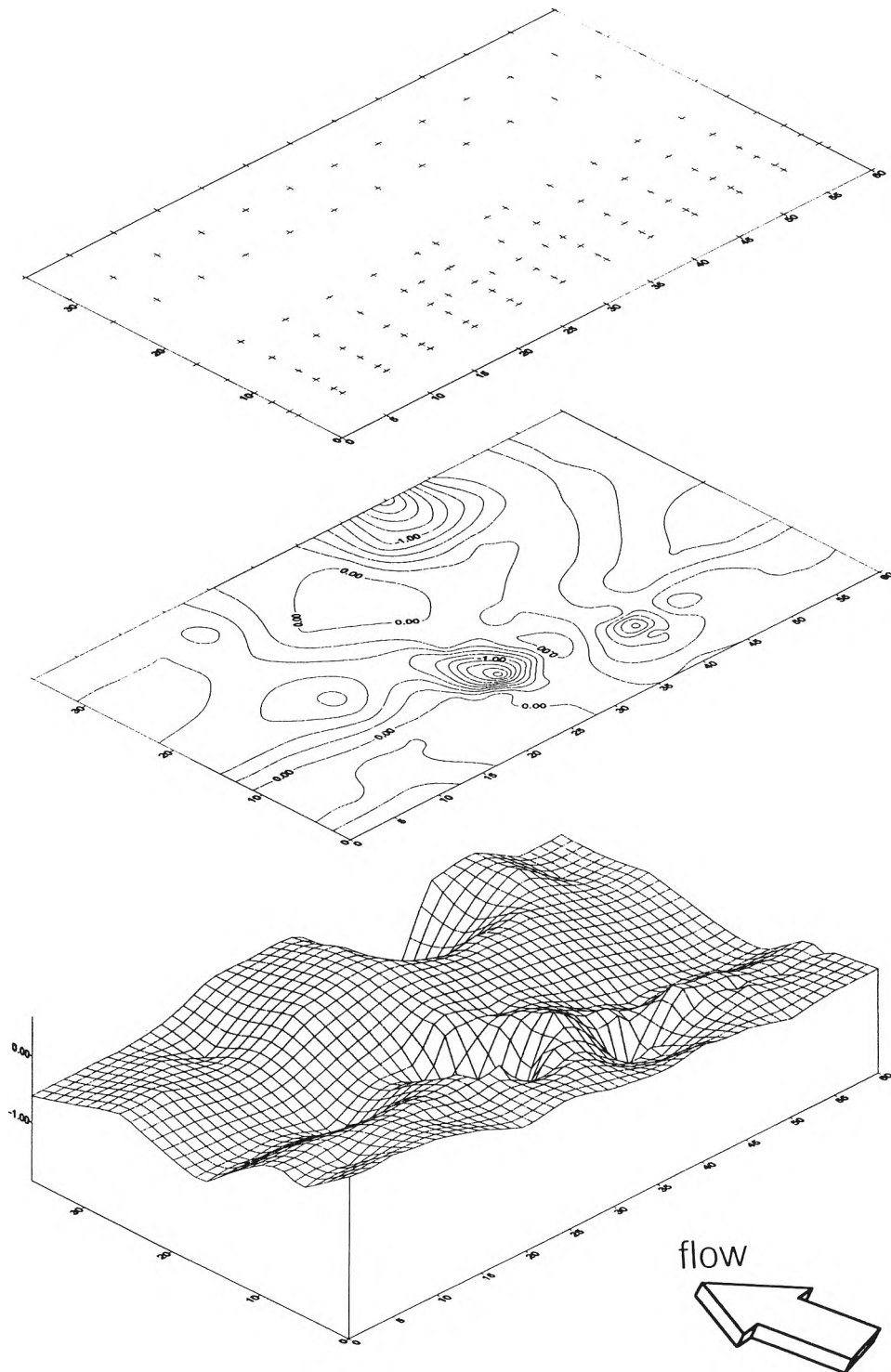
รูป ค.22 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier ขนาด 5.0/15.0 ซม.
 สภาวะเงื่อนไข Clear water scour มุมปะทะ 0 องศา



