

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นของการกัดเซาะ (Basic Theory of Scour)

2.1 ปรัชญาการกัดเซาะ

การกัดเซาะของกระแสน้ำในทางน้ำธรรมชาติ สามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ กัดเซาะจากกระแสน้ำที่มีตะกอนแขวนลอย (Scour with continuous sediment motion) และกัดเซาะเฉพาะแห่งซึ่งเกิดกระแทกกันจากภาวะน้ำหลาก หรือพบสิ่งกีดขวาง (Local Scour) ทั้งสองลักษณะเป็นอันตรายต่อโครงสร้างทุกประเภทที่ก่อสร้างกีดขวางการไหลของกระแสน้ำ เช่น เขื่อน ฝาย สะพาน เป็นต้น ดังนั้นการได้เข้าใจสภาพทางอุทกวิทยา ภูมิศาสตร์ ธรณีวิทยา ในสถานที่ที่เลือกไว้เพื่อการก่อสร้างโครงสร้างก่อนเริ่มทำการออกแบบ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุในโครงสร้างนั้น ๆ โดยเฉพาะโครงสร้างสะพาน ซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างหลักคือเสาเข็ม ฐานรากและตอม่อซึ่งก่อสร้างอยู่กลางน้ำเพื่อรับน้ำหนักสะพานส่วนบน และน้ำหนักจรของยวดยาน

แนวทางเพื่อการศึกษาปัญหาการกัดเซาะจึงพอแยกออกได้ 2 ประเด็น คือ

1. ลักษณะทางกายภาพของลำน้ำ
2. พฤติกรรมของกระแสน้ำอันเนื่องจากการก่อสร้างสะพานและการก่อสร้างอื่น ๆ

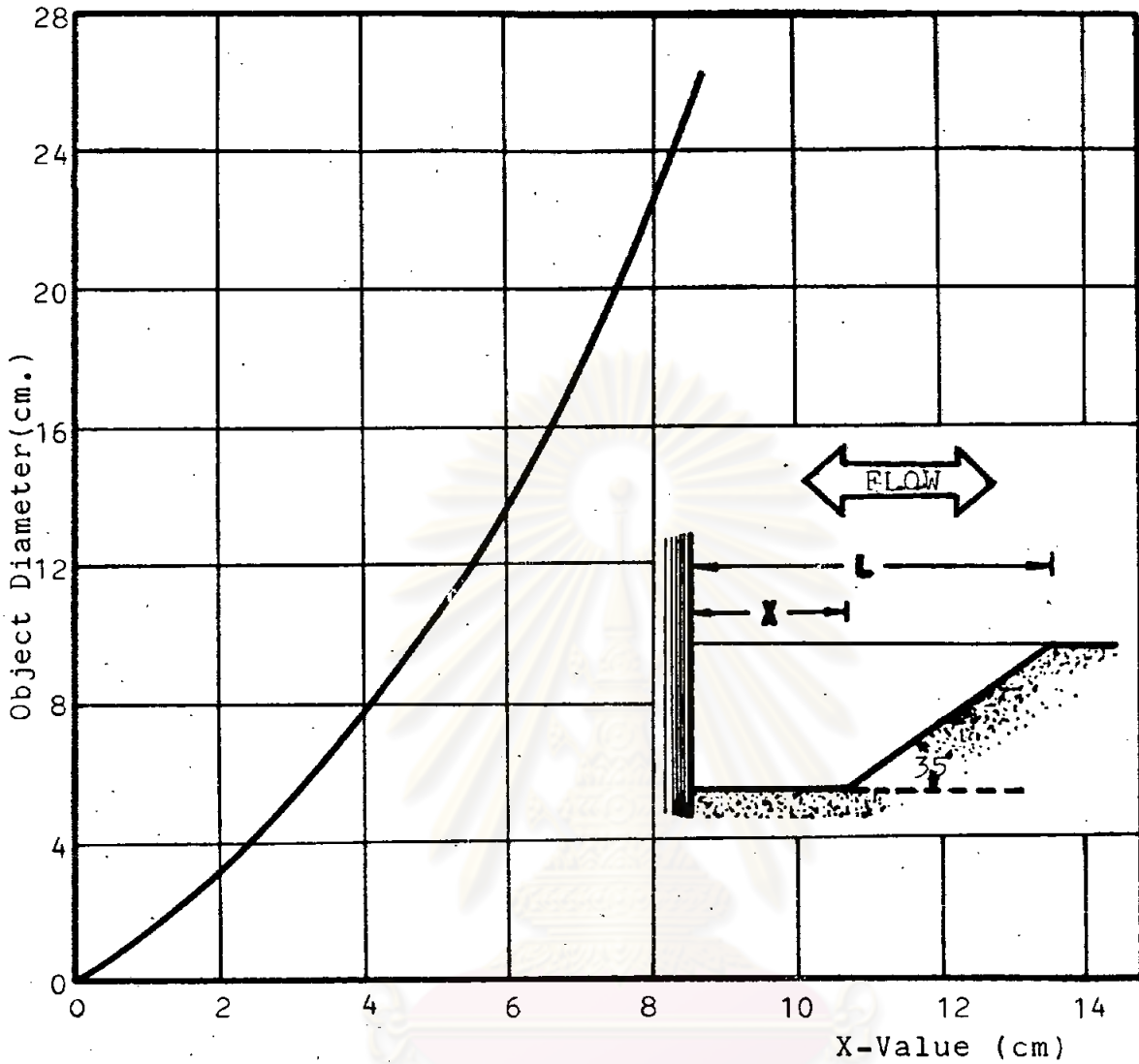
แนวทางแรกเป็นธรรมชาติของลำน้ำก่อนการก่อสร้าง วิเคราะห์หาความเร็วกระแสน้ำ แรงปะทะ สภาพดิน การขนส่งตะกอน แล้วนำไปออกแบบตามที่กล่าวมาแล้ว แนวทางหลังเป็นผลที่ปรากฏหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ ทำให้เกิดการลดพื้นที่หน้าตัดสำหรับน้ำไหล (Constriction) กลายเป็นวัตถุกีดขวางการไหลของกระแสน้ำ (Obstruction) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในอัตราการไหล (Discharge) ความเร็ว (Velocity) ทิศทางการไหล และสถานะการไหล (State of flow) รวมไปถึงโครงสร้างที่ออกแบบเป็นท่อลอด

ทั้งท่อกลม (Circular culvert) และท่อเหลี่ยม (Box culvert)

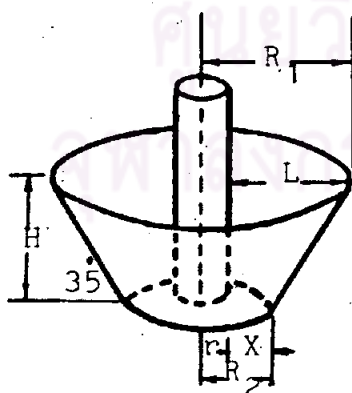
แนวทางทั้งสองข้อนี้มีผู้นำมาศึกษาทดลองในส่วนปลักย่อย และต่างตั้งเป้าหมายการศึกษาของตนแยกออกไปอย่างกว้างขวาง แตกแขนงออกตามประสบการณ์ ข้อปัญหาที่สนใจ อย่างไรก็ตาม จุดเริ่มต้นของการศึกษาค้นคว้าแต่ละครั้งได้อ้างอิงมาจากจุดเดียวกันคือพฤติกรรมการกัดเซาะ

กระแสน้ำที่ไหลมาตามลำน้ำ เมื่อมีสิ่งกีดขวางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็ว กระทั่งหัน อันเนื่องมาจากเหตุใดก็ตาม จะก่อให้เกิดภาวะปั่นป่วน และรุนแรงขึ้นจนกลายเป็นน้ำวน (Eddy) เส้นใยกระแสน้ำแตกออกเป็นสายพุ่งออกตามทิศทางต่าง ๆ ขณะเดียวกัน แรงยกจะเพิ่มขึ้นจนสามารถพัดพาเอาวัสดุท้องน้ำเช่น ดิน ทราย กรวด ฃ จุดที่กระแสน้ำสายนั้นไหลผ่าน ลอยตัวขึ้นและเคลื่อนออกจากที่อยู่เดิม หากการนำพาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง จุดที่ถูกแรงกระทำโดยตรงจะกลายเป็นหลุม เริ่มจากหลุมเล็กแล้วค่อย ๆ ขยายเป็นหลุมใหญ่เรียกว่าหลุมกัดเซาะ (Scour hole) ก้นหลุมมีระดับลึกลงไปจากระดับท้องน้ำเดิม ความลึกที่ปรากฏแต่ละแห่งมีขนาดแตกต่างกันไป ขึ้นกับองค์ประกอบหลาย ๆ อย่าง สิ่งแรกคือกระแสน้ำ ซึ่งก่อตัวเป็นกระแสน้ำวน (Vortex) ถ้ากระแสน้ำวนมีแรงมากจะทำให้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาต้านทานแรงกระแสน้ำไม่ไหว ถูกจุดให้ลอยตัวขึ้น กระแสน้ำที่ตามมาจะทำหน้าที่พาวัสดุเคลื่อนที่ไป ถ้ากระแสน้ำระลอกหลังมีแรงน้อยกว่า ขณะเดียวกันแรงตกตะกอนของวัสดุมีมากกว่าวัสดุก็จะตกตะกอนลงยังที่เดิม คุณสมบัติของวัสดุจึงเป็นองค์ประกอบที่สองของการกัดเซาะ อย่างไรก็ตามหากกระแสน้ำมีความเร็วสูง คุณสมบัติของมวลวัสดุสามารถจะไม่นำมาพิจารณาได้ หลุมกัดเซาะโดยทั่วไปมีด้านข้างลาดเอียงเป็นมุม ความลึกวัดจากปากหลุมถึงก้นหลุมเรียกว่าความลึกกัดเซาะ (Scour depth) ขนาดของปากหลุมขึ้นอยู่กับขนาดของตอม่อหรือเสาเข็ม โดยหลุมกัดเซาะจะค่อย ๆ ขยายตัวตามความลึกที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 2-1 สำหรับมิติต่าง ๆ และปริมาตรของส่วนประกอบของหลุมกัดเซาะแต่ละส่วน ได้แสดงไว้ในรูป 2-2

ความลึกนี้เพิ่มขึ้นตามกาลเวลา เมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่งการกัดเซาะขลอความรุนแรงลง แต่ยังคงปรากฏอยู่ในอัตราต่ำและคงอยู่เช่นนี้ตลอดไป คณะผู้วิจัยของ H.K.Liu ได้ทดลองในปี ค.ศ.1961 (Liu, 1961) พบว่า ความลึกการกัดเซาะสัมพันธ์กับค่า Log ของเวลาเป็นเส้นตรง ในกรณีที่การกัดเซาะนั้น เป็นการกัดเซาะน้ำใส แต่ถ้ามีตะกอนปนอยู่ในกระแสน้ำด้วย ความสัมพันธ์จะเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นโค้งตามรูป 2-3 อย่างไรก็ตาม ความลึกกัดเซาะจะมีค่าสูงสุดได้ในกรณีที่ Bed shear strength ในหลุมต่ำกว่าค่าวิกฤต



รูป 2-1 กราฟแสดงการขยายของหลุมกัดเซาะ (จาก H.Palmer, 1970)



SCOUR PIT

$$\text{Volume} = \frac{\pi H}{3} (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) - \pi r^2 H$$

