

บทที่ 2

หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา

2.1 หลักการที่ใช้ในการศึกษา

2.1.1 ปรัชญาการกัดเซาะ

การกัดเซาะของกระแสน้ำในทางธรรมชาติ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ กัดเซาะสภาพทั่วไป (general scour) การกัดเซาะจากการบีบตัวของลำน้ำ (constriction scour) และกัดเซาะเฉพาะแห่ง (local scour) ซึ่งเกิดกระแทกหน้าจากภาวะน้ำหลาก หรือพบสิ่งกีดขวาง ทั้งสามลักษณะเป็นอันตรายต่อโครงสร้างทุกประเภทที่ก่อสร้างกีดขวางการไหลของกระแสน้ำ เช่น เขื่อน ฝาย สะพาน เป็นต้น ดังนั้น การเข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของน้ำที่สอดคล้องสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพของลำน้ำ อันเป็นผลจากการสร้างโครงสร้างขวางกั้นการไหลของน้ำในลำน้ำ ในสถานที่ที่เลือกไว้เพื่อการก่อสร้างโครงสร้างก่อนเริ่มทำการออกแบบ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุในโครงสร้างนั้น ๆ โดยเฉพาะโครงสร้างสะพาน ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างหลัก คือ เสาเข็ม ฐานรากและตอม่อ ซึ่งก่อสร้างอยู่กลางน้ำ เพื่อรับน้ำหนักสะพาน ส่วนบนและน้ำหนักจรของยวดยาน

แนวทางเพื่อการศึกษาปัญหาการกัดเซาะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเด็น คือ

- (1) ลักษณะทางกายภาพของลำน้ำ
- (2) พฤติกรรมของกระแสน้ำอันเนื่องจากการก่อสร้างสะพานและการก่อสร้างอื่นๆ

แนวทางแรกเป็นธรรมชาติของลำน้ำก่อนการก่อสร้างวิเคราะห์หาความเร็ว กระแสน้ำ แรงปะทะ สภาพดิน การเคลื่อนที่ของตะกอน แล้วนำไปออกแบบตามที่กล่าวมาแล้ว แนวทางหลังเป็นผลที่ปรากฏหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ ทำให้เกิดการลดพื้นที่หน้าตัดการไหล (constriction) กลายเป็นสิ่งกีดขวางการไหลของกระแสน้ำ (flow obstruction) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (velocity) ทิศทางการไหล และสถานะการไหล (state of flow) รวมไปถึงโครงสร้างที่ออกแบบเป็นท่อลอดทั้งท่อกลม (circular culvert) และท่อเหลี่ยม (box culvert) แนวทางทั้งสองข้อนี้มีผู้นำมาศึกษาทดลองในสวนปศุศัลยกรรม และต่างตั้งเป้าหมายการศึกษาของตนแยกออกไปอย่างกว้างขวาง แตกแขนงออกตามประสบการณ์ ข้อปัญหาที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตาม จุดเริ่มต้นของการศึกษาค้นคว้าแต่ละครั้งได้อ้างอิงมาจากจุดเดียวกัน คือ พฤติกรรมการกัดเซาะ

กระแสน้ำที่ไหลมาตามลำน้ำ เมื่อมีสิ่งกีดขวางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วกระแสน้ำ อันเนื่องมาจากเหตุใดก็ตาม จะก่อให้เกิดภาวะปั่นป่วนและรุนแรงขึ้นจนกลายเป็นน้ำวน เส้นใย กระแสน้ำไหลออกเป็นสายพุ่งออกตามทิศทางต่าง ๆ ขณะเดียวกัน แรงยกจะเพิ่มขึ้นจนสามารถพัดพาเอาวัสดุท้องน้ำ เช่น ดิน ททราย กรวด ณ จุดที่กระแสน้ำสายนั้นไหลผ่านลอยตัวขึ้นและเคลื่อนออกจากที่อยู่เดิม หากการนำพาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง จุดที่ถูกแรงกระทำโดยตรงจะกลายเป็นหลุม เริ่มจากหลุมเล็กแล้วค่อย ๆ ขยายเป็นหลุมใหญ่เรียกว่าหลุมกัดเซาะ ก้นหลุมมีระดับลึกลงไปจากระดับท้องน้ำเดิมความลึกที่ปรากฏแต่ละแห่งมีขนาดแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับองค์ประกอบหลาย ๆ อย่าง สิ่งแรก คือ กระแสน้ำ ซึ่งก่อตัวเป็นกระแสน้ำวน (vortex) ถ้ากระแสน้ำวนแรงมากจะทำให้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาต้านทานแรงกระแสน้ำไม่ไหวถูกดูดให้ลอยตัวขึ้น กระแสน้ำที่ตามมาจะทำหน้าที่พาวัสดุเคลื่อนที่ไป ถ้ากระแสน้ำระลอกหลังมีแรงน้อยกว่า ขณะเดียวกันแรงตกตะกอนของวัสดุมีมากกว่าวัสดุก็จะตกตะกอนลงยังที่เดิม คุณสมบัติของวัสดุจึงเป็นองค์ประกอบที่สองของการกัดเซาะ อย่างไรก็ตามหากกระแสน้ำมีความเร็วสูง คุณสมบัติของมวลวัสดุสามารถจะไม่นำมาพิจารณาได้ หลุมกัดเซาะโดยทั่วไปมีด้านข้างลาดเอียงเป็นมุม ความลึกวัดจากปากหลุมถึงก้นหลุมเรียกว่าความลึกกัดเซาะ (scour depth) ขนาดของปากหลุมขึ้นอยู่กับขนาดของตอม่อหรือเสาเข็ม โดยหลุมกัดเซาะจะค่อย ๆ ขยายตัวตามความลึกที่เพิ่มขึ้น ดังรูป 2.1 สำหรับมิติต่าง ๆ และปริมาตรของส่วนประกอบของหลุมกัดเซาะแต่ละส่วน ดังรูป 2.2

ปรากฏการณ์กัดเซาะสามารถแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน

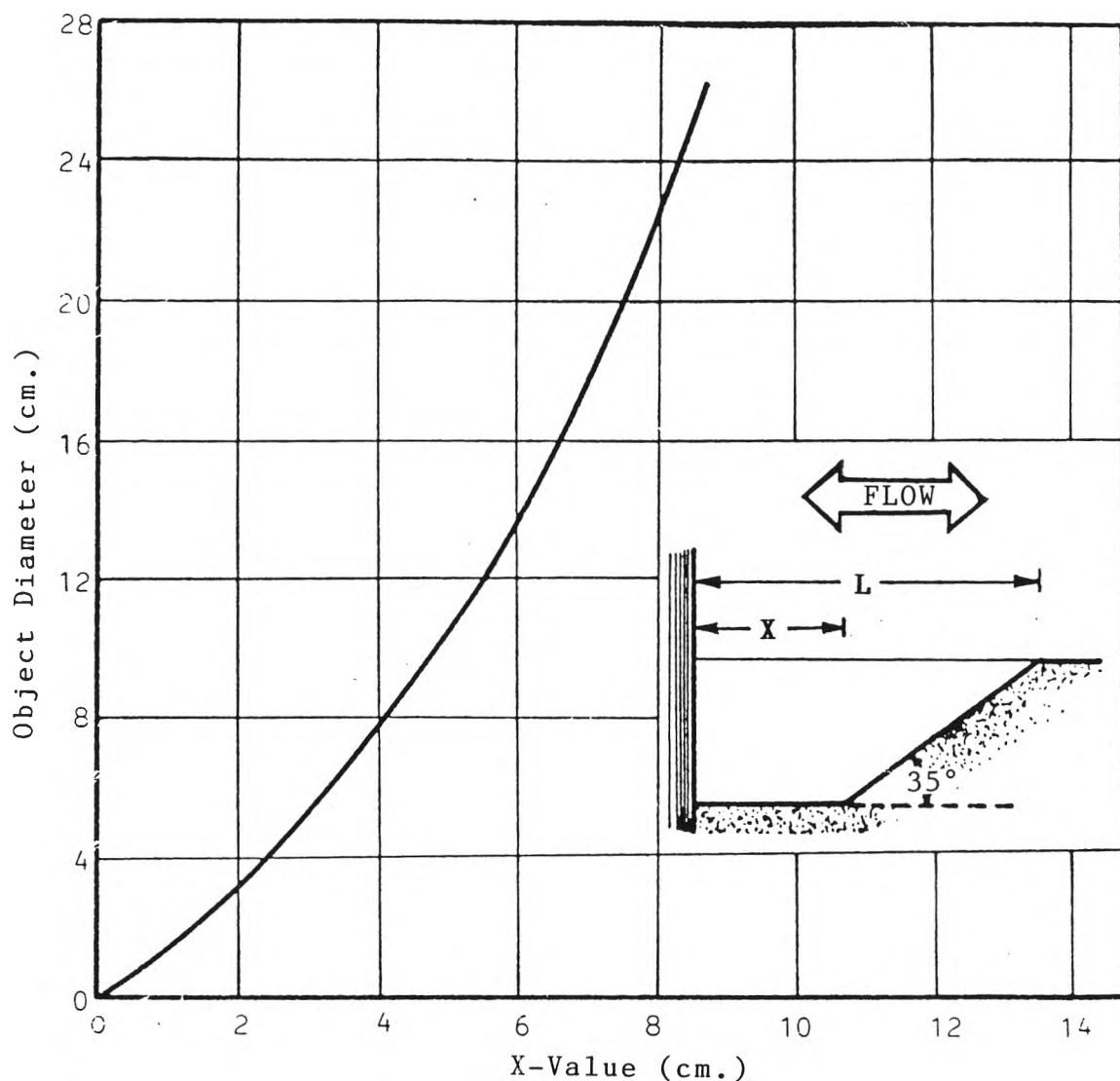
(1) ขั้นตอนเริ่มแรกปรากฏหลุมเล็ก ๆ บนผิวราบเรียบของท้องน้ำ สามารถมองเห็นได้ชัดเจน และความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

(2) ขั้นสมดุล (equilibrium scour depth) ในขั้นนี้ความลึกจะเข้าใกล้ภาวะสมดุล คือ มีการกัดเซาะในขณะที่มีการทับถมของเม็ดดินเข้าสู่จุดกัดเซาะ อัตราการกัดเซาะจึงลดลงและเข้าสู่สภาวะที่เกือบจะคงที่ ให้ค่าความลึกกัดเซาะสูงสุดชั่วคราว

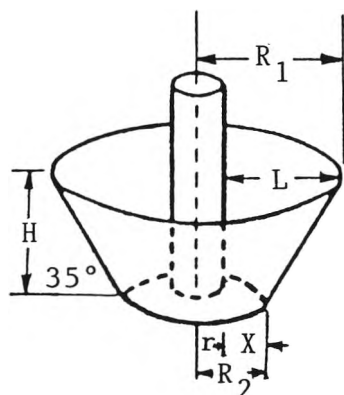
(3) ขั้นสูงสุด (maximum scour depth) หลุมกัดเซาะจะทรงตัวอยู่ในขั้นภาวะสมดุลจนถึงเงื่อนไขหนึ่งจึงจะมีการกัดเซาะต่อ และถึงจุดความลึกกัดเซาะสูงสุดหรือเกิดเงื่อนไขที่ต้องยุติการกัดเซาะ ค่าความลึกสมดุลขณะนั้นก็จะเป็ความลึกกัดเซาะสูงสุด

