

การวิเคราะห์ลาดชันดินริมตลิ่ง กรณีศึกษาการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ณ บ้านท่าแก อ.เมือง จ.ขอนแก่น

Case Study of The Slope Stability Under Rapid Drawdown of Nam-Pong bank at BaanTahGae, Mueng District, Khon Kaen Province

สรวิชัย ทอนศรี (Sorawich Thonsri)^{1*} ดร.รัตมณี นันทสาร (Dr.Ratamane Nuntasarn)**

(Received: October 29, 2021; Revised: February 14, 2022; Accepted: February 15, 2022)

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา เสถียรภาพลาดชันริมตลิ่งลำน้ำพอง ณ บ้านท่าแก อ.เมือง จ.ขอนแก่น เนื่องจากการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ได้ทำการสำรวจหาลักษณะชั้นดินโดยการเจาะสำรวจจากระดับผิวดินจนถึงที่ความลึก 15 เมตร พบว่าดินริมตลิ่งลำน้ำพองแบ่งดินออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ Lean Clay (CL), Clayey Sand (SC) และ Silty Sand (SM) โดยนําดินเหนียวที่เก็บโดยวิธีไม่ถูกรบกวนมาทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำไม่ระบายน้ำเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ได้แก่ มุมเสียดทานของดิน แรงยึดเหนี่ยวของดิน สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในดิน อัตราส่วนปัวร์ของ โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินคงที่และทำการลดระดับน้ำในลำน้ำลงครั้งละ 25% จากระดับน้ำใต้ดินจนกระทั่งถึงที่ระดับน้ำลด 75% ของระดับน้ำใต้ดิน ชั้นดินเหนียวที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินอยู่ในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะทำการวิเคราะห์ที่สภาพ Transition (ค่าดึงดูดเมทริกเท่ากับ 200 kPa) และที่สภาพ Residual (ค่าดึงดูดเมทริกเท่ากับ 300 kPa) โดยความคุมจำนวนวันไว้ที่ 60 วัน จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วที่ระดับน้ำลด 75% อัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าน้อยที่สุด การเคลื่อนตัวของดินจะเพิ่มขึ้น

ABSTRACT

This research studied the slope stability of the Nam-pong riverbank at Ban Tha Kae, Muang District, Khon Kaen Province, due to the rapid drawdown. The subsurface exploration was bored from the soil surface until a depth of 15 meters. The soil profile was divided into three layers; Lean Clay (CL), Clayey Sand (SC), and Silty Sand (SM). The consolidated undrained method determined an undisturbed clay sample's friction angle, cohesion, permeability coefficient, elastic modulus, and poison ratio from the triaxial test. The values obtained from the test were analyzed by finite element method using Plaxis 2D program. In the analysis, the groundwater level was fixed, and the water level in the river was reduced by 25% from the groundwater level water level reach 75% of the groundwater level. The clay layer above groundwater was in an unsaturated condition. An unsaturated clay was analyzed as transition regime (the matric suction equal to 200 kPa) and residual regime (the matric suction equal to 300 kPa). Moreover, the specific date of reduction water level in the river was 60 days. Analysis shows that when water levels drop sharply at 75%, the safety ratio is the lowest. Soil movement was increase.

คำสำคัญ: เสถียรภาพลาดชัน ระดับน้ำลดอย่างรวดเร็ว ไฟไนต์เอลิเมนต์

Keywords: Slope stability, Rapid drawdown, Finite element

¹Corresponding author: Sorawich.t@kkumail.com

*นักศึกษ าลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ รัตมณี นันทสาร สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

บริเวณตลิ่งริมน้ำพอง ณ หมู่บ้านทางแก อำเภอมือจี้ จังหวัดขอนแก่น เกิดการพังทลายอันเนื่องมาจากการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ณ ช่วงฤดูแล้ง ส่งผลให้โครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียงนั้นเกิดความเสียหาย ทำให้ผู้อยู่อาศัยนั้นได้รับความเดือดร้อน

ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดชันโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method) เพื่อทำการหา ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) การเสถียรภาพทั้งหมด การเสถียรภาพในแนวนอน การเสถียรภาพในแนวตั้ง แรงกระทำที่เกิดขึ้นในดิน ตำแหน่งการเสถียรภาพ ซึ่งโดยวิธีสมมูลจำกัดนั้นสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยได้เพียงอย่างเดียว ในส่วนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถคำนวณหาค่าความปลอดภัย การเสถียรภาพทั้งหมด หน่วยแรงที่กระทำในดิน การทรุดตัวของดิน ตำแหน่งที่ดินเกิดการวิบัติ ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้นำโมดูลัสของดิน อัตราการไหลของน้ำ อัตราส่วนช่องว่างของดิน มาทำการวิเคราะห์ และค่าที่ได้มีความใกล้เคียงธรรมชาติมากกว่าวิธีสมมูลจำกัด [1-7] ใน การศึกษานี้จะได้นำดินมาทำการหาคุณสมบัติต่างๆเพื่อที่จะนำไปทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรมต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาเสถียรภาพลาดชันดิน ณ ตลิ่งริมแม่น้ำพอง หมู่บ้านท่าแก อำเภอมือจี้ จังหวัดขอนแก่น

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Tests)

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน [4,8]

