บทที่ 2
หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา

2.1 ลักษณะของการกัดเซาะ

ลักษณะของการกัดเซาะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

2.1.1 การกัดเซาะตามพื้นผิว (general scour) การกัดเซาะประเภทนี้มักจะเกิดขึ้นตามลำน้ำธรรมชาติ จะเกิดการกัดเซาะทั่วไปตามผิวลำน้ำไม่ว่าจะมีโครงสร้างขวางลำน้ำหรือไม่ก็ตาม ซึ่งอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ ได้แก่ เงื่อนไขการไหล (flow condition) ,สภาพลำน้ำหรือสภาพทางภูมิศาสตร์ ทำให้เกิดขบวนการการพัดพาวัสดุท้องน้ำ (bed material) เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบท้องน้ำ (bed form) และการเปลี่ยนแปลงระดับพื้นท้องน้ำไปจากเดิม อาจจะทับถมหรือกัดเซาะ (Aggradation or Degradation)

2.1.2 การกัดเซาะเนื่องจากการบีบตัวของลำน้ำ (constriction scour) เมื่อมีสิ่งกีดขวางลำน้ำ เช่น ตอม่อสะพานขวางลำน้ำ ทำให้หน้าตัดการไหลของลำน้ำลดลงและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลและการยกระดับน้ำด้านหน้าตอม่อ ซึ่งเป็นการเพิ่มความเร็วการไหลผ่านช่องเปิดสะพาน ความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้เกิดการกัดเซาะได้ การกัดเซาะจะเพิ่มมากขึ้นบริเวณพื้นที่ที่มีโครงสร้างขวางลำน้ำ สิ่งกีดขวางที่มีขนาดใหญ่มีผลต่อความสัมพันธ์การไหลกับความกว้างของลำน้ำ ยิ่งทางน้ำบีบตัวลงมากเท่าใดก็ยิ่งทำให้เกิดการกัดเซาะมากยิ่งขึ้น

2.1.3 การกัดเซาะเฉพาะแห่ง (local scour) การกัดเซาะเฉพาะแห่งเป็นการกัดเซาะรอบๆสิ่งกีดขวาง สิ่งกีดขวางมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล ทำให้เกิดพื้นที่เล็กๆรอบสิ่งกีดขวางและเกิดการไหล 3 มิติ ซึ่งเป็นการไหลแบบหมุนวน ความลึกทั้งหมดของการกัดเซาะต้องใช้ระยะเวลาเป็นผลรวมทั่วๆไปของความลึกการกัดเซาะ เนื่องจากทางน้ำแคบลงจนเกิดการกัดเซาะเฉพาะแห่ง

การกัดเซาะเฉพาะแห่งที่รอบตอม่อสะพานยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

(1) การกัดเซาะคงที่ (stable scour) กรณีนี้วัสดุแขวนลอยที่ถูกพัดมาตามกระแสน้ำจากที่อื่นเข้าไปในหลุมกัดเซาะมีปริมาณเท่ากับวัสดุแขวนลอยที่ถูกพัดออกจากหลุมกัดเซาะ ฉะนั้น ระดับความลึกจะคงที่ไปตลอด นั่นคือ

$$q'_{out} = q'_{in} \tag{2.1}$$

(2) การกัดเซาะเนื่องจากภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear-water scour) ความหมายของการกัดเซาะกรณีนี้คือแรงเค้นเฉือนที่ท้องน้ำจากพื้นที่การกัดเซาะน้อยกว่าแรงเฉือนวิกฤติ (τ_c) ที่ต้องการสำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำและวัสดุท้องน้ำได้เคลื่อนที่บริเวณใกล้ๆกับตอม่อเท่านั้น ซึ่งแรงเค้นเฉือนที่ชั้นขอบเขตมากกว่าแรงเค้นเฉือนวิกฤติ วัสดุท้องน้ำด้านเหนือน้ำของพื้นที่การกัดเซาะจะยังคงเหมือนเดิมและไม่มีวัสดุท้องน้ำเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่หลุมกัดเซาะซึ่งได้ถูกกัดเซาะไปแล้ว ขบวนการกัดเซาะได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแรงเค้นเฉือนที่ชั้นขอบเขตในหลุมกัดเซาะลดต่ำกว่าแรงเค้นเฉือนวิกฤติ ซึ่งการไหลสม่ำเสมอเป็นเงื่อนไขการไหลต่ำกว่าวิกฤติจะทำให้เกิดความลึกการกัดเซาะสูงสุด การกัดเซาะจะเกิดขึ้นเป็นระยะเวลานานจนกระทั่งความลึกกัดเซาะเข้าสู่ภาวะสมดุล นั่นคือ

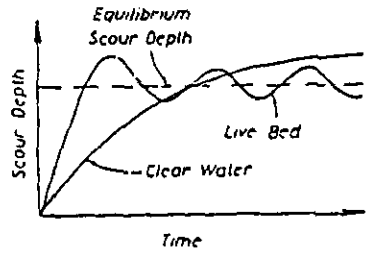
$$q'_{out} > 0, q'_{in} = 0 \qquad (2.2)$$

(3) การกัดเซาะเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (live-bed scour) เกิดจากการเคลื่อนที่ของตะกอน ความลึกกัดเซาะเฉพาะแห่งได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นไปตามการขึ้นลงของความลึกการกัดเซาะสมดุล สภาวะการเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาในการไหลเข้าของตะกอนทางด้านหน้าของหลุมกัดเซาะเข้าสู่หลุมกัดเซาะเท่ากับปริมาตรตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ รูปลักษณะท้องน้ำ (ท้องน้ำธรรมชาติไม่แน่นอน) ตลอดจนหลุมกัดเซาะเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความลึกของหลุมกัดเซาะและเวลาเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับความลึกการกัดเซาะ เช่น ความลึกกัดเซาะเฉลี่ย , ความลึกกัดเซาะสูงสุด

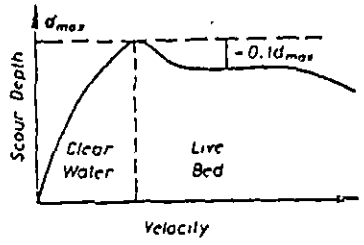
$$q'_{out} > q'_{in} > 0 \qquad (2.3)$$

ในการศึกษาคุณลักษณะของปรากฏการณ์การกัดเซาะเฉพาะแห่ง จะแบ่งการกัดเซาะเนื่องจากภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำกับภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำอย่างชัดเจน การประเมินการกัดเซาะจะสัมพันธ์กับเวลาและการเข้าสู่สภาวะสมดุลของหลุมกัดเซาะจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการกัดเซาะและความเร็วการไหล