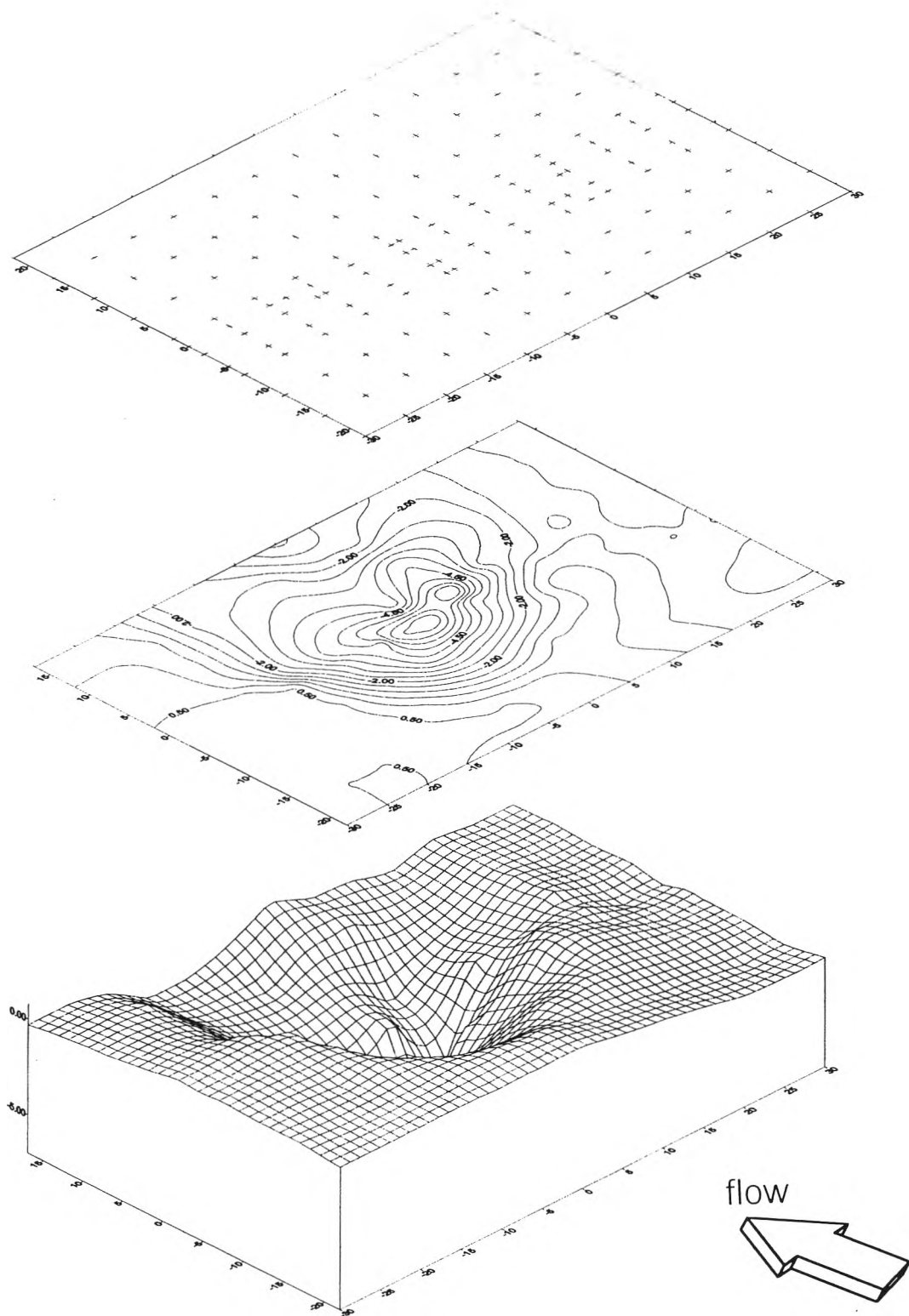
รูป ค.23 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 30 degree ขนาด 2.0/7.5 ซม.
 สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



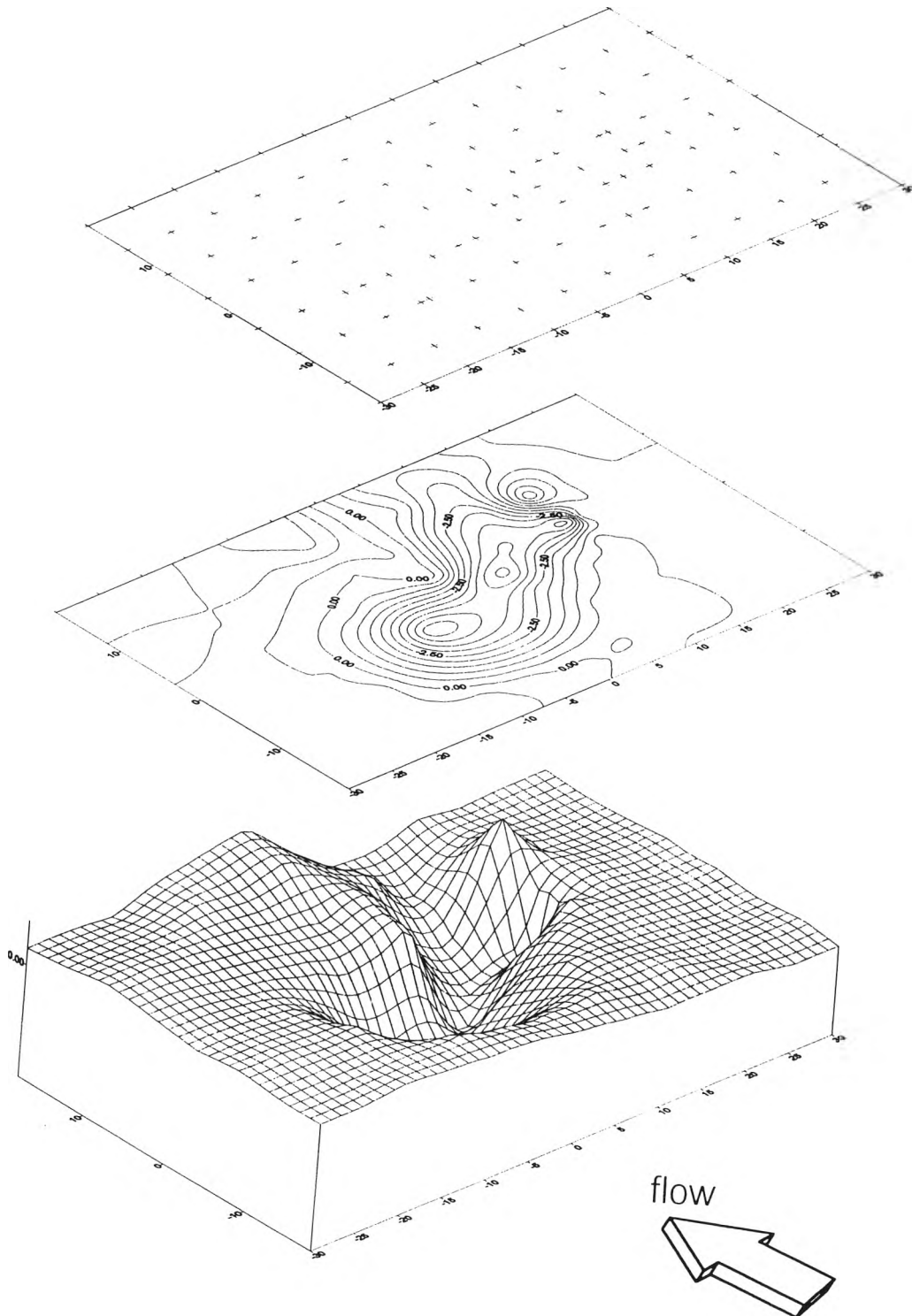
รูป ค.24 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 30 degree ขนาด 2.5/12.5 ซม.
สถานะเงื่อนไข Clear water scour