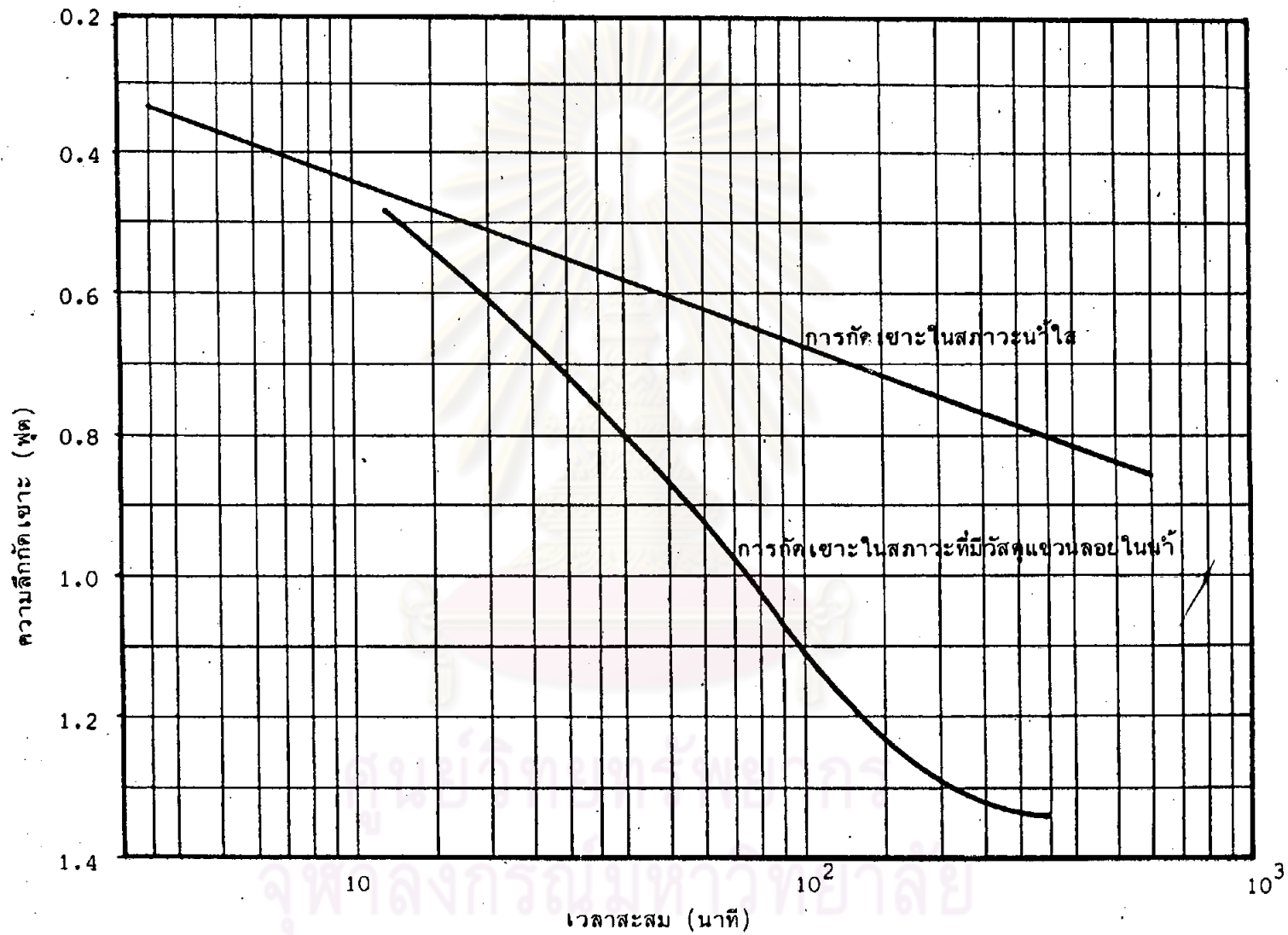
L = 0 → L_{max} in 0.5cm increment

X = L/2 → X_{max}

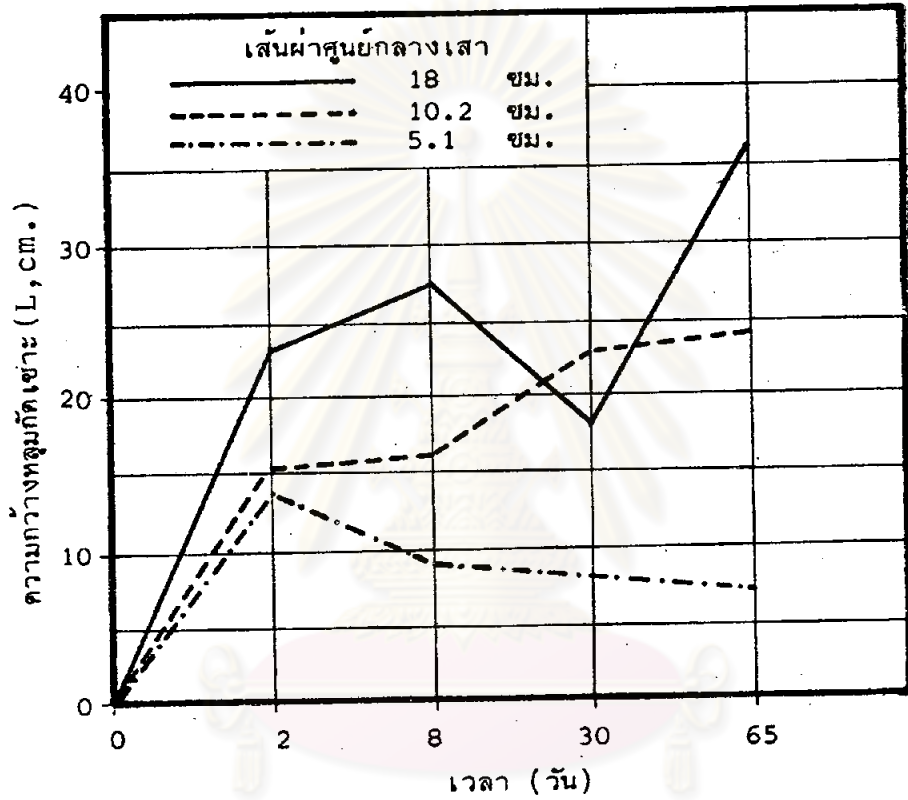
$$R_1 = r + L, \quad R_2 = r + X$$

$$H = \tan 35^\circ (L - X) \quad \text{or} \quad 0.70021(L - X)$$

รูป 2-2 มิติและปริมาตรของหลุมกัดเซาะ (จาก H.Palmer, 1970)



รูป 2-3 ความสัมพันธ์ของเวลากับความลึกกักเก็บน้ำ (จากผลการทดลองของคณะวิจัยของ H.K.Liu, 1961)



รูป 2-4 กราฟแสดงการขยายตัวของหูลมกั๊ดเซาะตามเวลาโดยใช้ขนาดเสาทีแตกต่างกัน (จาก H. Palmer, 1970)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรากฏการณ์กัดเซาะ สามารถแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นเริ่มแรก ปรากฏหลุมเล็ก ๆ บนผิวราบเรียบของท้องน้ำ สามารถมองเห็นได้ชัดเจน และความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2. ขั้นสมดุล (Equilibrium scour depth) ในขั้นนี้ความลึกจะเข้าใกล้ภาวะสมดุลคือมีการกัดเซาะในขณะที่มีการทับถมของเม็ดดินเข้าสู่จุดกัดเซาะ อัตราการกัดเซาะจึงลดลง และเข้าสู่สภาวะที่เกือบจะคงที่ ให้ค่าความลึกกัดเซาะสูงสุดชั่วคราว

3. ขั้นสูงสุด (Maximum scour depth) หลุมกัดเซาะจะทรงตัวอยู่ในขั้นภาวะสมดุลจนถึงเงื่อนไขหนึ่งจึงจะมีการกัดเซาะต่อและถึงจุดความลึกกัดเซาะสูงสุดหรือเกิดเงื่อนไขที่ต้องยุติการกัดเซาะ ค่าความลึกสมดุลขณะนั้นก็จะ เป็นความลึกกัดเซาะสูงสุด

รูป 2-4 ได้แสดงตัวอย่างผลการทดลองในห้องปฏิบัติการโดย Palmer (H.Palmer, 1970) ซึ่งจะเป็นการเกิดปรากฏการณ์กัดเซาะกับเวลาเป็นไปตามขั้นตอนที่กล่าวมา

2.2 ชนิดของการกัดเซาะ

พฤติกรรมกัดเซาะที่กล่าวมานี้อาจพิจารณาจำแนกชนิดกัดเซาะได้ตามลักษณะการเกิดได้แก่

1. การกัดเซาะตามพื้นผิว (General scour)

2. การกัดเซาะเฉพาะแห่ง (Local scour)

2.2.1 การกัดเซาะตามพื้นผิว (General scour)

ขณะเกิดน้ำหลาก ระดับน้ำในลำน้ำเพิ่มสูงขึ้น กระแสน้ำไหลด้วยความเร็วสูงกว่าปกติ จึงเกิดการชะล้างเอาเม็ดดิน หิน หวาย หลุดลอยออกจากผนังหรือพื้นที่ท้องคลองกลายเป็นวัสดุลอยน้ำ (Suspension material) เคลื่อนตามกระแสน้ำและไปตกยังตำแหน่งใหม่ ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นตลอดลำน้ำที่น้ำท่วมถึง เมื่อพ้นภาวะน้ำหลาก ระดับพื้นน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม อาจเพิ่มหรือลดลง (Aggradation or Degradation) จากการศึกษาพบว่าทั้งสองกรณีสามารถก่ออันตรายให้แก่โครงสร้างได้

ในปี 1969-1971 กระทรวงโยธาธิการ (Ministry of Public work) ประเทศเม็กซิโก ได้ศึกษาการกัดเซาะชนิดนี้ตามแม่น้ำต่าง ๆ หลายสาย ได้ข้อสรุปดังนี้

1. ระดับพื้นท้องน้ำโดยเฉลี่ยจะใกล้เคียงกันทุกปี โดยทำการสำรวจข้อมูลในฤดูแล้งของทุก ๆ ปี หลังภาวะน้ำหลากผ่านพ้นไปแล้ว
2. ลำน้ำที่มีดินท้องน้ำเป็นวัสดุหยาบ วัสดุที่ถูกพัดหลุดจากหลุมกัดเซาะจะปกคลุมลงตำแหน่งเดิม หลุมกัดเซาะจึงมีขนาดไม่กว้างและไม่ลึก
3. ลำน้ำที่มีพื้นน้ำเป็นวัสดุละเอียดหรือทรายละเอียด หลุมกัดเซาะมีลักษณะที่แคบชัดและเห็นง่าย สามารถรักษารูปร่างได้ถึง 2-3 สัปดาห์ ท้องลำน้ำจึงจะคืนสู่ระดับเดิม ระยะเวลาในการกลับคืนสภาพเดิมของท้องน้ำอาจรับสั้นเข้าได้ ในกรณีเกิดน้ำหลากขนาดย่อมตามหลังมาอีก
4. ลำน้ำที่มีท้องน้ำเป็นวัสดุละเอียดมาก (Silt) หลุมกัดเซาะต้องใช้เวลาอันเป็นเดือนขึ้นไปสำหรับการปรับคืนสู่สภาพเดิม
5. ความลึกกัดเซาะสูงสุดสามารถเกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งหรือหลายจุดในพื้นที่หน้าตัดหนึ่ง ๆ ดังแสดงไว้ในรูป 2-5 (ก) แต่สำหรับหน้าตัดลำน้ำบนส่วนโค้งของลำน้ำ ความลึกกัดเซาะสูงสุดจะเกิดขึ้นเพียงจุดเดียวในตำแหน่งที่เอนเอียงไปทางด้านนอกของส่วนโค้งดังแสดงในรูป 2-5 (ข)

ในขณะที่น้ำไหลด้วยความเร็วสูง แรงจากกระแสน้ำพยายามแยกมวลวัสดุท้องน้ำออกจากกัน โดยต้องเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างผิวของมวลวัสดุ แรงทั้งสองชนิดต่างต้านทานซึ่งกันและกัน จนถึงขีดจำกัดหนึ่งที่แรงดันกระแสน้ำชนะแรงยึดเกาะได้ในที่สุด ความเร็วกระแสน้ำจึงถูกแบ่งออกเป็นหลายชนิดตามแรงที่เกิดขึ้น ถ้าเป็นกระแสน้ำทั่วไป เรียกว่า ความเร็วกระแสน้ำจริง (Real velocity- V_r) ถ้าเป็นความเร็วที่มีแรงพืดแยกมวลวัสดุออกจากกัน เรียกว่า ความเร็วกัดเซาะ (Eroded Velocity- V_e)

จากสมการ $V = Q/A$ เมื่อ $V_e \gg V_r$ การกัดเซาะปรากฏมากขึ้น พื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นตามแรงกัดเซาะ การที่พื้นที่หน้าตัด (A) เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่า V ลดลงตามสมการข้างต้น เนื่องจากค่า Q คงที่และลดลงไปเรื่อย ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุลหรือ $V_r = V_e$