ความลึกการกัดเซาะเนื่องจากภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำกับความสัมพันธ์ $\frac{\tau_o}{\tau_{ii}} \approx 1$ อาจจะพิจารณาเงื่อนไขใกล้ท้องน้ำของหลุมกัดเซาะ สำหรับกรณีความลึกการกัดเซาะสูงสุดเนื่องจากภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำโดยทั่วไปลึกมากกว่า 10 % ของการกัดเซาะเนื่องจากภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ดังรูปที่ 2-1



ก.ความลึกกัดเซาะสัมพันธ์กับเวลา



ข.ความลึกกัดเซาะสัมพันธ์กับความเร็ว

รูป 2-1 ความลึกการกัดเซาะที่สัมพันธ์กับตอม่อและขนาดตะกอน

2.2 ปรากฏการณ์การกัดเซาะ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

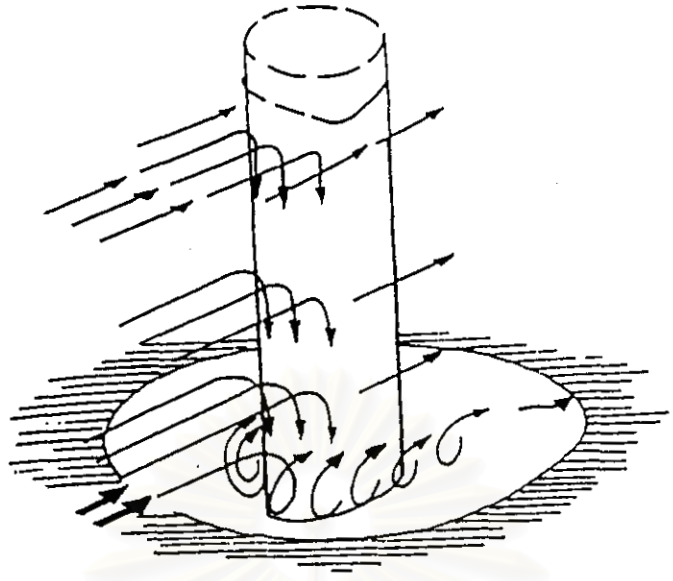
2.2.1 ขั้นเริ่มแรก (initial phase) จะปรากฏหลุมเล็กๆบนผิวราบเรียบของท้องน้ำ สามารถมองเห็นได้ชัดเจน และความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.2.2 ขั้นสมดุล (equilibrium scour depth) ในขั้นนี้ความลึกจะเข้าใกล้สภาวะสมดุลคือมีการกัดเซาะที่มีการทับถมของเม็ดตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะ อัตราการกัดเซาะจึงลดลงและเข้าสู่สภาวะที่เกือบจะคงที่ ให้ค่าความลึกการกัดเซาะสูงสุดชั่วคราว

2.2.3 ขั้นสูงสุด (maximum scour depth) หลุมกัดเซาะจะทรงตัวอยู่ในขั้นสภาวะสมดุลจนถึงเงื่อนไขหนึ่ง จึงจะมีการกัดเซาะต่อและถึงจุดความลึกกัดเซาะสูงสุดหรือเกิดเงื่อนไขที่ต้องยุติการกัดเซาะ ค่าความลึกสมดุลก็จะเป็นค่าความลึกการกัดเซาะสูงสุด

2.3 กลศาสตร์การกัดเซาะ (Mechanics of Scour)

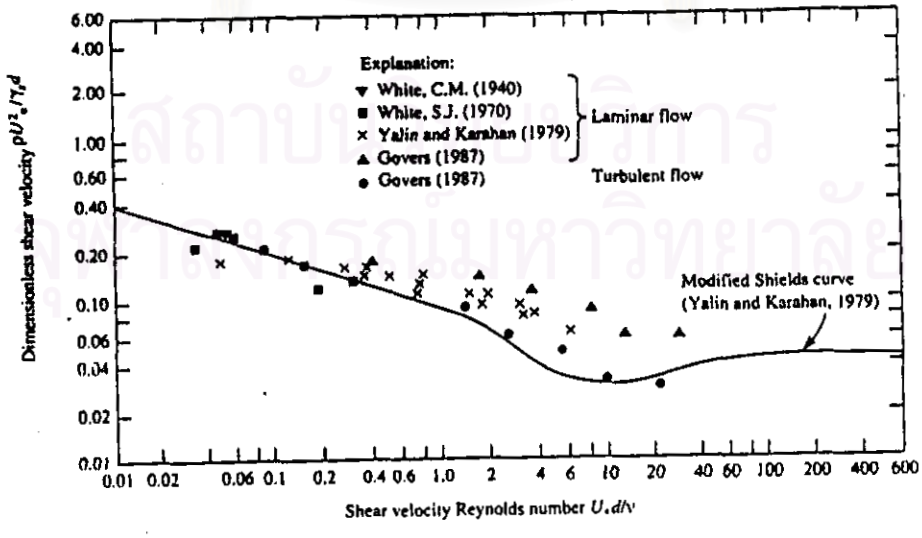
การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานเป็นผลมาจากการไหลแบบหมุนวน (vortex system) ซึ่งได้เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลเกิดการเบี่ยงเบนรอบๆตอม่อ การไหลหมุนวนจะช่วยสนับสนุนให้เกิดการกัดเซาะที่สันตอม่อด้านเหนือน้ำ ซึ่งทิศทางการไหลจะไหลพุ่งลงข้างล่างและเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ทิศทางการไหลวกกลับในแนวราบที่ท้องน้ำ วัสดุท้องน้ำจะเคลื่อนที่โดยการไหลกลิ้งวนภายในหลุมกัดเซาะโดยหมุนวนรอบด้านข้างตอม่อในแนวราบ การไหลหมุนวนจะเป็นรูปเกือกม้า ดังรูป 2-2



รูป 2-2 การเกิด Horseshoe Vortex ที่ตอม่อรูปทรงกระบอก

ความลึกการกัดเซาะที่เงื่อนไขสมดุลมักจะเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อสภาวะเงื่อนไข clear-water และสภาวะเงื่อนไข live-bed เมื่อความเร็วใกล้หลุมกัดเซาะเท่ากับ U_c ความเร็ววิกฤติเฉลี่ยสำหรับการเริ่มต้นการเคลื่อนที่

การหาความเร็วเฉือนวิกฤติ (shear velocity) ทั้งสภาวะเงื่อนไข clear-water และ สภาวะเงื่อนไข live-bed สามารถหาได้จากรูป 2-3



รูป 2-3 Modified Shield's Diagram(GOVERS ,1987)