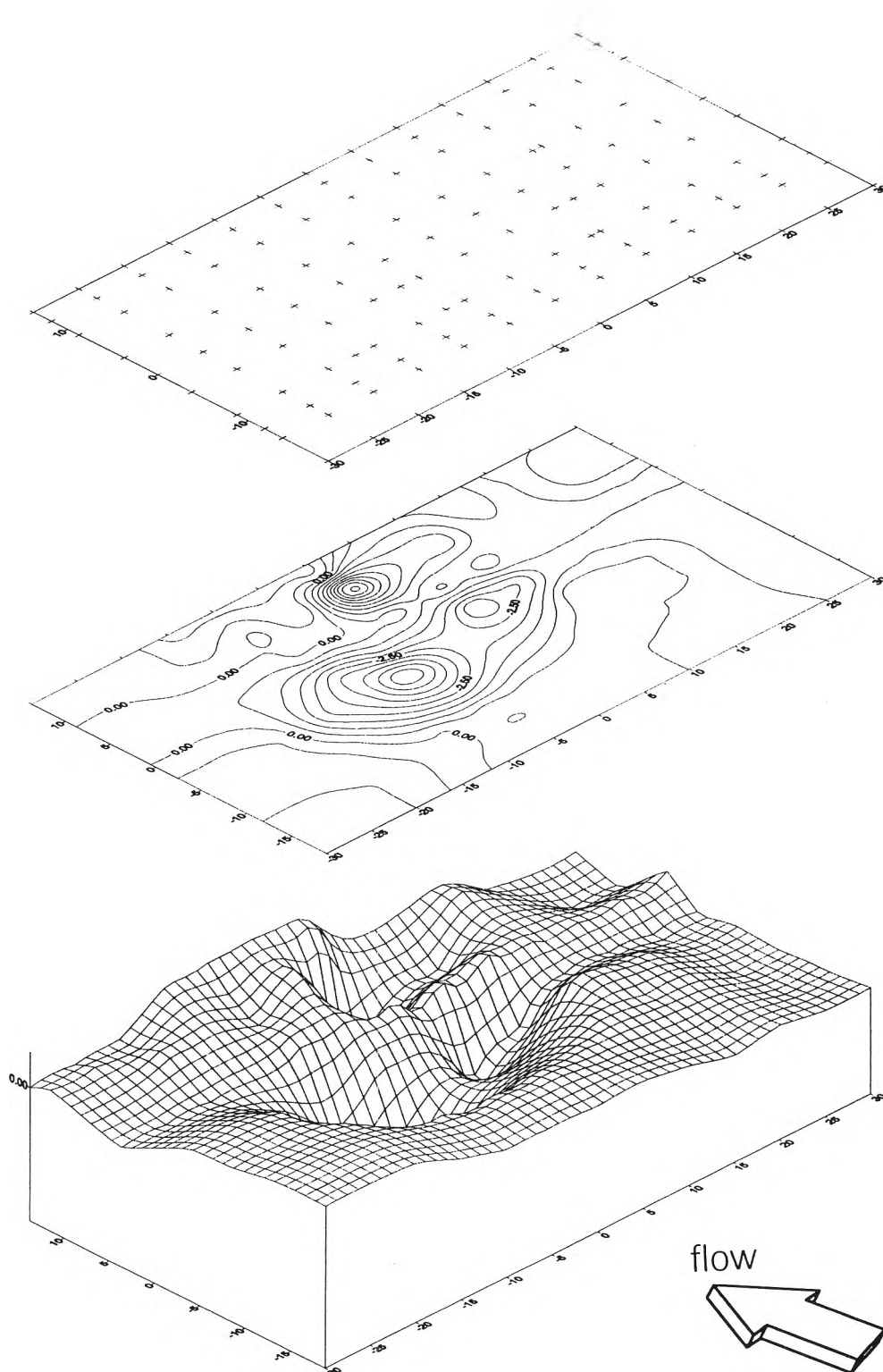
รูป ค.25 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 30 degree ขนาด 5.0/15.0 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



