

การศึกษาการกัดเซาะตลิ่งลำน้ำพอง ณ บ้านหนองหิน ต.ศิลา อ.เมือง จ.ขอนแก่น The Study of Phong River Bank Erosion at Ban Nong Hin, Northeastern Thailand

อริยปรัชญ์ บุญผ่องศรี (Ariyaprat Bunpong Sri)^{1*} ดร.รัตมนี นันทสาร (Dr. Ratamane Nuntasarn)**

(Received: October 27, 2021; Revised: February 8, 2022; Accepted: February 10, 2022)

บทคัดย่อ

การกัดเซาะตลิ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญที่ทำให้เสถียรภาพของตลิ่งลดลง ก่อให้เกิดอันตรายต่อการอยู่อาศัยและการเดินทางในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกับตลิ่งนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาการกัดเซาะตลิ่งลำน้ำพอง ณ บ้านหนองหิน ม.8 ต.ศิลา อ.ขอนแก่น จ.ขอนแก่น การกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการกัดเซาะ ($\mathcal{E}$) มีค่ามากกว่าศูนย์ โดยตัวแปรที่สำคัญคือหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ (τ_o) หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (τ_c) และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (k_d) ความเร็วการไหลของน้ำสำรวจด้วยเครื่องมือ River Surveyor M9 และรวบรวมจากระบบโทรมาตรเขื่อนจุฬาภรณ์และเขื่อนอุบลรัตน์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ค่าบันทึกผลการทดสอบในสนามด้วยวิธี Submerged Jet Test ถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน โดยมีทั้งหมด 3 วิธีที่แตกต่างกันคือวิธี Blaisdell Solution, Scour Depth Solution และ Iterative Solution สุดท้ายพบว่าระยะการกัดเซาะตลิ่งของวิธี Blaisdell Solution มีค่าเท่ากับ 58.99 m. และ 219.78 m. แต่วิธี Scour Depth Solution และ Iterative Solution ให้ค่าระยะการกัดเซาะตลิ่งเท่ากับ 0.00 m. เพื่อความแม่นยำของผลการทดสอบจึงเปรียบเทียบกับรูปตัดของตลิ่งที่เปลี่ยนไปจากการสำรวจความเปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 192 วัน พบว่าตลิ่งถูกกัดเซาะมากที่สุดเท่ากับ 3.73 m. ทั้งนี้สรุปได้ว่าระยะการกัดเซาะจากวิธี Blaisdell Solution ให้ความคลาดเคลื่อนที่สูงเกินไป แต่วิธี Scour Depth Solution และ Iterative Solution ให้ความคลาดเคลื่อนที่ต่ำเกินไป ซึ่งยังไม่สามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบครั้งนี้ไปทำนายระยะการกัดเซาะที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคต ดังนั้นการเพิ่มชุดจำนวนการทดสอบในสนามให้มากขึ้น พร้อมกับทดสอบให้ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ถูกน้ำกัดเซาะมากที่สุด จะสามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลการทดสอบและผลการทำนายระยะการกัดเซาะที่จะเกิดขึ้นในอนาคตให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ABSTRACT

The river bank erosion is a major process to decrease a slope stability of the river bank, and then the slope can be failure. The Phong river bank at Ban Nong Hin, Northeastern Thailand is the research site in this study. The purposes of this study are to find and recheck the value of erodibility parameters of Phong river bank for predicting the erosion distance in the future. The erosion is occurred by the erosion rate ($\mathcal{E}$) is over than zero. The significant parameters are the boundary shear stress (τ_o), the critical shear stress (τ_c) and the erodibility coefficient (k_d). The water velocities are collected by the River Surveyor M9 equipment and the water-tele of the Electricity Generating Authority of Thailand. The

¹Corresponding author: Ariyaprat_b@kkumail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

field-testing results of the Submerged Jet Test are analyzed to predict the critical shear stress and the erodibility coefficient in each soil layers. The three differential methods for predicting the parameters are Blaisdell solution, Scour Depth solution and Iterative solution. Finally, the erosion distances are compared to the changed cross section of slope in 192 days. The erosion distance after surveying the new cross section is 3.73 m. The erosion distances of Blaisdell solution are 58.99 m. and 219.78 m., it's an overprediction. The erosion distances of Scour Depth solution and Iterative solution are 0.00 m., it's an underprediction. The probable factor that affected to this study is the variable density in each level of the soil layers. The test at the riverside and increasing the quantity may affect to predict the erosion distances more precisely.

คำสำคัญ: การกัดเซาะตลิ่ง พารามิเตอร์การกัดเซาะ ลำน้ำพอง

Keywords: River bank erosion, Submerged jet test, Phong river bank

บทนำ

การกัดเซาะตลิ่งเนื่องจากการไหลของน้ำ เป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญที่ทำให้เสถียรภาพของตลิ่งลดลง เนื่องจากเม็ดดินในตลิ่งถูกกระแสน้ำพัดพา ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปตัดของตลิ่ง [1] เมื่อรูปตัดของตลิ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยของตลิ่ง (FS) นั้น มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ถ้าค่าตัวประกอบความปลอดภัยของตลิ่งมีค่าน้อยกว่า 1.3 จะถือว่า โครงสร้างของตลิ่งนั้นไม่มีความเสถียรภาพ ทั้งนี้กระบวนการกัดเซาะตลิ่งจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical Shear Stress, τ_c) ของดินชนิดนั้น มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำที่ขอบตลิ่ง (Boundary Shear Stress, τ_o) เมื่อโครงสร้างของตลิ่งเกิดการพิบัติจะก่อให้เกิดผลกระทบหลายอย่างตามมา เช่น โครงสร้างบนตลิ่ง (อาคาร ที่พักอาศัย ฯลฯ) เกิดความเสียหาย ผู้พักอาศัยในบริเวณนั้นอยู่ในพื้นที่เสี่ยงอันตราย และความสวยงามด้านภูมิทัศน์ถูกทำลาย เป็นต้น

รูปตัดใหม่จากการถูกกัดเซาะสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการคำนวณอัตราการกัดเซาะ (Erosion Rate, E) ที่มาจากผลต่างของหน่วยแรงเฉือนจากการไหลของน้ำกับหน่วยแรงเฉือนวิกฤต ซึ่งจำเป็นต้องได้ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะในการคำนวณ วิธี Submerged Jet Test เป็นหนึ่งในวิธีที่ถูกบรรจุในมาตรฐาน ASTM D5852 [2] นักวิจัยหลายท่านได้ทำการทดสอบและแนะนำสมการเชิงประจักษ์มากมายเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ [1, 3-4] ตลิ่งลำน้ำพอง ณ บ้านหนองหิน หมู่ที่ 8 ตำบลศิลา อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น ได้ถูกเลือกเป็นสถานที่การศึกษา ทั้งนี้เพื่อการศึกษาลักษณะตลิ่ง ไม่ว่าจะเป็นชั้นดิน และการกัดเซาะที่เกิดขึ้น เป็นประโยชน์ต่อผู้อยู่อาศัย และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในอนาคต

ในการศึกษาการกัดเซาะของตลิ่งลำน้ำพองนี้จะได้ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะจากการทดสอบในสนามด้วยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D5852 สำนวจสภาพภูมิประเทศ เจาะสำรวจลักษณะของชั้นดิน วัดความเร็วการไหลของน้ำ ผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ระยะการกัดเซาะเนื่องจากเวลา และเปรียบเทียบระยะการกัดเซาะที่ได้จากผลการวิเคราะห์กับการเปลี่ยนแปลงของรูปตัดตลิ่งที่เกิดขึ้นจริงและสมการเชิงประจักษ์