- 1) การทดสอบการกระจายของเม็ดดิน (Sieve Analysis) มาตรฐาน ASTM C136
- 2) การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis Test) มาตรฐาน ASTM D422
- 3) การหาค่าพิกัดความชื้นเหลวของดินหรือพิกัดอัตราเทอร์เบิร์ก (Atterberg Limits) มาตรฐาน ASTM D4318
- 4) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity) มาตรฐาน ASTM D854
- 5) การทดสอบอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำไม่ระบายน้ำ (Consolidate Undrained Triaxial Test) มาตรฐาน ASTM D4767
- 6) การทดสอบหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Test) มาตรฐาน ASTM D2434

การเจาะสำรวจ

การสำรวจชั้นดินและความชันของตลิ่ง [7]

- 1) ทำการรังวัดการลาดชันของตลิ่งลำน้ำพอง
- 2) วัดความลึกของระดับน้ำในลำน้ำ
- 3) วัดระดับน้ำใต้ดิน
- 4) การทดสอบเจาะสำรวจ (Standard Penetration test)

การวิเคราะห์ผล

นำผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบต่างๆมาทำการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม Plaxis 2D

ผลการวิจัย

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ทำเจาะสำรวจที่ความลึก 15 เมตร ดังภาพที่ 1 จำแนกออกได้ดังนี้ ที่ความลึก 1-8 เมตร เป็นดินชนิด Lean Clay (CL) ที่ความลึก 9-13 เมตร เป็นดินชนิด Clayey Sand (SC) และที่ความลึก 14-15 เมตร เป็นดินชนิด Silty Sand (SM) แสดงในตารางที่ 1 โดยตลิ่งมีความชัน 31 องศา

การทดสอบการอัดแรงสามแกนอัดตัวคายน้ำแบบไม่ระบายน้ำ (CU Triaxial Test) [4] ทำการทดสอบที่ดินเหนียวในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดสอบที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำทำการทดสอบที่แรงดึงจุดเมทริกที่ 200 และ 300 kPa ซึ่งที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำได้ค่ามุมเสียดทาน 29.67 องศา และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเท่ากับ 24.40 kPa ที่สภาวะดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่แรงดึงจุดเมทริก 200 kPa ได้ค่ามุมเสียดทาน 31.30 องศา และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเท่ากับ 88.30 kPa และที่แรงดึงจุดเมทริก 300 kPa ได้ค่ามุมเสียดทาน 31.30 องศา และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเท่ากับ 134.53 kPa กรณีดิน Clayey Sand (SC) และ Silty Sand (SM) หาค่ามุมเสียดทานโดยการแปลงค่า Blow Count จากการทดสอบ Standard Penetration test (SPT) มีค่าเท่ากับ 31.90 องศา และ 36.21 องศา ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 1

ผลการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม Plaxis 2D

ในงานวิจัยนี้จะนำตัวแปรต่างๆไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัย การเคลื่อนตัว ซึ่งการวิเคราะห์จะแบ่งดินออกเป็นจำนวน 3 ชั้น โดยดินชนิด SC และ SM จะใช้ค่าเปรียบเทียบจากการทดสอบ SPT มาหาตัวแปรต่างๆ ในส่วนของดินเหนียวตัวแปรที่นำไปวิเคราะห์จะอาศัยผลการทดสอบ Triaxial Test [4] ซึ่งในการวิเคราะห์จะทำการศึกษาดินเหนียวใน 3 สภาวะด้วยกันได้แก่ สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ(ค่าแรงดึงจุดเมทริกเท่ากับ 0 kPa) สภาวะ Transition (ค่าแรงดึงจุดเมทริกเท่ากับ 200) และสภาวะ Residual (ค่าแรงดึงจุดเมทริกเท่ากับ 300 kPa) แสดงในตารางที่ 2

ในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 5 กรณี ได้แก่

1. รักษาระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับ -8.00 ม. และระดับน้ำในลำน้ำคงที่ที่ระดับ -8.00 ม.
2. รักษาระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับผิวดิน และรักษากระดับน้ำในลำน้ำคงที่ที่ระดับน้ำเต็ม
3. รักษากระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับ -2.00 ม. ระดับน้ำในลำน้ำเริ่มต้นที่ระดับ -2.00 ม. และลดลงทุกๆ 2 ม.จนระดับในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 ม.
4. รักษากระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับ -4.00 ม. ระดับน้ำในลำน้ำเริ่มต้นที่ระดับ -4.00 ม. และลดลงทุกๆ 2 ม.จนระดับในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 ม.
5. รักษากระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับ -6.00 ม. ระดับน้ำในลำน้ำเริ่มต้นที่ระดับ -6.00 ม. และลดลงทุกๆ 2 ม.จนระดับในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 ม.

กรณีที่ 1 รักษากระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับ -8.00 ม. และระดับน้ำในลำน้ำคงที่ที่ระดับ -8.00 ม.

ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์โดยโปรแกรม Plaxis 2D ณ สภาพความเป็นจริงในวันที่สำรวจโดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ -8.00 ม. จากระดับผิวดินดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวของดินเหนียวปนทราย(Clayey Sand,SC) ซึ่งในการวิเคราะห์ผลได้ทำการวิเคราะห์ดินเหนียวในสภาพ Unsaturated ที่ แรงดึงจุดเมทริก 200 และ 300 kPa และให้ระดับน้ำในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 ม. ตลอดเวลา ไม่มีการลดหรือการเพิ่มของระดับน้ำ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3 จากการศึกษาคพบว่า อัตราส่วนความปลอดภัย(FS) ของดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่แรงดึงจุดเมทริก 300 kPa มีค่ามากกว่า ดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่แรงดึงจุดเมทริก 200 kPa และการเคลื่อนที่ของดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่แรงดึงจุดเมทริก 300 kPa มีค่าน้อยกว่า ดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่แรงดึงจุดเมทริก 200 kPa

กรณีที่ 2 รักษาระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับผิวดิน และรักษาระดับน้ำในลำน้ำคงที่ที่ระดับน้ำเต็ม

ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์โดยโปรแกรม Plaxis 2D ณ โดยกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินและระดับน้ำของลำน้ำอยู่ที่ระดับตลิ่ง ซึ่งในการวิเคราะห์ผลได้ทำการวิเคราะห์ดินเหนียวในสภาพ Saturated ดังภาพที่ 3 โดยวิเคราะห์ให้น้ำเต็มตลิ่งตลอดเวลา ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4 จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนความปลอดภัย(FS) มีค่าเท่ากับ 1.767

กรณีที่ 3 รักษาระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับ -2.00 ม. ระดับน้ำในลำน้ำเริ่มต้นที่ระดับ -2.00 ม. และลดลงทุกๆ 2 ม. จนระดับในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 ม.

โดยกำหนดให้น้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับความลึก -2.00 ม.จากผิวดิน และระดับของน้ำในลำน้ำเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ -2.00 ม. จากผิวดิน จากนั้นระดับน้ำในลำน้ำลดลงทุกๆ 2.00 ม จนกระทั่งระดับน้ำในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 ม. จากผิวดิน

ซึ่งในการวิเคราะห์กำหนดให้ค่าแรงดึงดูดเมทริกของดินเหนียวที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Clay Unsaturated) มีค่าแรงดึงดูดเมทริกเท่ากับ 200 และ 300 kPa ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 5 แสดงในภาพที่ 4 การเคลื่อนตัวแสดงในภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำน้ำและอัตราส่วนความปลอดภัยดังกราฟที่ 1 จากการศึกษาพบว่าเมื่อระดับน้ำในลำน้ำลดลงอัตราส่วนความปลอดภัย(FS) จะลดลง และการเคลื่อนตัวของดินจะมีการเคลื่อนที่ไปที่ลำน้ำมากขึ้นนอกจากนี้ยังพบว่าดินเหนียวที่มีค่าแรงดึงดูดเมทริกที่เพิ่มมากขึ้นหรือดินเหนียวที่อยู่ในสภาพแห้งนั้นจะมีผลต่ออัตราส่วนความปลอดภัยและการเคลื่อนตัวเล็กน้อย

กรณีที่ 4 รักษาระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับ -4.00 ม. ระดับน้ำในลำน้ำเริ่มต้นที่ระดับ -4.00 ม. และลดลงทุกๆ 2 ม.จนระดับในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 ม.

เมื่อกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินคงที่อยู่ที่ระดับ -4.00 ม. ระดับน้ำเริ่มต้นในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -4.00 ม. และลดลงทุกๆ 2.00 ม. จนกระทั่งถึง -8.00 ม และกำหนดให้ดินเหนียวสภาพ Unsaturated ซึ่งหนา 4.00 ม. มีค่าแรงดึงดูดเมทริก 200 และ 300 kPa ตามลำดับ ส่วนดินเหนียวที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ทำการวิเคราะห์ในสภาพ Saturated ผลแสดงในตารางที่ 6 การวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 6 การเคลื่อนตัวแสดงในภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำน้ำและอัตราส่วนความปลอดภัยดังกราฟที่ 2 เมื่อระดับน้ำลดลงอัตราส่วนความปลอดภัย(FS) จะลดลง และการเคลื่อนที่ของดินจะมีการเคลื่อนที่ไปที่ลำน้ำมากขึ้น

กรณีที่ 5 รักษาระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ระดับ -6.00 ม. ระดับน้ำในลำน้ำเริ่มต้นที่ระดับ -6.00 ม. และลดลงทุกๆ 2 ม.จนระดับในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 ม.

เมื่อกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินคงที่อยู่ที่ระดับ -6.00 ม. ระดับน้ำเริ่มต้นในลำน้ำอยู่ที่ระดับ -6.00 ม. และลดลงทุกๆ 2.00 ม. จนกระทั่งถึง -8.00 ม และกำหนดให้ดินเหนียวสภาพ Unsaturated ซึ่งหนา 6.00 ม. มีค่าแรงดึงดูดเมทริก 200 และ 300 kPa ตามลำดับ ส่วนดินเหนียวที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ทำการวิเคราะห์ในสภาพ Saturated ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 7 การวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 8 การเคลื่อนตัวแสดงในภาพที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำน้ำและอัตราส่วนความปลอดภัยดังกราฟที่ 3 เมื่อระดับน้ำลดลงอัตราส่วนความปลอดภัย(FS) จะลดลง และการเคลื่อนที่ของดินจะมีการเคลื่อนที่ไปที่ลำน้ำมากขึ้น

อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัย

การศึกษาเสถียรภาพของดินริมตลิ่ง ลำน้ำพอง บ้านท่าแก อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่นนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ซึ่งตัวแปรต่างที่นำไปแทนค่าในโปรแกรมนั้น ได้จากการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องอัดสามแกน แบบอัดตัวคายน้ำไม่ระบายน้ำ (Consolidated Undrained Triaxial Test) จะทราบถึงค่าแรงยึด

เหนียวของดิน มุมเสียดทานของดิน ยังโมดูลัสของดิน อัตราการไหลของน้ำในดิน อัตราส่วนความเครียดในแนวด้านข้าง ต่อความเครียดในแนวด้านยาวของตัวอย่างดิน และผลการวิเคราะห์จะได้อ้างอิงต่อไป

1. การเคลื่อนตัวของดินนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับน้ำในลำน้ำลดลงแต่ระดับน้ำใต้ดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง
2. อัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลง เมื่อระดับน้ำลดลงแต่ระดับน้ำใต้ดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง
3. จากการทดสอบในงานวิจัยนี้ ทำให้ทราบว่าดินและความชื้นของตลิ่งที่นำมาวิเคราะห์จะมีแนวโน้มที่จะเกิดการวิบัติที่ระดับน้ำลดลงเหลือ 25 เปอร์เซ็นต์จากระดับน้ำเต็มตลิ่ง และระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวตลิ่ง ภายในระยะเวลา 2 เดือน โดยเกิดจากการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว
4. ผลการเปลี่ยนค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน กรณีค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 30.30 องศา โดยเมื่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินที่มีค่ามากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่ามากขึ้น ตามสมมติฐานที่ว่าเมื่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินดีขึ้น สมบัติของดินก็ดีขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นนั้นมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจึงมีค่ามากขึ้น
5. ค่าโมดูลัสจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ถึงจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้วิธี c-f reduction เป็นการลดทอนค่ากำลังตัวแปร $\tan f$ และ c จนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติ ซึ่งค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน และค่ามุมเสียดทานภายในจะส่งผลต่อการคำนวณโดยตรงมากกว่าค่าโมดูลัสของยัง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.รัตมณี นันทสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำแนวทางผลการทดสอบ การวิเคราะห์ผล ตลอดจนการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้ จนสำเร็จไปด้วยดี นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ ประธานในการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดลฤดี หอมดี กรรมการในการสอบที่ได้สละเวลามามาให้คำแนะนำ ขอขอบพระคุณบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และสุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Kakaradee W. Study of Slope Stability Analysis by Comparing the Limit Equilibrium, Finite Element and Stress Based Method. 2013; 20(2):5-10.
2. Baba K, Bahi L, Ouadif L, Akhssas A. Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods applied to a railway in the Moroccan Rif. Open journal of civil engineering. 2012; 2(1):27.
3. Hammouri NA, Malkawi AH, Yamin M. Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. (2008); 67(4):471.
4. Hough. "Unretained Earth Slope and Embankments". Basic Soils Engineering. New York: Ronald Press Company.1957;1(1):7-8.
5. Navfac DM. Foundations and earth structures. Design manual.1982; 7(3):5-7.

6. Orr TLL. Effect of Uncertainty in the Groundwater Level on Safety in Geotechnical Design. Proceedind of the Ninth European Confrence on Soil Mechanic and Foundation Enginerring. 1987; 3(31):4-8.
7. Pinyol NM, Alonso EE, Olivella S. Rapid drawdown in slopes and embankments. Water resources research.2008; 44(5):8-9.
8. Skempton AW. The pore-pressure coefficients A and B. Geotechnique.1954; 4(4):143-147.

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

คุณสมบัติ	ค่า		
ความลึกจากผิวดิน(เมตร)	1-8	9-13	13-15
Liquid Limit (LL), %	28.6	39.9	28.6
Plastic Limit (PL), %	18.9	17.8	0.0
Plasticity Index (PI), %	9.8	22.1	28.6
Specific Gravity	2.66	2.67	2.79
Saturated Density, T/m ³	1.70	1.90	1.90
Unsaturated Density, T/m ³	1.80	1.70	1.70
% Passing Sieve#4, %	100	100.00	87.9
% Passing Sieve#200, %	85.6	42.00	21.3
ประเภทของดิน (USCS)	CL	SC	SM

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ชนิดดิน	ความลึก (ม.)	C (kPa)	f' (degree)	E (kPa)	V	K (m/day)	g_{sat}^3 (kN/m ³)	g_{unsat}^3 (kN/m ³)	g_{sat}^3 (kN/m ³)	แรงดึงจุดเมทริก (kPa)
CL(sat)	1-8	24.20	29.67	207,000	0.18	0.00012	20.00	18.00	18.00	0
CL M200	1-8	88.30	31.30	91,437	0.18	0.00012	20.00	18.00	18.00	200
CL M300	1-8	134.53	31.30	106,384	0.18	0.00012	20.00	18.00	18.00	300
SC	8-13	0	31.90	100,000	0.17	0.00864	18.00	17.00	17.00	-
SM	13-15	0	36.21	100,000	0.17	0.00864	18.00	17.00	17.00	-