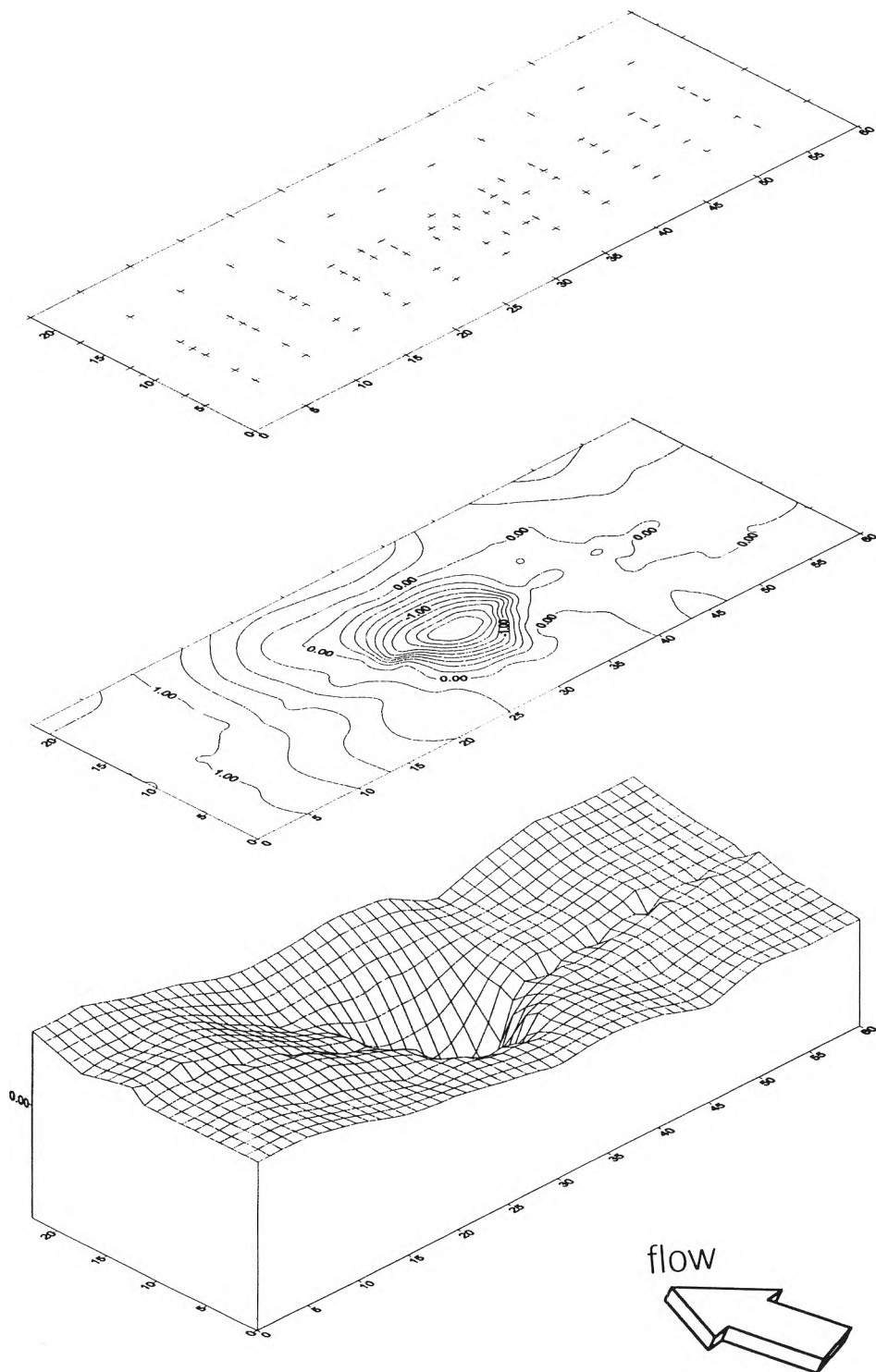
รูป ค.26 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 60 degree ขนาด 2.0/7.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