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชั่นของความเร็วเฉือน และ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค (Particle Reynold Number) ซึ่งคิดค้นโดย Sheild และต่อมาได้รับการปรับปรุงโดย Yalin กับ Kalahan (1979) และ Govers (1987) ได้แนะนำรูป 2 – 3 เนื่องจากได้รับการปรับปรุงแล้ว โดยเงื่อนไข clear-water จุดจะตกอยู่ใต้เส้นทึบ และเงื่อนไข Live-bed จุดจะตกอยู่เหนือเส้นทึบ ซึ่งเส้นดังกล่าว คือเส้น Threshold of Movement

ฟังก์ชั่นความเร็วเฉือน (U_*) กำหนดโดยความสัมพันธ์

$$\frac{d}{\nu}\left[0.1\left(\frac{\gamma_s}{\gamma}-1\right)gd\right]^{1/2} \tag{2.4}$$

เมื่อ d คือ ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ ; ν คือ ความหนืดของของไหล ; γ_s และ γ คือน้ำหนักจำเพาะของวัสดุท้องน้ำและน้ำตามลำดับ ; g คือแรงโน้มถ่วงของโลก

สำหรับทางน้ำกว้าง :

$$F = \frac{\rho U_*^2}{\gamma_s d} \tag{2.5}$$

เมื่อ F คือ ฟังก์ชั่นของความเร็วเฉือน ; ρ คือความหนาแน่นของน้ำ ;U_* คือความเร็วเฉือน (shear velocity) ;

ค่า Reynold number ของอนุภาค , R

$$R = \frac{U_* d}{\nu} \tag{2.6}$$

สำหรับทางน้ำกว้าง :

$$R = \frac{d\sqrt{(2yS)}}{\nu} \tag{2.7}$$

เมื่อ R คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ; y คือ ความลึกการไหลของน้ำ ; S คือความลาดชันพลังงาน

2.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อการกัดเซาะเฉพาะแห่ง (Factors Affecting Local Scour)

2.4.1 ลักษณะของตอม่อ (Pier Characteristics)

- ความกว้างของตอม่อ (width of piers) มีผลกระทบโดยตรงต่อหลุมกัดเซาะ การเพิ่มความกว้างของตอม่อจะมีผลทำให้ความลึกการกัดเซาะเพิ่มขึ้น

- ความยาวของตอม่อ (length of piers) ไม่ค่อยจะมีผลกระทบต่อความลึกการกัดเซาะ ถ้าตอม่อวางแนวทางเดียวกับทิศทางการไหล และถ้าทิศทางการไหลทำมุมปะทะกับตอม่อความยาวตอ

ม่อมากยิ่งมีผลกระทบมาก ที่มุมปะทะเดียวกันความยาวตอม่อเพิ่มขึ้น 2 เท่า จะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มประมาณ 33%

- รูปร่างของตอม่อ (*shape of piers*) มีความสำคัญต่อการกัดเซาะที่ด้านหน้าตอม่อเพื่อเป็นการลดความแรงของ Horseshoe Vortex ลดความลึกการกัดเซาะ ทางด้านท้ายของตอม่อจะเป็นการลดความแรงของ Wake Vortex ตอม่อที่มีสันสี่เหลี่ยมจะมีความลึกการกัดเซาะสูงสุดประมาณ 20% ซึ่งมากกว่าตอม่อสันคม และ มากกว่าตอม่อรูปทรงกระบอกหรือตอม่อสันมน 10 %

2.4.2 ลักษณะของการไหล

- ความลึกการไหล (depth of flow) มีผลกระทบโดยตรงกับความลึกหลุมกัดเซาะการเพิ่มความลึกการไหลสามารถเพิ่มความลึกการกัดเซาะรอบตอม่อและ Abutment

- ความเร็วการไหล (velocity of approach flow) ความเร็วยิ่งมากความลึกการกัดเซาะก็ยิ่งมาก ที่การไหลต่ำกว่าวิกฤติหรือสูงกว่าวิกฤติจะมีผลกระทบต่อความลึกการกัดเซาะ

- มุมของการไหลที่ปะทะตอม่อ (angle of attack of the approach flow to the piers) มีผลกระทบอย่างมากต่อความลึกการกัดเซาะ ในกรณีที่ตอม่อมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ในการศึกษานี้สนใจระยะห่างระหว่างตอม่อว่ามีผลกระทบต่อการกัดเซาะอย่างไร เมื่อวางตอม่อทำมุมกับแนวทิศทางการไหล

2.4.3 ลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (Bed Material Characteristics)

- ขนาดของวัสดุท้องน้ำ (size of the bed material) ขนาดของท้องน้ำที่ละเอียด (แป้งหรือดินเหนียว) จะมีความลึกกัดเซาะลึกกว่าท้องน้ำที่เป็นทราย ผลกระทบของแรงเชื่อมแน่นซึ่งสัมพันธ์กับเวลาที่เข้าใกล้ความลึกกัดเซาะสูงสุด ความลึกกัดเซาะสูงสุดที่มีทรายเป็นท้องน้ำจะใช้เวลาเป็นชั่วโมง แต่ถ้าวัสดุท้องน้ำเป็น cohesive soil อาจจะต้องใช้เวลาเป็นวัน เดือน หรือ เป็นปีที่จะเข้าสู่ความลึกกัดเซาะสูงสุด

- ลักษณะสัณฐานของตะกอน (bed form) ในลำน้ำที่มีทรายเป็นวัสดุท้องน้ำ ลักษณะของท้องน้ำอาจจะเป็น ripples dunes plane bed และ antidunes ซึ่งขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของทรายท้องน้ำ เงื่อนไขการไหลและความหนืดการไหล (fluid viscosity) ลักษณะของท้องน้ำอาจเปลี่ยนจาก dunes เป็น plane bed หรือ antidunes ระหว่างการเพิ่มการไหลลักษณะท้องน้ำอาจจะเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำหรือเปลี่ยนความเข้มข้นของ silt และ clay ลักษณะท้องน้ำจะมีผลกระทบต่อความเร็วการไหล การพัดพาตะกอนและการกัดเซาะ

2.5 การพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ

ปรากฏการณ์การกัดเซาะรอบตอม่อเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสน้ำ ทำให้กระแสน้ำเบี่ยงเบนรอบ ๆ ตอม่อ เกิดกระแสน้ำหมุนวน และเกิดขบวนการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งมีลักษณะเป็น 3 มิติ ที่มีความยุ่งยากสลับซับซ้อน

ความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อ (d_s) ขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของน้ำ สภาพการไหล วัสดุท้องน้ำ รูปร่างตอม่อ ระยะห่างระหว่างตอม่อ และมุมการไหลที่ปะทะตอม่อ เมื่อพิจารณาตัวแปรหลักที่สำคัญทั้งหมด 9 ตัวแปร สามารถเขียนสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆได้ดังนี้

$$d_s = f(g, \rho, \mu, v, y, d_{50}, L, D, \ldots) \qquad (2.8)$$

เมื่อ d_s คือความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล ; g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ; ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ ; μ คือ ความหนืดพลศาสตร์ของน้ำ ; v คือ ความเร็วเฉลี่ยการไหลเข้าใกล้ตอม่อ ; y คือความลึกการไหล ; d_{50} คือขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดเล็กกว่าจนถึง 50 % โดยน้ำหนัก (The mediam diameter is the size of sediment for which 50% of the sample is finer.) ; L คือ ระยะห่างระหว่างตอม่อ ; D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ

การกัดเซาะรอบตอม่อเกี่ยวข้องกับหน่วยพื้นฐาน 3 หน่วย คือ มวล (mass) ความยาว (length) และ เวลา (time) ดังนั้นตัวแปรอิสระ 9 ตัว สามารถลดรูปเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ 3 กลุ่มตามทฤษฎีวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) โดยใช้ตัวแปร ρ , g และ y เป็นตัวแปรซ้ำ จะสามารถเขียนนฟังก์ชั่นอธิบายความสัมพันธ์ความลึกการกัดเซาะในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ได้ดังนี้

$$\frac{d_s}{y} = \Phi\left[\frac{v^2}{gy}, \frac{vy}{\nu}, \frac{y}{d_{50}}, \frac{y}{L}, \frac{y}{D}\right] \qquad (2.9)$$

ซึ่งกลุ่มตัวแปรเหล่านี้ใช้เป็นแนวทางในการอธิบายความสัมพันธ์ของรูปแบบหลุมกัดเซาะ พฤติกรรมการไหลของน้ำ และลักษณะของตะกอนท้องน้ำในการศึกษานี้

2.6 การศึกษาที่ผ่านมา

การศึกษาค้นคว้าเรื่องที่เกี่ยวกับการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานในห้องปฏิบัติการ โดยการทดลองในรางน้ำมีรายละเอียดดังนี้

Lacey (1929 อ้างถึงใน Chen, 1980:3) ได้เสนอสมการเบื้องต้นสำหรับทำนายความลึกการกัดเซาะ Lacey ได้ แนะนำว่าความลึกการกัดเซาะสูงสุด (d_{sm})ที่บริเวณสะพานและบริเวณพื้นที่อื่นที่คอดลง (constriction area) สามารถคำนวนจาก

$$d_{sm} = CR \tag{2.10}$$

เมื่อ d_{sm} คือความลึกกัดเซาะสูงสุด ;C ขึ้นอยู่กับพื้นที่รูปตัดขวางของแม่น้ำบริเวณสะพาน มีค่าอยู่ระหว่าง 1-2 , R คือรัศมีชลศาสตร์ของรูปตัดขวาง (hydraulic radius)

Inglis , Thomas และ Joglekar (1939) ได้รายงานผลการศึกษาแบบจำลองที่คล้ายคลึงกันตามมาตราส่วน ซึ่งใช้สำหรับแบบจำลองตอม่อสะพาน มาตราส่วน 1/40 1/65 1/105 และ 1/200 โดยใช้อัตราการไหลหลายๆค่า ตอม่อเดี่ยวถูกนำไปไว้ที่แนวศูนย์กลางของรางน้ำ ฝังลงในทราย ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.29 มม. ทดลองโดยทำทรายท้องน้ำให้อยู่ในแนวราบเท่านั้น ในกรณีเริ่มแรกครั้งแรกปล่อยอัตราการไหลน้อยๆ ขณะที่อัตราการไหลมากขึ้นได้ทำการทดลองโดยไม่ปรับท้องน้ำ ไม่มีการหมุนวนของตะกอน ความลึกการกัดเซาะจะลึกที่สุดที่สันตอม่อด้านเหนือน้ำ ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d_{sm}}{b} = 1.70\left(\frac{q^{2/3}}{b}\right)^{0.78} \tag{2.11}$$

เมื่อ d_{sm} คือความลึกกัดเซาะสูงสุด ; b คือความกว้างของตอม่อ , q คืออัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง (cfs/ft) ที่จุดศูนย์กลางของรางน้ำด้านเหนือน้ำของตอม่อ

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

$$\frac{d_{sm}}{y} = 4.19Fr^{0.52}\left(\frac{L}{y}\right)^{0.22} - 1 \tag{2.12}$$

เมื่อ d_{sm} คือความลึกกัดเซาะสูงสุด ; y คือ ความลึกการไหล ;L คือ projected length และ Fr คือค่าฟรุดนัมเบอร์

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. นำมาใช้รอบๆ ตอม่อ ใช้อัตราการไหล q คงที่ = 1 ฟุต^3/วินาที/ฟุต และความลึกของน้ำเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 ฟุตถึง 1.45 ฟุต การทดลองนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ แต่ละการทดลองกระทำต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการกัดเซาะสูงสุดรอบๆตอม่อ ซึ่ง Chitale สรุปได้ดังนี้

1. การไหลตามแนวแกน (axial flow) ความลึกการกัดเซาะสูงสุดเกิดขึ้นที่สันตอม่อ การกัดเซาะที่ด้านข้างตอม่อจะน้อยกว่าที่สันตอม่อประมาณ 5-15 %

2. อัตราส่วนระหว่างความลึกกัดเซาะสูงสุดกับความลึกการไหลในรางน้ำ ($\frac{S_{max}}{h}$) แสดงด้วยความสัมพันธ์อย่างง่ายของความเร็วใกล้หลุมกัดเซาะของรางน้ำ

3. ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองมีดังนี้

$$\frac{d_{se}}{y} = -0.51 + 6.65Fr - 5.49\,Fr^2 \qquad (2.13)$$

เมื่อ d_{se} คือความลึกกัดเซาะสมดุลภายใต้ท้องน้ำปกติ , y คือความลึกของน้ำใกล้หลุมกัดเซาะ , Fr คือฟรุดนัมเบอร์ของการไหลใกล้หลุมกัดเซาะ (Froude Number, $Fr = \frac{\overline{U}}{\sqrt{gy}}$) , $\overline{U}$ คือความเร็วเฉลี่ยของการไหลใกล้หลุมกัดเซาะ