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เมื่อระดับน้ำอยู่ที่ 8.00 เมตร ต่ำจากผิวตลิ่ง โดยโปรแกรม Plaxis 2D

ชนิด	ระดับน้ำจากผิวตลิ่ง (ม.)	Undrained A เฉพาะดินเหนียว	
		FS	Displacement (ม.)
Clay Unsaturated M200	0.00 – 8.00		
SC	8.00 – 13.00	1.635	5.5460×10^{-6}
SP	13.00 -15.00		
Clay Undrained M300	0.00 – 8.00		
SC	8.00 – 13.00	2.239	0.2559×10^{-3}
SP	13.00 -15.00		

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เมื่อระดับน้ำอยู่ที่ผิวตลิ่ง โดยโปรแกรม Plaxis 2D

ชนิด	ระดับน้ำจากผิวตลิ่ง (ม.)	Undrained A เฉพาะดินเหนียว	
		FS	Displacement (ม.)
Clay Saturated	0.00 – 8.00		
SC	8.00 – 13.00	1.767	0.2423×10^{-6}
SP	13.00 -15.00		

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เมื่อระดับน้ำอยู่ที่ 2.00 เมตร ต่ำจากผิวตลิ่ง โดยโปรแกรม Plaxis 2D

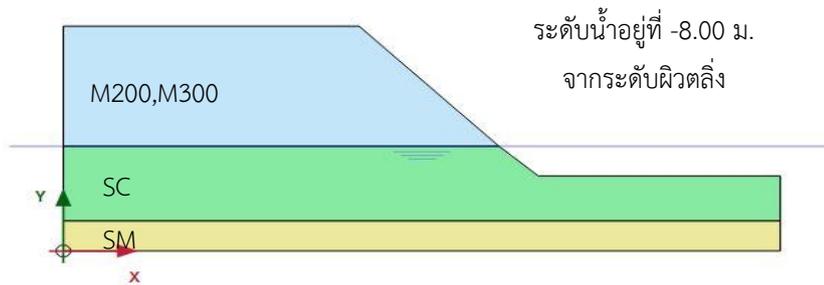
ชนิด	ระดับน้ำใต้ดิน (ม.)	ระดับน้ำจากผิว ตลิ่ง (ม.)	Undrained A เฉพาะดินเหนียว	
			FS	Displacement (ม.)
		-2.00	1.648	0.1865×10^{-3}
ดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ แรงดึงดูดเมทริก 200 kPa	-2.00	-2.00 ถึง -4.00	1.351	0.9826×10^{-3}
		-2.00 ถึง -6.00	1.172	2.8780×10^{-3}
		-2.00 ถึง -8.00	1.031	17.2000×10^{-3}
		-2.00	1.648	0.1851×10^{-3}
ดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ แรงดึงดูดเมทริก 300 kPa	-2.00	-2.00 ถึง -4.00	1.343	0.9778×10^{-3}
		-2.00 ถึง -6.00	1.171	2.7500×10^{-3}
		-2.00 ถึง -8.00	1.032	15.8000×10^{-3}

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์เมื่อระดับน้ำอยู่ที่ 2.00 เมตร ต่ำจากผิวตลิ่ง โดยโปรแกรม Plaxis 2D

ชนิด	ระดับน้ำใต้ดิน (ม.)	ระดับน้ำจากผิว ตลิ่ง (ม.)	Undrained A เฉพาะดินเหนียว	
			FS	Displacement (ม.)
ดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ แรงดึงดูดเมทริก 200 kPa	-4.00	-4.00	1.676	0.1518×10^{-3}
		-4.00 ถึง -6.00	1.384	1.0660×10^{-3}
ดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ แรงดึงดูดเมทริก 300 kPa	-4.00	-4.00	1.677	0.1655×10^{-3}
		-4.00 ถึง -6.00	1.378	1.0380×10^{-3}
		-4.00 ถึง -8.00	1.172	12.4700×10^{-3}
		-4.00 ถึง -8.00	1.184	25.8700×10^{-3}

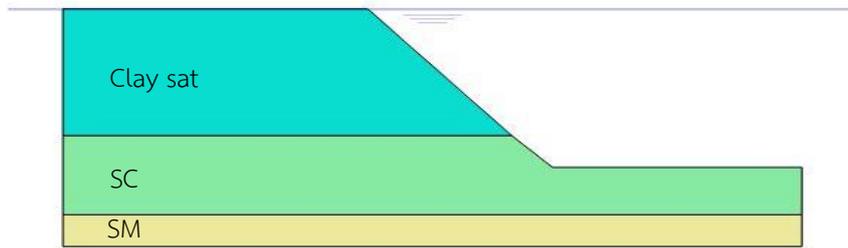
ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์เมื่อระดับน้ำอยู่ที่ 2.00 เมตร ต่ำจากผิวตลิ่ง โดยโปรแกรม Plaxis 2D

ชนิด	ระดับน้ำใต้ดิน (ม.)	ระดับน้ำจากผิว ตลิ่ง (ม.)	Undrained A เฉพาะดินเหนียว	
			FS	Displacement (ม.)
ดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ แรงดึงดูดเมทริก 200 kPa	-6.00	-6.00	1.721	0.1052×10^{-3}
		-6.00 ถึง -8.00	1.430	1.0230×10^{-3}
ดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ แรงดึงดูดเมทริก 300 kPa	-6.00	-6.00	1.710	0.1093×10^{-3}
		-6.00 ถึง -8.00	1.410	1.0380×10^{-3}