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการกัดเซาะของตลิ่งลำน้ำพอง ณ บ้านหนองหิน หมู่ที่ 8 ตำบลศิลา อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น โดยทดสอบการกัดเซาะด้วยวิธี Submerged Jet Test (ASTM D5852) และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระยะ

การกัดเซาะตลิ่งจากการสำรวจจริง กับการทำนายโดยใช้ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของการทดสอบในสนามด้วยวิธี Submerged Jet Test และจากค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของสมการเชิงประสพการณ์

วิธีการวิจัย

การสำรวจรูปตัดและเจาะสำรวจลักษณะชั้นดินของตลิ่ง

1) สำรวจลักษณะรูปตัดของตลิ่ง ด้วยกล้อง Total Station พร้อมบันทึกค่าที่สำรวจได้ เช่น ระยะราบ ค่าอ่านจาน องศาราบ และค่าอ่านจานองศาตั้ง เป็นต้น เพื่อคำนวณหาค่าพิกัดทางราบและค่าระดับของแต่ละจุด โดยสมมติให้จุดตั้งกล้องเริ่มต้นมีค่าพิกัดทางราบและค่าระดับ เป็น 1,000.000 เมตร และ 100.000 เมตร ตามลำดับ และวาดรูปตัดของตลิ่งจากค่าพิกัดทางราบและค่าระดับที่คำนวณได้

2) เจาะสำรวจและจำแนกประเภทของชั้นดินด้วยวิธีการตอกทดลองมาตรฐาน (SPT) และเก็บตัวอย่างดินแบบถูกรบกวน โดยใช้สว่านมือในช่วง 0.00 – 3.00 m. แรก หลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างดินจากกระบอกผ่าซีกจากการทดสอบทุกๆ 1.50 m. และนำไปจำแนกประเภทของตัวอย่างดิน พร้อมทั้งหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของดินในห้องปฏิบัติการ

การสำรวจความเร็วการไหลของน้ำ

ข้อมูลความเร็วการไหลของกระแสน้ำได้จากการสำรวจด้วยเครื่องมือ River Surveyor M9 (ภาพที่ 1) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้สำรวจความเร็วของน้ำ อัตราการไหล ความลึกและหน้าตัดของตลิ่ง ด้วยความถี่ของคลื่นเสียง (ADP) ทั้งนี้การดำเนินงานสำรวจ เครื่องมือ และผลการสำรวจได้รับความอนุเคราะห์จาก “สำนักงานชลประทานที่ 6 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาหนองหอย” และเพื่อความแม่นยำในการทำนายระยะกัดเซาะจึงได้รวบรวมความเร็วการไหลของน้ำจากระบบโทรมาตรเขื่อนจุฬาภรณ์และเขื่อนอุบลรัตน์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (สถานี TD02 ลำน้ำพอง โรงเขื่อนลำน้ำพอง) ด้วยเช่นกัน

การทดสอบการกัดเซาะของดินในสนาม

ดำเนินการทดสอบในสนามด้วยวิธี Submerged Jet Test ตามมาตรฐาน ASTM D5852 [2] ซึ่งเครื่องมือและวิธีการดำเนินการทดสอบถูกพัฒนาขึ้นโดย Hanson and Cook (2004) [5] เพื่อความความสะดวกมากขึ้นในการปฏิบัติงาน (ภาพที่ 2)

- 1) ปรับผิวดินสำหรับวางถัง Submergence (อัตราส่วนความชันแนวราบต่อแนวตั้งไม่เกิน 2:1 หรือ 26°)
- 2) ตอกถัง Submergence ลงในดินให้แผ่น Steel Ring Plate อยู่ในระนาบกับผิวดิน
- 3) ติดตั้ง Jet Tube, Point Gauge ให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของถัง Submergence
- 4) กำหนดความสูงของ Jet Nozzle ประมาณ 40 – 220 mm. (ความสูงนี้คือ J_i)
- 5) ติดตั้ง Adjustable Head Tank และเสาเหล็กกล่องสูง 2.00 m. เข้ากับชุด Frame
- 6) วางปั๊มสุบน้ำบนตำแหน่งที่สามารถลำเลียงในระบบตลอดระยะเวลาการทดสอบได้
- 7) ต่อท่อส่งน้ำเข้าระบบทุกจุด
- 8) บันทึกค่า J_i ด้วย Point Gauge (กำหนดให้เป็นระยะการกัดเซาะเริ่มต้น)
- 9) ปิด Jet Nozzle ด้วย Deflector Plate และปล่อย point gauge ให้ชนกับ Deflector Plate เพื่อป้องกันการไหลออกของน้ำจากระบบ
- 10) เปิด Control Valve ปล่อยน้ำเข้าสู่ระบบจนเต็ม และเปิดวาล์ว Air-Relief เพื่อขับไล่ฟองอากาศในน้ำออก
- 11) ยก Point Gauge ขึ้นออกจาก Deflector Plate โดยให้ปลาย Point Gauge สูงจาก Deflector Plate ประมาณ 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของ Nozzle (64 mm.) และรอจนน้ำเต็มถึง Submergence
- 12) บันทึกค่า Head โดยเป็นผลต่างระหว่างระดับน้ำบนสุดใน Adjustable Head tank กับระดับ Jet Nozzle

13) เริ่มต้นการทดสอบการกัดเซาะโดยเปิด Deflector Plate

14) บันทึกค่าอ่านที่ปลายของ Point Gauge ถึงผิวหน้าดินที่ถูกกัดเซาะ ทุกๆ 5 – 10 นาที จำนวน 10 – 12 ครั้ง

การวิเคราะห์ผลการทดสอบการกัดเซาะ

ค่าที่ถูกบันทึกมาใช้ในการสร้างสมการในรูปแบบไฮเพอร์โบลาท่านายระยะกัดเซาะสูงสุด (Equilibrium Depth, J_e) เพื่อนำไปคำนวณกำลังต้านทานการกัดเซาะของดินหรือหน่วยแรงเฉือนวิกฤต และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ โดยวิธีในการวิเคราะห์หาทั้งหมด 3 วิธี คือ Blaisdell Solution , Scour Depth Solution และ Iterative Solution โดยโปรแกรม Excel Spreadsheet “JET-Spreadsheet-Tool ver2.1.1” ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Garey A. Fox (ภาพที่ 3)

การหาระยะการกัดเซาะสมมูลจากการทดสอบในสนาม ใช้ระยะเวลาในการทดสอบมากพอสมควร ดังนั้นต้องใช้ Spreadsheet ในการประมาณค่าระยะการกัดเซาะสมมูล โดยให้ค่าเริ่มต้นของ A และ f_o เท่ากับ 1 ค่าวนซ้ำจนสามารถลดค่าผลรวมเบี่ยงเบนของค่า x ที่ได้จากการทดสอบในสนามกับค่า x ที่วิเคราะห์ได้จากสมการฟังก์ชันของไฮเพอร์โบล่าเป็นกราฟระหว่างระยะการกัดเซาะกับเวลาพัฒนาขึ้นโดย Blaisdell et al. (1981) [13] ดังสมการที่ 1

$$x = \left[(f - f_o)^2 - A^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