2.1.2 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ได้แก่ รูปทรงเรขาคณิตของตอม่อ ขนาด และมุมปะทะของตอม่อ รูปแบบการไหล พฤติกรรมการไหล ความเร็ว ความลึก



รูป 2.1 กราฟแสดงการขยายของหลุมกัดเซาะ (H.Palmer (1970) จากอ้างอิงสมรักษ์,1987)



SCOUR PIT

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

$$L = 0 \rightarrow L_{\text{max}} \text{ in } 0.5 \text{ cm. increment}$$

$$X = L/2 \rightarrow X_{\text{max}}$$

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

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

รูป 2.2 มิติและปริมาตรของหลุมกัดเซาะ (H.Palmer (1970) จากอ้างอิงสมรักษ์,1987)

ของการไหล คุณสมบัติของน้ำ ความหนืด (viscosity) ความหนาแน่น (density) คุณลักษณะของตะกอน ขนาด การกระจายตัว ช่วงเวลาในการกัดเซาะ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\text{Scour depth} = F \left[\left(\text{Pier} \right), \left(\text{Flow} \right), \left(\text{Fluid Characteristics} \right), \left(\text{Sediment} \right), \left(\text{Time} \right) \right]$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะพบว่า การวิเคราะห์หาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน เป็นสิ่งที่กระทำได้ยากเนื่องจากมีปัจจัยต่าง ๆ มากมาย อย่างไรก็ตามอิทธิพลของวัสดุท้องน้ำ รูปแบบตอม่อ ความลึกของน้ำ และความเร็วของการไหล จะถูกนำมาพิจารณาในการศึกษา โดยที่จะยกเว้นเงื่อนไขของเวลา เนื่องจากจะศึกษาหลุมกัดเซาะในสภาวะที่การกัดเซาะสูงสุดแล้ว และยังคงเว้นเงื่อนไขของความหนาแน่นของของไหล (fluid density) และความหนืดของของไหล (viscosity) เนื่องจากกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.1.2.1 อิทธิพลของตอม่อสะพาน (influence of pier) จะพิจารณาถึง รูปร่าง ขนาด และรูปแบบการวาง

2.1.2.2 อิทธิพลของสภาวะการไหล (influence of flow characteristics on local scour) โดยจะใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางกลศาสตร์ 3 ทฤษฎี ได้แก่

- (1) หลักการคงตัวของมวล (conservation of mass)
- (2) หลักการคงตัวของโมเมนตัม (conservation of momentum)
- (3) หลักการคงตัวของพลังงาน (conservation of energy)

เพื่อใช้ในการพิจารณาอิทธิพลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการไหลดังต่อไปนี้

- อิทธิพลของความลึก และความเร็วของน้ำ (influence of flow depth and velocity)
- อิทธิพลของช่วงเวลาการไหล (influence of flow duration)
- อิทธิพลของฟรูดนัมเบอร์ (influence of froude number)
- อิทธิพลของเรย์โนลด์นัมเบอร์ (influence of reynolds number)

2.1.2.3 อิทธิพลของวัสดุท้องน้ำ (influence of bed material on local scour) โดยจะพิจารณาถึง ขนาด และ ลักษณะการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำ

2.2 การศึกษาที่ผ่านมา

ความรุนแรงของปัญหาการกัดเซาะที่เกิดขึ้นต่อตอม่อสะพาน ขึ้นอยู่กับสภาพของธรรมชาติ แต่สามารถแก้ไขป้องกัน หรือลดความรุนแรงลงได้โดยการศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะรอบตอม่อ

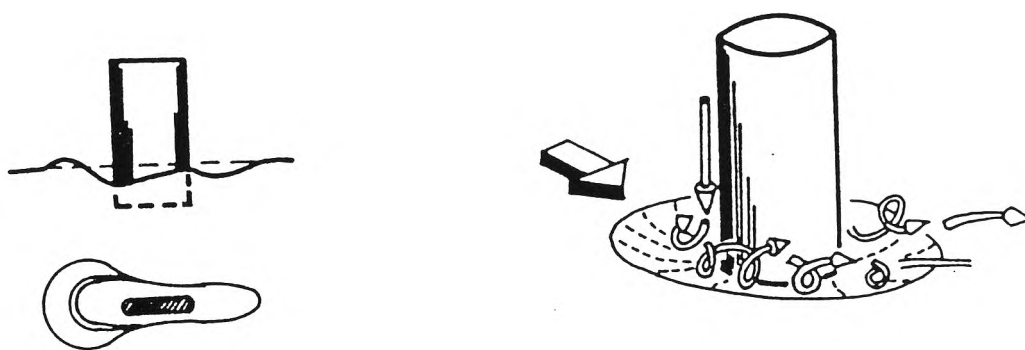
สะพาน แล้วนำไปออกแบบหาวิธีป้องกันหรือลดความรุนแรงของการกัดเซาะ การกัดเซาะไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในประเทศไทย ประเทศอื่น ๆ ก็ประสบปัญหานี้เช่นกัน โดยเฉพาะประเทศในซีกโลกตะวันตกมีการศึกษาค้นคว้ากันตั้งแต่ปี 1950 ผลงานวิจัยปรากฏออกมามากมายในช่วงปี 1950-1975 เน้นหนักไปในด้านการศึกษาหาพฤติกรรมการกัดเซาะ และการคาดคะเนความลึกการกัดเซาะ ส่วนประเทศในซีกโลกตะวันออกโดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่น เริ่มทำการศึกษาวิจัยปัญหานี้ในช่วงปี 1970-1980 แต่เน้นหนักไปในด้านการป้องกันการกัดเซาะ สำหรับในประเทศไทยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างสะพาน ได้แก่ กรมทางหลวง กรมโยธาธิการ ไม่ได้มีการสำรวจรวบรวมข้อมูลหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานไว้ เพียงแต่ทราบว่าการกัดเซาะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สะพานเกิดการวิบัติ และเมื่อสะพานวิบัติ ก็ทำการซ่อมแซม เช่น นำหินทิ้งไปทิ้งบริเวณหลุมกัดเซาะ เป็นต้น

2.2.1 การศึกษาทั่วไปเกี่ยวกับการกัดเซาะ

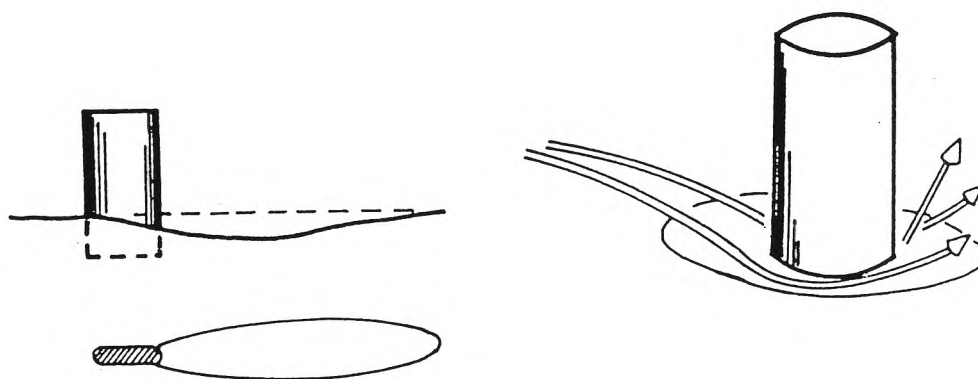
นักวิชาการหลายท่าน เช่น Tison (1940) Keutner (1932) Posey (1949) Laursen (1956) Neil (1964) Bata (1960) และ Roper (1967) เป็นต้น ต่างให้ความเห็นว่าจุดเด่นของกระแสน้ำที่ไหลผ่านตอม่อจะปรากฏเป็นกระแสน้ำวนขนาดใหญ่ ปรับตัวไปตามรูปทรงของตอม่อ น้ำวนเหล่านี้เป็นจุดเริ่มของกลศาสตร์แห่งการกัดเซาะขั้นพื้นฐาน ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (pressure) ในกรณีที่แรงดันมากกระแสน้ำใน Boundary layer จะแยกออกไป 3 ทิศทางตามแนวแกน X Y Z หนึ่งใน 3 ทิศทาง คือทิศทางตามแกน Z กระแสน้ำมันตัวลงไปตามผิวตอม่อในแนวตั้งเกิดกระแสน้ำวนในรูปเกือกม้า เรียกว่า Horseshoe vortex system ดังรูป 2.3 ก.

Schwind (1962 อ้างถึงใน Shen, 1971 : 23-4) ผู้ศึกษาบันทึกในผลการทดลองเขาว่าในกระแสน้ำที่มีค่า Reynolds number บางช่วง Horseshoe vortex ก่อตัวขึ้นและทิ้งห่างเป็นระยะ ๆ คล้ายหยอยหากจำนวนมากเกาะและคลานไปตามผิวตอม่อ

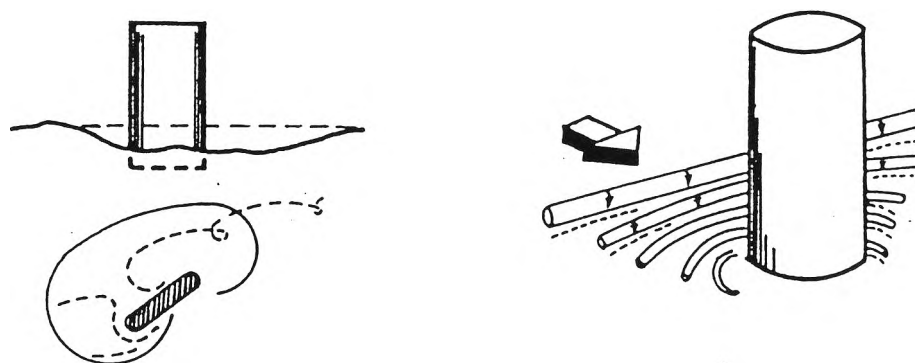
Shen and Other (1966) ทดลองศึกษาพฤติกรรมกระแสน้ำวนอันเกิดจากตอม่อพบว่าตอม่อที่ไม่ปรากฏ Horseshoe vortex หลุมกัดเซาะรูปตอม่อจะไม่ปรากฏ แต่กลับไปปรากฏหลุมกัดเซาะขนาดใหญ่ด้านท้ายน้ำหลังตอม่อ ซึ่งเป็นผลของกระแสน้ำวนอีกระบบหนึ่งเรียกว่า Wake vortex system ทำหน้าที่คล้ายเครื่องดูดพาว์สดูดท้องน้ำเคลื่อนออกไปดังรูป 2.3 ข.