การกัดเซาะจึงยุติ ค่าต่าง ๆ ของการกัดเซาะจึงสามารถทราบได้ในช่วงเวลาของการสมมูลนี้โดยวิธีการวัดหรือคำนวณจากรูป 2-6 สามารถหาสมการของค่าความเร็วกัดเซาะทั่วไปได้ ดังเช่นผลงานของ Maza Alvarez, ในขั้นต้นกำหนดให้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามในรูปมีดังนี้

H_{ms} = ความลึกเฉลี่ยของพื้นที่กัดเซาะ

H_{mo} = ความลึกเฉลี่ยในฤดูแล้ง

H_o = ความลึกสูงสุดในฤดูแล้ง

H_s = ความลึกกัดเซาะสูงสุด

P = ตำแหน่งที่ปรากฏความลึกกัดเซาะสูงสุด



จากรูป 2-6

$$V = Q / BH_{ms} \quad (2.1)$$

จากสมการ Tangential stress จะได้ว่า

สำหรับพื้นผิวขรุขระ
$$V_e = 5.75 \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \log \frac{30.2Y}{K_s} \quad (2.2)$$

สำหรับพื้นผิวเรียบ
$$V_e = 5.75 \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \log 9.2 \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \frac{Y}{\nu} \quad (2.3)$$

โดย
$$Y = 0.368 H$$

ฉะนั้น ความลึกกัดเซาะเฉลี่ยจะได้
$$H_{ms} = \frac{0.365 Q^{0.784}}{B^{0.784} D^{0.157}} \quad (2.4)$$

และความลึกกัดเซาะสูงสุดจะได้
$$H_s = 0.365 \frac{H_o}{H_{mo}} \times \frac{Q^{0.784}}{B^{0.784} D^{0.157}} \quad (2.5)$$

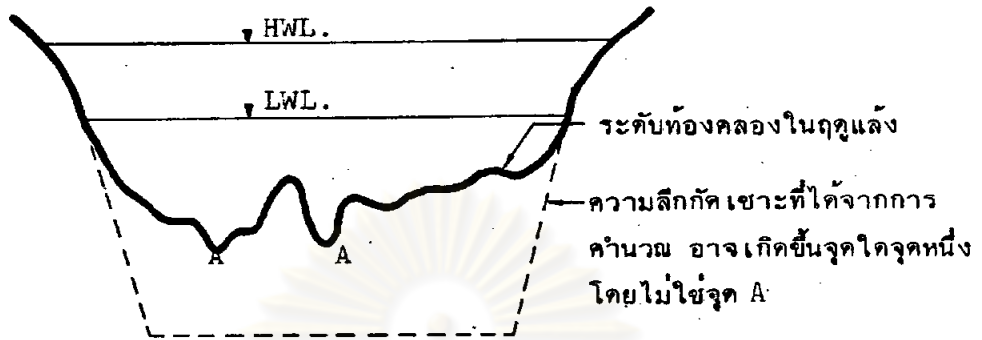
สมการ 2.4, 2.5 เป็นจริงเฉพาะลำน้ำที่เป็นทรายหรือกรวดเท่านั้น และการคาดคะเนความลึกการกัดเซาะพื้นผิว (General scour) นี้สรุปได้ว่าจะต้องมีข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

1. ระดับดินท้องน้ำของพื้นที่หน้าตัดที่วัดได้จากพื้นที่จริงในฤดูแล้ง
2. ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลในช่วงเกิดการกัดเซาะ (Q)
3. ค่าระดับท้องน้ำเทียบกับระดับผิวน้ำขณะกัดเซาะ (H)
4. ขนาดเม็ดวัสดุและการกระจายของขนาดเม็ดวัสดุลำน้ำ (D)
5. ความกว้างผิวน้ำขณะเกิดการกัดเซาะ (B)

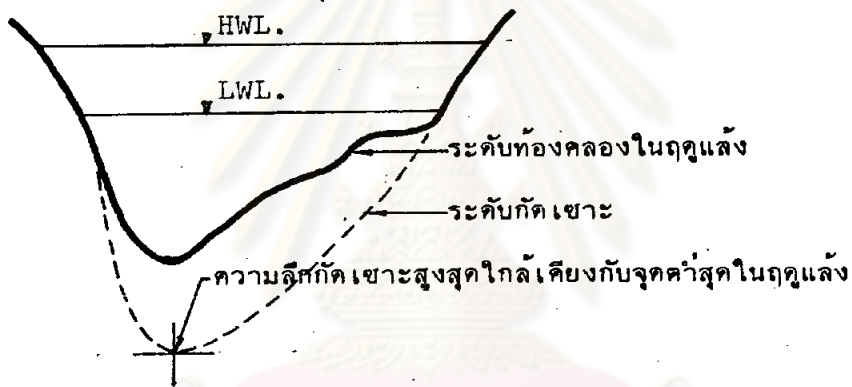
การเกิดวิบัติของโครงสร้างสะพาน ท่อ เขื่อน และอื่น ๆ มักเกิดในขณะที่ปรากฏการณ์กัดเซาะเฉพาะแห่ง (Local scour) ทำให้เข้าใจว่าการกัดเซาะเฉพาะแห่งเป็นต้นเหตุที่ทำให้โครงสร้างพังทลาย แต่ถ้าศึกษาถึงสาเหตุที่แท้จริงแล้ว จะพบว่า การกัดเซาะพื้นผิว (General scour) ทำอันตรายต่อโครงสร้างในลักษณะต่อเนื่องและยาวนาน จึงไม่ควรละเลยการประเมินข้อมูลบริเวณก่อสร้างก่อนการก่อสร้าง และตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงหลังการก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว เพื่อคาดคะเนอิทธิพลการกัดเซาะพื้นผิวของบริเวณนั้น

2.2.2 การกัดเซาะเฉพาะแห่ง (Local scour)

การกัดเซาะเฉพาะแห่งเป็นการกัดเซาะต่อเนื่องจากการกัดเซาะพื้นผิว (General scour) ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วกระแสน้ำกระทันหันหรือเกิดขึ้นจากเงื่อนไขต่าง ๆ ในบริเวณนั้น ๆ สามารถสังเกตได้จากการปรากฏน้ำวน (Eddies) รอบตอม่อสะพาน การกัดเซาะชนิดนี้เกิดรอบตอม่อหรือเสาเข็ม หลุมกัดเซาะจะเน้นหนักเฉพาะด้านหน้าหรือหลังของตอม่อ ส่วนหน้าและมุมของตอม่อจะมีความลึกมากกว่าส่วนหลังและข้าง อาจลึกต่อเนื่องกันตลอดตอม่อ ทั้งนี้ แล้วแต่ประเภทน้ำวนที่เกิดขึ้น ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูป 2-7 (ก) เป็นการกัดเซาะของน้ำวนเกือกม้า (Horseshoe Vortex) หลุมกัดเซาะจะปรากฏด้านหน้าและต่อเนื่องไปถึงด้านหลังของตอม่อ รูป 2-7 (ข) เป็นลักษณะกัดเซาะที่เกิดขึ้นจาก Wake Vortex การกัดเซาะจะปรากฏเฉพาะด้านหลังของตอม่อเท่านั้น และรูป 2-7 (ค) เป็นหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นคล้ายรูป 2-7 (ก) แต่มีความกว้างและลึกกว่า เป็นหลุมกัดเซาะที่เกิดจาก Skewed Vortex

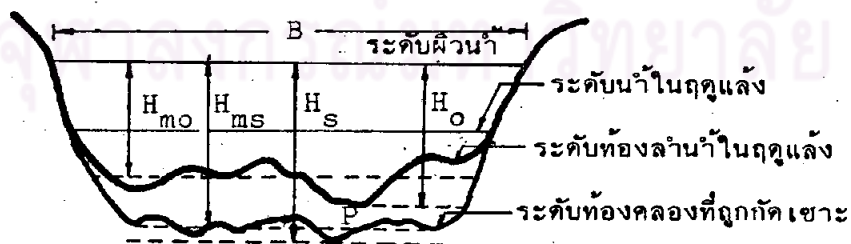


(ก) รูปตัดลำน้ำในช่วงตรง

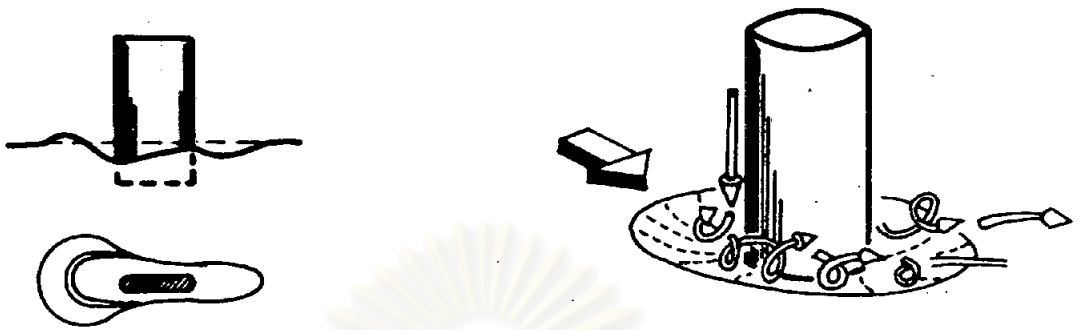


(ข) รูปตัดลำน้ำบนส่วนโค้งของลำน้ำ

รูป 2-5 ระดับท้องลำน้ำที่ถูกกักเขาะ (จาก J.Maza Alvarez, 1973)



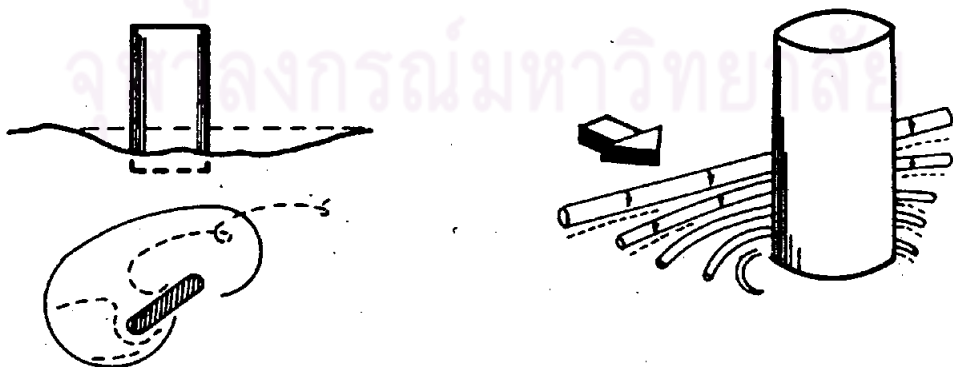
รูป 2-6 ค่าระดับต่างๆเพื่อการคำนวณการกักเขาะ (จาก J.Maza Alvarez, 1973)



(ก) Horse-shoe Scour



(ข) Wake Scour



(ค) Skewed Scour

รูป 2-7 การกีดเขาระอบตอม่อชนิดต่างๆ

การกัดเซาะเฉพาะ สามารถแบ่งออกได้ 3 กรณี คือ

1. กัดเซาะคงที่ (Stable Scour) กรณีนี้วัสดุแขวนลอยที่ถูกพัดมาตามกระแสน้ำ จากที่อื่นเข้าไปในหลุมกัดเซาะ มีปริมาณเท่ากับวัสดุแขวนลอยที่ถูกพัดออกจากหลุมกัดเซาะ ฉะนั้น ระดับความลึกจะคงที่ไปตลอด นั่นคือ

$$q'_{out} = q'_{in} = 0$$

2. กัดเซาะน้ำใส (Clear water Scour) กรณีนี้กระแสน้ำไหลผ่านหลุมกัดเซาะ โดยไม่นำพาวัสดุแขวนลอยปะปนมาด้วย เสมือนหนึ่งเป็นน้ำสะอาดแต่เมื่อพัดผ่านหลุมกัดเซาะจะพา วัสดุออกจากหลุมไปด้วย โดยทั่วไปหลุมกัดเซาะชนิดนี้จะปรากฏให้เห็นได้และเพิ่มความลึกของหลุม ในอัตราสม่ำเสมอจนถึงค่าความลึกสมมูล นั่นคือ

$$q'_{out} > 0, \quad q'_{in} = 0$$

3. กัดเซาะจากน้ำที่กระแสน้ำที่มีตะกอนแขวนลอย (Scour with continuous sediment motion) แตกต่างจากกรณีแรกคือปรากฏวัสดุแขวนลอยทั้งขณะพัดเข้าหลุมกัดเซาะ และออกจากหลุมกัดเซาะแต่อัตราวัสดุที่ถูกพัดออกมากกว่าวัสดุที่ถูกพัดเข้า

$$q'_{out} \geq q'_{in} > 0$$

สำหรับโครงสร้างสะพาน การกัดเซาะเกิดขึ้นในลักษณะกรณี (2) มากกว่ากรณีอื่น ๆ เนื่องจากกระแสน้ำจะปรากฏพฤติกรรมกัดเซาะช่วงไหลผ่านตอม่อ รูปทรงตอม่อรอบกวางทิศทาง และความเร็วของกระแสน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เพิ่มแรงปะทะต่อมวลวัสดุ กระแสน้ำทาง ตันน้ำจึงเป็นน้ำสะอาด (Clear water)