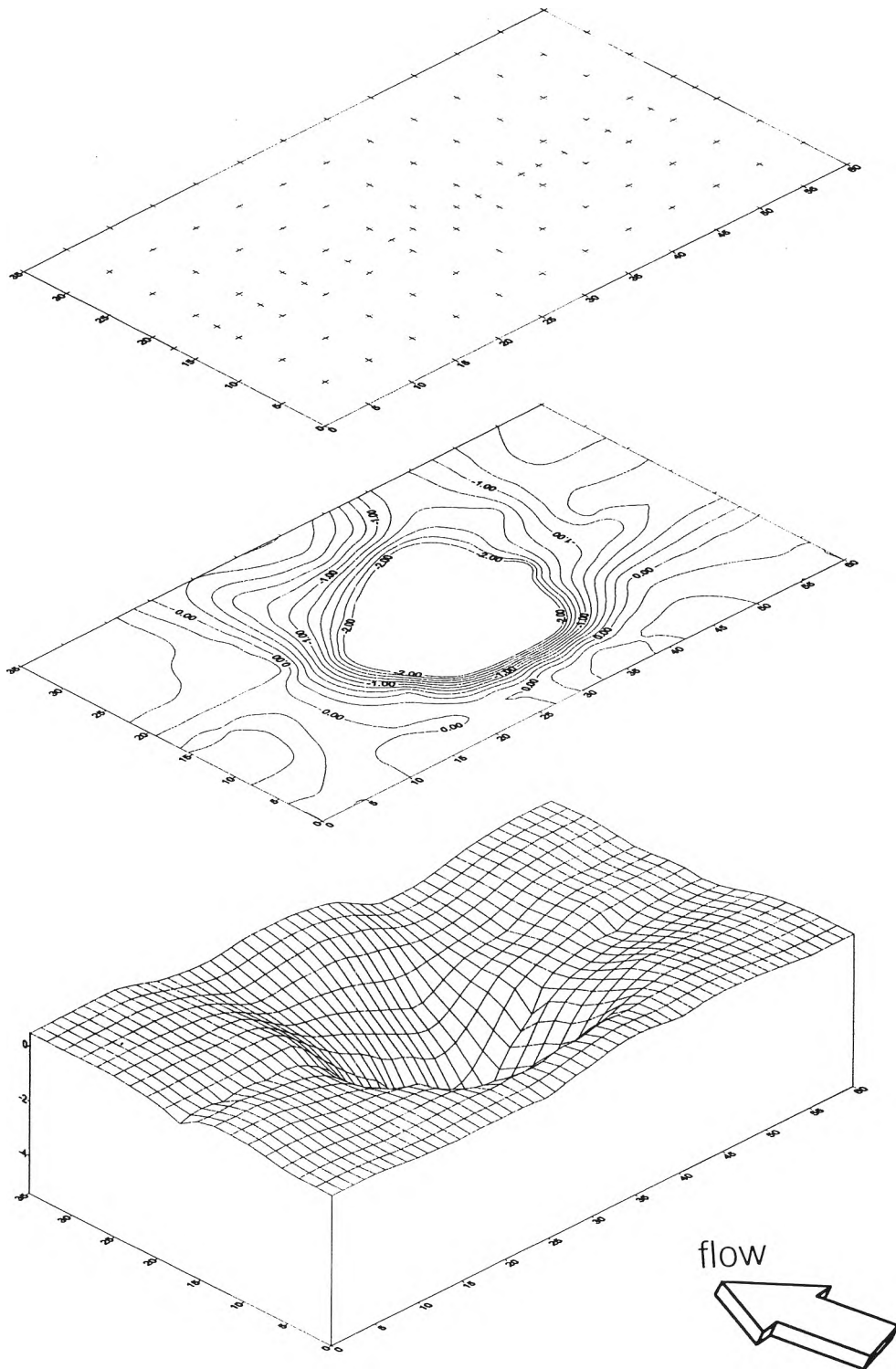
รูป ค.27 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 60 degree ขนาด 2.5/12.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