Laursen (1954 **อ้างถึง** Raudkivi, 1976:290) ได้ศึกษาผลกระทบของทางน้ำและลักษณะของวัสดุท้องน้ำต่อการกัดเซาะ Laursen พบว่า หลังจากเวลาผ่านไปจนกระทั่งการกัดเซาะเข้าสู่สมดุลได้วัดค่าความลึกการกัดเซาะ ความลึกการกัดเซาะสมดุลไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลหรือขนาดวัสดุท้องน้ำ แต่การหาค่าโดยรูปทรงทางเรขาคณิตของตอม่อและความลึกการไหล อัตราการกัดเซาะระหว่างคาบเวลาที่กระทำขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลและขนาดวัสดุท้องน้ำ

Laursen และ Toch (1954 อ้างถึง Raudkivi, 1976:290) ได้แนะนำเกณฑ์การออกแบบสำหรับความลึกกัดเซาะสูงสุดของทางน้ำภายใต้ภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ดังนี้

$$\frac{d_{sm}}{L} = 1.35\left(\frac{L}{y}\right)^{0.7} \qquad (2.14)$$

Garde et. al. (1961 อ้างถึงใน Chang,1978:14) แสดงให้เห็นว่า ความลึกของการไหลมีผลกระทบน้อยมากต่อความลึกการกัดเซาะ Garde พบว่า ความเร็วของการไหลเป็นองค์ประกอบสำคัญมากกว่า แต่ไม่ได้แบ่งการกัดเซาะโดยภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำและภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

Laursen(1962 อ้างถึงใน Shen,1980:5) ได้ศึกษาความสัมพันธ์สำหรับทำนายการกัดเซาะที่ตอม่อและคอสะพาน สำหรับกรณีที่มีการพัดพาตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะ (scour hole) ความสัมพันธ์ได้ถูกพัฒนาและวิเคราะห์ในห้องทดลอง และหลุมกัดเซาะขึ้นอยู่กับสภาพเงื่อนไขการไหล ความกว้างของหลุมกัดเซาะประมาณเท่ากับ 2.75 เท่าของความลึกการกัดเซาะ

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

$$\frac{d_{sm}}{L} = \frac{y}{L}\left[\frac{1.95}{\left(\frac{y}{L}\right)^{1/6}} - 1\right] \qquad (2.15)$$

Carstens (1966) ได้ทำการทดลองในรางน้ำกว้าง 0.80 ม. ยาว 21.0 ม. วางตอม่อ 3 อันที่กึ่งกลางรางน้ำ ใช้ทรายแตกต่างกัน 4 ขนาดดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 3.08 , 1.52 , 0.52 และ 0.26 มม. ใช้หลักการพัดพาของตะกอน สมการที่เกี่ยวข้องกับความลึกการกัดเซาะมีดังนี้

1. สมมุติว่าอัตราการพัดพาตะกอนเป็นฟังก์ชั่นของอัตราการกระจายแรงบนอนุภาคตะกอน (ΣF_d) ต่อแรงคงที่ (ΣF_s)

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

$$= C_d k_1 d^2 \rho \frac{U^2}{2} + C_d k_1 d^2 \rho \frac{U^2}{2} \quad (2.16)$$

และ ΣF_s = น้ำหนักประสิทธิผลของอนุภาค

$$= (\gamma_s - \gamma_w) k_2 d^3$$

ดังนั้น

$$\frac{\sum Fd}{\sum Fs} = \frac{K_1\sqrt{C_d^2 + C_l^2}}{K_2} \frac{U^2}{(S-1)gd} \quad (2.17)$$

$$= [\, f(\text{sediment grain geometry}\,]\, N_s^2$$

เมื่อ C_d คือสัมประสิทธิ์แรงฉุดลากของอนุภาค (drag force coefficient) , C_l คือสัมประสิทธิ์แรงยกตัวของอนุภาค (lift force coefficient) , K_1 คือแฟคเตอร์รูปร่างของอนุภาคตะกอน (พื้นที่) , K_2 คือแฟคเตอร์รูปร่างของอนุภาคตะกอน (ปริมาตร) , d คือขนาดของอนุภาคตะกอน , ρ คือความหนาแน่นของของไหล และ γ_s , γ_w คือน้ำหนักจำเพาะของอนุภาคตะกอนและของไหล ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้

$$Ns = \frac{U}{\sqrt{(s-1)gD}} = \frac{U}{\sqrt{\Delta gD}} \quad (2.18)$$

เมื่อ *Ns* เป็นค่าพารามิเตอร์เรียกว่า เลขตะกอน (Sediment Number)

2. การศึกษาเส้นชั้นความลึกของหลุมกัดเซาะ , Carstens สมมุติว่า รูปร่างของหลุมกัดเซาะเป็นลักษณะของกรวยกลับหัว ซึ่งมีฐานเท่ากับความกว้างของตอม่อ (b) และมีความชันด้านข้างเท่ากับมุมเสถียรภาพของวัสดุท้องน้ำ ($\varnothing$) และปริมาตรตะกอนหาได้จาก

$$Qs = \frac{\pi}{3\tan\phi}\left(\frac{S^3}{\tan\phi} + \frac{3bS^2}{2}\right) \quad (2.19)$$

เมื่อ *S* คือความลึกการกัดเซาะที่เวลา t ใดๆ

3. สำหรับเงื่อนไขการกัดเซาะสมดุล จะได้สมการความลึกการกัดเซาะดังนี้

$$\frac{d_{se}}{y} = 0.546\left(\frac{N_s^2 - 1.25}{N_s - 5.02}\right)^{5/6} \quad (2.20)$$

Shen , Schneider , Karari (1966) และ Wang (1983) ได้เสนอสมการ การกัดเซาะโดย clear-water ดังนี้

$$\frac{d_{sm}}{L} = 2Fr^{0.43}\left(\frac{L}{y}\right)^{0.645} \qquad (2.21)$$

Shen et al (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 (dunes) ต่อหลุมกัดเซาะ ใช้เครื่องหาความลึกโดยใช้คลื่นเสียงเคลื่อนที่ไปตามรางน้ำและใช้หารูปตัดตามยาวของท้องรางน้ำ ตอม่อกว้าง 0.896 ฟุต และใช้ทราย d_{50} = 0.24 มม. และ 0.46 มม.

3. รางน้ำโดยใช้น้ำหมุนวนลึก 5 ฟุต ยาว 180 ฟุต ใช้ทรายd_{50} = 0.46 มม.

จากผลการทดลองของ Shen สรุปได้ดังนี้

1. ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ตอม่อ ($R_p = \frac{\bar{u}b}{\nu}$) มีความสำคัญในการอธิบายขบวนการกัดเซาะ

2. สมการ $S_e = 0.222R_p^{0.619}$ มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นหลักเกณฑ์ในการออกแบบสำหรับประมาณค่าความลึกการกัดเซาะที่เป็นไปได้ ,Se เป็นความลึกการกัดเซาะสมดุลมีหน่วยเป็นเซนติเมตร.