2.3 กลศาสตร์กัดเซาะ (Scouring Mechanics)

วัสดุท้องน้ำเช่น กรวด หิน ดิน หวาย และอื่น ๆ ทรงตัวอยู่ในความสมดุลภายใต้แรง กระทำชนิดต่าง ๆ เช่น แรงฉุด (Drag force) แรงลอยตัว (Lift force) และน้ำหนักวัสดุ (Weight)

แรงจุด (Shear force or Drag force) สามารถเขียนเป็นรูปสมการได้

$$F_D = C_D K_1 D^2 \frac{\rho V_b^2}{2} \quad (2.6)$$

แรงลอยตัว (Lift force) เขียนเป็นรูปสมการได้

$$F_L = C_L K_2 D^2 \frac{\rho V_b^2}{2} \quad (2.7)$$

น้ำหนักวัสดุ (Weight) ขณะอยู่ในน้ำ เขียนเป็นรูปสมการได้

$$W = K_3 (\rho_s - \rho) g D^3 \quad (2.8)$$

ซึ่ง

$$V_b = \text{ความเร็วน้ำบริเวณท้องน้ำ}$$

$$C_D, C_L = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงจุดและแรงลอยตัวตามลำดับ}$$

$$D = \text{ขนาดของวัสดุท้องน้ำ}$$

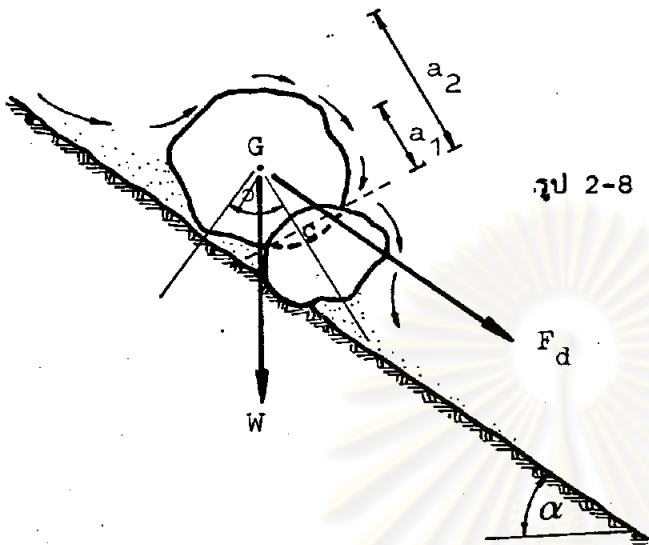
$$K_1, K_2 = \text{องค์ประกอบรูปทรงตะกอน}$$

$$\rho, \rho_s = \text{ความหนาแน่นของน้ำและวัสดุตามลำดับ}$$

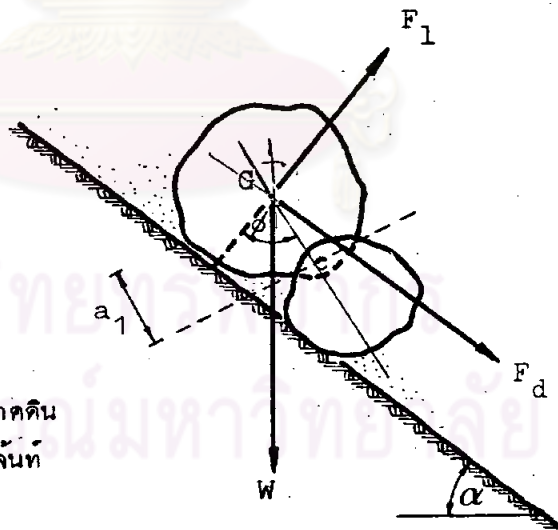
จะสังเกตได้ว่าทั้งแรงจุดและแรงยกแปรผันโดยตรงกับความเร็วกระแสน้ำ (V_b) และขนาดวัสดุท้องน้ำ (D) เมื่อความเร็วกระแสน้ำต่ำ ผลลัพธ์ของแรงจุด (F_D) และแรงยก (F_L) จะต่ำด้วย ไม่สามารถเอาชนะน้ำหนักของวัสดุได้ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แรงจุดและแรงยกจะเพิ่มขึ้นตาม จนกระทั่งน้ำหนักวัสดุ (W) ต้านแรงรวมของแรงจุดและแรงยกไม่ไหว วัสดุจึงถูกแรงน้ำกระแทกให้หลุดลอยอยู่ในน้ำ นี่คือจุดเริ่มต้นของการกัดเซาะ ความเร็วกระแสน้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอะไรบ้าง เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.9 จะพบว่าความเร็วกระแสน้ำแปรผันตามค่าความลาดชันของทางน้ำไหลและค่ารัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic radius-R)

$$V \propto R^x S^y \quad (2.9)$$

$$V = CR^x S^y$$



รูป 2-8 แสดงแรงกระทำบนอนุภาคดิน
ในการไหลแบบลามินาร์
(Laminar Flow)



รูป 2-9 แสดงแรงกระทำบนอนุภาคดิน
ในการไหลแบบเทอร์บูเลนต์
(Turbulent Flow)

ค่า X, Y เป็นค่าคงตัว และ C เป็นสัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุแต่ละชนิด ในสภาพการไหลหนึ่ง ๆ ความเร็วกระแส น้ำจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือการไหลแบบลามินาร์ (Laminar flow) ซึ่งมีความเร็วการไหลต่ำและความลึกการไหลน้อย ค่า (Reynold number) มีค่าน้อยกว่า 500 มีความหนืดเป็นตัวเกณฑ์ในการกำหนดความเร็วการไหล การไหลอีกแบบหนึ่งคือการไหลแบบปั่นป่วนหรือเทอร์บูเลนต์ (Turbulent flow) ความเร็วการไหลสูงและความลึกการไหลมากขึ้น ค่า Reynold number มากกว่า 2,000 ขึ้นไป มีความเฉื่อยของมวลน้ำเป็นเกณฑ์ในการกำหนดความเร็ว

ในด้านอุทกศาสตร์ แรงยก (Lift force) จะไม่ก่อตัวขึ้นในช่วงที่ความเร็ว กระแส น้ำเป็นลามินาร์ (Laminar flow) แรงที่กระทำต่อวัตถุมีเฉพาะแรงจุด (Drag force) วัตถุจะเริ่มเคลื่อนตัวได้ โมเมนต์น้ำหนักของวัตถุเท่ากับแรง F_D ที่มากระทำ ซึ่งสามารถพิจารณา เป็นสมการได้ (Overbeek, 1980) ดังนี้

$$W_s \sin(\phi - \alpha) a_1 = F_D \cos \alpha a_2 \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$W_s = \text{น้ำหนักวัตถุ}$$

$$\phi = \text{ค่ามุมผลึกของวัตถุ}$$

$$\alpha = \text{มุมความลาดเอียงของท้องลำน้ำ}$$

$$F_D = \text{ค่าแรงจุด ตามสมการ 2.6}$$

เมื่อกระแส น้ำเข้าสู่สภาวะ Turbulent flow แรงยก (Lift force) เริ่มก่อตัวขึ้น รูปสมการโมเมนต์เปลี่ยนแปลงเป็น

$$a_1 W_s \sin(\phi - \alpha) - F_L \sin \phi \times a_1 = a_1 F_D \cos \phi \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$F_L = \text{ค่าแรงยก ตามสมการ 2.7}$$

เมื่อผลลัพธ์รวมของแรงจุดและแรงยกเพิ่มขึ้นจนชนะน้ำหนักของวัตถุแล้ว เม็ดดิน เม็ดทรายจะเริ่มขยับตัว พื้นท้องน้ำที่ราบเรียบเริ่มปรากฏเป็นระลอกคลื่น (Ripple) ขึ้นทั่วไป เพิ่ม

ความหยาบและเพิ่มแรงต้านทานต่อแรงจุดและแรงยกจากกระแสน้ำ กระแสน้ำวน (Eddy) เล็กๆ เริ่มก่อตัวตามยอดคลื่นของพื้นทราย กระแสน้ำวนเหล่านี้ค่อยเปลี่ยนระลอกคลื่นเล็ก ๆ กลายมาเป็นเนินดิน เนินทราย (Dune) และนำไปให้เกิดสภาวะปั่นป่วนขึ้นตามลำดับ จนกลายเป็น Turbulent แรงจุดและแรงยกจะพาให้เม็ดดิน เม็ดทรายหลุดลอยอยู่ในน้ำ

ปริมาณเม็ดดินที่ลอยตัวอยู่ในน้ำ มีผลโดยตรงต่อขนาดของหลุมกัดเซาะ การทรบความเข้มข้นของมวลวัสดุลอยในน้ำจึงมีประโยชน์ต่อการคาดคะเนแนวการกัดเซาะ

Carstens (1966) และ Einstein (1950) ได้วิเคราะห์เรื่องนี้ในกรณีเดียวกันแต่ต่างวาระ หาความสัมพันธ์ของปริมาณมวลวัสดุในน้ำกับความเร็วกระแสน้ำ ได้ข้อสรุปคล้ายกัน คือ

$$N_s = \frac{V}{\sqrt{\left[\frac{\gamma_s}{(\gamma - 1)} \right] gD}} \quad (2.12)$$

N_s = ปริมาณวัสดุในน้ำ (Sediment number)

V = ความเร็วเฉลี่ยของกระแสน้ำ

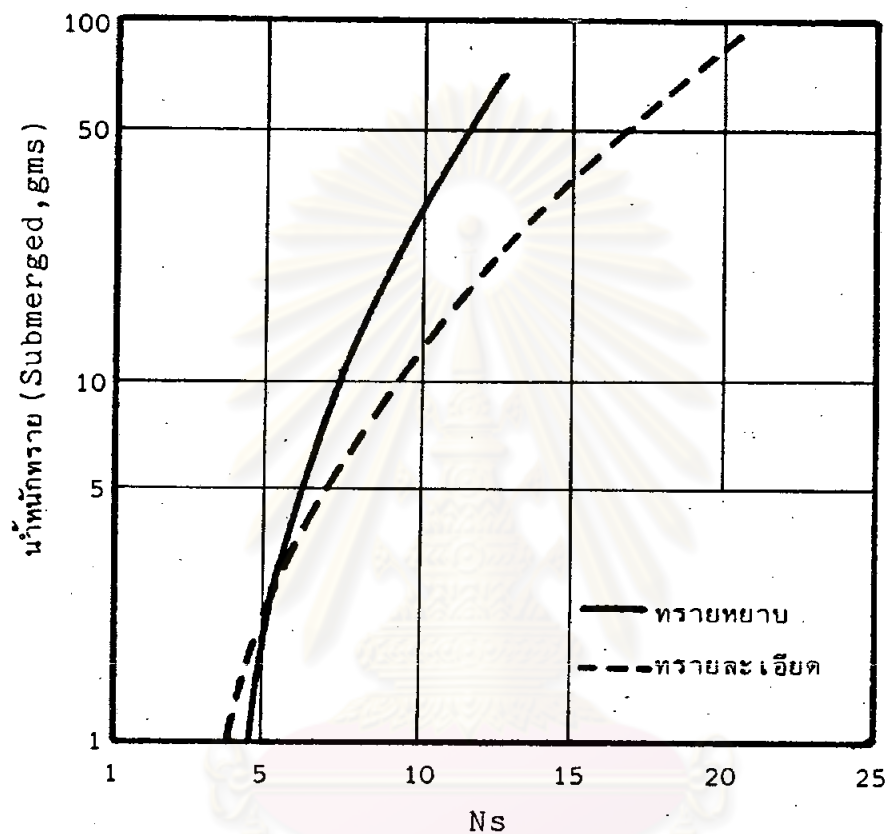
γ_s, γ = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุท้องน้ำและน้ำตามลำดับ