เมื่อ

A = ค่าของความยาวแกน Semi-Transverse และ Semi-Conjugate ของกราฟไฮเพอร์โบล่า

$f = \log [J/d_o] - \log [(U_o t)/d_o]$

$f_o = \log (J_e/d_o)$

$x = \log [(U_o t)/d_o]$

d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางของ Orifice

ค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ หาได้จากสมการฟังก์ชันของเวลาในรูปแบบไร้หน่วย สร้างกราฟระหว่างระยะการกัดเซาะกับเวลา โดยมีการแทนค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตที่ได้จากสมการที่ 2

$$T^* = -J^* + 0.5 \ln \left(\frac{1 + J^*}{1 - J^*} \right) \Bigg|_{J_i}^{J_e} \quad (2)$$

เมื่อ

$T^* =$ เวลาในรูปแบบไร้หน่วย = t_m/T_r

$t_m =$ เวลาจากการบันทึกค่าในสนาม

$T_r =$ เวลาอ้างอิง = $J_e/(k_d T_c)$

$J^* = J/J_e$

$J_i^* = J_i/J_e$

J = ระยะความลึกของการกัดเซาะใดๆ ที่บันทึกค่าในสนาม

J_i = ระยะความลึกของการกัดเซาะเริ่มต้น

สามารถเขียนสมการในรูปแบบใหม่เพื่อใช้สำหรับ Spreadsheet ในการสร้างกราฟและลดค่าเบี่ยงเบนของ t_m จากการทดสอบในสนามกับค่า t_m ที่วิเคราะห์ได้ ดังสมการที่ 3

$$t_m = T_r \left[0.5 \ln \left(\frac{1 + J^*}{1 - J^*} \right) - J^* - 0.5 \ln \left(\frac{1 + J_i^*}{1 - J_i^*} \right) + J_i^* \right] \quad (3)$$

วิธีการวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธี มีความแตกต่างกันดังนี้ 1) วิธี Blaisdell Solution ; คือวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ ดังที่กล่าวไว้แล้วในข้างต้น โดย Excel Spreadsheet จะป้อนค่าเริ่มต้น (เช่น A , f_0 และ k_d) เพื่อลดค่าผลรวมเบี่ยงเบนของค่า x และ t_m ที่ได้จากการทดสอบในสนามกับค่าที่ได้จากการทำนายตามสมการที่ 1 และ 3 ตามลำดับ 2) วิธี Scour Depth Solution ; เริ่มต้นการวิเคราะห์โดยป้อนค่าเริ่มต้น คือหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ และใช้โปรแกรม Solver Routine ใน Microsoft Excel (Generalized Reduced Gradient Method) ในการปรับแก้ค่า τ_c และ k_d ให้ผลระยะการกัดเซาะจากการทำนายสมการ Excess Shear Stress Equation ดังสมการที่ 4 ใกล้เคียงกับผลระยะการกัดเซาะที่วัดได้จากสนามจริงมากที่สุด ซึ่งก็คือการลดความแปรปรวนระหว่างข้อมูลภายในกลุ่มเดียวกัน 3) วิธี Iterative Solution ; เริ่มต้นการวิเคราะห์โดยป้อนค่าเริ่มต้น คือ หน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ และใช้โปรแกรม Solver Routine เช่นเดียวกับวิธี Scour Depth Solution ในการปรับแก้ค่า τ_c และ k_d แต่สนใจในการลดค่า Root Mean Square Error ระหว่างเวลาสะสมแต่ละช่วงข้อมูลในการทดสอบจริงกับเวลาที่ได้จากการทำนายของสมการที่ 3

$$\text{Predicted Scour Depth} = \text{Sum Average } [(\tau_i - \tau_c) \times t] \times k_d \quad (4)$$

เมื่อ

τ_i = หน่วยแรงเฉือนที่ขอบเริ่มต้นของแต่ละชุดข้อมูลในเวลานั้นๆ (Pa.)

τ_c = หน่วยแรงเฉือนวิกฤตที่ได้จากโปรแกรม Solver Routine ใน Microsoft Excel (Pa.)

t = ระยะเวลาของการทดสอบในแต่ละชุดข้อมูลนั้นๆ (min)

k_d = สัมประสิทธิ์การกัดเซาะที่ได้จากโปรแกรม Solver Routine ใน Microsoft Excel ($\text{cm}^3/\text{N.s}$)

แรงที่กระทำเนื่องจากการไหลของน้ำต่อมวลดินก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (τ_o , Pa.) และการกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนที่ขอบมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน “หน่วยแรงเฉือนวิกฤต (τ_c , Pa.)” กระบวนการนี้ก่อให้เกิดเป็นอัตราการกัดเซาะ (ε , cm/s) ขึ้น โดยมีค่าคงที่คือสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (k_d , $\text{cm}^3/\text{N.s}$)

ดังสมการที่ 5

$$\varepsilon = k_d (\tau_o - \tau_c) \quad (5)$$

ทั้งนี้ตำแหน่งตลิ่งที่ได้สำรวจและใช้ในการวิเคราะห์เป็นช่วงโค้งงวนอกของลำน้ำ สมการที่ใช้ในการหาหน่วยแรงเฉือนที่ขอบคือสมการที่ 6 เสนอโดย Crosato (2007) ได้จากผลการจำลองหาหน่วยแรงเฉือนที่ขอบจากการไหลของน้ำเนื่องจากการยกตัวและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วการไหลน้ำ [1] โดยค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (n) ของลำน้ำธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.035 – 0.050 (สะอาด คดเคี้ยว มีวัชพืชและหิน) (Chow, 1959) [7] ซึ่งใช้ค่า 0.035 ในการวิเคราะห์

$$\tau_o = \frac{\gamma_w n^2 (u + U)^2}{R^{1/3}} \quad (6)$$

โดย γ_w คือหน่วยน้ำหนักของน้ำ (N/m^3), u คือความเร็วการไหลเฉลี่ยของน้ำ (m/s), U คือความเร็วการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการยกตัวในช่วงโค้งงวนอก (m/s), R คือรัศมีชลศาสตร์ (m) มีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดการไหล (m^2) หารด้วยเส้นขอบเปียก (m)

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะได้มีผู้วิจัยหลายท่านได้ทำการทดสอบและสร้างความสัมพันธ์จากสถิติเป็นสมการเชิงประสพการณ์ [1, 3-4] เพื่อสามารถหาหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินได้ด้วยการแทนค่าคุณสมบัติต่างๆ ของดินลงใน

สมการ ไม่ว่าจะเป็นขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D_{50}) ปริมาณดินเหนียว (P_c) ดัชนีพลาสติก (PI) และปริมาณดินตะกอน - ดินเหนียว (SC) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะก็สามารถคำนวณหาได้จากการแทนค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (ตารางที่ 1)

ผลการวิจัย

ลักษณะรูปตัดและประเภทของดินแต่ละชั้น

จากการเจาะสำรวจและทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ (ตารางที่ 2) พบว่าช่วงระดับผิวดิน (+100.00 m.) ถึงระดับ +97.00 m. เป็นชั้นดินเหนียวแข็งมาก จำแนกประเภทตามระบบ USCS ได้เป็น Lean Clay (CL) และจากระดับ +97.00 m. ถึงระดับ +88.00 m. เป็นชั้นดินทรายแน่นปานกลาง จำแนกประเภทตามระบบ USCS ได้เป็น Silty Sand (SM) และมีสภาพเป็น Non-Plastic

