



การวิเคราะห์เสถียรภาพและการเสียรูปของลาดดินเนื่องจากการระบายน้ำของบึงหนองบอน
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พลอยไพลิน ทองอินทร์

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การวิเคราะห์เสถียรภาพและการเสียรูปของลาดดินเนื่องจากการระบายน้ำของบึงหนองบอน
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พลอยไพลิน ทองอินทร์

การค้นคว้าอิสระเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิ
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การวิเคราะห์เสถียรภาพและการเสียรูปของลาดดินเนื่องจากการระบายน้ำของบึงหนองบอน ด้วยวิธีไฟไนต์
เอลิเมนต์

โดย พลอยไพลิน ทองอินทร์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยี
วิศวกรรมกรรมการก่อสร้าง

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

.....

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิไลลักษณ์ สระมูล)

.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข)

.....

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศาสตร์ สกุลศักดิ์ศรี)

ชื่อ : พลอยไพลิน ทองอินทร์
 ชื่อการค้นคว้าอิสระ : การวิเคราะห์เสถียรภาพและการเสียรูปของลาดดินเนื่องจากการระบายน้ำของ
 บึงหนองบอน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ อีระวัฒนสุข
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

สารนิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพและการเสียรูปของลาดดินด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Model, FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทาง FEM กับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมของดินภายในบึงหนองบอนขณะสูบน้ำจนถึงระดับ -5.00 ม.รทก. โดยทำการศึกษาพร้อมน้ำออกจากบึงหนองบอนที่ระดับน้ำตั้งแต่ 0.00 ม.รทก. จนถึงระดับ -7.00 ม.รทก. ในการจำลองเสถียรภาพและพฤติกรรมการเสียรูปของดินจะดำเนินการลดระดับน้ำด้วยอัตราการสูบน้ำเท่ากับ 60 ลบ.ม./วินาที

ผลจากการวิเคราะห์พบว่าลาดดินบึงหนองบอนที่ทำการศึกษามีจำนวน 4 หน้าตัด ประกอบด้วย Sta.4+700 , Sta.5+050 , Sta.5+150 และ Sta.5+450 ทุกหน้าตัด มีค่า Factor of Safety มากกว่า 1.0 แสดงให้เห็นว่า ลาดดินบึงหนองบอนมีเสถียรภาพเพียงพอหากต้องการพร้อมน้ำออกจากบึงหนองบอนจนถึงระดับกักเก็บต่ำสุด และมีการเสียรูปของลาดดินสูงสุด 20.97 เซนติเมตร จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ กับข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมของดินภายในบึงหนองบอนขณะสูบน้ำจนถึงระดับที่ได้ทำการวิเคราะห์ที่ระดับ -5.00 ม.รทก. นอกจากนี้ พบว่าข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D แตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง ค่าความแตกต่างต่ำสุดเท่ากับ 0.00 เมตร และสูงสุดเท่ากับ 1.0 เมตร

(จำนวน 139 หน้า)

คำสำคัญ : ไฟไนต์เอลิเมนต์, เสถียรภาพ, โปรแกรม PLAXIS 2D

อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก

Name : PLOYPAILIN THONG-IN
Independent Study Title : Stability and Deformation analyses of soil slope due to water drainage of Bueng Nong Bon by finite element Method
Major Field : Construction Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Independent Study Advisor : CHAIRAT TEERAWATTANASUK
Academic Year : 2024

ABSTRACT

The objective of this master project was to investigate the stability and deformation of soil slopes in Bueng Nong Bon using the Finite Element Method (FEM) with PLAXIS 2D software. To accomplish this, the analyzed results from FEM were compared with measured actual data of soil behavior during water pumping to a level of -5.00 meters (AMSL). The study simulated the drawdown of water from Bueng Nong Bon, starting from 0.00 meters AMSL to a lowest point of -7.00 meters AMSL, at a pumping rate of 60 cubic meters per second.

The analysis results revealed that the four studied cross-sections of Bueng Nong Bon's slopes (Sta. 4+700, Sta. 5+050, Sta. 5+150, and Sta. 5+450). All sections had a Factor of Safety greater than 1.0. This indicates that the slopes are sufficiently stable even if the water level is drawn down to the minimum retention level. The maximum observed slope deformation was 20.97 centimeters. When comparing the results from PLAXIS 2D with the measured actual data of soil behavior during water pumping at -5.00 meters AMSL, it was found that the results differed. The smallest difference was 0.00 meters, while the largest difference was 1.0 meter.