D = ขนาดตะกอนโดยเฉลี่ย

ในรูป 2-10 เป็นผลของการวิจัยส่วนหนึ่ง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักทรายต่อค่า N_s ทรายละเอียดจะให้ค่า N_s มากกว่าทรายหยาบในปริมาณที่เท่ากัน

Carstens (1966) กล่าวว่า ค่า N_s ในช่วงเริ่มกัดเซาะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่า N_s ช่วงที่การกัดเซาะได้ดำเนินต่อเนื่องแล้ว

ที่กล่าวมานี้ เป็นพฤติกรรมการกัดเซาะที่เกิดขึ้นต่อวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา การต้านทานต่อแรงปะทะมีจำกัด สำหรับวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก เมื่อถูกกระแทก หลุดลอยอยู่ในน้ำ จะพยายามเคลื่อนกลับไปยังที่เดิมในแนวตั้ง และจับลงด้วยความเร็วชนิดหนึ่ง เรียกว่า Fall Velocity (ω) ซึ่งเป็นแรงดึงให้วัสดุกลับเข้าที่เดิม ในกรณีเช่นนี้ หลุมกัดเซาะ



รูป 2-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักทราย (เปียก) และ N_s
(จาก H. Palmer, 1970)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไม่ปรากฏให้เห็นแม้จะมีการกัดเซาะเกิดขึ้นก็ตาม เว้นเสียแต่ว่าแรงจากความเร็วกระแสน้ำมีมากถึงขนาดชนะแรงตึงนี้ได้ แต่ก็ไม่สามารถพาวัสดุลอยออกไปไกลมากนัก Fall Velocity หาได้จากรูป 2-11 หรือสมการ 2.13 ดังนี้

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3C_D} \times \frac{(\rho_s - \rho) g D}{\rho}} \quad (2.13)$$

อย่างไรก็ตาม นักวิชาการหลาย ๆ ท่านได้พยายามศึกษาการกัดเซาะนี้ต่อไป โดยพยายามใช้ข้อมูลจากลำน้ำจริง นำมาคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง จนสร้างสูตรสำหรับการคาดคะเนเกี่ยวกับการกัดเซาะมากมาย ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกอ้างอิงเฉพาะสูตรที่เห็นว่าเหมาะสมเท่านั้น

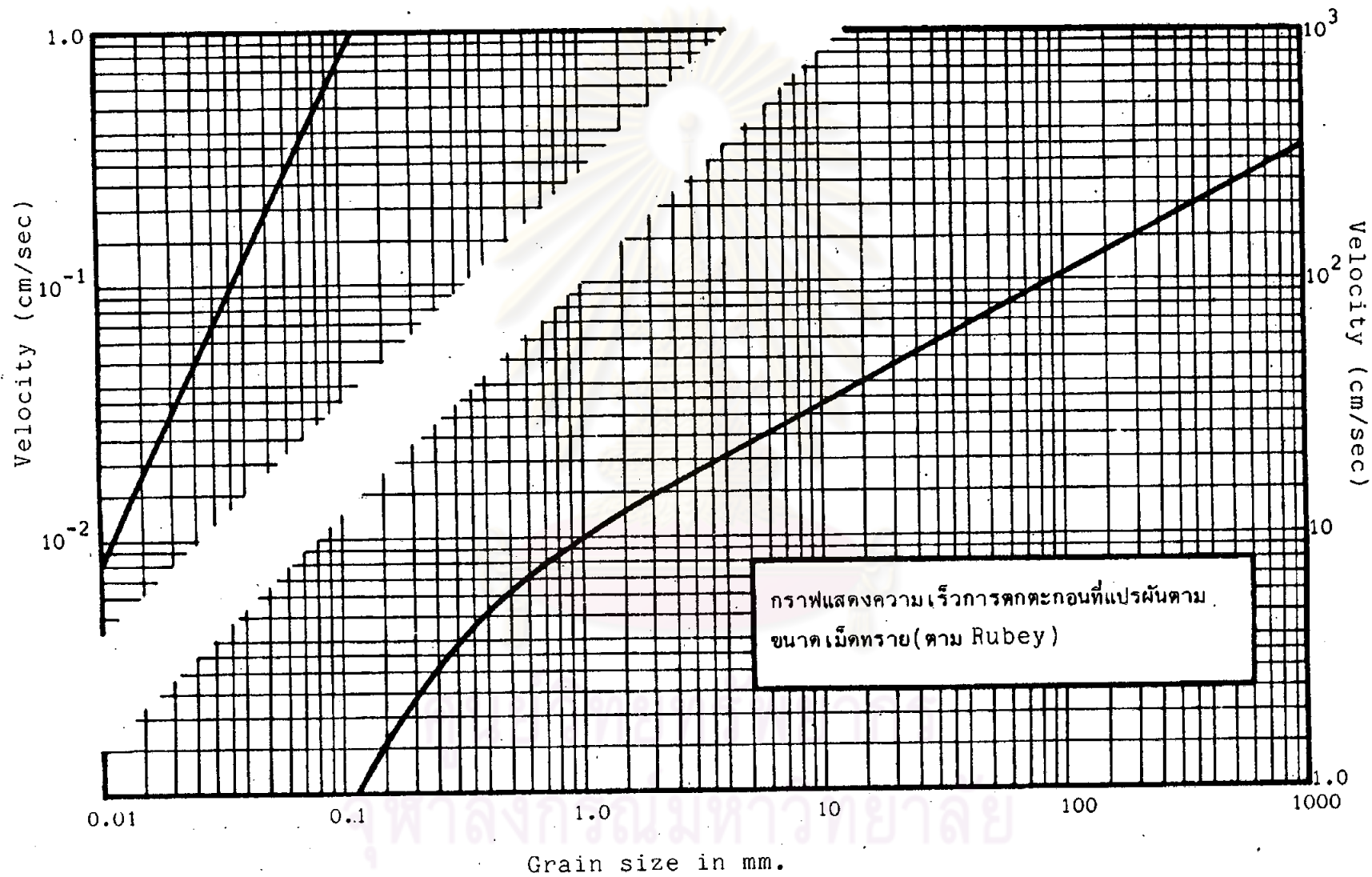
2.4 สถานะภาพของสิ่งก่อสร้างกับการกัดเซาะ

โครงสร้างต่าง ๆ ที่ก่อสร้างอยู่กลางลำน้ำก็ขวางกระแสน้ำ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชลศาสตร์ ซึ่งเป็นต้นเหตุการเกิดกัดเซาะ แต่จะแตกต่างกันตามชนิดของโครงสร้างและตำแหน่งที่ตั้ง สามารถจัดเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ Constriction, Obstruction และท่อกลมหรือท่อเหลี่ยม เป็นต้น

2.4.1 การบีบตัวของลำน้ำ (Constriction)

Constriction คือการที่พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำเปิดสายเดียวกัน ลดลงในทันที อาจเกิดจากความกว้างของลำน้ำลดลง และ/หรือเพราะมีสิ่งก่อสร้างอยู่กลางลำน้ำขวางทางกระแสน้ำไหล ณ จุดใดจุดหนึ่ง เช่นจุดที่ตั้งสะพาน ท่อลอด ซึ่งมีผลกระทบต่อ Boundary geometry อัตราการไหล (Q) และสถานะการไหล (State of flow) ของลำน้ำ

ณ จุด Constriction กระแสน้ำจะเกิดความปั่นป่วนทั้งในแนวที่ขนานและตั้งฉากกับทิศทางการไหล เกิดระดับน้ำต่างระดับขึ้น ในระหว่างที่กระแสน้ำไหลผ่านจุด Constriction พื้นที่การไหลเล็กกว่าพื้นที่การไหลปกติที่ผ่านมา จะมีกระแสน้ำบางส่วนแยกตัวออกหมุนเป็นวงเรียกว่าเขตน้ำวน (Eddy Zone) ในรูป 2-12 แสดงรูปแผนและรูปตัดตามยาวของลำน้ำที่เกิดกรณี Constriction ตำแหน่งหน้าตัดที่ (1) รูป 2-12. (ก) เป็นหน้าตัดของลำน้ำปกติ ส่วนหน้าตัดที่ (2) มีพื้นที่ลดลงเนื่องจากมีตอม่อก่อสร้างอยู่กลางน้ำ



รูป 2-11 กราฟแสดงความเร็วการตกตะกอนตามขนาดของเม็ดทราย (จาก Rubey)

กระแส น้ำต้องบีบตัวลงตามพื้นที่หน้าตัดที่ลดลง กลายเป็นลักษณะ Vena Contracta ใน Orifice flow พอพ้นคอม่อ กระแส น้ำเริ่มบานออกจนถึงตำแหน่งหน้าตัดที่ (4) การไหล จึง เข้าสู่พื้นที่หน้าตัดปกติ

กระแสน้ำที่ไหลผ่านจุด Constriction ยังสามารถแบ่งออกได้ตามสถานะการไหล คือ Subcritical flow หรือ Super Critical flow รูป 2-13 แสดงรูปตัดตามทาง น้ำไหลของน้ำเมื่อพบคอม่อสะพานในสถานะการไหลต่าง ๆ ในลำน้ำที่พื้นที่ท้องน้ำมีความลาดเอียง น้อยกว่าความลาดเอียงวิกฤต สถานะการไหลเป็น Subcritical flow ระดับน้ำทางต้นน้ำ จะสูงกว่าระดับน้ำทางท้ายน้ำและสูงไปทางต้นน้ำค่อนข้างไกล ซึ่งเรียกว่า Backwater Effect ดังแสดงในรูป 2-13 (ก), 2-13 (ข) หากความลาดเอียงของพื้นที่ท้องน้ำมากกว่าความลาดเอียง วิกฤตเฉพาะจุดที่ผ่านคอม่อเท่านั้น ดังแสดงในรูป 2-13 (ค) ความลึกน้ำด้านเหนือน้ำของ Constriction สูงกว่าความลึกวิกฤต ผิวน้ำจะก่อตัวเป็น S_1 - Profile ระดับน้ำ เพิ่มขึ้นในช่วงสั้นโดยจะเกิด Hydraulic jump ทางด้านเหนือน้ำ ดังแสดงในรูป 2-13(ง)

หน้าตัดวิกฤตของจุด Constriction สามารถเกิดขึ้นได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับ Energy (E_n) ของการไหลปกติ เทียบกับค่า E_c ของการไหลวิกฤต (Critical flow) ที่จุด Constriction

การวิเคราะห์คุณสมบัติการไหลโดยทั่วไป จะต้องมีข้อสมมุติฐาน ดังนี้

1. ความลาดเอียงของท้องลำน้ำมีน้อยมาก
2. ระดับน้ำของจุดที่เกิด Vena Contracta ใกล้เคียงกับระดับน้ำที่จุดหน้าตัด ที่ 3 หรือ
3. สมประสิทธิ์สำหรับค่าอัตราการน้ำไหล (Discharge) ขึ้นอยู่กับลักษณะการ หดตัว Eddy loss ความไม่สม่ำเสมอในการกระจายของความเร็วกระแสน้ำ และ Non hydrostatic distribution pressure