หน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ

จากการสำรวจความเร็วการไหลของกระแสน้ำในตลิ่งได้ด้วยเครื่องมือ River Surveyor M9 เมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2564 พบว่าความเร็วการไหลเฉลี่ยของน้ำ (u) มีค่าเท่ากับ 0.047 m/s. และที่ขอบช่วงโค้งงอนอกตลิ่งความเร็วการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น (U) เท่ากับ 0.103 m/s. และจากข้อมูลอัตราการไหลของน้ำ ของระบบโทรมาตรเขื่อนจุฬาภรณ์และเขื่อนอุบลรัตน์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สถานี TD02 ลำน้ำพอง โรงเรียนลำน้ำพอง ระยะเวลากำหนดให้อยู่ในช่วงของการสำรวจครั้งแรกเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ.2563 และการสำรวจครั้งที่สองเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ.2564 ความเร็วการไหลของน้ำมากที่สุด เท่ากับ 0.255 m/s. สามารถคำนวณหาหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ (τ_c) จากทั้ง 2 แหล่งข้อมูลได้เท่ากับ 0.196 Pa. และ 0.565 Pa. ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

หน่วยแรงเฉือนวิกฤต และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ

(ตารางที่ 4) จากการวิเคราะห์ชั้นดินเหนียวทั้งหมด 3 วิธี จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี Scour Depth Solution และวิธี Iterative Solution มีความใกล้เคียงกันในการทดสอบครั้งที่ 1, 2 และ 3 ส่วนครั้งที่ 4 และ 5 มีค่าที่ไม่ใกล้เคียงกันนัก โดยเฉพาะผลจากวิธี Blaisdell Solution ที่ได้ค่าแตกต่างจากทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมาข้างต้นอย่างมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (k_d) เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ระยะการกัดเซาะต่อไปโดยตัดค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดเพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล โดยค่าเฉลี่ยดังกล่าวของวิธี Blaisdell Solution เท่ากับ 0.32 Pa. และ 12.29 cm³/N.s, วิธี Scour Depth Solution เท่ากับ 1.43 Pa. และ 60.54 cm³/N.s และวิธี Iterative Solution เท่ากับ 1.46 Pa. และ 91.39 cm³/N.s

(ตารางที่ 5) จากการวิเคราะห์ชั้นดินทรายทั้งหมด 3 วิธี การทดสอบครั้งที่ 1 ไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะได้ เนื่องจากขณะที่ทำการทดสอบในช่วงท้ายของระยะเวลานั้น น้ำในถังเกิดการไหลออก และดินทรายบริเวณข้างเคียงเกิดการกัดเซาะถล่ม ในการทดสอบครั้งที่ 2, 3, 4 และ 5 จะเห็นได้ว่าค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตที่ได้จากวิธี Scour Depth Solution และวิธี Iterative Solution มีความใกล้เคียงกันในแต่ละครั้งการทดสอบ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ มีค่าที่ไม่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธี Blaisdell Solution แตกต่างจากทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมาข้างต้นอย่างมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (k_d) เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ระยะการกัดเซาะต่อไปโดยตัดค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดเพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล โดยค่าเฉลี่ยดังกล่าวของวิธี Blaisdell Solution เท่ากับ 0.06 Pa. และ 26.21 cm³/N.s, วิธี Scour Depth Solution เท่ากับ 0.73 Pa. และ 64.17 cm³/N.s และวิธี Iterative Solution เท่ากับ 0.72 Pa. และ 192.12 cm³/N.s

ทั้งนี้ด้วยความแตกต่างของทั้ง 3 วิธีคือ Blaisdell Solution ใช้การลดค่าผลรวมเบี่ยงเบนของผลการทำนายและผลจากการทดสอบจริงในสนาม, Scour Depth Solution มีการลดความแปรปรวนระหว่างข้อมูลภายในกลุ่มเดียวกันเฉพาะระยะ

การกัดเซาะในแต่ละช่วงข้อมูล และ Iterative Solution มีการลดค่า Root Mean Square Error เฉพาะระยะเวลาในแต่ละช่วง ข้อมูลจากการทำนายผลและระยะเวลาของการทดสอบจริง จึงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้ง 3 วิธีนั้นมีความแตกต่างกัน

(ตารางที่ 6) จากผลการเจาะสำรวจชั้นดินในสนามขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D_{50}) ปริมาณดินเหนียว (P_c) ดัชนีพลาสติก (PI) และปริมาณดินตะกอน - ดินเหนียว (SC) สามารถนำไปแทนค่าในสมการเชิงประสพการณ์เพื่อประมาณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (k_d) ได้

ระยะการกัดเซาะตลิ่งลำน้ำพอง บ้านหนองหิน ม.8 ต.ศิลา อ.เมือง จ.ขอนแก่น

ระยะการกัดเซาะหาได้จากค่าอัตราการกัดเซาะ (E) คูณด้วยระยะเวลาที่เกิดขึ้น โดยการกัดเซาะด้านข้างที่เกิดขึ้นกับ ตลิ่งอยู่ในแนวนอน ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 192 วัน ระยะการกัดเซาะที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 กรณี คือระยะการกัดเซาะที่เกิดจากหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำจากการสำรวจด้วยเครื่องมือ River Surveyor M9 และจากระบบ ไทโรมาตรเขื่อนจุฬาภรณ์และเขื่อนอุบลรัตน์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สถานี TD02 ลำน้ำพอง โรงเรียนลำน้ำพอง

จากการสำรวจจุดตลิ่งครั้งที่ 2 (ภาพที่ 4) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับระยะการกัดเซาะที่ได้จากการทำนาย พบว่าตลิ่งเกิดการกัดเซาะในชั้นดินทรายด้านล่าง (จุด A ถึง จุด A') มากที่สุดเท่ากับ 3.73 m. และด้านบน (จุด B ถึง จุด B') เท่ากับ 1.31 m.

จากการแทนค่าหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินทรายจากการทดสอบในสนาม ลงในสมการที่ 5 พบว่าระยะการกัดเซาะตลิ่งที่เกิดจากหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ เนื่องจากการไหลของน้ำ จากการสำรวจด้วยเครื่องมือ River Surveyor M9 และระบบไทโรมาตรฯ ได้ผลตรงกันคือ ระยะการกัดเซาะจากการคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของ Scour Depth Solution และ Iterative Solution มีค่าเท่ากับ 0.00 m. หรือไม่เกิดการกัดเซาะขึ้นเลย ให้ผลการทำนายที่ต่ำกว่าความเป็นจริง แต่ Blaisdell Solution ให้ผลระยะการกัดเซาะเท่ากับ 58.99 m. (ภาพที่ 6) และ 219.78 m. (ไม่สามารถแสดงผลได้เนื่องจากมาตราส่วนของ ขนาดระยะการกัดเซาะกับสัดส่วนของตลิ่งต่างกันเกินไป) ซึ่งให้ผลการทำนายที่มากกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำจากทั้ง 2 แหล่งข้อมูลมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของ Scour Depth Solution และ Iterative Solution แต่มีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของ Blaisdell Solution

เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและตรวจสอบความใกล้เคียงของสมการเชิงประสพการณ์ จึงใช้ค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะจากสมการเชิงประสพการณ์ พบว่าระยะการกัดเซาะจากค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ ที่คำนวณโดยขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D_{50}) ของ Smerdon and Beasley (1961) [10] และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนวิกฤตกับค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของ Hanson and Simon (2001) [4] มีค่าเท่ากับ 6.01 m. และ 17.97 m. มีค่าใกล้เคียงกับระยะการกัดเซาะจากการสำรวจมากที่สุดคือ 3.73 m. แต่ผลการทำนายยังคงมีค่ามากกว่าความเป็นจริง อยู่ (ภาพที่ 6 และภาพที่ 7)