(total 139 page)

Keywords: Finite Element Method, Stability, PLAXIS 2D

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพและการเสีรูปของลาดดิน เนื่องจากการระบายน้ำของบึงหนองบอนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข ที่ให้คำแนะนำ ความรู้ และแนวทางในการแก้ปัญหา ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลลักษณ์ สระมูล และรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศาสตร์ สกุลศักดิ์ศรี คณะกรรมการสอบสารนิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ความรู้แนวทาง และข้อคิดเห็นต่าง ๆ และนางสาวสิริภัทร อวยพร วิศวกรโยธา บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ เมเนจเม้นท์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ

ทั้งนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้ความสนับสนุนและช่วยเหลือ จนสารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

พลอยไพลิน ทองอินทร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทนำ.....	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	16
1.2 วัตถุประสงค์.....	17
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย.....	18
บทที่ 2	19
2.1 รายละเอียดของบึงหนองบอน.....	19
2.2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำจากบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา	20
2.3 ชั้นดินบริเวณถนนบางนา-บางปะกง.....	20
2.4 สาเหตุการวิบัติของลาดดิน.....	21
2.5 ลักษณะการวิบัติของลาดดิน.....	24
2.6 หลักเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน สำหรับการสูบน้ำออกจากบึงกักเก็บน้ำ.....	25
2.7 แบบจำลอง Mohr-Coulomb (Elasto-Plastic)	26
2.9 Finite Element Method.....	30

บทที่ 3	43
3.1 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย	43
3.2 ข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของลาดดิน	44
บทที่ 4	73
บทที่ 5	112
5.1 สรุปผลการวิจัย	112
5.2 ข้อเสนอแนะ	113
บรรณานุกรม	114
ภาคผนวก	118
ประวัติผู้เขียน	133



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 ลักษณะชั้นดินที่ได้จากการเจาะสำรวจหลุม BH-2	32
3-2 ความจุสะสมในแก้มลิงบึงหนองบอนที่ระดับน้ำต่าง ๆ	35
3-3 อัตราการสูบน้ำที่ระดับต่าง ๆ	36
3-4 พารามิเตอร์ของชั้นดิน	48
3-5 การกำหนดค่าการลดระดับน้ำของแต่ละ Phase	54



สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า
3-15 ค่าพารามิเตอร์ของดินชั้นที่ 1 แลเบเครื่องมือ General	47
3-16 ค่าพารามิเตอร์ของดินชั้นที่ 1 แลเบเครื่องมือ Mechanical	48
3-17 ค่าพารามิเตอร์ของดินชั้นที่ 1 แลเบเครื่องมือ Ground Water ของโปรแกรม PLAXIS 2D	49
3-18 หน้าต่าง Material Sets เมื่อกรอกข้อมูลชั้นดินครบถ้วน	50
3-19 การวาดชั้นดินที่ต้องการวิเคราะห์	50
3-20 หน้าต่างแสดงผลแบบจำลองเมื่อวาดเสร็จ	51
3-21 การกรอกข้อมูล Load ที่กระทำต่อแบบจำลอง	51
3-22 การกำหนดเส้นระดับน้ำที่ต้องการศึกษาในแบบจำลอง	54
3-23 การกรอกค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการลดระดับน้ำ	55
3-24 การเลือกความละเอียดของการวิเคราะห์ข้อมูล	55
3-25 หน้าต่างแสดงสถานะการวิเคราะห์ข้อมูลของโปรแกรม PLAXIS 2D	56
3-26 หน้าต่างแสดงสถานะการวิเคราะห์ข้อมูลของโปรแกรม PLAXIS 2D	56
4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of Safety กับระดับน้ำในบึงหนองบอนของ Sta.4+700	57
4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of Safety กับระดับน้ำในบึงหนองบอนของ Sta.5+050	58
4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of Safety กับระดับน้ำในบึงหนองบอนของ Sta.5+150	59
4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of Safety กับระดับน้ำในบึงหนองบอนของ Sta.5+450	60
4-5 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ของ Initial Phase	61
4-6 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows	62

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-7 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	62
4-8 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	62
4-9 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour ShadeD	63
4-10 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก.ใน รูปแบบDisplacement Arrows	63
4-11 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	64
4-12 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก.จนถึง -4.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	64
4-13 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	65
4-14 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก.ใน รูปแบบ Displacement Arrows	65
4-15 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	66

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-16 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	66
4-17 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shades	67
4-18 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำ การลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	67
4-19 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำกา ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	68
4-20 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ของ Initial Phase	68
4-21 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	68
4-22 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	69
4-23 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	70
4-24 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	70

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-25 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก.ใน รูปแบบ Displacement Arrows	71
4-26 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	71
4-27 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก.ใน รูปแบบ Displacement Arrows	72
4-28 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำ การลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	72
4-29 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก.ใน รูปแบบ Displacement Arrows	73
4-30 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	73
4-31 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	74
4-32 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	74
4-33 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก.ใน รูปแบบ Displacement Arrows	75

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-34 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	75
4-35 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ของ Initial Phase	76
4-36 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows	77
4-37 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	77
4-38 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	78
4-39 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	78
4-40 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	79
4-41 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	79
4-42 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	80

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-43 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	80
4-44 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	81
4-45 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	81
4-46 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	82
4-47 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	82
4-48 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Displacement Arrows	83
4-49 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ใน รูปแบบ Contour Shade	83
4-50 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ของ Initial Phase	84
4-51 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการ ลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