ฉะนั้น อัตราการไหลในจุด Constriction หรือจุดตำแหน่งคอม่อสะพานตั้งอยู่ จึงหา ได้จาก

$$Q = C_c A_3 V_3 \quad (2.14)$$

$$A_3 = \text{พื้นที่หน้าตัดที่จุด 3}$$

$$V_3 = \text{ความเร็วกระแสน้ำที่จุด 3}$$

$$C_c = \text{สัมประสิทธิ์}$$

จากสมการ 2.14 อาจเขียนได้เป็น

$$Q = CA_3 \sqrt{2g(\Delta h - h_f + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g})} \quad (2.15)$$

$$\Delta h = \text{Head loss}$$

$$= h_1 - h_3$$

$$h_f = \text{Frictional loss}$$

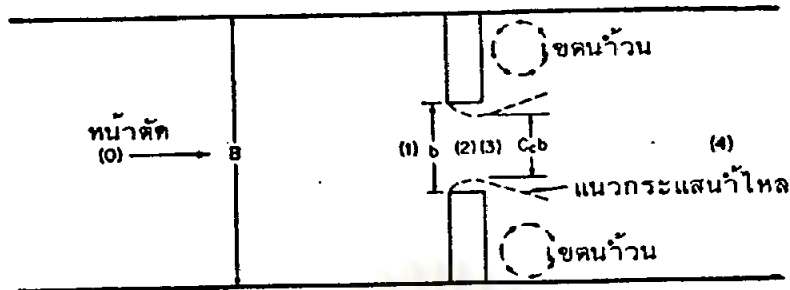
$$= L_a (Q/\sqrt{K_1 K_3}) + L(Q/K_3)^2$$

$$\alpha_1 = \text{Energy Coefficient at point 1}$$

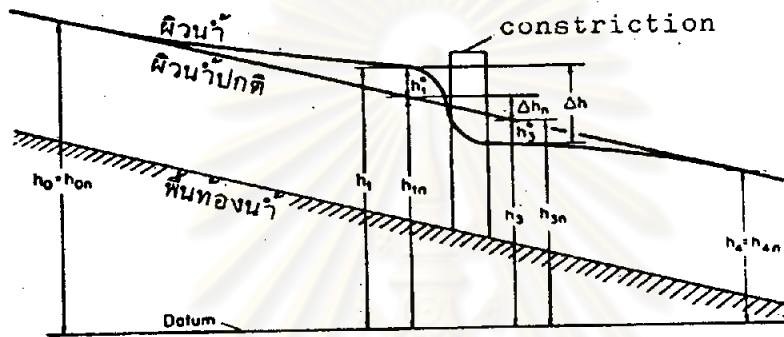
$$C = C' \cdot K_F \cdot K_R \cdot K_W \cdot K_\phi \cdot K_y \cdot K_x \cdot K_e \cdot K_t \cdot K_j$$

$$K_1, K_3 = \text{Total conveyances of section 1\&3}$$

C' เป็นค่าสัมประสิทธิ์สำหรับอัตราการไหลที่ผ่านจุด Constriction มีสภาพหรือเงื่อนไขที่เป็นมาตรฐานหนึ่ง ส่วนค่า K ทั้งหมดเป็นตัวผันแปรสำหรับเงื่อนไขอื่น ที่เปลี่ยนแปลงตาม Froude number (F), Entrance rounding (r/b), Bridge submergence, เสาค้ำสะพานและตอม่อตามลำดับ ค่า K ต่าง ๆ เหล่านี้อาจมีเพียงค่าเดียวหรือหลายค่าพร้อมกัน แล้วแต่สภาพของสะพานและลักษณะตอม่อริมฝั่ง หากสะพานมีเพียงตอม่อ เข็มตอกและตอม่อธรรมดา

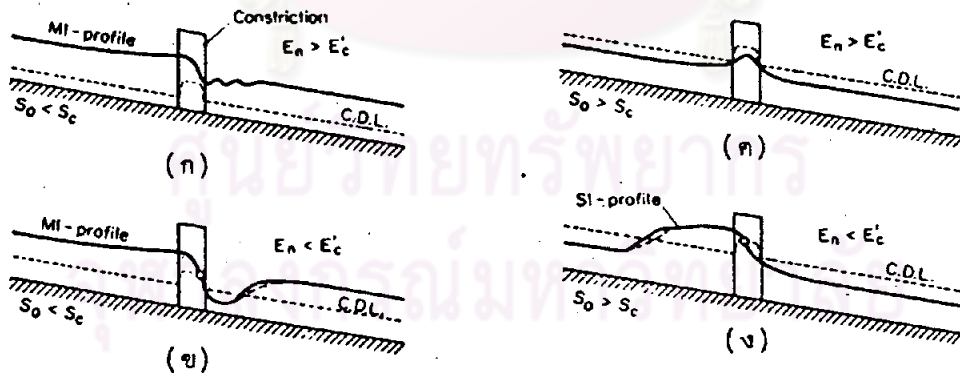


(ก) รูปแปลน



(ข) รูปด้านข้าง

รูป 2-12 แสดงกระแสน้ำไหลผ่าน Constriction (จาก Chow, 1959)



รูป 2-13 ระดับผิวน้ำไหลผ่าน Constriction ในสถานะการไหลแบบ Subcritical flow (ก, ข) และ Supercritical flow (ค, ง) (จาก Chow, 1959)

ค่า $C'=1$ ส่วนค่า K จะมีอิทธิพลเฉพาะค่า K_t, K_j เท่านั้น ค่า K ต่าง ๆ สามารถหาได้จาก Chart ต่าง ๆ แสดงในรูป 2-14 และ 2-15 ข้างล่างนี้ โดยให้

$$m = 1 - B/B'$$

$$F_3 = \frac{Q}{A_3 \sqrt{gY_3}}$$

จากสมการ 2.15 แทนค่า $h_{f'}$, $V_1 = Q/A$ จะได้สมการใหม่เป็น

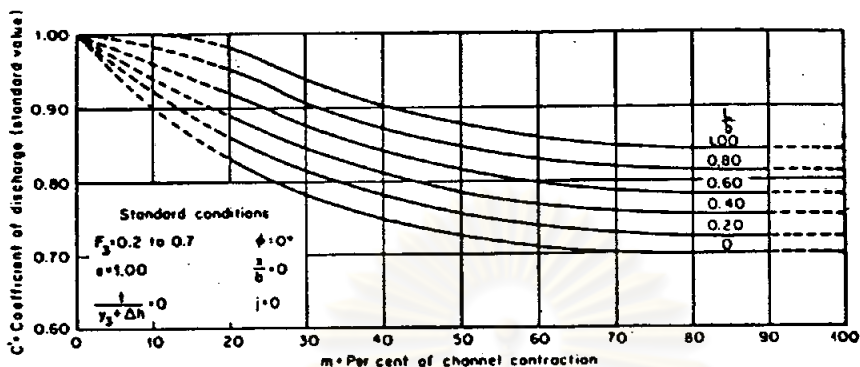
$$Q = 8.02CA_3 \sqrt{\frac{\Delta h}{1 - \alpha_1 C^2 (A_3/A_1)^2 + 2gC^2 (A_3/K_3)^2 (L+La K_3/K_1)}} \quad (2.15)$$

ถ้า F ที่จุด (3) ในรูป 2-12 มากกว่า 0.8 จะทำให้เกิด Critical หรือ Super critical velocity ขึ้น วิธีการคำนวณต้องเปลี่ยนไป

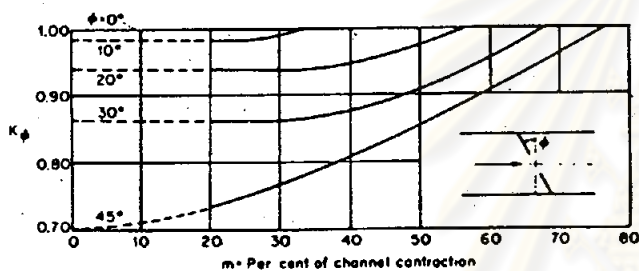
กราฟที่นำมาเป็นตัวอย่างการหาตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ 2.15 เป็นรูปแบบคอม่อริมที่มีความลาดเอียงทั้งด้านหน้าและด้านข้าง เป็นรูปแบบที่นิยมสำหรับสะพาน ส่วนกราฟรูปแบบอื่น ๆ สามารถหาศึกษาได้ในหนังสืออ้างอิงที่ได้ระบุไว้ รูป 2-14(ก-ค) เป็น Chart สำหรับหาค่า C', K_ϕ, K_n ใน Constriction ที่มีความลาดเอียงทั้งด้านข้างและด้านหน้าในอัตรา 2:1 ตามรูปทรงแสดงไว้ ส่วนรูปทรงที่มีความลาดเอียง 1:1 รูป 2-14 (ง-ฉ) ได้แสดงค่าของ C', K_ϕ, K_n ไว้เช่นกัน ในการก่อสร้างสะพานโดยทั่วไป คอม่อริมฝั่งอาจก่อสร้างยื่นเข้าไปในลำน้ำในตำแหน่งความลึกที่ไม่เท่ากัน ขณะเดียวกัน สะพานที่มีคอม่อริมมากกว่า 1 ติบ ย่อมจะมีคอม่อริมส่วนหนึ่งตั้งอยู่กลางน้ำ ตลอดจนความลึกของลำน้ำที่มีผลทำให้คอม่อริมอยู่ในน้ำมากน้อยต่างกัน สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล (Q) ในรูป 2-15(ก-ง) ได้แสดงกราฟสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้ อันได้แก่ค่า K_e, K_t, K_j

2.4.2 สิ่งกีดขวางกระแสน้ำไหล (Flow Obstruction)

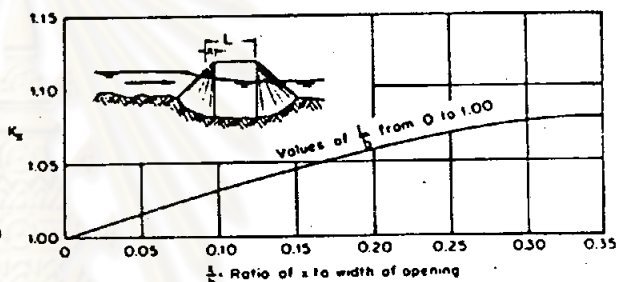
สิ่งกีดขวางกระแสน้ำ (Obstruction) หมายถึงสิ่งก่อสร้างที่ตั้งอยู่กลางน้ำกีดขวางการไหลของกระแสน้ำ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ขึ้นคล้ายกับ Constriction คือทำให้พื้นที่



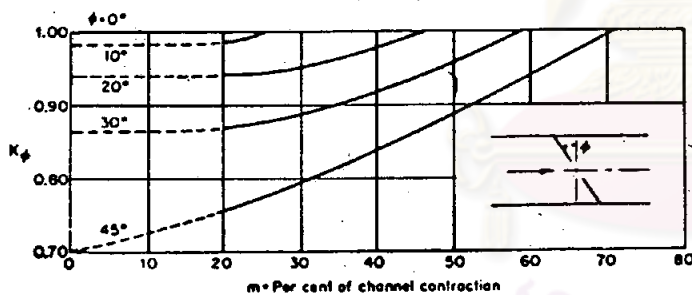
(ก)



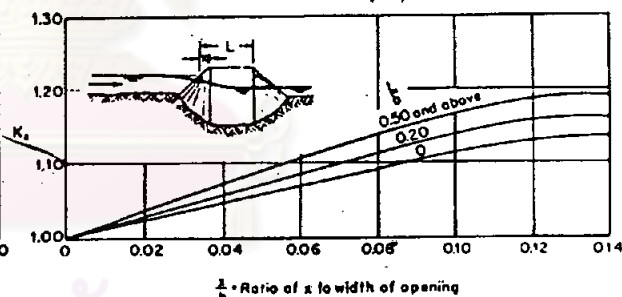
(ข)



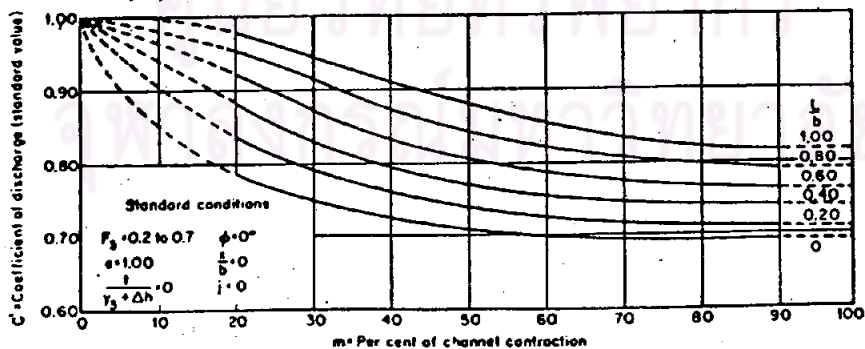
(ค)



(ง)

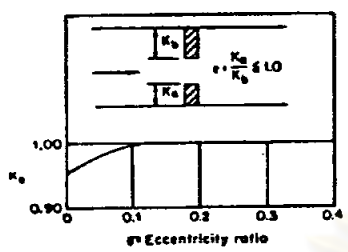


(จ)

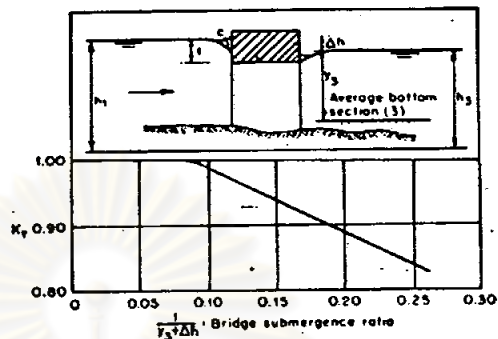


(ฉ)