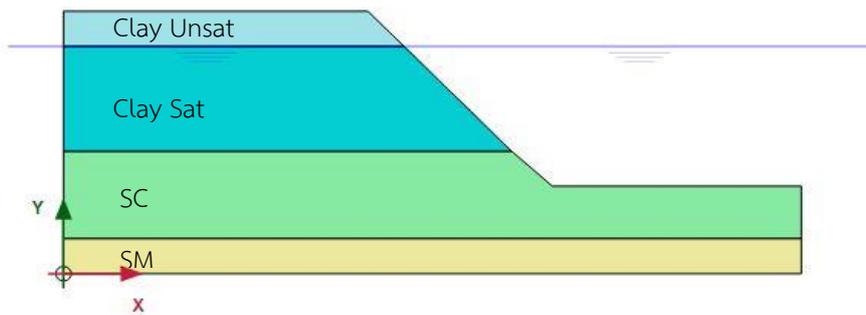
ภาพที่ 2 การแสดงการจำลองตลิ่งที่ระดับน้ำอยู่ที่ 8.00 เมตร ต่ำจากผิวตลิ่ง

ระดับน้ำอยู่ที่ผิวตลิ่ง 0.00 ม.

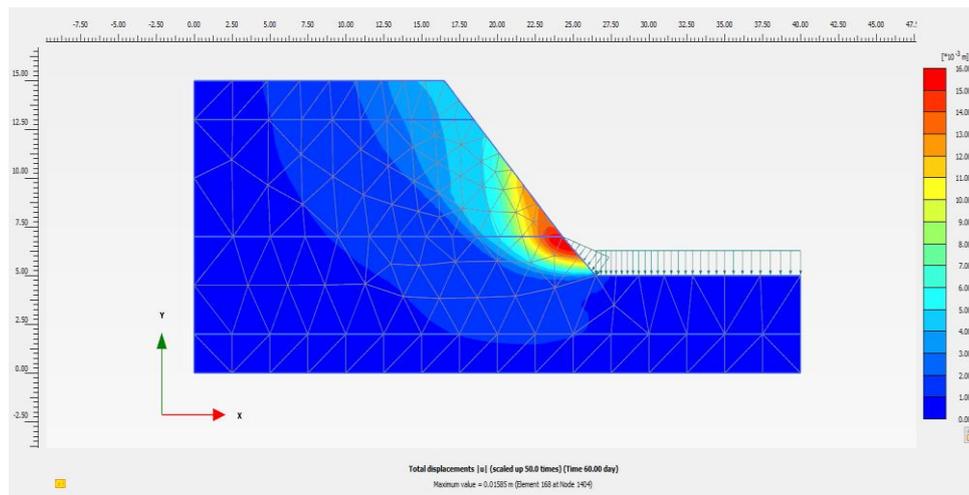


ภาพที่ 3 การแสดงการจำลองตลิ่งที่ระดับน้ำอยู่ที่ผิวตลิ่ง

ระดับน้ำอยู่ที่ -2.00 ม. จากระดับตลิ่ง และจะลดระดับทุกๆ 2 ม. จนระดับน้ำอยู่ที่ -8.00 ม.