(ก) Horseshoe scour



(ข) wake scour



(ค) skewed scour

รูป 2.3 การกัดเซาะรอบตอม่อชนิดต่าง ๆ (จากอ้างอิง Simons, 1977)

2.2.2.1 การศึกษาทดลองความเร็วกระแสน้ำ และแรงเฉือนที่มีผลต่อการกัดเซาะ

การศึกษาเกี่ยวกับการกัดเซาะในระยะแรก ได้มีความสนใจต่อผลของความเร็วการไหลของน้ำและแรงเฉือนหรือแรงจุดต่อขนาดหรือความรุนแรงของการกัดเซาะ จึงได้มีการกำหนดหลักการของความเร็ววิกฤต (critical pick-up velocity หรือ critical velocity) และแรงเฉือนหรือแรงจุดวิกฤต (critical shear or tractive force) นิยามได้ว่าเป็นความเร็วหรือแรงต่ำสุดที่จะทำให้เม็ดวัสดุท้องน้ำเริ่มลอยตัวและมีศักยภาพต่อการถูกพัดพา ซึ่งได้มีการศึกษาสรุปได้ดังต่อไปนี้

Brahms (1753 อ้างอิงใน Garde, 1977 : 47) เป็นคนแรกที่กำหนดค่าความเร็วกระแสน้ำวิกฤตที่พอดีทำให้วัสดุท้องน้ำเคลื่อนที่ ให้ออกมาในรูปของสมการโดยให้สัมพันธ์กับน้ำหนักวัสดุท้องน้ำ คือ

$$v_c = KW^{1/6} \quad (2.1)$$

v_c = ความเร็ววิกฤตของกระแสน้ำที่พอดีทำให้วัสดุเคลื่อนตัว

W = น้ำหนักวัสดุในน้ำ (submerge weight)

K = ค่าคงที่

DuBuat (1816 อ้างอิงใน สมรรถ, 1987:40) กำหนดค่าความเร็วกระแสน้ำวิกฤต (critical pick-up velocity) ที่พอดีทำให้วัสดุท้องน้ำเคลื่อนที่ ในวัสดุท้องน้ำชนิดต่าง ๆ ดังตาราง 2-1

Airy (1834 อ้างอิงใน สมรรถ, 1987:41) ให้ความสนใจกับสมการหาค่าความเร็ววิกฤตนี้เช่นกัน โดยศึกษาสมการจากความสัมพันธ์ของแรงพื้นฐานที่กระทำต่อวัสดุทรงกลมคือแรงกระทำ (tractive force) และแรงเสียดทาน (friction force) นำแรง 2 ชนิดนี้มาเข้าสมการจะทำให้ผลค่าความเร็ววิกฤตในรูปกำลังสอง คือ

$$v_c^2 = 33.1 (\gamma_s - \gamma) D \quad (2.2)$$

γ_s = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ (specific weight of material)

γ = ความถ่วงจำเพาะของน้ำ (specific weight of water)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุท้องน้ำ

ตาราง 2-1 ความเร็ววิกฤตที่ทำให้วัสดุชนิดต่าง ๆ เคลื่อนที่

No	Material	Velocity (cms.)
1.	Potter's clay	10.6
2.	Coarse sand	21.6
3.	Gravel and sand abstracted From the channel of the sieve :	
	a) Size of aniseed	10.8
	b) Size of peas	18.9
	c) Size of marsh-plants beans	32.5
4.	Sea pebbles , about $\varnothing 1''$ or more	65.0
5.	Sharp-edged flint of the size of an egg , and large	120

Schoklitsch (1914 อ้างถึงใน Graf, 1971:91) ทดลองเกี่ยวกับค่าการเคลื่อนตัวของวัสดุเช่นกัน แต่หาออกมาในรูปของแรงเฉือน (Shear Force) ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตาราง 2-2 และได้กำหนดสมการของแรงเฉือนวิกฤตในระบบเมตริกคือ

$$\begin{aligned}\tau_c &= \gamma y_c s_c \\ &= \sqrt{0.385(\gamma_s - \gamma)W\zeta}\end{aligned}\quad (2.3)$$

ζ = " Form factor " ของวัสดุลำนํ้า เช่น

Form factor	ทรงกลม	=	1.0
	ทราย	=	1.15-1.35
	หินแตก	=	3.1
	Flint	=	4.4

γ_s = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ (specific weight of material)

γ = ความถ่วงจำเพาะของน้ำ (specific weight of water)

จากสมการที่ 2.3 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ของแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) และขนาดเม็ดวัสดุ (D) ดังรูป 2.4

ตาราง 2-2 ค่าแรงเฉือนวิกฤต τ_c ที่ทำให้วัสดุต่าง ๆ เคลื่อนที่

No	Material	τ_c (kg / m ²)
1.	Ordinary quartz sand 0.2 to 0.4 mm.	0.18 - 0.20
2.	Ordinary quartz sand 0.4 to 1. mm.	0.25 - 0.30
3.	Ordinary quartz sand up to 2 mm.	0.4
4.	Rounded quartz gravel 0.5 to 1.5 mm.	1.25
5.	Clayish soil	1.0 - 1.2
6.	Coarse gravel 4.0 to 5.0 cm.	4.8
7.	Flat limestone gravel 1 to 2 cm. thick, & 4 to 6cm. long	5.6

Shield (1936 อ้างถึงใน Graf, 1971:95) วิเคราะห์ปัญหาแรงจุดในชั้น Laminar boundary ติดกับผิวท้องน้ำ ซึ่งเชื่อว่าเป็นชั้นการไหลของน้ำที่เป็น Laminar flow ทำให้พบว่า

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)D} = \phi(D/\delta) \quad (2.4)$$

δ = ความหนาของชั้น Laminar boundary

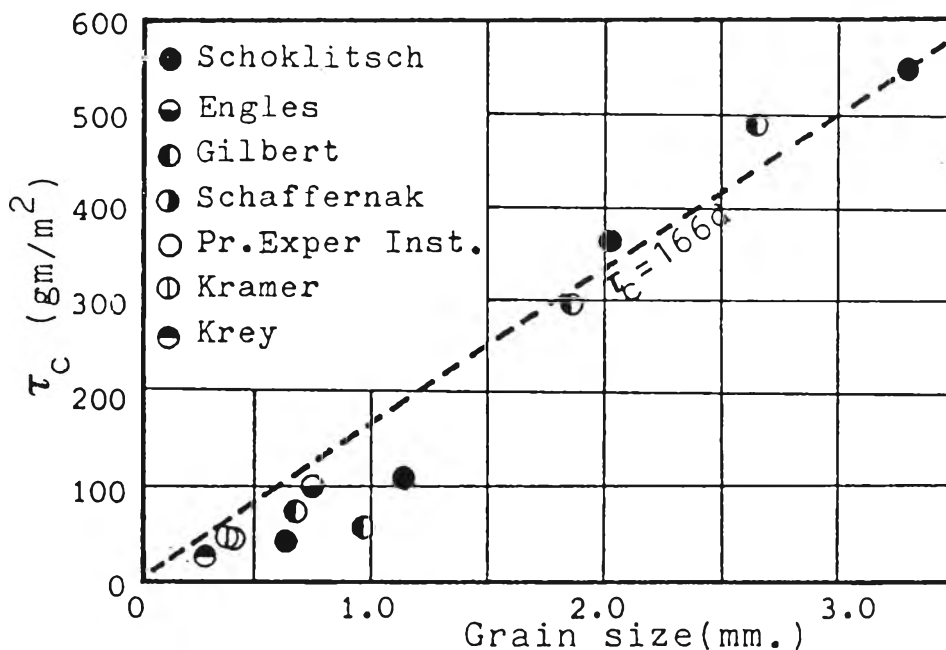
τ_0 = แรงจุดลาก (drag force)

γ_s, γ = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ และน้ำ (specific weight of material , water)

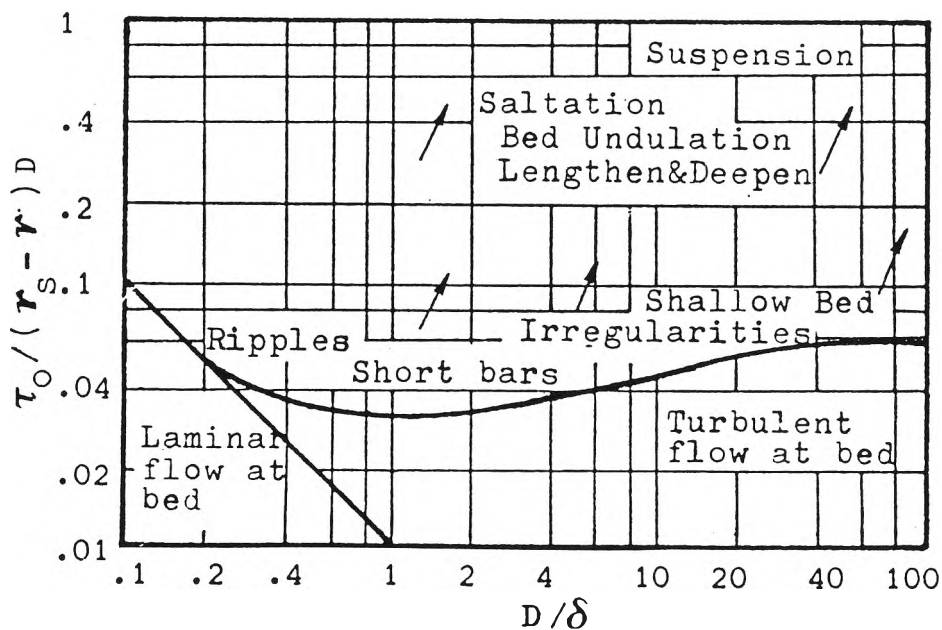
D = ขนาดของวัสดุ (size of material)

จากสมการ 2.4 นี้ สามารถสร้างเส้นกราฟขึ้นมา เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงจุดวิกฤตกับอัตราส่วนของขนาดวัสดุต่อความหนาของ Laminar layer (D/δ) เรียกว่า Shields' s diagram ดังรูป 2.5

สมรักษ์ ต่ดวงศ์ไพชยนต์ (1987) ศึกษาวิทยานิพนธ์เรื่อง "การกัดเซาะของน้ำต่อโครงสร้างสะพานและท่อ" โดยทำการทบทวนและรวบรวมหลักวิชาการต่าง ๆ



รูป 2.4 แสดงค่า τ_c ในสมการของเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุท้องน้ำ (Leleavsky (1955) จากอ้างอิง สมรักษ์, 1987)



รูป 2.5 กราฟของ Shield แสดงค่า τ_c ในอัตราส่วนขนาดวัสดุต่อความหนาของ Laminar Layer (Leleavsky (1995) จากอ้างอิง สมรักษ์, 1987)