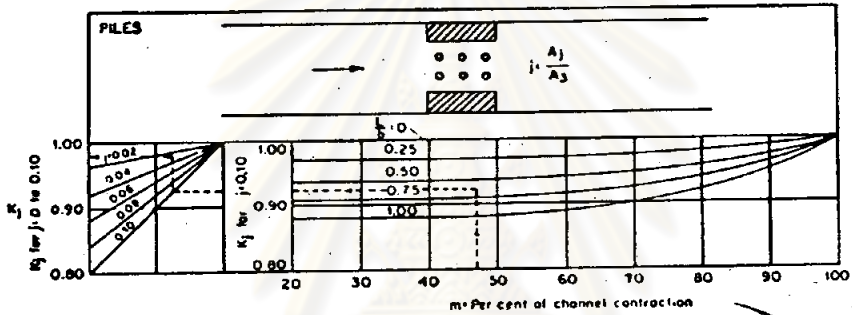
รูป 2-14 สัมประสิทธิ์ปริมาณน้ำไหลของ Constriction ที่มีลาดเอียง (Chow, 1959)
 (ก, ข, ค) แสดงค่า C' , K_D , K_X สำหรับ Constriction ที่มี Slope 2: 1
 (ง, จ, ฉ) แสดงค่า C' , K_D , K_X สำหรับ Constriction ที่มี Slope 1: 1



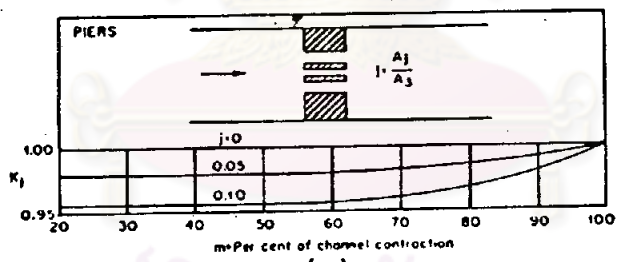
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูป 2-15 กราฟแสดง K_e, K_t และ K_j สำหรับ Constriction
ทุกประเภท (Chow, 1959)

หน้าตัดการไหลลดลง แต่ Constriction มีช่องเปิดเพียงแห่งเดียวในขณะที่ Obstruction ก่อให้เกิดช่องเปิดอย่างน้อย 2 แห่ง ในด้านการก่อสร้างสะพาน โครงสร้างกลางน้ำที่กีดขวางการไหลของกระแสน้ำ จะได้แก่ ตอม่อสะพาน เสาค้ำยัน เป็นต้น

น้ำที่ไหลผ่าน Obstruction เป็นได้ทั้ง Subcritical flow หรือ Super Critical flow เช่นกัน สมการ Energy สำหรับหน้าตัดที่ (2) และ (3) ในรูป 2-16 คือ

$$E \left(Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) = Y_3 + \frac{V_3^2}{2g}$$

$$E Y_2 (2 + F_2^2) = Y_3 (2 + F_3^2)$$

$$F_2 = \frac{V}{\sqrt{gY_2}}$$

$$F_3 = \frac{V}{\sqrt{gY_3}}$$

E = เปรอ์เซ็นต์ของ Energy ที่มีอยู่ โดยจะเกิด Energy loss ระหว่างหน้าตัด

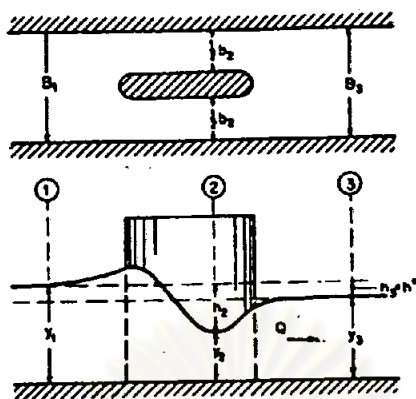
ให้ $\sigma = b_2/B_3$ และใช้ Continuity of flow จะได้

$$\sigma^2 = \frac{E^3 F_3^2 (2 + F_2^2)^3}{F_2^2 (2 + F_3^2)^3} \tag{2.17}$$

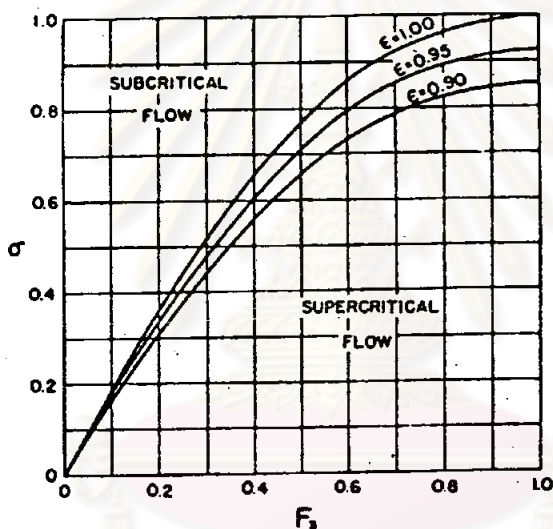
ถ้า พื้นที่หน้าตัดจุดที่ (2) เป็นพื้นที่วิกฤต หรือ $F_2 = 1$, F_3 ที่ต่อเนื่องจากจุดนี้ จะเป็นค่าจำกัด (Limiting Value) สามารถเรียกใหม่เป็น F_{3L} และสมการที่ 2.17 จะกลายเป็น

$$\sigma^2 = \frac{27 E^3 F_{3L}^2}{(2 + F_{3L}^2)^3} \tag{2.18}$$

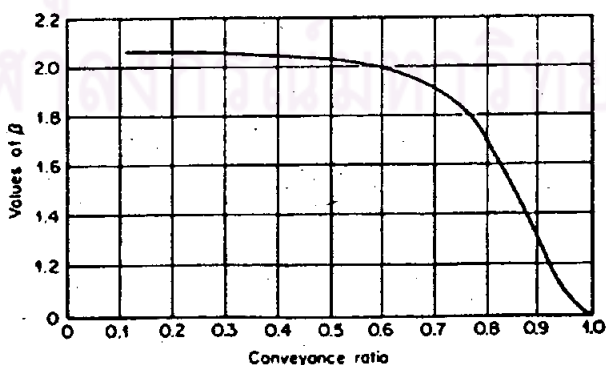
ความสัมพันธ์ระหว่าง σ และ F_3 ในข้อแปรเปลี่ยนของค่า E ระหว่าง 0.9 - 1.0



รูป 2-16 ภาพแสดงการไหลผ่าน Obstruction ของน้ำ (Chow, 1959)



รูป 2-17 ค่า σ สำหรับกระแสน้ำในสถานะการไหลของ Subcritical และ Supercritical flow (Chow, 1959)



รูป 2-18 กราฟแสดงค่า β ในสูตรของ Nagler (Chow, 1959)

สามารถเขียนเป็นกราฟได้ตามรูป 2-17 ซึ่งสามารถพิจารณาสถานะการไหลของกระแสน้ำจากการเปรียบเทียบค่า F_3 และ F_{3L} กล่าวคือ ถ้า $F_3 = F_{3L}$ สถานะการไหลจะเป็น Critical flow ถ้า $F_3 < F_{3L}$ สถานะการไหลเป็น Sub-critical flow ถ้า $F_3 > F_{3L}$ สถานะการไหลจะเป็น Super critical flow

สำหรับ Obstruction ที่เป็นตอม่อสะพาน Rehbock (1919, 1921) ได้แบ่งประเภทการไหลออกเป็น Least, Moderate และ Complete Turbulent ต่อมา Yarnell (Chow, 1959) คัดค้านว่าการแบ่งลักษณะนี้แม้จะมีประโยชน์แต่ไม่สมจริงเท่าการแบ่งแบบ Sub critical flow และ Super critical flow สมการสำหรับหาค่าอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่าน Obstructure ได้มีการวิเคราะห์ในแนวความคิดของ Yarnell นี้ ได้แบ่งออกเป็น 2 ฝ่าย ฝ่ายแรกคือ Negler (1918) ได้วิเคราะห์ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมกับสถานะการไหลแบบ Subcritical flow และ Critical flow ได้สมการ

$$Q = K_N b \sqrt{2g} \left(Y_3 - \theta \frac{V_3^2}{2g} \right) \sqrt{h_3 + \beta \frac{V_1^2}{2g}} \quad (2.19)$$

โดย K_N = สัมประสิทธิ์ขึ้นกับอัตราการลดของลำน้ำและคุณสมบัติของสิ่งก่อสร้าง

θ = ตัวประกอบสำหรับการลดความลึกลำน้ำจาก Y_3 ถึง Y_2 ปกติมีค่า 0.3

β = สัมประสิทธิ์สำหรับการแก้ไขความเร็วของลำน้ำ หาได้จากกราฟในรูป 2-18

ฝ่ายที่ 2 ได้แก่ d'Aubuisson (1840) ได้คิดสูตรหาค่าอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมกับสถานะการไหลแบบ Supercritical flow ได้สมการ

$$Q = K_A b Y_3 \sqrt{2gh_3 + V_1^2} \quad (2.20)$$

Type of pier	Conveyance ratio									
	0.9		0.8		0.7		0.6		0.5	
	K_N	K_A	K_N	K_A	K_N	K_A	K_N	K_A	K_N	K_A
Square noses and tails	0.91	0.96	0.87	1.02	0.86	1.02	0.87	1.00	0.89	0.97
Semicircular noses and tails	0.94	0.99	0.92	1.13	0.95	1.20	1.03	1.26	1.11	1.31
90° triangular noses and tails	0.95	-	0.94	-	0.92					
Twin-cylinder piers, with or without diaphragms	0.91	-	0.89	-	0.88					
Lens-shaped noses and tails	0.95	1.00	0.94	1.14	0.97	1.22				

ตาราง 2-1 ค่า K_A, K_N ในเงื่อนไขต่างๆของ Pier โดย Yarnell (Chow, 1959)

โดย K_A = อัตราการหดตัวของลำน้ำและรูปลักษณะของสิ่งกีดขวาง

$$Y_2 = Y_3 \quad (\text{เพราะ Backwater})$$

YARNELL (Chow, 1959) ได้ศึกษารายละเอียดในสูตรของ Negler และ d'Aubuisson พบว่า สูตรทั้งสองใช้ได้ในความเร็วน้ำปกติ แต่ไม่เหมาะสมกับความเร็วน้ำสูง จึงได้ทำการวิเคราะห์ใหม่ หาค่าสัมประสิทธิ์ K_N, K_A เพื่อใช้ในการปฏิบัติ สำเร็จผลดังปรากฏในตาราง 2-1 ได้ค่า K_N และ K_A ในเงื่อนไขต่าง ๆ

2.4.3 ท่อลอด (Culvert)

ท่อลอดแบ่งออกเป็นท่อลอดแบบกลม (Circular calvert) และท่อลอดแบบเหลี่ยม (Box calvert) ทั้ง 2 แบบจัดได้เป็น Constriction อีกชนิดหนึ่งที่มีปากทางเข้า (Inlet) เป็น Contraction ชนิดพิเศษ คุณสมบัติของน้ำที่ไหลผ่านท่อจะแปรเปลี่ยนไปโดยถูกจำกัดด้วยรูปทรงทางเข้า (Inlet geometry) ในรูปของขอบท่อด้านในที่เป็นเหลี่ยมหรือมน ความลาดเอียง (Slope) ในการวางท่อ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (Diameter) ความขรุขระของผิวภายในท่อ (Roughness) รวมทั้งข้อจำกัดที่นอกเหนือไปจากตัวท่อคือสภาพท้ายน้ำ

การกัดเซาะท่อลอดมีหลักการเกี่ยวกับการกัดเซาะต่อม่อสะพาน พฤติกรรมสำคัญอยู่ที่แรงกระทำของลำน้ำที่พุ่งออกจากปากท่อ I.S. Dunn (1959) อธิบายว่า " วัสดุที่อยู่ปากท่อจะถูกกัดเซาะเมื่อแรงกระทำของน้ำเท่ากับหรือมากกว่าแรงต้านทานของเม็ดดิน" ความรุนแรงในการกัดเซาะนี้ไม่อาจจะคาดคะเนได้ หากไม่เข้าใจถึงชลศาสตร์การไหลของน้ำภายในท่อลอด และหาวิธีป้องกันในสิ่งที่เกิดขึ้นนั้น ตัวแปรสำคัญที่เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงในชลศาสตร์การไหลนี้ ได้มีการทดลองโดย Yarnell, Nagler และ Woodward (1926), Mavis (1942), Straub และ Bowers (1950), Bowers (1953), Clayton (1953), French (1955-1957) ผลการทดลองจากตัวอย่างท่อชนิดต่าง ๆ พอสรุปตัวแปรที่สำคัญ ๆ ได้ดังนี้