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ลักษณะของตลิ่งลำน้ำพอง ณ บ้านหนองหิน ม.8 ต.ศิลา อ.เมือง จ.ขอนแก่น มีลักษณะที่มีความเสี่ยงต่อการถูกกัดเซาะสูง เนื่องจากชั้นดินส่วนบนของตลิ่งเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Very Stiff Clay, CL) ซึ่งมีความหนาประมาณ 3.00 m. แต่ชั้นดินส่วนล่างของตลิ่งลงไปจนถึงท้องคลองที่มีความลึก 13.00 m. เป็นดินทรายแน่นปานกลาง (Medium Dense Sand, SM) ชั้นดินส่วนล่างมีโอกาสถูกน้ำกัดเซาะ และชั้นดินส่วนบนเกิดการบีบอัดในลักษณะไหลทะลักลงได้

ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วยวิธี Submerged Jet Test ตามมาตรฐาน ASTM D5852 ของชั้นดินเหนียวและชั้นดินทรายมีความแตกต่างกัน โดยหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของชั้นดินเหนียวจะมีค่า

มากกว่าชั้นดินทราย และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของชั้นดินทรายจะมีค่ามากกว่าชั้นดินเหนียว ซึ่งบ่งบอกว่าความต้านทานการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำในตลิ่งได้ว่าชั้นดินเหนียวสามารถต้านทานได้มากกว่าชั้นดินทราย

ผลการวิเคราะห์ระยะการกัดเซาะตลิ่งจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ของการทดสอบในสนามจริงยังไม่สามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับระยะการกัดเซาะจากการสำรวจการเปลี่ยนแปลงของรูปตัดจริงได้ โดยผลการวิเคราะห์จาก Blaisdell Solution ให้ค่าการทำนายที่สูงเกินไป แต่ Scour Depth Solution และ Iterative Solution ให้ค่าการทำนายที่ต่ำเกินไป ตัวแปรที่สำคัญคือการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากทั้ง 3 วิธี เนื่องจากมีค่าต่างกันและให้ความสนใจลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลต่างกัน การนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้ได้จึงจำเป็นต้องมีตัวแปรควบคุมเพื่อตรวจสอบความแม่นยำคือผลการสำรวจการเปลี่ยนแปลงของรูปตัดตลิ่งจริง โดยต้องเพิ่มจำนวนและความถี่ของการสำรวจรูปตัดตลิ่งอยู่เสมอ และเนื่องจากความแน่นของชั้นดินทรายในระดับที่ต่างกัน ตำแหน่งการทดสอบการกัดเซาะในสนามของชั้นดินทรายนั่นอยู่ที่เฉพาะระดับผิวของชั้นดินทรายคือต่ำกว่าชั้นผิวดิน 3.00 m. ไม่สามารถทดสอบ ณ ขอบตลิ่งได้โดยตรงซึ่งมีความชันมาก ดังนั้นหากสามารถทำการทดสอบ Submerged Jet Test ในพื้นที่ที่น้ำสามารถกัดเซาะได้ (เช่น ริมตลิ่ง) เพิ่มชุดจำนวนการทดสอบในสนาม และเพิ่มจำนวนการสำรวจความเร็วของน้ำ จะสามารถทำนายระยะการกัดเซาะได้แม่นยำมากขึ้นและตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลได้ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ดังกล่าวนี้จะสามารถนำมาประมาณระยะการกัดเซาะที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคต และสืบค้นวิธีป้องกันการสูญเสียเสถียรภาพของตลิ่งที่จะเกิดขึ้นได้ทันทั่วถึง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.รัตมณี นันทสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางการศึกษา ทั้งทางด้านการหาข้อมูล การเก็บข้อมูล การทดสอบ การวิเคราะห์ ตลอดจนคำชี้แนะในการเขียน การจัดทำ การตรวจสอบในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งนำความรู้และแนวทางในการศึกษา ตลอดจนการสนับสนุนในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จไปด้วยดี ซึ่งผู้เขียนมีความซาบซึ้งใจเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ผู้เขียนยังขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ ประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดลฤดี หอมดี กรรมการสอบ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าในการร่วมให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่านรองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ ที่ได้มอบทุนสนับสนุนทั้งหมดในการประดิษฐ์เครื่องมือสำหรับการทดสอบการกัดเซาะของดิน ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชัย พาวพัฒนา ที่ได้ให้คำปรึกษาเรื่องการวิเคราะห์ระบบความดันของน้ำในเครื่องมือ และความรู้ด้านวิศวกรรมชลศาสตร์ และสุดท้าย ท่านอาจารย์สุรัตน์ ประมวลศักดิ์กุล ที่ได้ให้คำปรึกษาเรื่องหลักการการสำรวจรังวัด และแสดงผลการสำรวจ

เอกสารอ้างอิง

1. Tanit C, Tanan C. Riverbank retreat and erosion protection of the U-Tapao river in Songkhla province [Thesis]. Songkhla: Prince of Songkla University; 2016. Thai.
2. Standard test method for erodibility determination of soil in the field or in the laboratory by the jet index method (ASTM D5852). West Conshohocken (PA): ASTM – American Society for Testing Material (US); 2000 Feb.
3. Daly ER, Fox GA, Al-Madhhachi AT, Miller RB. A scour depth approach for deriving erodibility parameters from Jet erosion tests. ASABE. 2013; 56(6): 1343–1351.

4. Hanson GJ, Simon A. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA. *Hydrol Process.* 2001; 15(1): 23–38.
5. Hanson GJ, Cook KR. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Appl Eng Agric.* 2004; 20(4): 455–462.
6. Crosato A. Effects of smoothing and regriding in numerical meander migration models. *Water Resour.* 2007; 43.
7. Chow. *Open channel hydraulics.* Davis EH, editor. McGraw-Hill; 1959.
8. Julian JP, Torres R. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology.* 2006; 76(1-2): 193-206.
9. Karmaker T, Dutta S. Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India. *Hydrol Process.* 2011; 25: 104-111.
10. Smerdon ET, Beasley RT. Critical tractive forces in cohesive soils. *Agr Eng.* 1961; 42(1): 26-29.
11. Simon A, Thomas RE, Klimetz L, editors. Comparison and experiences with field techniques to measure critical shear stress and erodibility of cohesive deposits. *Proceeding of the 2nd Joint Federal Interagency Conference*; 2010 June 27 – July 1; Las Vegas, US.
12. Wynn TM. The effects of vegetation on streambank erosion [PhD dissertation]. Blacksburg, Va: Virginia Tech, Department of Biological Systems Engineering; 2004.
13. Blaisdell FW, Anderson CL, Hebaus GG. Ultimate dimensions of local scour. *J Hydraul Eng Div.* 1981; 107(HY3): 327-337.