ประกอบด้วย ทฤษฎีชลศาสตร์ของการกัดเซาะเบื้องต้น ผลการศึกษาและทดลอง และ ประสบการณ์ด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวกับการกัดเซาะ โดยเฉพาะการกัดเซาะต่อโครงสร้างที่ขวางการไหลของน้ำ และทำการศึกษาและรวบรวมหลักการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรม ในการสำรวจออกแบบก่อสร้างสะพานและท่อลอดที่ได้มีการปฏิบัติโดยทั่วไปในงานวิศวกรรมของไทย ตัวอย่างที่นำมาศึกษา และวิเคราะห์ เป็นเหตุการณ์วิบัติของสะพาน ที่เกิดขึ้นจริงในช่วงปี 2520-2526 อันประกอบด้วยการวิบัติของสะพาน 4 แห่ง ได้แก่ สะพานข้ามลำน้ำกก จ.เชียงราย สะพานข้ามลำน้ำว้า จ.น่าน สะพานข้ามลำน้ำเลย จ.เลย และสะพานข้ามคลองตรอน จ.อุตรดิตถ์ การศึกษาพบว่า การวิบัติของสะพานส่วนใหญ่มีสาเหตุหลักมาจากการกัดเซาะ การศึกษาออกแบบด้านชลศาสตร์ และอุทกวิทยาไม่เพียงพอ

2.2.1.2 การศึกษาทดลองเกี่ยวกับความลึกกัดเซาะ

การกัดเซาะที่เกิดขึ้นในตำแหน่งตอม่อสะพานถูกจัดประเภทเป็นการกัดเซาะเฉพาะแห่ง (local scour) และผลงานการศึกษาเพื่อคาดคะเนความลึกกัดเซาะ ข้อมูลส่วนใหญ่รวบรวมได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ นำมาประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนความลึกกัดเซาะในธรรมชาติ

Lacey (1929 อ้างถึงใน Chen, 1980:3) ได้เสนอสมการเบื้องต้นสำหรับคาดคะเนความลึกการกัดเซาะ Lacey ได้แนะนำว่า ความลึกการกัดเซาะสูงสุดที่บริเวณสะพานและบริเวณพื้นที่อื่นที่บีบตัว (constriction area) สามารถคำนวณจาก

$$d_{sm} = CR \quad (2.5)$$

เมื่อ d_{sm} = ความลึกกัดเซาะสูงสุดวัดจากผิวน้ำ

R = รัศมีชลศาสตร์ของรูปตัดขวาง (hydraulic radius of the section)

C = ขึ้นอยู่กับพื้นที่รูปตัดขวางของแม่น้ำบริเวณสะพาน มีค่าอยู่ระหว่าง 1-2

Lacey (1931 อ้างถึงใน Garde, 1977:330) ประมาณว่าค่าความลึกสูงสุดของหลุมกัดเซาะวัดจากผิวน้ำถึงก้นหลุมกัดเซาะ สามารถหาได้จากสมการที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะกับความลึกน้ำซึ่งเรียกว่า Lacey's regime depth (y_r) เป็นค่าที่

ใช้เฉพาะในส่วนของลำน้ำที่เป็นส่วนของคลองทรงเหลี่ยม (prismatic canal) โดยเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำไหล คือ

$$y_L = 0.47 (Q / f)^{1/3} \quad (2.6)$$

หรือ

$$y_L = 0.9 (q^2 / f)^{1/3} \quad (2.7)$$

Q = ปริมาณน้ำไหล (total discharge)

q = ปริมาณน้ำไหลต่อหน่วยความกว้างของลำน้ำ

f = Lacey's silt factor = 1.76 / D

D = ขนาดวัสดุท้องน้ำ (มม.)

y_L เป็นสัดส่วนกับความลึกกัดเซาะสูงสุด ฉะนั้น ความลึกกัดเซาะสูงสุด จึงสามารถหาได้จากสมการของ Khosla (1936) คือ

$$d_{sm} = Ky_L \quad (2.8)$$

d_{sm} = ความลึกกัดเซาะสูงสุดวัดจากผิวน้ำ

K = ค่าคงที่ตามชนิดของสิ่งก่อสร้าง

Chitale (1941 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976:289) ได้ดำเนินการทดลอง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของการกัดเซาะทางด้านเหนือน้ำและขนาดของทรายต่อการกัดเซาะตอม่อ ตอม่อที่ใช้ในการทดลองเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าความยาว 0.925 ฟุต กว้าง 0.6 ฟุต และรูปทรงครึ่งวงกลม เพื่อจำลองรูปร่างตอม่อให้เหมือนจริง พื้นรางน้ำใส่ทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มม. และแตกต่างกันอีก 4 ขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.16 0.24 0.68 และ 1.51 มม. นำมาใช้ รอบ ๆ ตอม่อ ใช้อัตราการไหล q คงที่ = 1 ฟุต³/วินาที/ฟุต และความลึกของน้ำเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 ฟุตถึง 1.45 ฟุต การทดลองนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขสภาวะน้ำใส แต่ละการทดลองกระทำต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการกัดเซาะสูงสุดรอบ ๆ ตอม่อ ซึ่ง Chitale สรุปได้ดังนี้

1. การไหลตามแนวแกน (axial flow) ความลึกการกัดเซาะสูงสุดเกิดขึ้นที่สันตอม่อ การกัดเซาะที่ด้านข้างตอม่อจะน้อยกว่าที่สันตอม่อประมาณ 5-15 %
2. อัตราส่วนระหว่างความลึกกัดเซาะสูงสุดกับความลึกการไหลในรางน้ำ ($\frac{d_{se}}{y}$) แสดงด้วยความสัมพันธ์อย่างง่ายของความเร็วไหลเฉลี่ยความลึกกัดเซาะของรางน้ำ
3. ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองมีดังนี้

$$\frac{d_{se}}{y} = -0.51 + 6.65Fr - 5.49 Fr^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ d_{se} = ความลึกกัดเซาะสมดุลภายใต้ท้องน้ำปกติ

y = ความลึกของน้ำไหลในหลุมกัดเซาะ

Fr = ฟรูดนัมเบอร์ (froude number) ของการไหลในหลุม

กัดเซาะ ($Fr = \frac{\bar{v}}{\sqrt{gh}}$)

\bar{v} = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในหลุมกัดเซาะ

Inglis (1949 อ้างถึงใน Simons, 1971:682) ให้เหตุผลในเวลาต่อมาว่าการที่ความลึกกัดเซาะสูงสุดเป็นสัดส่วนกับ Lacey's regime depth (y_L) เป็นผลมาจากการหักเหของกระแสน้ำที่ไหลมากระทบตอม่อสะพาน ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิต ทำให้มุมหักเหแตกต่างกันไป เป็นที่มาในความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ (K) และค่า K ที่สำคัญได้แก่

ก. ความลึกกัดเซาะสูงสุด (d_{sm}) ด้านท้ายน้ำของตอม่อ ค่าคงที่ K มีค่าเท่ากับ 4 สมการ 2.8 จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$d_{sm} = 4 y_L \quad (2.10)$$

ข. ความลึกกัดเซาะรอบ ๆ ตอม่อสะพาน ค่าคงที่ K มีค่าเท่ากับ 2 สมการที่ 2.10 เขียนใหม่ได้เป็น

$$d_{sm} = 2 y_L \quad (2.11)$$

กรณีลำน้ำธรรมชาติ ความลึกก้นเซาะสูงสุดสามารถหาได้เมื่อทราบ ปริมาณการไหลในลำน้ำนั้น Inglis จึงได้ให้สมการไว้คือ

$$\frac{d_{sm}}{b} = 1.7 \frac{(q^{2/3})^{0.78}}{b} \quad (2.12)$$

b = ความกว้างหรือเส้นผ่าศูนย์กลางของตอม่อสะพาน

q = ปริมาณน้ำไหลต่อหน่วยความกว้างของลำน้ำ

นอกจากนี้ Lacey ยังได้คิดหาสูตรค่าความกว้างของผิวน้ำ ของลำน้ำ ในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำไหล ซึ่งมีผลต่อตำแหน่งที่ตั้งของสะพาน โดยมีค่า Lacey's coefficient เป็นค่าคงที่ดังในสมการ 2.13

$$P = CQ^{1/2} \quad (2.13)$$

P = เส้นของเปียก (wetted perimeter)

Q = อัตราการไหล (discharge)

C = 8/3 สำหรับคลองที่มีทรายเป็นวัสดุท้องน้ำ

= 1.8 สำหรับคลองที่ประกอบด้วยวัสดุที่ค่อนข้างมันคง

และจากสมการ 2.13 นี้สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟเพื่อความสะดวก ในการใช้ โดยสร้างกราฟระหว่างค่าความกว้างผิวน้ำ กับค่าอัตราการไหล ดังรูป 2.6

Inglis (1949 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976:289) ได้พัฒนาสูตร Inglis-Poona ดังนี้

$$\frac{d_{sm}}{y} = 4.19 Fr^{0.52} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.22} - 1 \quad (2.14)$$

Laurson (1954 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976:290) ได้ศึกษาผลกระทบ ของทางน้ำและลักษณะของวัสดุท้องน้ำต่อการกัดเซาะ Laurson พบว่า หลังจากเวลาผ่านไปจน

กระทั่งการกัดเซาะเข้าสู่สมดุล ได้วัดค่าความลึกการกัดเซาะ ความลึกการกัดเซาะสมดุลไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลหรือขนาดวัสดุท้องน้ำ แต่ขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของตอม่อและความลึกการไหล การหาอัตราการกัดเซาะระหว่างคาบเวลาที่เกิดการกัดเซาะขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลและขนาดวัสดุท้องน้ำ

Laursen และ Toch (1954 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976:290) แนะนำเกณฑ์การออกแบบสำหรับความลึกกัดเซาะสูงสุดของทางน้ำภายใต้สภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear water scour) ดังนี้

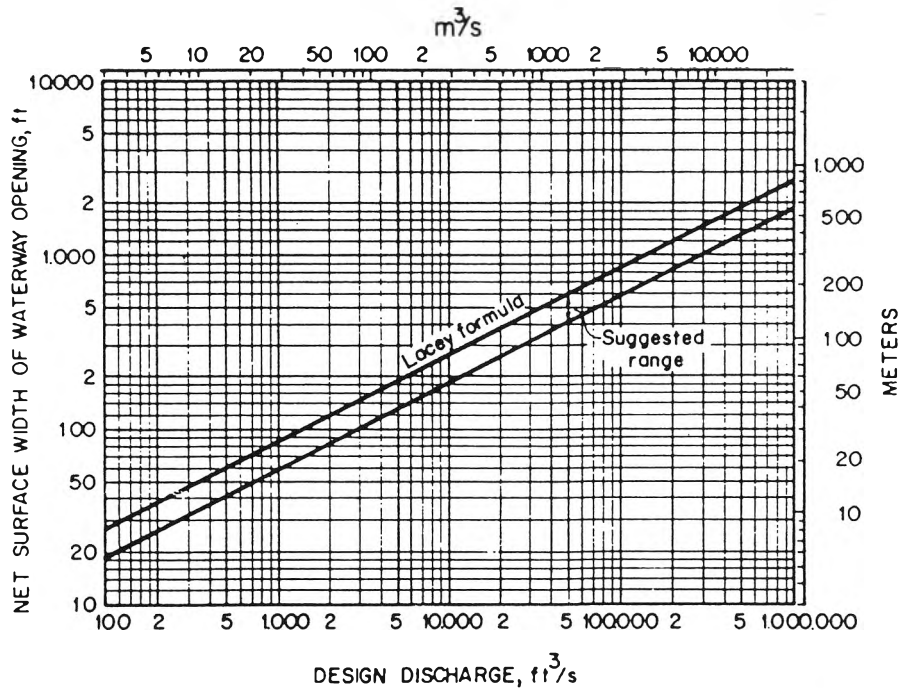
$$\frac{d_{sm}}{L} = 1.35\left(\frac{L}{y}\right)^{0.7} \quad (2.15)$$