1. ความสูงระดับน้ำ (Head of water-H) ที่ลอคท่วไปปากทางเข้า (Inlet) จะไม่ต่ำกว่าระดับน้ำและการไหลเข้าปากท่อจะเป็นการไหลอิสระ (Free Flow) ถ้าความสูงระดับน้ำ (H) ต่ำกว่าความสูงวิกฤต (H^*) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.5 เท่าของความสูงของท่อลอค ค่าที่เปลี่ยนแปลงของ H^* นี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเข้า

2. รูปทรงปากท่อ ท่อลอคที่มีปากทางเข้าเป็นเหลี่ยมหรือมน จะมีผลต่อการไหลภายในท่อคือการไหลของน้ำที่เต็มท่อและการไหลของน้ำที่ไม่เต็มท่อ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณน้ำไหล และความเร็วหน้าโดยตรง

3. ความยาวท่อ ความยาวท่อในที่นี้ถูกกำหนดไว้ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (L/D) เรียกว่า ความยาวสัมพัทธ์ เพื่อนำไปใช้ในการจำแนกการไหลในท่อว่าเป็นการไหลในท่อสั้นหรือยาว (Hydraulically short or long) โดยมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติอื่น ๆ ของท่อ เช่นความลาดเอียง รูปทรงส่วนขอบปากทางเข้าของท่อ และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ ตามที่ได้แสดงไว้ในรูป 2-19 หากความยาวท่อมีไม่เพียงพอ โอกาสที่น้ำจะไหลเต็มท่อ (Pipe Flow) จะไม่เกิดขึ้นและมีผลต่อปริมาณน้ำไหลเช่นกัน

ในด้านการปฏิบัติ การหาปริมาณน้ำไหลของท่ออาจพิจารณาได้จากความสูงระดับน้ำ (H) ขนาดท่อ (D) ค่าความสูงท้ายน้ำ (Y_t) และค่าความสูงน้ำวิกฤต (Y_e) ภายในท่อ จากความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เหล่านี้สามารถจำแนกชนิดการไหลของน้ำภายในท่อออกเป็น 6 ชนิดตามที่ได้แสดงไว้ในรูป 2-20 คือ

ชนิดที่ 1 และ 2 จัดเป็นการไหลภายในท่ออย่างแท้จริง เนื่องจากมีน้ำไหลเต็มท่อ สัมประสิทธิ์สำหรับค่าปริมาณน้ำไหล (Q) มีค่าเท่ากับ 1

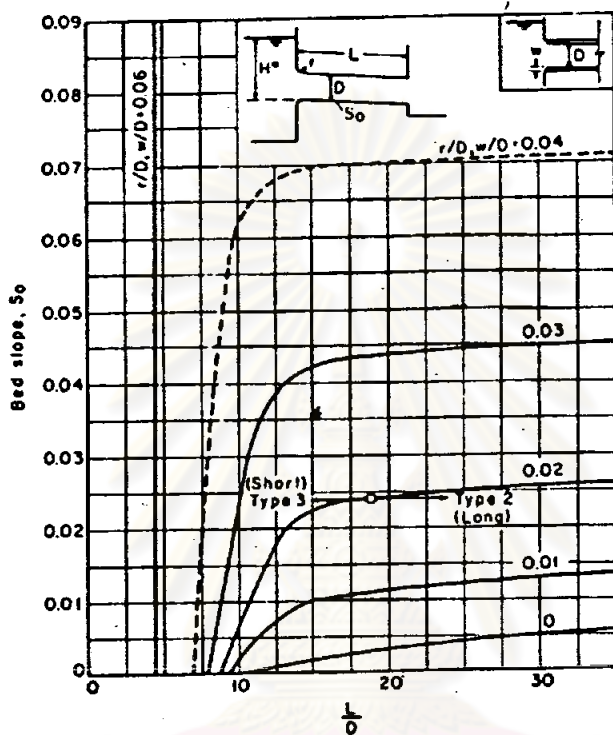
ชนิดที่ 3 เป็น 1 ใน 4 ชนิดของการไหลที่มีน้ำไหลไม่เต็มท่อ กลายเป็นการไหลแบบทางน้ำเปิด (Open channel) อัตราการไหลของน้ำในชนิดนี้มีลักษณะคล้ายการไหลของน้ำที่ผ่าน Orifice สัมประสิทธิ์สำหรับค่าปริมาณน้ำไหล (Q) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.45 - 0.75

ชนิดที่ 4, 5 และ 6 เป็นการไหลของน้ำแบบทางน้ำเปิดที่มีลักษณะการไหลผ่านฝายน้ำล้น (Weir) ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำไหลเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.75 - 0.95

อย่างไรก็ตาม การหาค่าปริมาณน้ำไหลผ่านท่ออาจหาเป็นค่าประมาณได้จากกราฟที่แสดงไว้ในรูป 2-21 และ 2-22 ซึ่งแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำไหลกับขนาดท่อและความสูงน้ำ ทั้งในท่อกลมและท่อเหลี่ยม ผลของค่าปริมาณน้ำไหลที่หาได้จากวิธีการใดวิธีการหนึ่ง จะถูกนำมาคำนวณหาแรงกระทำของน้ำต่อวัสดุท้ายน้ำ และใช้ในการออกแบบพื้นที่ระบายน้ำให้เพียงพอกับปริมาณน้ำที่มีอยู่ในฤดูน้ำหลากแต่ละครั้ง

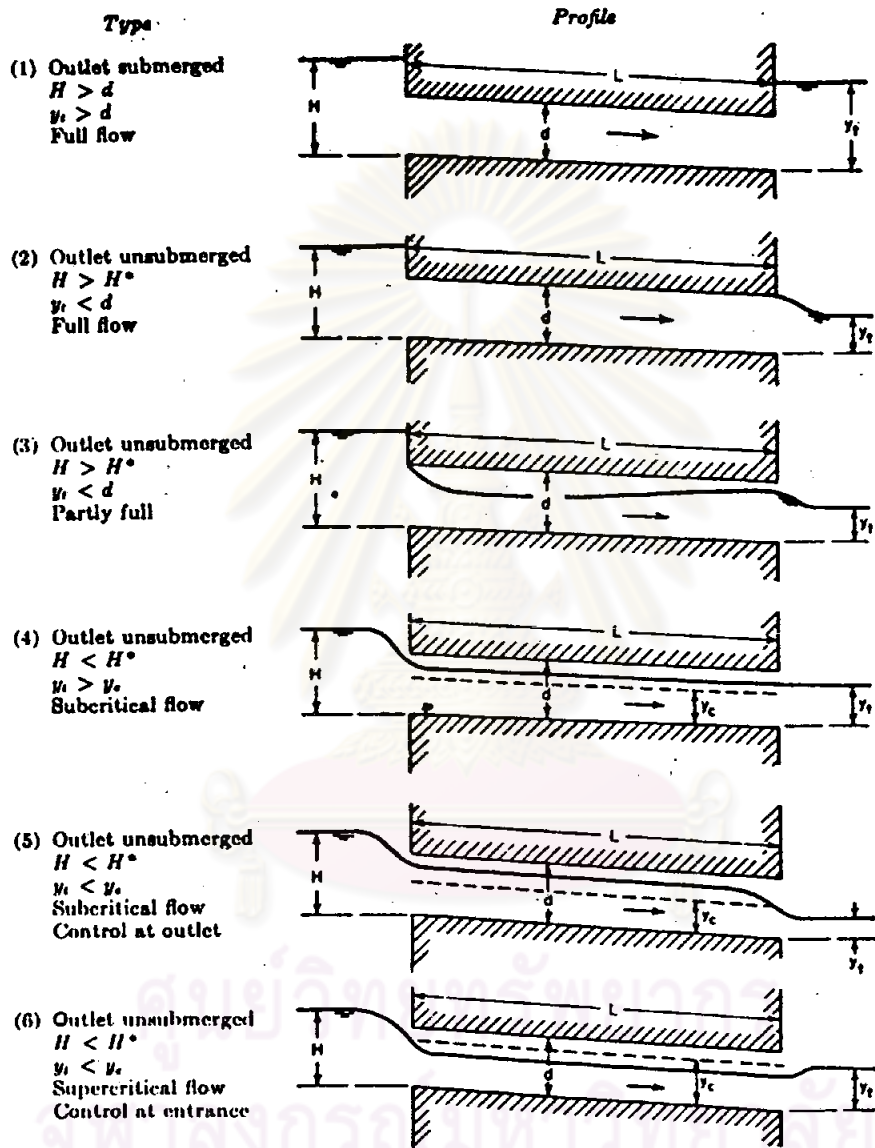


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

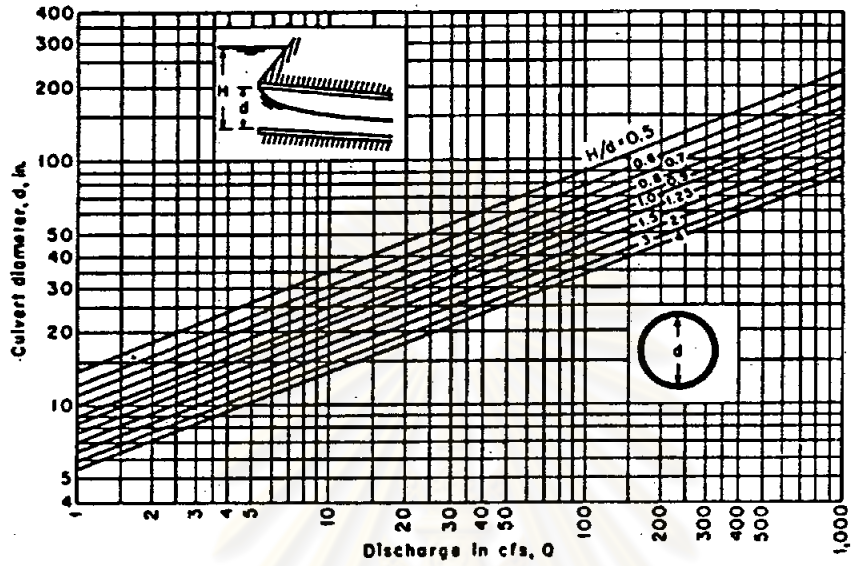


รูป 2-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความลาดเอียง ขนาด
รูปทรงของท่อ ค่อกำหนด Hydraulicly
short and long (Chow, 1959)

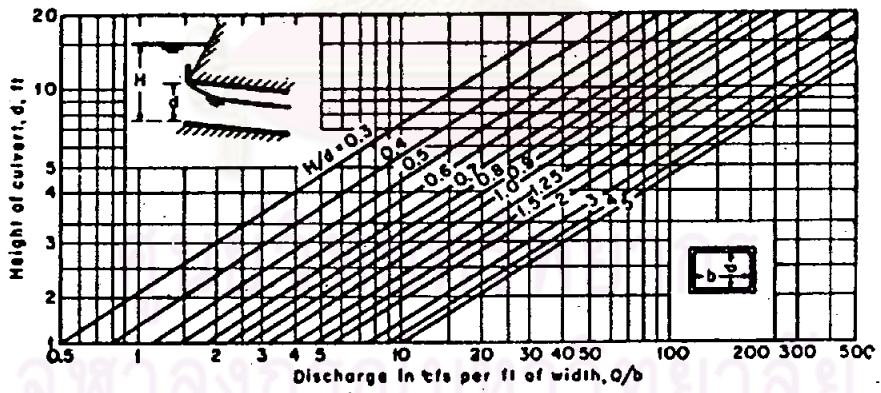
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 2-20 ชนิดของการไหลในท่อ (จาก Chow, 1959)



รูป 2-21 กราฟแสดงค่าแรงดันสำหรับท่อกลมที่มีขอบเหลี่ยมและน้ำไหลไม่เต็มท่อ (จากChow, 1959)



รูป 2-22 กราฟแสดงค่าแรงดันสำหรับท่อเหลี่ยมที่มีขอบเหลี่ยมและน้ำไหลไม่เต็มท่อ (Chow, 1959)