ตารางที่ 1 สมการเชิงประสพการณ์ (Empirical Equation) สำหรับหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ

หน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical Shear Stress, τ_c)		
Smerdon and Beasley (1961)	$\tau_c = 3.54 \times 10^{-28.1D50}$	(7)
	$\tau_c = 0.493 \times 10^{0.0182Pc}$	(8)
	$\tau_c = 0.16 (PI)^{0.84}$	(9)
Julian and Torres (2006)	$\tau_c = 0.1 + 0.1779(SC) + 0.0028(SC)^2 - 2.34 \times 10^{-5} \times (SC)^3$	(10)
สัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (Erodibility Coefficient, k_d)		
Hanson and Simon (2001)	$k_d = 0.2\tau_c^{-0.5}$	(11)
Wynn (2004)	$k_d = 3.1\tau_c^{-0.37}$	(12)
Karmaker and Dutta (2011)	$k_d = 3.16\tau_c^{-0.185}$	(13)
Simon (2010)	$k_d = 1.62\tau_c^{-0.838}$	(14)
Daly (2013)	$k_d = 157\tau_c^{-1.620}$	(15)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

คุณสมบัติของดินชั้นบน (1 st Layer)		คุณสมบัติของดินชั้นล่าง (2 nd Layer)	
Liquid Limit (LL), %	36.5	Liquid Limit (LL), %	N/A
Plastic Limit (PL), %	21.5	Plastic Limit (PL), %	N/A
Plasticity Index (PI), %	14.9	Plasticity Index (PI), %	Non-Plastic
Specific Gravity	2.64	Specific Gravity	2.70
Total Density, T/m ³	1.83	Total Density, T/m ³	1.64
% Passing Sieve#4, %	100.0	% Passing Sieve#4, %	100.0
% Passing Sieve#200, %	92.7	% Passing Sieve#200, %	44.6
ขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D ₅₀), mm.	0.02	ขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D ₅₀), mm.	0.09
Hydrometer Silt (%)	89.7	Hydrometer Silt (%)	37.6
Analysis Clay (%)	3.0	Analysis Clay (%)	7.0
N _{avg} , blow/ft.	35	N _{avg} , blow/ft.	21
ประเภทของดิน	Lean Clay (CL), Very Stiff	ประเภทของดิน	Silty Sand (SM), Medium Dense

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์และผลการคำนวณหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ

รายการ	River Surveyor M9	ระบบโทรมาตรเขื่อนจุฬาภรณ์และเขื่อนอุบลรัตน์
หน่วยน้ำหนักของน้ำ (γ_w), N/m ² .	9807	9807
สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (n)	0.035	0.035
พื้นที่หน้าตัดการไหล (Flow Segment), m ² .	62.652	62.652
เส้นขอบเปียก (Wetted Perimeter), m.	23.767	23.767
รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic Radius, R), m.	2.636	2.636
ความเร็วการไหลเฉลี่ย (Average Water Velocity, u), m/s.	0.047	0.255
ความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้น (Increasing Water Velocity by Superelevation, U), m/s.	0.103	-
หน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ (Boundary Shear Stress, τ_o), Pa.	0.196	0.565

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์การกัดเซาะของชั้นดินเหนียว

พารามิเตอร์การกัดเซาะ	CL#01	CL#02	CL#03	CL#04	CL#05	Avg.
วิธี Blaisdell Solution						
τ_c (Pa)	0.34	0.99	0.15	0.47	0.02	0.32
k_d (cm ³ /N.s)	9.22	7.51	20.13	6.76	28.62	12.29
วิธี Scour Depth Solution						
τ_c (Pa)	1.50	2.00	1.35	1.44	0.95	1.43
k_d (cm ³ /N.s)	41.76	62.40	110.74	16.73	77.45	60.54
วิธี Iterative Solution						
τ_c (Pa)	1.50	1.68	1.20	1.81	0.90	1.46
k_d (cm ³ /N.s)	68.58	56.53	149.06	55.79	211.81	91.39

หมายเหตุ : เฉลี่ยค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยตัดค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์การกัดเซาะของชั้นดินทราย

พารามิเตอร์การกัดเซาะ	SM#01	SM#02	SM#03	SM#04	SM#05	Avg.
วิธี Blaisdell Solution						
τ_c (Pa)	N/A	0.06	0.02	0.11	0.06	0.06
k_d (cm ³ /N.s)	N/A	20.51	33.01	20.52	31.9	26.21
วิธี Scour Depth Solution						
τ_c (Pa)	N/A	0.73	0.71	0.72	0.74	0.73
k_d (cm ³ /N.s)	N/A	44.67	81.58	46.76	113.42	64.17
วิธี Iterative Solution						
τ_c (Pa)	N/A	0.76	0.69	0.74	0.61	0.72
k_d (cm ³ /N.s)	N/A	151.75	232.34	151.89	236.04	192.12

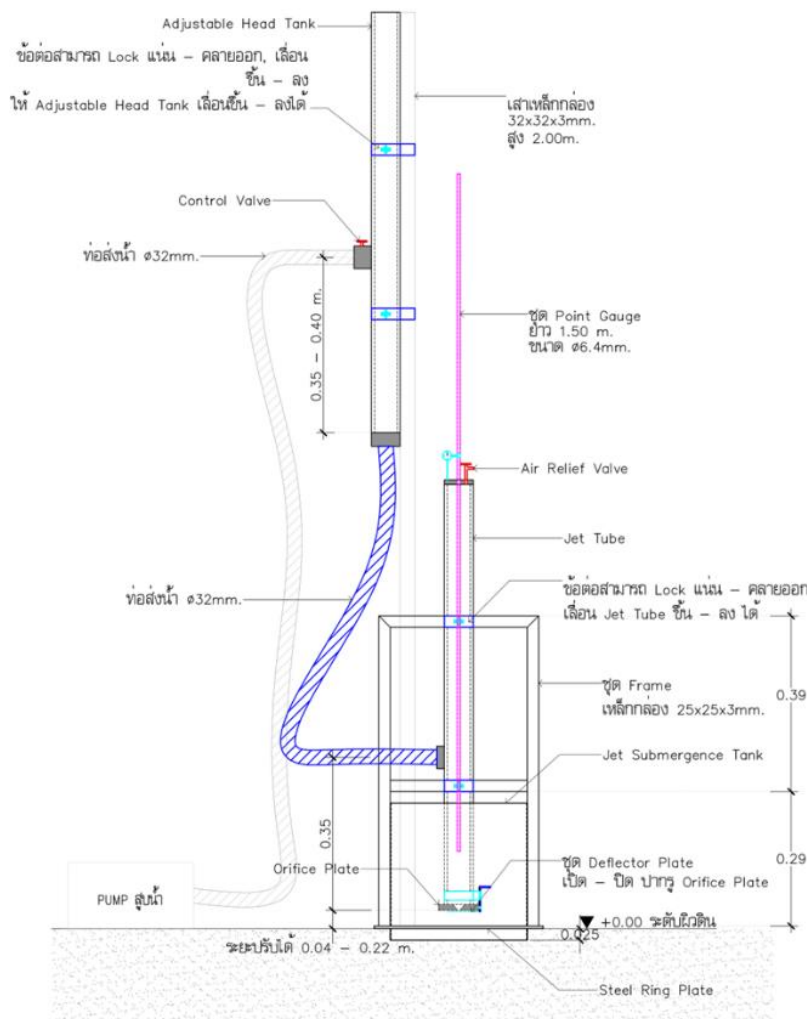
หมายเหตุ : เฉลี่ยค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยตัดค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะจากสมการเชิงประสกรณ์

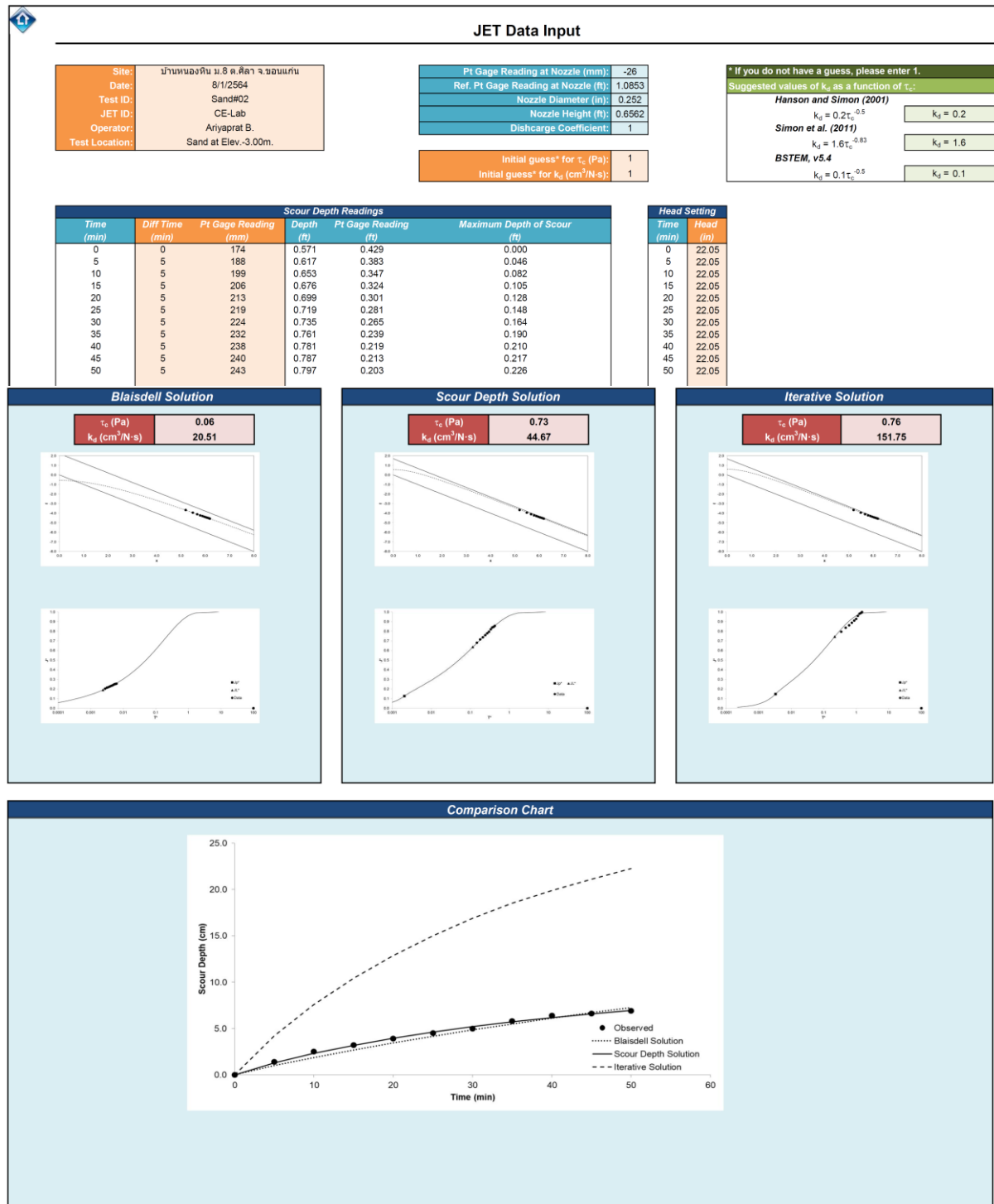
ชั้นดิน	τ_c , Pa.		k_d , $\text{cm}^3/\text{N.s}$				
	Type	τ_c	k_d , (Eq. 11)	k_d , (Eq. 12)	k_d , (Eq. 13)	k_d , (Eq. 14)	k_d , (Eq. 15)
ดินเหนียว (CL)	D ₅₀	0.97	0.20	16.75	3.18	1.66	164.80
	P _c	0.56	0.27	3.84	3.52	2.64	402.75
	PI	1.55	0.16	2.64	2.91	1.12	77.40
	SC	22.01	0.04	0.99	1.78	0.12	1.05
ดินทราย (SM)	D ₅₀	0.01	1.95	16.75	7.34	73.92	253,217.88
	P _c	0.66	0.25	3.61	3.41	2.29	306.97
	SC	11.53	0.06	1.25	2.01	0.21	2.99