Chabert and Engledinger (1956 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976:288) ศึกษาทดลองการกัดเซาะในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear water condition) พบว่าความลึกกัดเซาะสัมพันธ์กับแรงดูด (tractive force) เป็นเส้นตรง หากกัดเซาะต่อไปจนถึงขั้นต้องอาศัยแรงดูดวัสดุให้ลอยตัว ค่าความลึกขณะนั้นนับเป็นค่าความลึกสูงสุด (maximum scour depth) ขณะเดียวกันแรงดูดที่มีความรุนแรงมากกว่านี้ ซึ่งสามารถย้ายคลื่นท้องน้ำ (dune) จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ นั่นหมายความว่าความลึกกัดเซาะเริ่มให้ค่าขึ้น ๆ ลง ๆ (periodically) แต่ให้ค่าความลึกกัดเซาะสมดุล (equilibrium) เพียงค่าเดียว

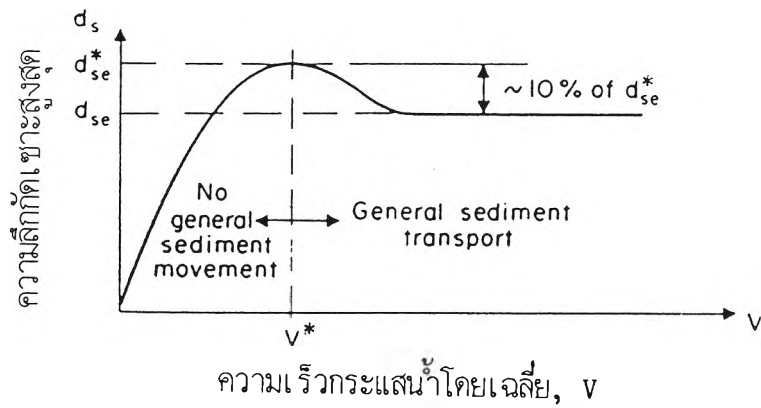
สรุปได้ว่า ความลึกของการกัดเซาะได้ค่าตามความเร็ว มีพฤติกรรมแตกต่างตามชนิดของการกัดเซาะ ดังรูป 2.7 และ 2.8

Laursen (1960) ได้ทดลองการกัดเซาะในภาวะที่กระแสน้ำมีวัสดุปะปนมาด้วย พบว่า ความลึกกัดเซาะขึ้นอยู่กับความลึกน้ำ รูปทรงตอม่อ แต่ไม่เกี่ยวข้องกับความเร็วกระแสน้ำ ดังรูป 2.9 ขณะเดียวกัน Laursen ได้ศึกษาความลึกกัดเซาะในส่วนของหน้าตัดลำน้ำที่บีบตัว เช่น ช่วงสะพาน สมการจากการวิเคราะห์หน่วย (dimensional analysis) ดังนี้ (หน่วยอังกฤษ)

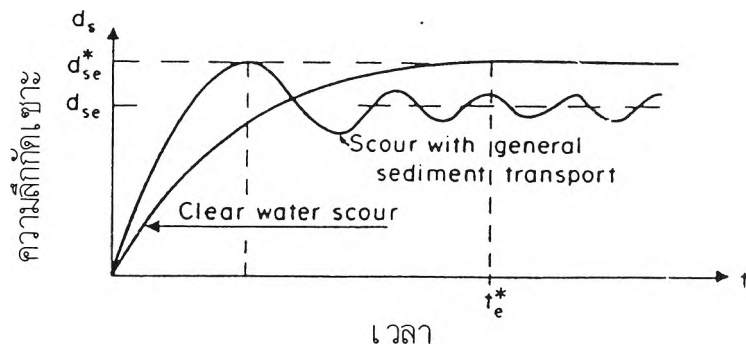
$$\frac{y_2}{y_1} = \left[\frac{Q_1}{Q_c}\right]^{C_1} \left[\frac{B_1}{B_2}\right]^{C_2} \left[\frac{n_2}{n_1}\right]^{C_3} \quad (2.16)$$



รูป 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Q ต่อความกว้างผิวหน้า (Lacey (1931) จากอ้างอิง Simons, 1971)



รูป 2.7 ความสัมพันธ์ความลึกการกัดเซาะกับความเร็วน้ำ (Chabert & Engeldinger (1956) จากอ้างอิง Raudkivi, 1976)



รูป 2.8 ความลึกการกัดเซาะแปรเปลี่ยนตามเวลา (Chabert & Engeldinger (1956) จากอ้างอิง Raudkivi, 1976)

$$C_1 = 6/7$$

$$C_2 = (6(2+f))/(7(3+f))$$

$$C_3 = 6f/(7(3+f))$$

$$Q_c = \text{อัตราการไหลของน้ำด้านเหนือน้ำ}$$

$$Q_t = \text{อัตราการไหลน้ำช่วงจุดตั้งสะพาน}$$

$$B = \text{ความกว้างของลำน้ำ}$$

$$n = \text{Manning roughness coefficient}$$

$$f = 0.25 \text{ สำหรับ } U^*/\omega < 0.5$$

$$= 1.0 \text{ สำหรับ } U^*/\omega = 1.0$$

$$= 2.25 \text{ สำหรับ } U^*/\omega > 2.0$$

$$U^* = \text{ความเร็วเฉือน (shear velocity)}$$

$$\omega = \text{ความเร็ว (fall velocity) ของวัสดุขนาด } D_{50}$$

Garde และคณะ (1961 อ้างถึงใน Chang, 1978:14) แสดงให้เห็นว่า ความลึกของการไหลมีผลน้อยมากต่อความลึกการกัดเซาะ Garde พบว่า ความเร็วของการไหลเป็นองค์ประกอบสำคัญมากกว่า แต่ไม่ได้แบ่งการกัดเซาะในสถานะที่ไม่มี การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear water) และสถานะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (live-bed scour)

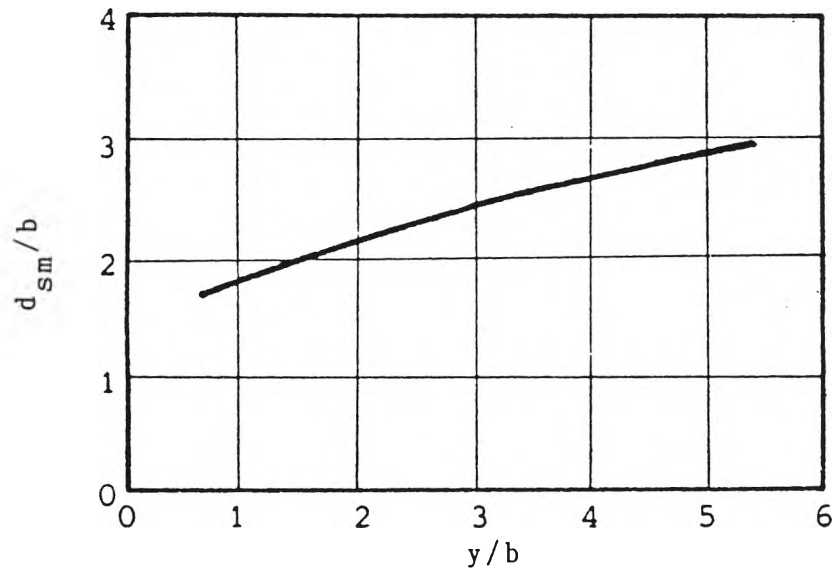
Liu และคณะ (1961) ศึกษาทดลองการกัดเซาะ เฉพาะที่เกิดกับตอม่อริมฝั่ง ในกรณีที่ตอม่อริมฝั่งมีตอม่ออื่นอยู่ใกล้เคียง จะก่อจุดกัดเซาะอยู่ในตำแหน่งดังรูป 2.10 และค่าความลึกกัดเซาะสมดุลที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{d_{se}}{y_1} = 1.1 \left[\frac{b}{y_1} \right]^{0.4} Fr^{0.33} \text{ เมื่อ } 0 < \frac{b}{y_1} < 25 \quad (2.17)$$

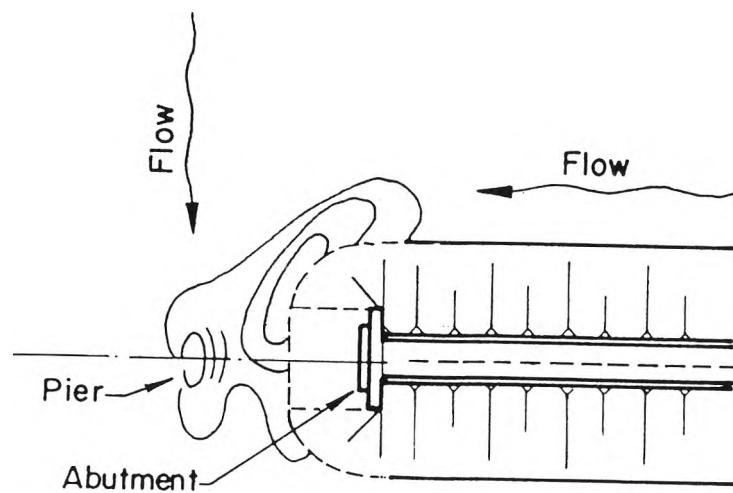
$b =$ ความยาวของตอม่อริมฝั่ง

$y =$ ความลึกน้ำด้านเหนือน้ำ

$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} = \text{Froude number ด้านเหนือน้ำ}$



รูป 2.9 ความลึกกัดเซาะสมดุณ ต่อม่อสะพาน
(Laursen, E.M, 1960)



รูป 2.10 การกัดเซาะจุดที่ตั้งต่อม่อริมฝั่งและต่อม่อใกล้เคียง
(Liu และคณะ 1961)

ถ้าตอม่อริมฝั่งมีลักษณะเป็นกำแพงตั้งลงติดพื้นท้องน้ำ ความลึกกัดเซาะจะให้ค่าเกือบเป็น 2 เท่า ของค่าที่ได้จากสมการที่ 2.18 คือ

$$\frac{d_{se}}{y_1} = 2.15 \left[\frac{b}{y_1} \right]^{0.4} Fr_1^{0.33} \quad (2.18)$$