3. ถ้าลักษณะท้องน้ำเป็นเนินทราย ที่ความเร็วออกแบบ ประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงของเนินทรายจะถูกพิจารณา เพื่อที่จะประมาณความลึกการกัดเซาะสมดุลจนถึงความลึกสูงสุดที่เป็นไปได้

Maza Alvarez และ Sanchez (1964 อ้างถึงใน Simons,1977:689) ได้ปรับปรุงสมการของ Jaroslavitisiv (1960) มีรายละเอียดดังนี้

$$\frac{S}{b} = k_1 k_2 \frac{U^2}{gb} - \frac{30Dg}{b} \qquad (2.22)$$

เมื่อ k_1 และ k_2 คือค่าพารามิเตอร์ดังตาราง 2-1 และตาราง 2-2

ตาราง 2–1 ค่าสัมประสิทธิ์ k_1

รูปร่างตอม่อ	k_1					
	β =	0°	10°	20°	30°	40°
รูปทรงวงกลม		10				
รูปทรงเหลี่ยม		8.5	8.7	9.0	10.3	11.3

ตาราง 2-2 ค่าสัมประสิทธิ์ k_2 (*)

		k_2			
$\frac{d1}{b}$	$\frac{v^2}{gb}$	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

(*) ค่าสัมประสิทธิ์ K_2 เป็นค่าโดยประมาณ

Breusers (1965) ได้แนะนำสมการการกัดเซาะดังนี้

$$d_{se} = 1.4\ b \tag{2.23}$$

เมื่อ b คือลักษณะทางเรขาคณิตของตอม่อ ซึ่งสมการดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับสมการของ Larras (1963) Larras ได้พบว่าความลึกการกัดเซาะสามารถหาได้จากสมการในรูปของความกว้างตอม่อ

$$d_{sm} = 1.42\ kb^{0.75} \tag{2.24}$$

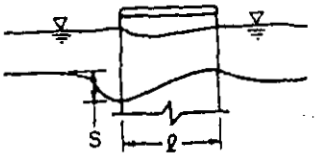
เมื่อ b คือขนาดตอม่อ , k = 1 สำหรับตอม่อรูปวงกลม , k = 1.4 สำหรับตอม่อรูปทรงเหลี่ยมและมุมการไหลปะทะตอม่อ (β) = 0°

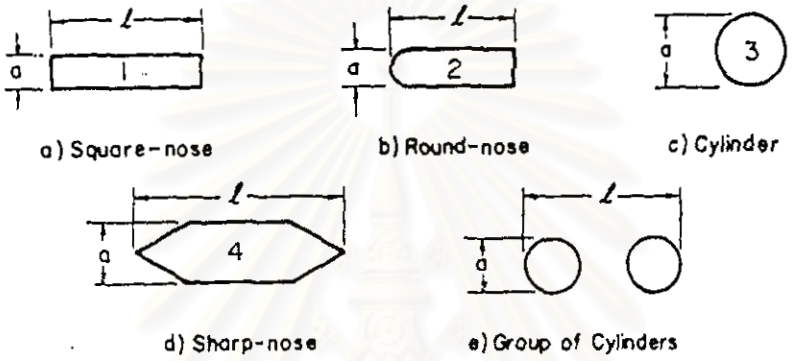
ส่วน Neil (1973) ได้สรุปสูตรทั่วไปสำหรับตอม่อรูปทรงต่างๆดังสมการ

$$d_s = kb \tag{2.25}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ k เปลี่ยนแปลงตามรูปทรงของตอม่อตามที่แสดงไว้ในตาราง 2 -3

ตาราง 2-3 ค่าสัมประสิทธิ์ K สำหรับตอม่อที่วางขนานกับทิศทางการไหล(อ้างถึง Neil,1973)

Pier Shape in Profile	Suggested Allowance for Local Scour
	Pier 1 = 2.0 Pier 2 = 1.5 Pier 3 = 1.5 Pier 4 = 1.2



Coleman (1971) ได้แนะนำค่าปรับแก้ระหว่าง 2 พารามิเตอร์คือค่าเลขกัดเซาะของออยเลอร์ (Scour Euler Number) = $\frac{U}{\sqrt{2gS}}$ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number) = $\frac{\rho UL}{\mu}$ เพื่อที่จะทำนายการกัดเซาะดังนี้

$$\frac{U}{\sqrt{2gS}} = A\left(\frac{\rho Ub}{\mu}\right)^{9/10} \tag{2.26}$$

เมื่อ $A = 0.6\left(\frac{\mu}{\rho g^{1/2} b^{3/2}}\right)^{9/10}$

ซึ่งค่า A เป็นค่าในสมการการกัดเซาะสูงสุด

$$\frac{U}{\sqrt{2gS}} = 0.6\left(\frac{U}{\sqrt{gb}}\right)^{9/10}$$ หรือ

$$d_s = 1.49\, b^{9/10}\left(\frac{U^2}{2g}\right)^{1/10} \qquad (2.27)$$

ถ้า $U^2/2g = 1$, $b^{9/10} \approx b$ และ 1.49 แทนด้วย 1.4 สำหรับตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะได้ความสัมพันธ์ความลึกการกัดเซาะดังนี้ $S = 1.4\, b$ ซึ่งก็เป็นสมการของ Breusers นั่นเอง

Jain และ Fisher (1979) ได้สรุปว่า ความลึกการกัดเซาะรอบตอม่อวงกลมในทางน้ำที่มีการพัดพาตะกอนเริ่มแรกลดลงและเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ Froude Number ลักษณะของท้องน้ำช่วยให้เกิดการกัดเซาะจนถึงการกัดเซาะสูงสุดและทวีความสำคัญตามความเร็วการไหลที่สูงขึ้น ดังสมการดังนี้

$$\frac{d_{sm}}{L} = 1.84 Fr^{0.25}\left(\frac{y}{L}\right)^{0.3} \qquad (2.28)$$

เมื่อ d_{sm} คือ ความลึกกัดเซาะสูงสุด ; y คือความลึกการไหล ; Fr คือค่าฟรุดนัมเบอร์ ; L คือ projected length สำหรับการกัดเซาะสูงสุดโดยภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear-water)