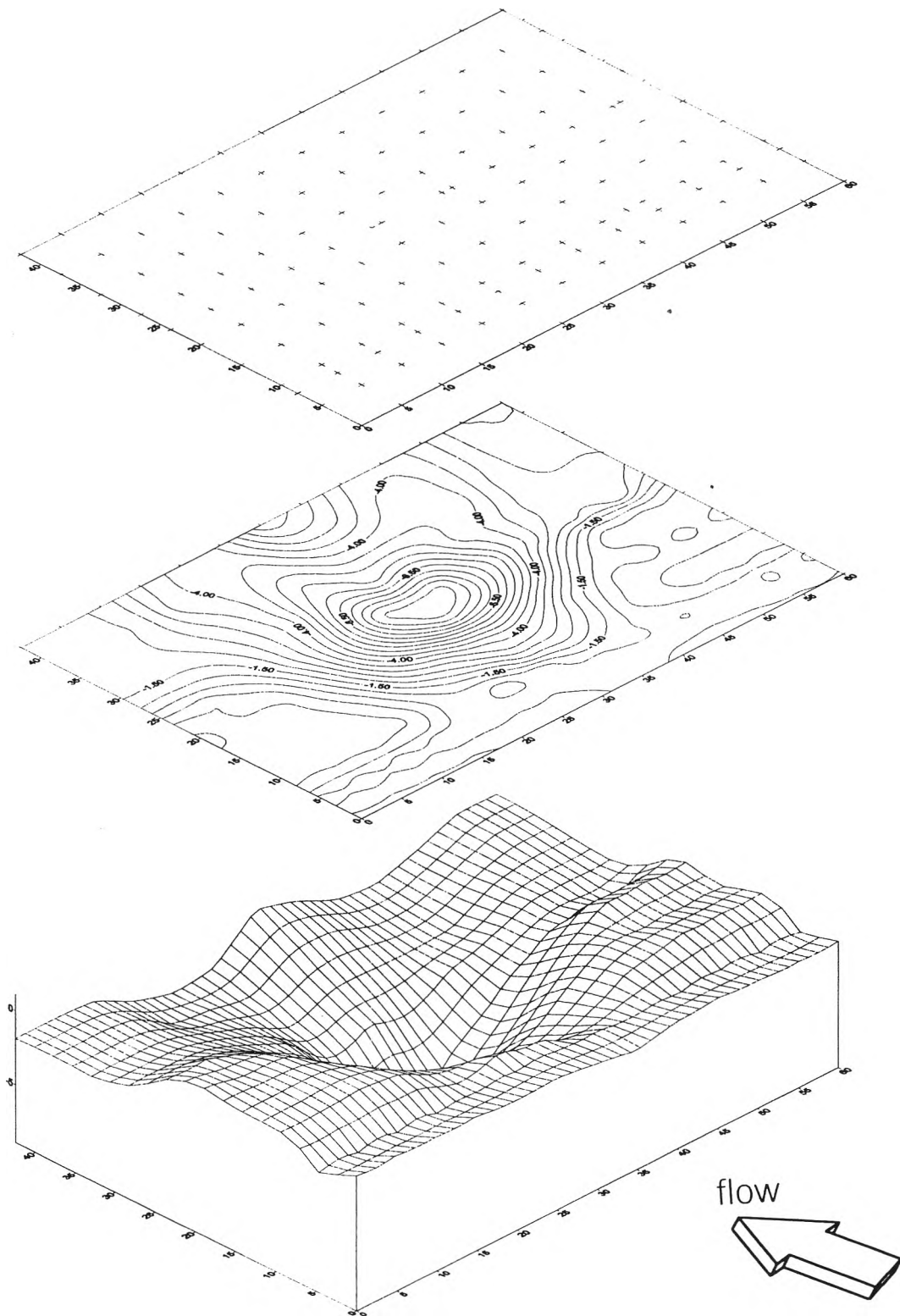
รูป ค.28 หลุมกัดเซาะ Blunt-nosed pier 60 degree ขนาด 5.0/15.0 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



รูป ค.29 หลุมกัดเซาะตอม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม.
 สภาวะเงื่อนไข Live-bed scour



รูป ค.30 หลุมกัดเซาะต่อม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.0 ซม.
สถานะเงื่อนไข Live-bed scour



รูป ค.31 หลุมกัดเซาะตอม่อรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 7.5 ซม.
สภาวะเงื่อนไข Live-bed scour

ภาคผนวก ง.

สมการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ

จากการศึกษาที่ผ่านมา มีผู้ศึกษาหลายท่านได้พยายามคิดสมการเพื่อคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ส่วนใหญ่สมการต่าง ๆ จะได้ข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ จะมีบางส่วนที่สมการได้มาจากข้อมูลในภาคสนาม ซึ่งสมการต่าง ๆ นั้นก็มีเงื่อนไขแตกต่างกันออกไปตามสมมุติฐานที่ผู้ศึกษาแต่ละท่านสนใจ ดังนั้นจึงได้รวบรวมสมการต่าง ๆ ไว้เท่าที่สามารถจะหาได้ เพื่อให้ผู้ที่สนใจได้เป็นแนวทางในการค้นคว้าต่อไป

ตาราง ง-1 สรุปสมการที่ใช้คาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ

ลำดับ	ผู้ศึกษา	ปี	สมการ	คำอธิบาย
1.	Lacey	1929	$d_{sm} = CR$	d_{sm} = ความลึกกัดเซาะสูงสุดวัดจากผิวน้ำ, $C \approx 1-2$ R = รัศมีชลศาสตร์
2.	Inglis-Poona	1939	$\frac{d_{sm}}{b} = 2.32 \left[\frac{q^{2/3}}{b} \right]^{0.78}$	b = ความกว้างตอม่อ , q = อัตราการไหล ต่อหน่วยความกว้าง (m^2/s)
3.	Chitale*	1941	$\frac{d_{se}}{y} = -0.51 + 6.65F_r - 5.49F_r^2$	d_{se} = ความลึกกัดเซาะสมมูล วัดจากท้องน้ำ y = ความลึกของน้ำทางด้านเหนือน้ำของ ตอม่อ F_r = ฟรูดนัมเบอร์ของทางน้ำ = $\frac{v}{\sqrt{gy}}$
4.	Ingles	1949	$\frac{d_{sm}}{y} = 4.19F_r^{.52} \left(\frac{L}{y} \right)^{0.22} - 1$	L = ความยาวของตอม่อ
5.	Laurson and Toch*	1954	$\frac{d_{sm}}{L} = 1.35 \left(\frac{L}{y} \right)^{0.7}$	
6.	Liu et Al**	1961	$\frac{d_{se}}{y} = 2.15 \left(\frac{b}{y} \right)^{0.4} F_r^{0.32}$	

ตาราง ง-1 (ต่อ) สรุปสมการที่ใช้คาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ

ลำดับ	ผู้ศึกษา	ปี	สมการ	คำอธิบาย
7.	Laursen*	1962	$\frac{d_{sm}}{y} = \left[\frac{B_1}{B_2} \right]^{6/7} \left[\frac{v^2}{120y^{1/3} D_{50}^{2/3}} \right]^{3/7} - 1$	B_1, B_2 = ความกว้างของลำน้ำในแต่ละจุด (ft.) v = ความเร็วกระแสน้ำด้านเหนือน้ำ (fps) D_{50} = ค่าเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ
8.	Z.S. Tapapore	1962	$d_{sm} = 1.35b$ for $\frac{b}{y} > 1.15$ $d_{sm} = 1.17y$ for $0 < \frac{b}{y} \leq 1.15$	
9.	Larras**	1963	$d_{sm} = 1.42 K_b^{0.75}$	K = สัมประสิทธิ์ปรับแก้รูปทรงเรขาคณิตของตอม่อ = 1 สำหรับตอม่อรูปวงกลม = 1.4 สำหรับตอม่อรูปสี่เหลี่ยม
10.	Neill**	1964	$d_{se} = 1.5 b^{0.7} y^{0.3}$	
11.	Maza and Sanchez	1964	$\frac{d_{se}}{b} = K_1 K_2 \frac{v^2}{2y} 30 \frac{D_g}{b}$	K_1, K_2 = ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ของมุมปะทะและความเร็วการไหล D_g = ขนาดของวัสดุท้องน้ำ
12.	Bauser s	1965	$d_{sm} = 1.4b$	

ตาราง ง-1 (ต่อ) สรุปสมการที่ใช้คาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ

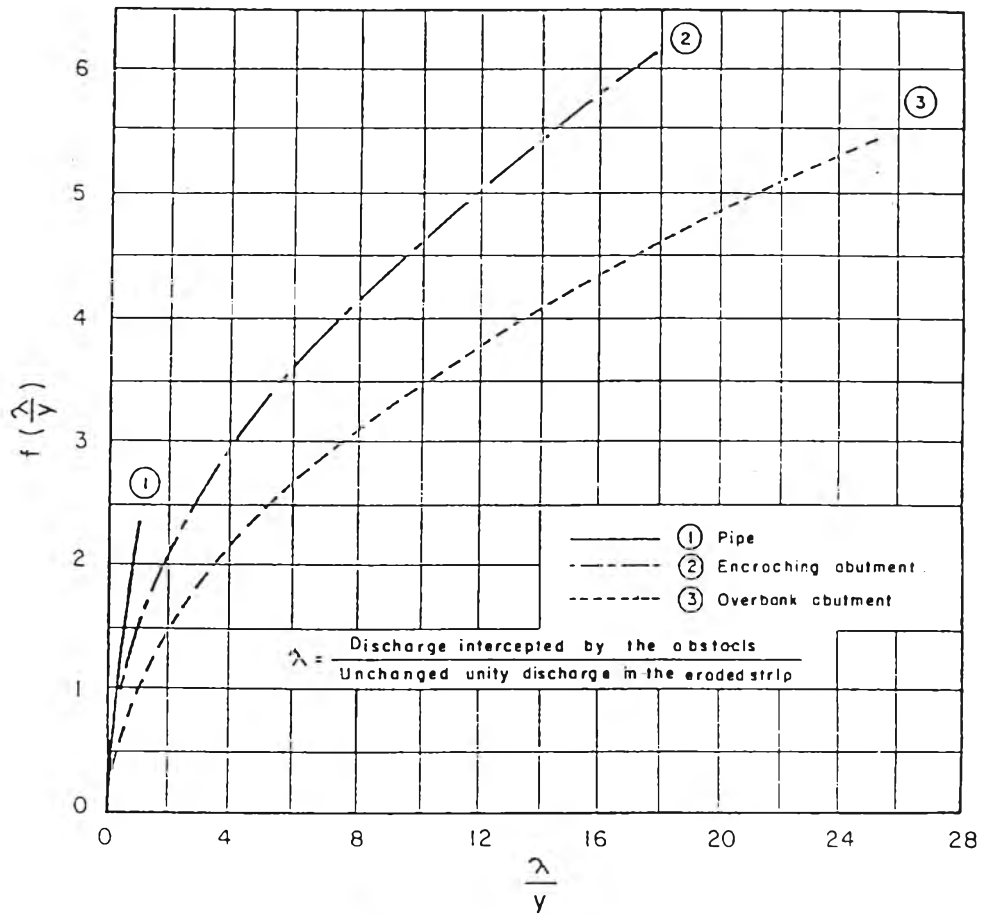
ลำดับ	ผู้ศึกษา	ปี	สมการ	คำอธิบาย
13.	Arunachalam	1965	$\frac{d_{sm}}{L} = \frac{y}{L} \left[\frac{1.95}{\left(\frac{y}{L}\right)^{1/6}} - 1 \right]$	
14.	Carsten's**	1966	$\frac{d_{se}}{b} = 0.546 \left[\frac{N_s^2 - 4.64}{N_s^2 - 5.02} \right]^{5/6}$	$N_s =$ เลขตะกอน (Sediment Number) $= \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{r_s}{r_s} - 1\right)gD}}$ $D =$ ขนาดของวัสดุท้องน้ำ
15.	Blench**	1966	$\frac{d_{sm}}{y} = 2.43 \left[\frac{b}{y_r} \right]^{1/4}$	$y_r = \left(\frac{q^2}{F_b} \right)^{1/3}$ $F_b = 1.9\sqrt{D}$; D มีหน่วยเป็น mm.
16.	Wang	1968	$\frac{d_{sm}}{L} = 2F_r^{0.42} \left(\frac{L}{y} \right)^{0.645}$	
17.	Shen et al.*	1969	$d_{se} = 0.222 R_p^{0.619}$	$R_p =$ ค่าเรย์โนลด์ส์แบบเบอร์ของตอม่อ $= \frac{vb}{\nu}$ $d_{se} =$ มีหน่วยเป็น ซม.