สำหรับสมการที่เป็นผลวิเคราะห์จากข้อมูลที่ได้จากสนามจริงนั้นหาได้ยาก แต่ก็มีข้อมูลที่คล้ายคลึงกันรวบรวมไว้ เป็นข้อมูลจากคันดักตะกอน (Dikes) ในแม่น้ำ Mississippi สามารถให้ค่าเปรียบเทียบได้ว่า

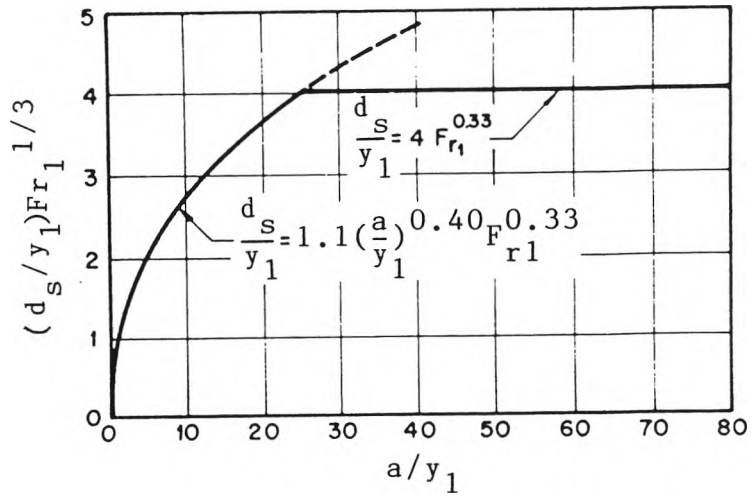
$$\frac{d_s}{y_1} = 4 Fr_1^{0.33} \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{b}{y_1} > 25 \quad (2.19)$$

จากสมการ 2.18 และ 2.19 สามารถเขียนเป็นกราฟสำหรับหาความลึกสมมูลในตอม่อริมฝั่งดังรูป 2.11 สำหรับตอม่อริมฝั่งที่มีด้านข้างเอียงเป็นมุม ให้ค่าที่แตกต่างกันไป จากค่าอื่น ซึ่งได้ค่าดังรูป 2.12

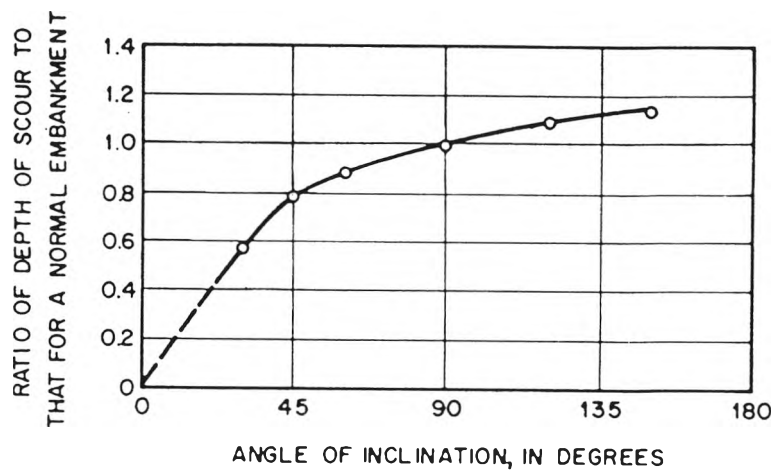
Laursen (1962 อ้างถึงใน Chen,1980:5) ได้ศึกษาความสัมพันธ์สำหรับคาดคะเนการกัดเซาะที่ตอม่อและคอสะพาน สำหรับกรณีที่มีการพัดพาตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะ (scour hole) ความสัมพันธ์ได้ถูกพัฒนาและวิเคราะห์ในห้องทดลอง ความลึกหลุมกัดเซาะขึ้นอยู่กับสภาพเงื่อนไขการไหล ความกว้างของหลุมกัดเซาะประมาณเท่ากับ 2.75 เท่าของความลึกการกัดเซาะ

Laursen (1963) ได้ทำการทดลองใหม่ แต่จำกัดภาวะเงื่อนไขเป็นการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear water scour) โดยใช้วัสดุในการทดลองเป็นทรายขนาด 3.0 มม. ทำให้เขาพบว่าความเร็วกระแสและขนาดของตอม่อมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลการกัดเซาะในการนี้ เขาได้สร้างสมการความสัมพันธ์ขึ้นใหม่ คือ

$$\frac{d_{sm}}{y_1} = \left[\frac{B_1}{B_2} \right]^{6/7} \left[\frac{v_1^2}{120 y_1^{1/3} D_{50}^{2/3}} \right]^{3/7} - 1 \quad (2.20)$$



รูป 2.11 กราฟการคำนวณการกัดเซาะต่อม่อริมฝั่ง (Liu และคณะ 1961)



รูป 2.12 การลดค่ากัดเซาะสำหรับค่ามุมต่าง ๆ (Liu และคณะ 1961)

- d_{sm} = ความลึกจุดกัดเซาะ (ft)
 y_1 = ความลึกน้ำ (ft)
 B_1, B_2 = ความกว้างของลำน้ำในแต่ละจุด (ft)
 D_{50} = ค่าเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ
 v_1 = ความเร็วกระแสน้ำด้านเหนือน้ำ (fps)

Larras (1963 อ้างถึงใน Shen, 1971:23-10) ก็ได้พบว่าความลึกกัดเซาะสามารถหาได้จากสมการในรูปของความกว้างตอม่อ

$$d_{sm} = 1.42 Kb^{0.75} \quad (2.21)$$

- b = ขนาดตอม่อ
 K = 1 สำหรับตอม่อรูปวงกลม
 = 1.4 สำหรับตอม่อรูปทรงเหลี่ยม

โดยตำแหน่งของตอม่อจะวางขนานกับกระแสน้ำ ข้อคิดเห็นของ Larras ตรงกับความคิดเห็นของ Breusers (1965) ซึ่งกำหนดไว้ว่า

$$d_{se} = 1.4 b \quad (2.22)$$

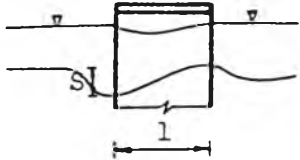
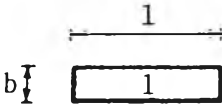
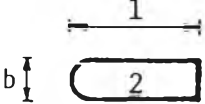

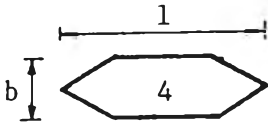
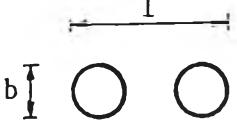
ส่วน Neil (1973) สรุปสูตรทั่วไปสำหรับตอม่อรูปทรงต่าง ๆ ไว้ในสมการที่ 2.23

$$d_{se} = Kb \quad (2.23)$$

ค่า K เปลี่ยนแปลงตามรูปทรงของตอม่อตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-3

Maza Alvarez และ Sanchez (1964 อ้างถึงใน Simons, 1977:689) ศึกษาสมมติฐานของ Laursen และ Yaroslavtsev (1960) พร้อมทั้งทำการทดลอง จนสรุปได้ว่าการคำนวณความลึกกัดเซาะสูงสุดสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

ตาราง 2-3 ค่าสัมประสิทธิ์ K สำหรับตอม่อรูปทรงต่าง ๆ ที่ตั้งขนานกับทิศทางการไหลของกระแสน้ำ (Neil, 1973)

มิติรูปทรงตอม่อ	สัมประสิทธิ์ K สำหรับการกักตะกอนเฉพาะ
	<p>ตอม่อรูปทรง 1 = 2.0</p> <p>ตอม่อรูปทรง 2 = 1.5</p> <p>ตอม่อรูปทรง 3 = 1.5</p> <p>ตอม่อรูปทรง 4 = 1.2</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>ก) ตอม่อรูปเหลี่ยม</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>ข) ตอม่อมนกลม</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>ค) ตอม่อทรงกระบอก</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>ง) ตอม่อมุมแหลม</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>จ) กลุ่มตอม่อทรงกระบอก</p> </div> </div>	

1. วิธีที่หนึ่ง ใช้สมการที่วิเคราะห์จากสมการของ Yaroslavtsiev คือ

$$\frac{d_{se}}{b} = K_1 K_2 \frac{v^2}{gb} - \frac{30D_g}{b} \quad (2.24)$$

b = ขนาดของตอม่อ

K_1, K_2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของมุมปะทะและความเร็วกระแสน้ำ
หาได้จากตาราง 2-4 และ 2-5

ตาราง 2-4 ค่าสัมประสิทธิ์ K_1 สำหรับตอม่อรูปทรงต่างๆ ที่ตั้งท่ามูมกับทิศทางการไหล

รูปทรงตอม่อ	β (องศา)				
	0	10	20	30	40
รูปทรงวงกลม	10.0				
รูปทรงเหลี่ยม	8.5	8.7	9.0	10.3	11.3

ตาราง 2-5 ค่าสัมประสิทธิ์ K_2 ที่สัมพันธ์กับค่าความเร็ว ขนาดตอม่อ ความลึกน้ำ

y_1 / b	v^2 / gb			
	0.25	0.15	0.10	0.04
1.8	0.75	0.95	1.15	1.40
2.2	0.75	0.95	1.10	1.35
2.6	0.75	0.90	1.10	1.30
3.0	0.75	0.90	1.10	1.30