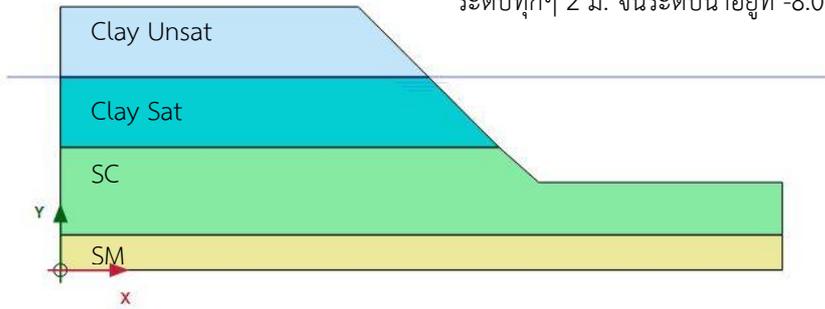


ภาพที่ 4 การแสดงการจำลองตลิ่งที่ระดับน้ำอยู่ที่ 2.00 เมตรต่ำจากผิวตลิ่งผิวตลิ่ง

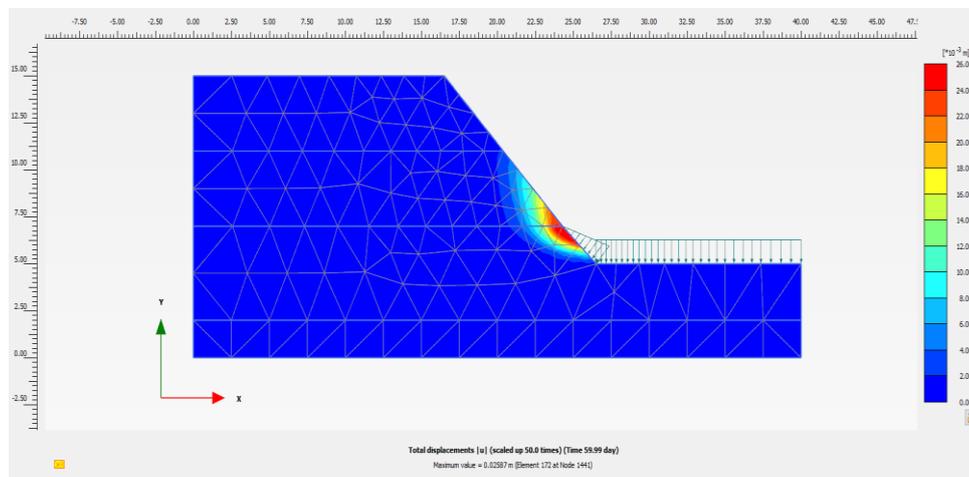


ภาพที่ 5 การแสดงการเคลื่อนตัวของเมื่กระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -2.00 เมตร และระดับลำนํ้าอยู่ที่ระดับ -8.00 เมตร

ระดับน้ำอยู่ที่ -4.00 ม. จากระดับตลิ่ง และจะลด
ระดับทุกๆ 2 ม. จนระดับน้ำอยู่ที่ -8.00 ม.

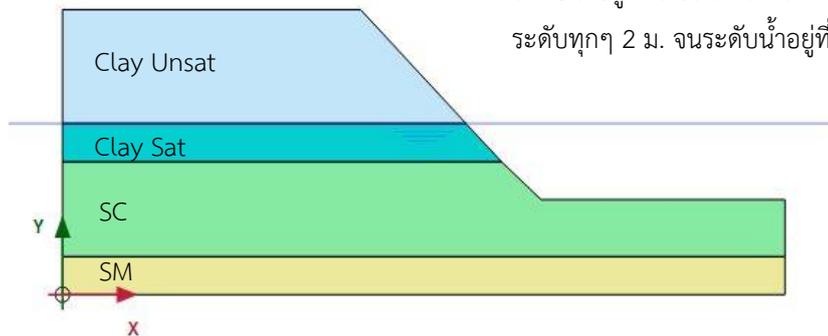


ภาพที่ 6 การแสดงการจำลองตลิ่งที่ระดับน้ำอยู่ที่ 4.00 เมตรต่ำจากผิวตลิ่งผิวตลิ่ง

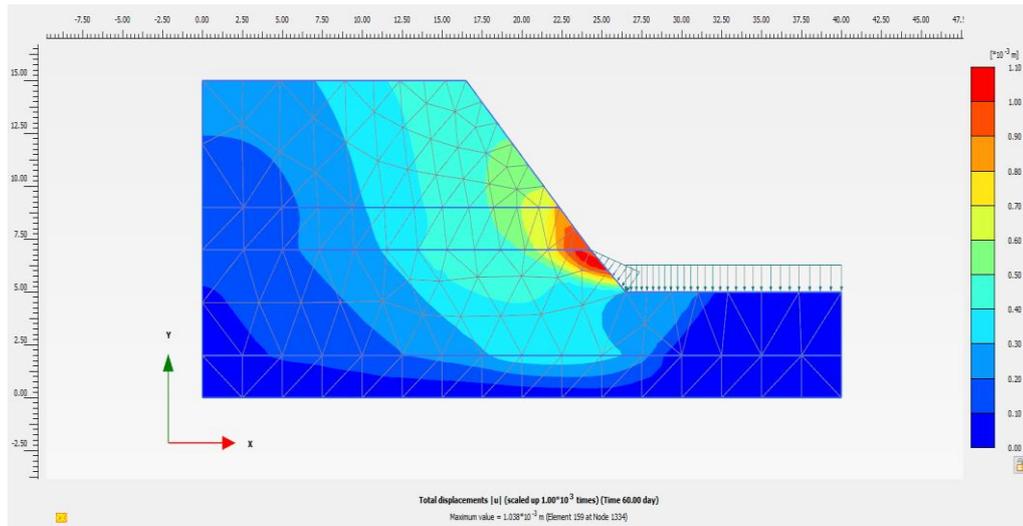


ภาพที่ 7 การแสดงการเคลื่อนตัวของเมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -4.00 เมตร และระดับลำนน้ำอยู่ที่ระดับ -8.00 เมตร

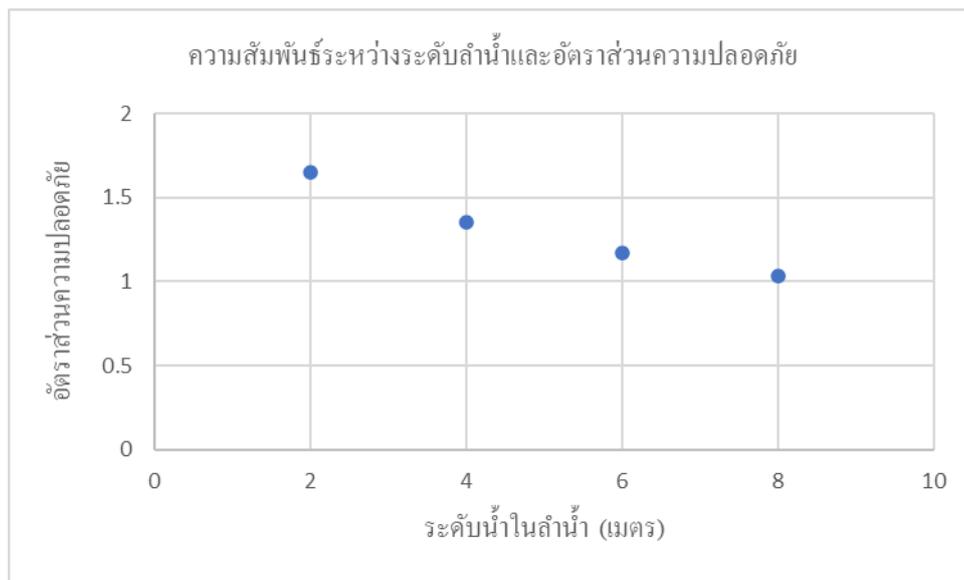
ระดับน้ำอยู่ที่ -6.00 ม. จากระดับตลิ่ง และจะลด
ระดับทุกๆ 2 ม. จนระดับน้ำอยู่ที่ -8.00 ม.