Chen A Han (1980) ได้ทำการทดลองหาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานทรงกลม ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) โดยใช้ทราย 2 ขนาด ได้แก่ d_{50} = 1.12 มม. ,σ_g = 1.24 , ϕ = 32 และ d_{50} = 0.30 มม. ,σ_g = 2.04 , ϕ = 29 และใช้ตอม่อรูปทรงกระบอก 3 ขนาด ในการทดลองเป็นสภาวะเงื่อนไข live-bed ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขนาดตะกอนมีผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาผลการศึกษาของผู้ศึกษาหลายท่านพบว่าขนาดของตะกอนไม่มีผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะ และได้ให้สูตรการทำนายความลึกหลุมกัดเซาะในภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยมีความสัมพันธ์ของขนาดตะกอน ดังสมการ 2.29 และ 2.30

$$d_{max} = \left[2.27 - 0.45\log\left(\frac{b}{D_{50}}\right)\right] d_{se} \quad \text{For } \frac{b}{D_{50}} \le 650 \qquad (2.29)$$

$$d_{max} = d_{se} \qquad \text{For } \frac{b}{D_{50}} > 650 \qquad (2.30)$$

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

d_{max} คือความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด , d_{se} คือความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล , b คือความกว้างของตอม่อ , $\frac{\overline{V}^2}{2g}$ คือ หัวความเร็ว (velocity head)

Ruadkivi A.J. และ Ettema R. (1983) ได้ทำการทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอกภายใต้ภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้ทรายเป็นวัสดุท้องน้ำ ข้อมูลพื้นฐาน ความลึกสมดุลของการกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ ความลึกการไหลมีความสัมพันธ์ทั้งขนาดตอม่อและขนาดวัสดุท้องน้ำ สรุปได้ดังนี้

1. ความลึกกัดเซาะสมดุลมีความสัมพันธ์กับขนาดวัสดุท้องน้ำ พบว่าการกระจายของวัสดุท้องน้ำเพิ่มขึ้น ความลึกกัดเซาะสมดุลจะลดลง
2. ความลึกสมดุลลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อลดลง
3. ความลึกสมดุลสูงสุดภายใต้ภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเป็นฟังก์ชั่นกับ y_o/D และ D/d_{50}
4. ความลึกสมดุลลดลงในอัตรามากกว่าการลดลงของความลึกการไหล สำหรับค่าความลึกการไหลน้อยๆ Y_o/D

Chang Sin Zee (1987) ได้ทำการทดลองหาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) โดยทำการศึกษาการกัดเซาะในภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำและ Steady uniform state โดยใช้วัสดุท้องน้ำเป็น uniform sand 3 ขนาด ได้แก่ ทรายหยาบ d_{50} = 0.97 มม. , σ_g = 1.94 , ϕ = 32.5 , ทรายปานกลาง d_{50} = 0.43 มม. , σ_g = 1.61 , ϕ = 29.0 , ทรายละเอียด d_{50} = 0.19 มม. ,σ_g = 1.47 , ϕ = 26.5 และใช้รูปทรงตอม่อสะพาน 2 แบบ ได้แก่ ตอม่อรูปทรงกระบอก (cylindrical piers) และ ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunt-nosed piers) และยังศึกษาครอบคลุมถึงขนาดของหลุมกัดเซาะอันเนื่องมาจากมุมในการปะทะของการวางตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมนอีกด้วย

จากการศึกษาทางทฤษฎีและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า พื้นที่หลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานขึ้นอยู่กับ รูปแบบการไหล ลักษณะการไหล ลักษณะของตอม่อ และขนาดของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งจากการศึกษาได้สูตรในการทำนายพื้นที่หลุมกัดเซาะ ดังสมการ 2.31 และ 2.32

$$\frac{A_{sm}}{L^2} = 8.5\left(F_p\right)^{1.36}\left(\frac{D_{50}}{L}\right)^{-0.36} \tag{2.31}$$

หรือ

$$\frac{A_{sm}}{L^2} = 47F_p^{\,1.27}\left(\frac{D_{50}}{L}\right)^{-0.35} R_p^{\,-0.17} \tag{2.32}$$

A_{sm} คือพื้นที่หลุมกัดเซาะสูงสุด , F_p คือค่าฟรุดนัมเบอร์ของตอม่อ (Froude Number at piers) $= \frac{V}{\sqrt{gL}}$, R_p คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ (Reynolds Number at piers) $= \frac{VL}{\nu}$, L คือ Projected Length ของตอม่อ

นอกจากนี้ ยังศึกษาถึงการป้องกันการกัดเซาะ โดยหาสูตรพื้นที่เพื่อป้องกันการกัดเซาะทางด้านหน้าตอม่อ ซึ่งลักษณะหลุมกัดเซาะเป็นรูปครึ่งวงกลม (semi-circular) และทางด้านท้ายตอม่อ ซึ่งลักษณะหลุมกัดเซาะเป็นรูปครึ่งวงรี (semi-elliptical) ดังสมการ 2.32

$$A_p = 1200\, L^2 (F_p)^{1.5} (R_p)^{-0.18} \tag{2.33}$$

A_p คือพื้นที่หลุมกัดเซาะที่ใช้ในการออกแบบป้องกันการกัดเซาะ

Richardson et al (1987 อ้างถึงใน FHWA,1988:41) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลความลึกหลุมกัดเซาะในห้องทดลองในภาวะการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำและภาวะการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ เพื่อหาสูตรการทำนายความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งเรียกว่าสมการ CSU (The Colorado State University Equation)

$$\frac{d_s}{y} = 2.0k_1k_2\left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \tag{2.34}$$

d_s คือความลึกหลุมกัดเซาะ , y คือความลึกน้ำด้านหน้าตอม่อ , k_1 คือสัมประสิทธิ์ค่าปรับแก้รูปร่างตอม่อ (correction for pier shape) , k_2 คือ สัมประสิทธิ์ค่าปรับแก้มุมปะทะตอม่อ (correction for angle of attack) , b คือความกว้างของตอม่อ , Fr คือฟรุดนัมเบอร์ (Froude Number) $= V_1^2/(gy_1)^{0.5}$

ตาราง 2-4 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ (K_1) รูปร่างตอม่อ

รูปร่างตอม่อ	k_1
ตอม่อรูปสี่เหลี่ยม (square nose)	1.1
ตอม่อปลายมน (round nose)	1.0
ตอม่อรูปทรงกระบอก (circular cylinder)	1.0
ตอม่อปลายแหลม (sharp nose)	0.9
ตอม่อรูปทรงกระบอกเป็นกลุ่ม (group of cylinder)	1.0

ตาราง 2-5 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

Nandana Vittal , U.C.Kothyari และ Morteza Haghighat (1994) ได้ทำการทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อกลุ่มภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำที่อัตราการไหลต่ำ โดยใช้ขนาดตะกอนสม่ำเสมอ ใส่ในรางน้ำยาว 25 เมตร กว้าง 1 เมตร และลึก 0.30 เมตร กำหนดความลาดชันท้องน้ำ S_0 = 7.83 x 10^{-4} พบว่าลักษณะตอม่อจมน้ำ (full pier group) จะมีอัตราการกัดเซาะลดลงประมาณ 40-75 % ของตอม่อจมน้ำบางส่วน (partial pier group) และตอม่อวางทำมุม 30° กับทิศทางการไหลจะให้ผลการกัดเซาะต่ำสุด