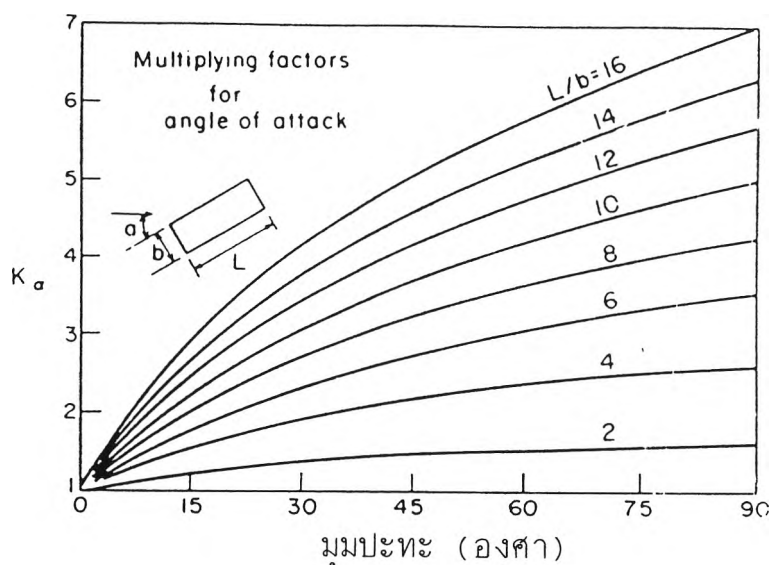
หมายเหตุ v = ความเร็วกระแสน้ำ

b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตอม่อ

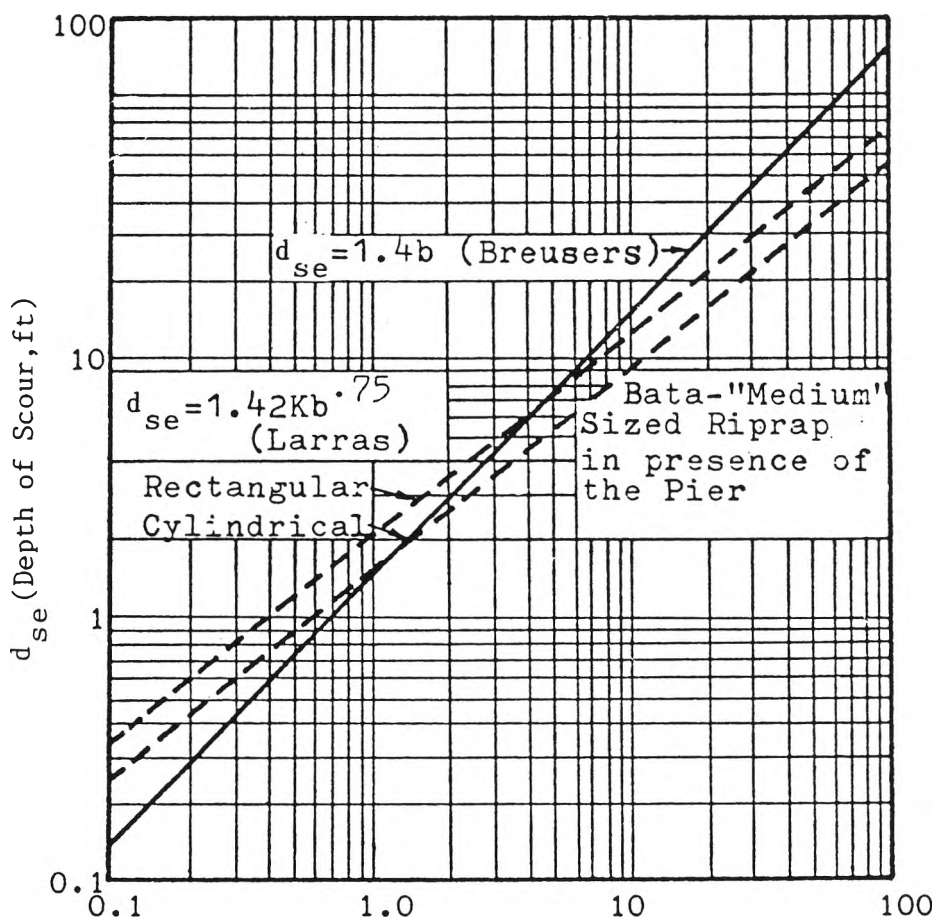
y = ความสูงน้ำ

2. วิธีที่สอง ใช้สมมติฐานของ Laursen โดยตอม่อท่ามูมกับกระแสน้ำ

ในค่าต่าง ๆ ค่าความลึกกัดเซาะเป็นผลคูณของ $K_{\alpha 1}$ ดังรูป 2.13 กับค่า d_{se} ดังรูป 2.14



รูป 2.13 ค่าคงที่สำหรับออกแบบของตอม่อที่ไม่ได้วางอยู่ในแนวทิศทางการไหลของกระแสน้ำ (Laursen & Toch (1956) จากอ้างอิง Raudkivi, 1976)



รูป 2.14 ความลึกกัดเซาะสมดุลในค่าของความกว้างของตอม่อโดยสมมุติให้วางในแนวทิศทางการกระแสน้ำ (Shen (1971) จากอ้างอิงสมรักษ์, 1987)

Arunachalam (1965 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976:301) ได้พัฒนาสมการการออกแบบ ซึ่งเป็นการเชื่อมสมการของ Laursen , Toch และ Lacey เข้าด้วยกันดังนี้

$$\frac{d_{sm}}{L} = \frac{y}{L} \left(\frac{1.95}{\left(\frac{y}{L}\right)^{1/6}} - 1 \right) \quad (2.25)$$

Carstens (1966) ได้ทำการทดลองในรางน้ำกว้าง 0.80 ม. ยาว 21.0 ม. วางต่อม่อ 3 อันที่กึ่งกลางรางน้ำ ใช้ทรายแตกต่างกัน 4 ขนาดดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 3.08 1.52 0.52 และ 0.26 มม. ใช้หลักการพัดพาของตะกอน สมการที่เกี่ยวข้องกับความลึกการกัดเซาะมีดังนี้

1. สมมติว่าอัตราการพัดพาตะกอนเป็นฟังก์ชันของอัตราการกระจายแรงบนอนุภาคตะกอน (ΣF_d) ต่อแรงคงที่ (ΣF_s)

เมื่อ ΣF_d = แรงจุดลาก (drag force) + แรงยกตัว
(lift force)

$$= C_d k_1 D^2 \rho \frac{v^2}{2} + C_L k_1 D^2 \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.26)$$

และ ΣF_s = น้ำหนักประสิทธิผลของอนุภาค
= $(\gamma_s - \gamma_w) k_2 D^3$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\Sigma F_d}{\Sigma F_s} = \frac{K_1 \sqrt{C_D + C_L}}{K_2} \frac{v^2}{(S-1)gD} \quad (2.27)$$

$$= [f (\text{Sediment grain geometry}) N_s^2$$

เมื่อ C_D = สัมประสิทธิ์แรงจุดลากของอนุภาค
(drag force coefficient)

C_L = สัมประสิทธิ์แรงยกตัวของอนุภาค
(lift force coefficient)

K_1 = แฟคเตอร์รูปร่างของอนุภาคตะกอน (พื้นที่)

- K_2 = แฟคเตอร์รูปร่างของอนุภาคตะกอน (ปริมาตร)
 D = ขนาดของอนุภาคตะกอน
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล
 $\gamma_s \cdot \gamma_w$ = น้ำหนักจำเพาะของวัสดุท้องน้ำและของไหล

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้

$$Ns = \frac{v}{\sqrt{(s-1)gD}} = \frac{v}{\sqrt{\Delta gD}} \quad (2.28)$$

เมื่อ Ns เป็นค่าพารามิเตอร์เรียกว่า เลขตะกอน (sediment number)

2. การศึกษาเส้นชั้นความลึกของหลุมกัดเซาะ Carstens สมมุติว่ารูปร่างของหลุมกัดเซาะเป็นลักษณะของกรวยกลับหัว ซึ่งมีฐานเท่ากับความกว้างของตอม่อ (b) และมีความชันด้านข้างเท่ากับมุมเสถียรภาพของวัสดุท้องน้ำ (ϕ) และปริมาตรตะกอนหาได้จาก

$$Qs = \frac{\pi}{3 \tan \phi} \left(\frac{d_s^3}{\tan \phi} + \frac{3bd_3^2}{2} \right) \quad (2.29)$$

เมื่อ d_s = ความลึกการกัดเซาะที่เวลา t ใดๆ

3. สำหรับเงื่อนไขการกัดเซาะสมดุล จะได้สมการความลึกการกัดเซาะดังนี้

$$\frac{d_{se}}{h} = 0.546 \left[\frac{Ns^2 - 1.25}{Ns - 5.02} \right]^{5/6} \quad (2.30)$$

Shen , Schneider และ Karaki (1966) และ Wang (1968) ได้เสนอสมการ การกัดเซาะโดยในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ดังนี้

$$\frac{d_{sm}}{L} = 2Fr^{0.43} \left(\frac{L}{y} \right)^{0.645} \quad (2.31)$$

Carstens (1966 อ้างถึงใน Simons, 1977:685) ศึกษาความลึกกัดเซาะโดยอาศัยสูตรพื้นฐาน คือ

$$t = \int_0^{Q_s} \left(\frac{dV}{Q_s} \right) \quad (2.32)$$

t = เวลา

V = ปริมาตรของหลุมกัดเซาะ

d_{sm} = ความลึกกัดเซาะ

Q_s = ปริมาณวัสดุที่ถูกพัดพาออกจากหลุมกัดเซาะ

ผลการวิเคราะห์ ได้ให้สมการ 2.33 ดังนี้

$$4.10 \times 10^{-6} (N_s^2 - N_{se}^2)^{5/2} \left(\frac{D_g}{b} \right) \left(\frac{U_t}{b} \right) = \frac{\left[\frac{d_s}{b} \right]^5}{t_g \phi} + \frac{\left[\frac{d_s}{b} \right]^4}{16} - \frac{\tan \phi \left[\frac{d_s}{b} \right]^3}{24} + \frac{\tan \phi \left[\frac{d_s}{b} \right]^2}{32} \\ - \frac{(\tan \phi)^3 \frac{d_s}{b}}{32} + \frac{(\tan \phi)^4}{64} \times \ln \left[\frac{2 \left[\frac{d_s}{b} \right]}{\tan \phi} + 1 \right] \quad (2.33)$$

N_s = Sediment number

N_{se} = N_s ที่จุด Sediment transport = 0

b = เส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ

ϕ = Angle of repose

d_s = ความลึกกัดเซาะ

ซึ่งสมการที่ 2.33 นี้ สามารถเขียนเป็นกราฟได้ ดังรูป 2.15 ส่วนความลึกกัดเซาะสมมูลจะได้จากสมการ

$$\frac{d_{se}}{b} = 0.546 \left[\frac{N_s^2 - 1.64}{N_s^2 - 5.02} \right]^{5/6} \quad (2.34)$$

$$N_s = \frac{v}{\sqrt{\left[\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right] g D_g}}$$

D_g = ค่าเฉลี่ยของขนาดวัสดุท้องน้ำ

Shen และคณะ (1969 อ้างถึงใน Shen , 1971:23-8) ได้ทำการทดลองโดยใช้รางน้ำ 3 ชนิด

1. รางน้ำโดยใช้น้ำหมุนวน กว้าง 6 ฟุต ลึก 1.5 ฟุต และ ยาว 60 ฟุต ใช้ตอม่อกว้าง 0.5 ฟุต และใช้ทราย $D_{50} = 0.24$ มม. และ 0.46 มม.
2. รางน้ำกว้าง 8 ฟุต และยาว 200 ฟุต ใช้ศึกษาผลกระทบของเนินทราย (dune) ต่อหลุมกัดเซาะ ใช้เครื่องหาความลึกโดยใช้คลื่นเสียงเคลื่อนที่ไปตามรางน้ำและ ใช้หารูปตัดตามยาวของท้องรางน้ำ ตอม่อกว้าง 0.896 ฟุต และใช้ทราย $D_{50} = 0.24$ มม. และ 0.46 มม.
3. รางน้ำโดยใช้น้ำหมุนวนลึก 5 ฟุต ยาว 180 ฟุต ใช้ทราย $D_{50} = 0.46$ มม.