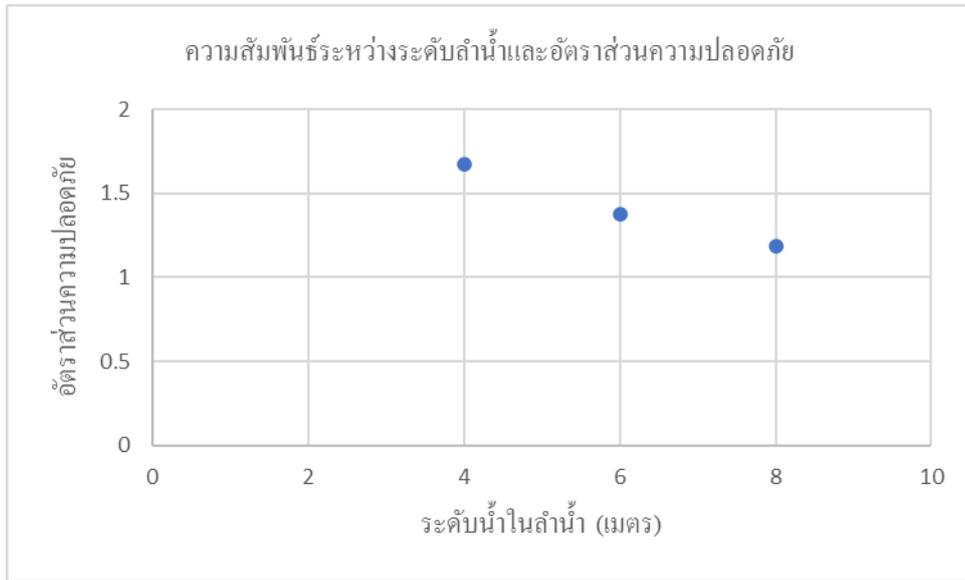
ภาพที่ 8 การแสดงการจำลองตลิ่งที่ระดับน้ำอยู่ที่ 6.00 เมตรต่ำจากผิวตลิ่งผิวตลิ่ง



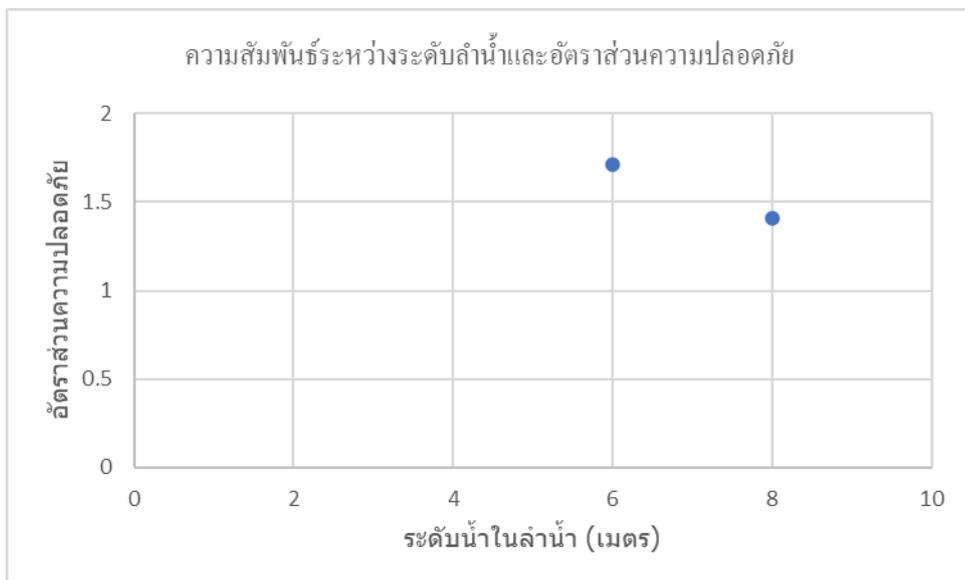
ภาพที่ 9 การแสดงการเคลื่อนตัวเมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -6.00 เมตร และระดับลำนํ้าอยู่ที่ระดับ -8.00 เมตร



กราฟที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยและระดับน้ำในลำนํ้า กรณีที่ 3



กราฟที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอตกภัยและระดับน้ำในลำน้ำ กรณีที่ 4



กราฟที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอตกภัยและระดับน้ำในลำน้ำ กรณีที่ 5