พรมงคล ชิดชอบ (1998) ได้ศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน อันเนื่องมาจากวัสดุท้องน้ำเป็นทรายธรรมชาตินำมาคละกัน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ สภาวะเงื่อนไข clear-water และสภาวะเงื่อนไข live-bed โดยใช้แบบจำลองตอม่อรูปทรงกระบอก 3 ขนาด ในการศึกษาที่สภาวะ clear-water และ live-bed ใช้แบบจำลองตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ซึ่งมีอัตราส่วน 3 อัตราส่วน ในการศึกษาที่สภาวะ clear-water จากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อหลุม

กัดเซาะในสภาวะเงื่อนไข clear-water ได้แก่ รูปร่าง ขนาด มุมการไหลปะทะตอม่อ ความลึกการไหล ความเร็วการไหลเฉลี่ย ขนาดของวัสดุท้องน้ำ และการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำ และในสภาวะเงื่อนไข live-bed ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อหลุมกัดเซาะ ได้แก่ รูปร่าง ขนาดตอม่อ มุมการไหลปะทะต่อม่อ และวัสดุท้องน้ำ

Robert Ettema , Bruce W. Melville and Brian Barkdoll (1998) ได้ศึกษาผลกระทบของความกว้างตอม่อที่มีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะเฉพาะแห่ง พบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง กับความกว้างตอม่อ โดยไม่ได้เปรียบเทียบรูปร่างตอม่อ การไหล และวัสดุท้องน้ำ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ศึกษาในรางน้ำ และเป็นการยากที่จะเก็บข้อมูลในสนาม แต่จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ พอที่จะเป็นแนวทางในการคาดคะเนหลุมกัดเซาะต่อไป การศึกษานี้ได้พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับความลึกหลุมกัดเซาะ ดังนี้

$$d_s = f(\rho, \mu, u, y, g, d, U_c, D) \tag{2.35}$$

และใช้ทฤษฎีวิเคราะห์มิติ จะได้ ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = \phi\left(\frac{U}{U_c}, \frac{u^2}{gD}, \frac{y}{D}, \frac{D}{d}, \frac{\rho u D}{\mu}\right) \tag{2.36}$$

ซึ่งได้สมการดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = \left(\frac{y}{D}\right)^{0.62} Fr^{0.2} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.08} \tag{2.37}$$

Martin Vide J.P. Hidalgo C. และ Bateman A. (1998) ได้ศึกษาการกัดเซาะเฉพาะแห่งรอบตอม่อสะพานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตั้งอยู่บนเสาเข็มรูปทรงกระบอก 2 ต้น โดยพิจารณาถึงผลกระทบของเสาเข็มที่มีท้องน้ำระดับต่างๆกัน ซึ่งทดลองในสภาวะ clear-water โดยกำหนดวัสดุท้องน้ำมีลักษณะขนาดสม่ำเสมอ และเฉลี่ยความกว้างของตอม่อ เมื่อตอม่อมีรูปทรงไม่เท่ากันตลอดตอม่อ 3 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 $$a = a_1(1-n) + a_2 n \tag{2.38}$$

เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของตอม่อ , a_2 คือ ความกว้างเสาเข็ม , $n = N/25.4$, N คือ ระดับท้องน้ำจนถึงระดับขอบล่างของตอม่อ

วิธีที่ 2 $$a = a_1 \int_{0}^{1-n} f(s)ds + a_2 \int_{1-n}^{1+Ys} f(s)ds \qquad (2.39)$$

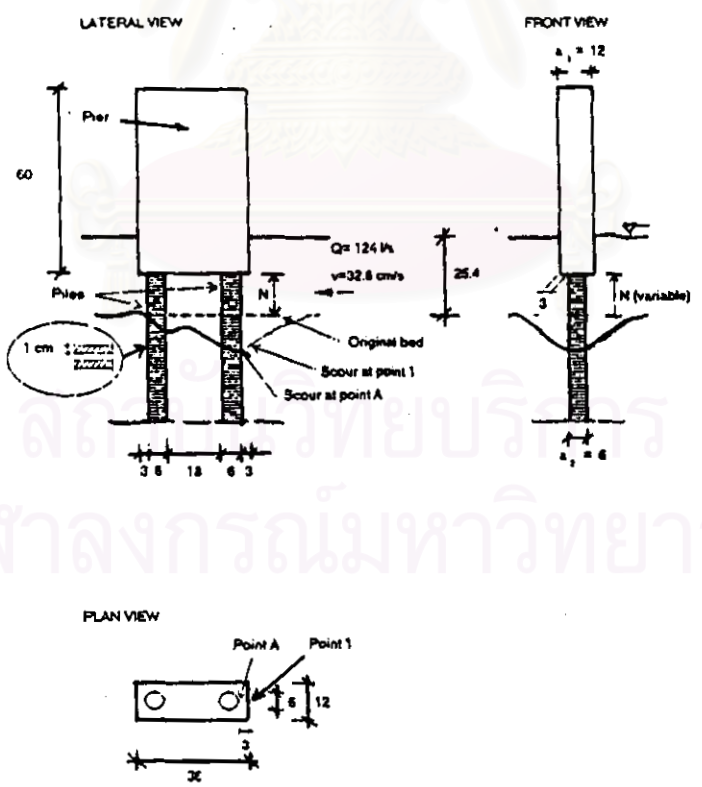
เมื่อ *f(s)* คือ weight function เมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 1

วิธีที่ 3 $$a = 0.52\ [\ a_1(1-n) + a_2 n\ ] + 0.48\ a_2 \qquad (2.40)$$

จากการศึกษาใช้สมการ Colorado State University (CSU)

$$d_s = 2.0 k_1 k_2\ a^{0.65}\ y^{0.35}\ Fr^{0.43} \qquad (2.41)$$

เมื่อ k_1 และ k_2 คือ แฟคเตอร์รูปร่างและมุมการไหลปะทะตอม่อ , *y* คือความลึกการไหล , *Fr* คือค่าฟรุดนัมเบอร์ , *a* คือ ความกว้างเฉลี่ยของตอม่อ จากการศึกษาพบว่า วิธีที่ 3 เป็นวิธีที่เหมาะสมวิธีหนึ่งในการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ



รูป 2-4 ลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของ pier-piles group ที่ใช้ในการทดลอง