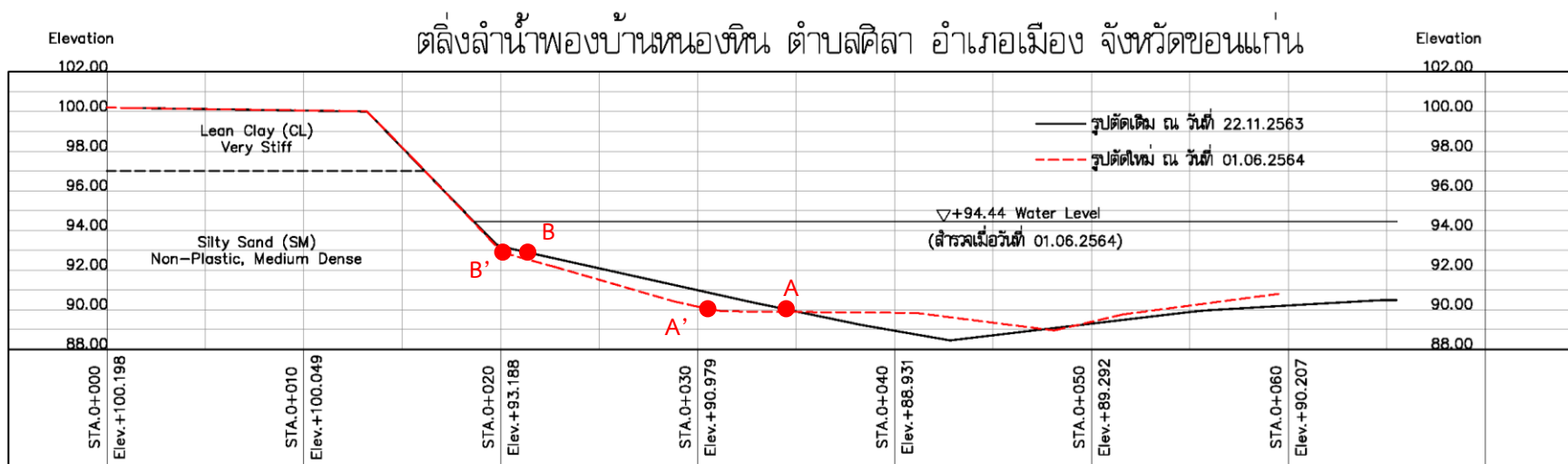
ภาพที่ 1 เครื่องมือ River Surveyor M9



ภาพที่ 2 แบบแสดงรายละเอียดและภาพเครื่องมือ Submerged Jet



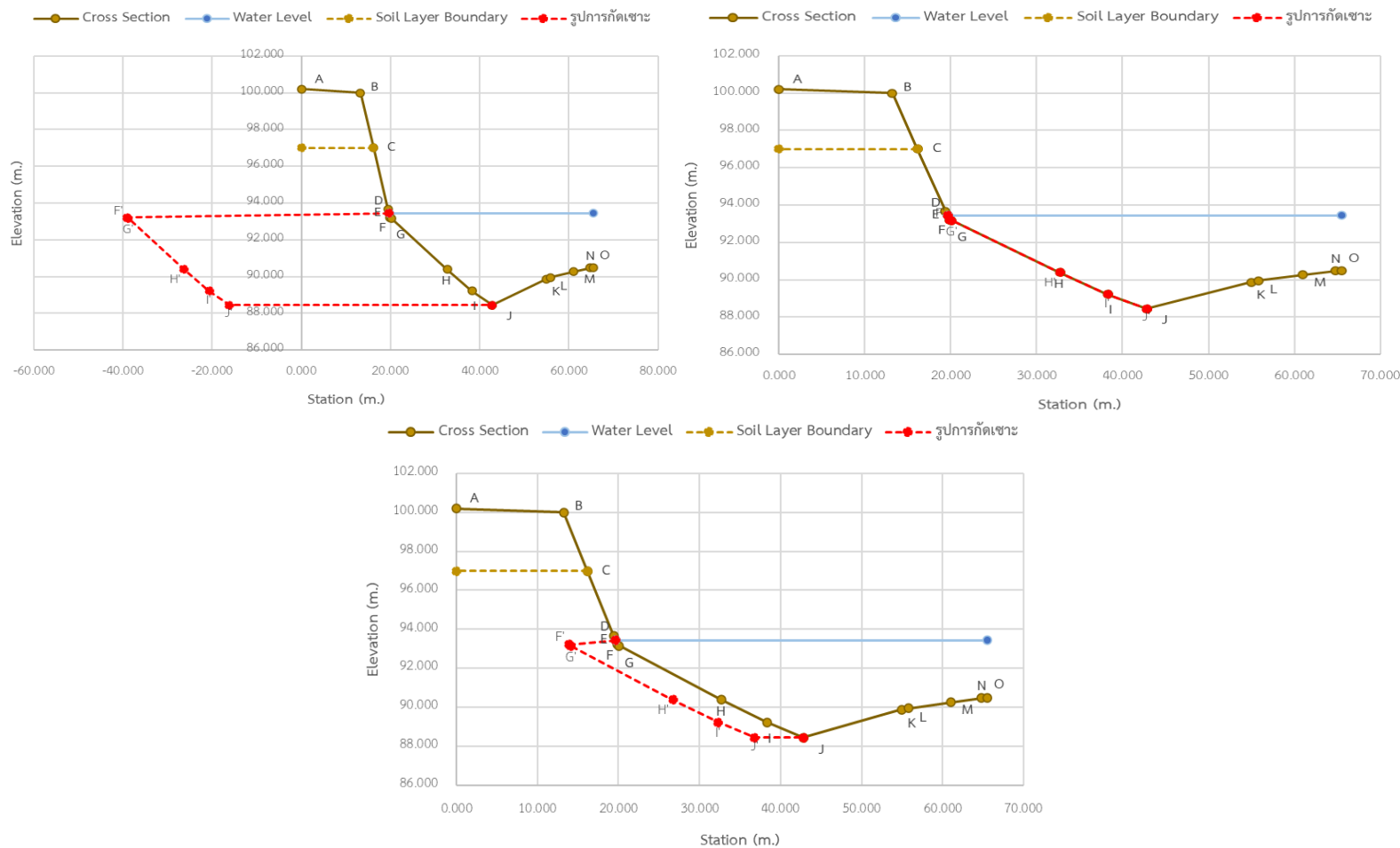
ภาพที่ 3 โปรแกรม JET-Spreadsheet-Tool ver2.1.1



ภาพที่ 4 รูปตัดตลิ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์

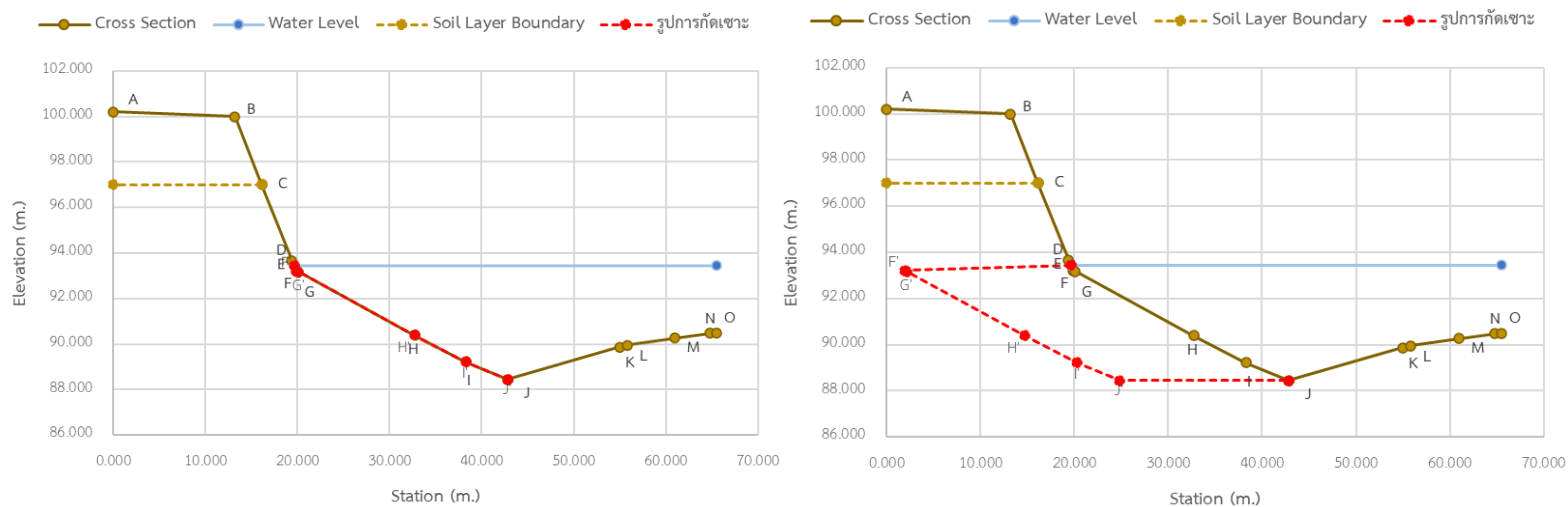


ภาพที่ 5 ภาพแสดงตำแหน่งทั้งหมดของการทดสอบการกัดเซาะชั้นดินเหนียวและดินทราย



ภาพที่ 6 ผลวิเคราะห์การกัดเซาะตลิ่งจากหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ (Boundary Shear Stress, τ_o) จากการสำรวจด้วยเครื่องมือ River Surveyor M9 :

วิธี Blaisdell Solution (ซ้ายบน), วิธี Scour Depth Solution และวิธี Iterative Solution (ขวาบน) และสมการเชิงประจักษ์จากขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D_{50}) ของ Smerdon and Beasley (1961) และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนวิกฤตกับค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของ Wynn (2007) (ด้านล่าง)



ภาพที่ 7 ผลวิเคราะห์การกัดเซาะตลิ่งจากหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ (Boundary Shear Stress, T_o) จากระบบโทรมาตรเขื่อนจุฬาภรณ์และเขื่อนอุบลรัตน์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย : วิธี Scour Depth Solution และวิธี Iterative Solution (ซ้าย) และสมการเชิงประสพการณ์จากขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D_{50}) ของ Smerdon and Beasley (1961) และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนวิกฤตกับค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของ Wynn (2007) (ขวา)