ตาราง ง-1 (ต่อ) สรุปสมการที่ใช้คาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ

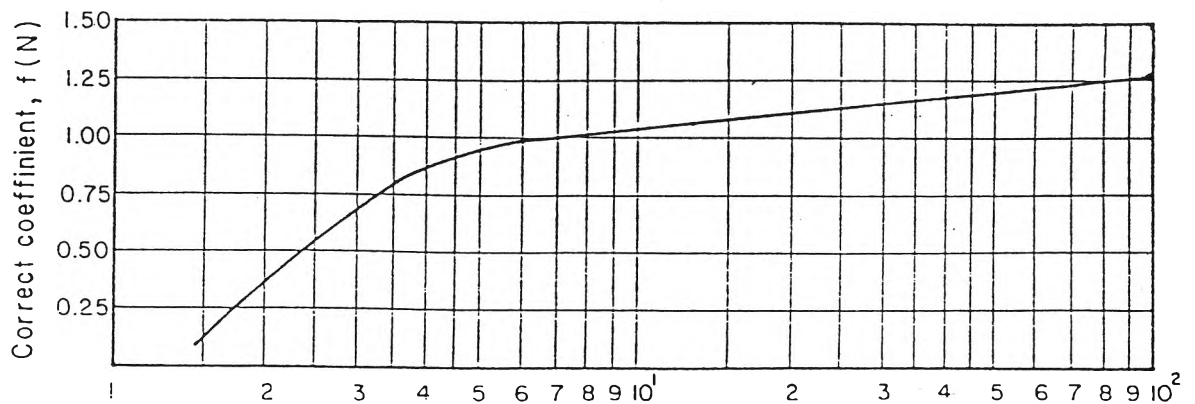
ลำดับ	ผู้ศึกษา	ปี	สมการ	คำอธิบาย
18.	Coleman**	1971	$\frac{v}{\sqrt{2gd_{se}}} = 0.6 \left(\frac{v}{\sqrt{yb}} \right)^{0.9}$	
19.	Jose Roman Temez Pelaez	1975	$\frac{d_{se}}{y} = f\left(\frac{\lambda}{y}\right) f(N_s)$	ดังรูป ง.1
20.	Jain and Fisher	1979	$\frac{d_{sm}}{L} = 1.84 F_r^{0.25} \left(\frac{y}{L}\right)^{0.3}$	
21.	Chen, A-Han**	1980	$\frac{d_{max}}{d_{se}} = 2.27 - 0.45 \log\left(\frac{b}{D_{50}}\right)$	$\frac{b}{D_{50}} \leq 650$
22.	Chang, Sin Zee	1987	$\frac{d_{sm}}{L} = 1.68 F_p^{0.75} R_p^{-0.09} \left(\frac{D_{50}}{L}\right)^{-0.21}$	$F_p =$ ฟรูดนัมเบอร์ของตอม่อ $= \frac{v}{\sqrt{gb}}$
23.	Richardson et.al.* ** (CSU Equation)	1987	$\frac{d_s}{y} = 2.0 K_1 K_2 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} F_R^{0.43}$	$K_1, K_2 =$ สัมประสิทธิ์ปรับแก้รูปทรงเรขาคณิตของตอม่อ และมุมปะทะ

หมายเหตุ * Clear Water

** Live Bed



$$\frac{d_{se}}{y} = f\left(\frac{\lambda}{y}\right) f(N_s)$$



$$\text{Sediment Number, } N_s = \frac{V}{\sqrt{\Delta g D}}$$

รูป ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันของ $\left(\frac{\lambda}{y}\right)$ กับ ฟังก์ชันของ (N_s)
 ในการทำนายหาความลึกหลุมกัดเซาะ (Temez Pelaez, 1975)

ประวัติผู้ศึกษา

ชื่อ : นายพรมงคล ชิดชอบ

เกิด : 10 สิงหาคม 2513

การศึกษา

พ.ศ. 2536 : สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)
สาขาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

พ.ศ. 2537 : เข้าศึกษาต่อหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสบการณ์ในการทำงาน

พ.ศ. 2535 - 2537 : นายช่างชลประทาน
งานจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา
ฝ่ายจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา
สำนักงานชลประทานที่ 8
กรมชลประทาน
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

พ.ศ. 2537 - ปัจจุบัน : วิศวกรโยธา
งานออกแบบชลประทาน 2
ฝ่ายออกแบบชลประทานส่วนเหนือ กองออกแบบ
กรมชลประทาน สามเสน
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์