จากผลการทดลองของ Shen สรุปได้ดังนี้

1. ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ตอม่อ $(R_p = \frac{vb}{\nu})$ มีความสำคัญในการอธิบายขบวนการกัดเซาะ
2. สมการ $d_{se} = 0.222 R_p^{0.619}$ มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นหลักเกณฑ์ในการออกแบบสำหรับประมาณค่าความลึกการกัดเซาะที่เป็นไปได้ โดย d_{se} เป็นความลึกการกัดเซาะสมมูลมีหน่วยเป็น ซม.
3. ถ้าลักษณะท้องน้ำเป็น Dune ที่ความเร็วออกแบบ ประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงของ Dune จะถูกพิจารณา เพื่อที่จะประมาณความลึกการกัดเซาะสมมูลจนถึงความลึกสูงสุดที่เป็นไปได้

Chen (1980) ได้ทำการทดลองหาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานทรงกลม ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (A.I.T.) โดยใช้ทราย 2 ขนาด ได้แก่ $D_{50} = 1.12$ มม. $\sigma_g = 1.24$ $\phi = 32$ และ $D_{50} = 0.30$ มม. $\sigma_g = 2.04$ $\phi = 29$ และใช้ตอม่อรูปทรงกระบอก 3 ขนาดในการทดลอง

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขนาดตะกอนมีผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะในสภาวะเงื่อนไขที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาผลการศึกษาของหลายท่านบอกว่าขนาดของตะกอนไม่มีผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะ และได้ให้สูตรการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะในสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยมีความสัมพันธ์ของขนาดตะกอน ดังสมการ 2.35 และ 2.36

$$d_{\max} = \left[2.27 - 0.45 \log \left(\frac{b}{D_{50}} \right) \right] d_{se} \text{ โดยที่ } \frac{b}{D_{50}} \leq 650 \quad (2.35)$$

$$d_{\max} = d_{se} \text{ โดยที่ } \frac{b}{D_{50}} > 650 \quad (2.36)$$

$$\text{เมื่อ } d_{se} = 1.27b^{0.83} \left(\frac{\bar{V}^2}{2g} \right)^{0.17}$$

d_{\max} = ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด

d_{se} = ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล

b = ความกว้างของตอม่อ

$\frac{\bar{V}^2}{2g}$ = หัวความเร็ว (velocity head)

Chang (1987) ได้ทำการทดลองหาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (A.I.T.) โดยทำการศึกษาการกัดเซาะในสภาพเงื่อนไขที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ การไหลคงที่สม่ำเสมอ (steady uniform state) โดยใช้วัสดุท้องน้ำที่มีขนาดสม่ำเสมอ (uniform sand) 3 ขนาด ได้แก่ ทรายหยาบ (coarse sand) $D_{50} = 0.97$ มม. $\sigma_g = 1.94$ $\phi = 32.5$ ทรายปานกลาง (medium sand) $D_{50} = 0.43$ มม. $\sigma_g = 1.61$ $\phi = 29.0$ และ ทรายละเอียด (fine sand) $D_{50} = 0.19$ มม. $\sigma_g = 1.47$ $\phi = 26.5$ และใช้รูปทรงตอม่อสะพาน 2 แบบ ได้แก่ ตอม่อรูปทรงกระบอก (cylindrical piers) และ ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunt-nosed piers) และยังคงศึกษาครอบคลุมถึงขนาดของหลุมกัดเซาะ อันเนื่องมาจากมุมในการปะทะของการวางตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน

จากการศึกษาทฤษฎี และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าพื้นที่หลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานขึ้นอยู่กับ รูปแบบและลักษณะการไหล ลักษณะของตอม่อ และขนาดของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งได้ให้สูตรในการคาดคะเนพื้นที่หลุมกัดเซาะ ดังสมการ 2.37 และ 2.38

$$\frac{A_{sm}}{L^2} = 8.5(F_p)^{1.36} \left(\frac{D_{50}}{L} \right)^{-0.36} \quad (2.37)$$

หรือ

$$\frac{A_{sm}}{L^2} = 47(F_p)^{1.27} \left(\frac{D_{50}}{L}\right)^{-0.35} (R_p)^{-0.17} \quad (2.38)$$

A_{sm} = พื้นที่หลุมกัดเซาะสูงสุด

F_p = ฟรูดนัมเบอร์ (froude number) ของตอม่อ

$$\left(F_p = \frac{v}{\sqrt{gL}}\right)$$

R_p = เรย์โนลด์นัมเบอร์ (reynolds number) ของตอม่อ

$$\left(R_p = \frac{vL}{\nu}\right)$$

L = Projected length ของตอม่อ

นอกจากนั้น ยังศึกษาถึงการป้องกันการกัดเซาะ โดยหาสูตรพื้นที่เพื่อป้องกันการกัดเซาะทางด้านหน้าตอม่อ ซึ่งมีลักษณะหลุมกัดเซาะเป็นรูปครึ่งวงกลม (semi-circular) และทางด้านท้ายตอม่อ ซึ่งมีลักษณะหลุมกัดเซาะเป็นครึ่งวงรี (semi-elliptical) ดังสมการ 2.39

$$A_p = 1200L^2(F_p)^{1.5} (R_p)^{-0.18} \quad (2.39)$$

A_p = พื้นที่หลุมกัดเซาะที่ใช้ในการออกแบบป้องกันการกัดเซาะ

Richardson และคณะ (1987 อ้างถึงใน FHWA, 1988:41) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลความลึกหลุมกัดเซาะในห้องทดลอง ในสภาวะการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และสภาวะการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ เพื่อหาสูตรคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ CSU (The Colorado State University equation) ดังสมการ 2.40

$$\frac{d_s}{y} = 2.0k_1 k_2 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} F_r^{0.43} \quad (2.40)$$

d_s = ความลึกหลุมกัดเซาะ (scour depth)

y = ความลึกน้ำหน้าตอม่อ

- K_1 = สัมประสิทธิ์ปรับแก้รูปร่างตอม่อ (correction for pier shape) ดังรูป 2.16 และตาราง 2-6
 K_2 = สัมประสิทธิ์ปรับแก้มุมปะทะตอม่อ (correction for angle of attack) ดังตาราง 2-7
 b = ความกว้างของตอม่อ
 F_r = ฟรูดนัมเบอร์ (froude number)

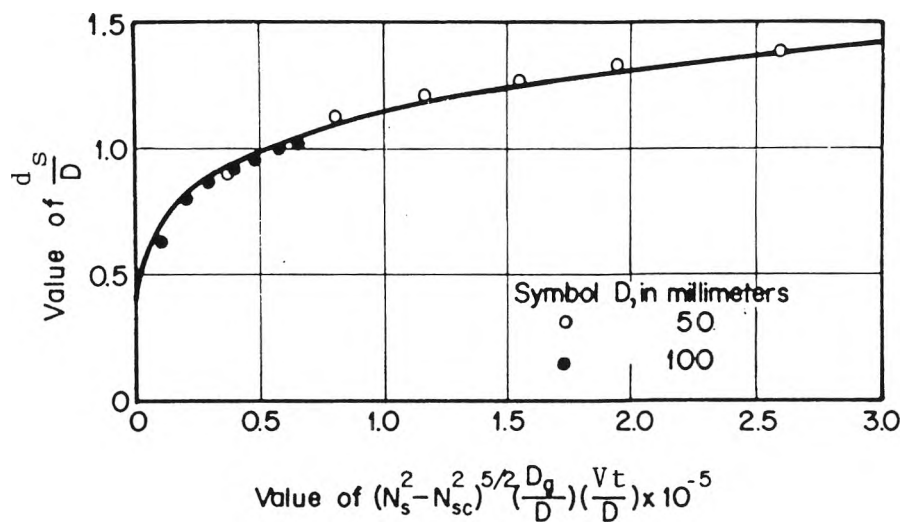
ตาราง 2-6 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ K_1 รูปร่างตอม่อ

	รูปร่างตอม่อ	K_1
1	ตอม่อรูปสี่เหลี่ยม (Square nose)	1.1
2	ตอม่อปลายมน (Round nose)	1.0
3	ตอม่อรูปทรงกระบอก (Circular cylinder)	1.0
4	ตอม่อปลายแหลม (Sharp nose)	0.9
5	ตอม่อรูปทรงกระบอกเป็นกลุ่ม (Group of cylinders)	1.0

ตาราง 2-7 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ K_2 มุมปะทะตอม่อกับทิศทางการไหลของน้ำ

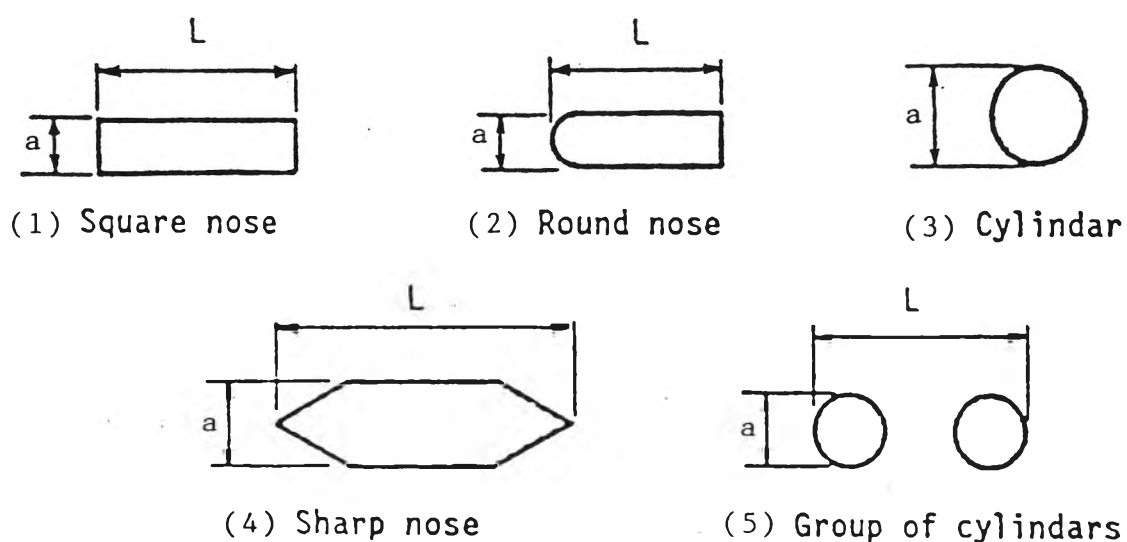
θ	$L/a=4$	$L/a=8$	$L/a=12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.5	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

- หมายเหตุ θ = มุมที่ตอม่อกระทำกับทิศทางการไหลของน้ำ
 L = ความยาวของตอม่อ



รูป 2.15 ความลึกกัดเซาะต่อเวลา

(Carstens (1966) จากอ้างอิง Simons 1977)



รูป 2.16 รูปร่างต่อม่อแบบต่าง ๆ

(Richardson และคณะ (1987) จากอ้างอิง FHWA, 1988)