บึงหนองบอน เป็นโครงการแก้มลิงตามแนวพระราชดำริ เมื่อปีพ.ศ. 2539 ถูกสร้างขึ้นเพื่อแก้ปัญหาน้ำท่วมในกรุงเทพมหานคร และใช้รองรับน้ำจากฝั่งตะวันออกกรุงเทพมหานคร โดยบึงหนองบอนสามารถกักเก็บน้ำได้กว่า 7,000,000 ลูกบาศก์เมตรจากคลองหนองบอน และคลองมะขามเทศ โดยใช้เวลาระบายน้ำท่วมขังเพียง 1-2 วัน ต่อมามีการพัฒนาอ่างเก็บน้ำบึงหนองบอนให้กลายเป็นศูนย์ฝึกกีฬาทางน้ำของกรุงเทพมหานคร และได้มีการฝึกสอนกีฬาทางน้ำให้กับประชาชนทั่วไป

เนื่องจากบึงหนองบอนมีความสามารถกักเก็บน้ำได้กว่า 7,000,000 ลูกบาศก์เมตร โดยแบ่งเป็นความจุของอ่างเก็บน้ำส่วนที่ต่ำกว่าระดับน้ำต่ำสุดที่กำหนด หรือ Dead Storage จำนวน 2,000,000 ลูกบาศก์เมตร และสามารถพร่องน้ำเป็นแก้มลิงได้ 5,000,000 ลูกบาศก์เมตร ต่อมามีการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา โดยมีอาคารรับน้ำบึงหนองบอนรับน้ำจากบึงหนองบอนลงสู่อุโมงค์ระบายน้ำ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำของบึงหนองบอนให้เพิ่มสูงขึ้น โดยในขั้นตอนการทดสอบระบบเครื่องสูบน้ำของโครงการจะมีการเปิดใช้เครื่องสูบน้ำเต็มอัตราการสูบน้ำที่อัตราการสูบ 60 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งการสูบน้ำในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ต้องมีการพร่องน้ำภายในบึงหนองบอนมากกว่า 5,000,000 ลูกบาศก์เมตร (สำนักการระบายน้ำ, 2563) จึงมีความจำเป็นต้องมีการตรวจสอบลาดดินบริเวณบึงหนองบอนว่ามีเสถียรภาพและมีการเสียรูปของดินที่เป็นอันตรายหรือไม่ จึงมีความจำเป็นต้องมีการศึกษาเสถียรภาพและการเสียรูปของลาดดินในบึงหนองบอนด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ซึ่งการใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายแทนที่วิธีแบบดั้งเดิม (Dancan, 1996 , Griffiths and Lane, 1999) แต่อาจจะมีเงื่อนไขในการคำนวณซับซ้อนและใช้เวลาคำนวณนานกว่าวิธีแบบดั้งเดิม แต่ข้อดีคือจะได้คำตอบที่ใกล้เคียงความจริงมากกว่า (ชลดา และ ประสาร, 2563)

สารนิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพและการเสียรูปของดินด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง โดยทำการศึกษาพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนที่ระดับน้ำตั้งแต่ 0.00 ม.รทก. จนถึงระดับ -7.00 ม.รทก.

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของการลดระดับน้ำในบึงหนองบอนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึง -7.00 ม.รทก. ต่อเสถียรภาพและการเสียรูปของลาดดินภายในบึง
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์การเสียรูปของลาดดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริงเมื่อดำเนินการสูบน้ำภายในบึงหนองบอนที่ระดับน้ำเท่ากับ -5.00 ม.รทก.

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 การจำลองเสถียรภาพและพฤติกรรมของการเสียรูปของลาดดิน จากการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนตั้งแต่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึง -7.00 ม.รทก. โดยดำเนินการลดระดับน้ำให้สอดคล้องกับอัตราการสูบน้ำของโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาที่ 60 ลบ.ม./วินาที และปริมาณความจุที่ระดับน้ำที่ต้องการศึกษา เมื่อทำการลดระดับน้ำลงทุก ๆ 1 เมตร จะเข้าสู่ขั้นตอน Consolidation เป็นเวลา 12 ชั่วโมง สลับกับการลดระดับน้ำจนกว่าจะถึงระดับที่ต้องการ ส่งผลให้ในการดำเนินการลดระดับน้ำของบึงหนองบอนจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. จะใช้เวลาทั้งหมด 108 ชั่วโมงหรือประมาณ 5 วัน โดยใช้การวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ
- 1.3.2 เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของมวลดินในแนวราบและแนวดิ่งจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ กับข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมของดินจากการตรวจวัดจริงภายในบึงหนองบอนขณะสูบน้ำจนถึงระดับที่ได้ทำการวิเคราะห์ที่ระดับ -5.00 ม.รทก.

1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.4.1 ทราบพฤติกรรมขณะดำเนินการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนให้ต่ำกว่าระดับกักเก็บต่ำสุด เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการพร่องน้ำในบึงให้สูงขึ้น ตั้งแต่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึง -7.00 ม.รทก. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ
- 1.4.2 ใช้เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบด้านเสถียรภาพและพฤติกรรมการเสียรูปของดินภายในบึงแห่งอื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือควบคุมในการพร่องน้ำให้เพิ่มสูงขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รายละเอียดของบึงหนองบอน

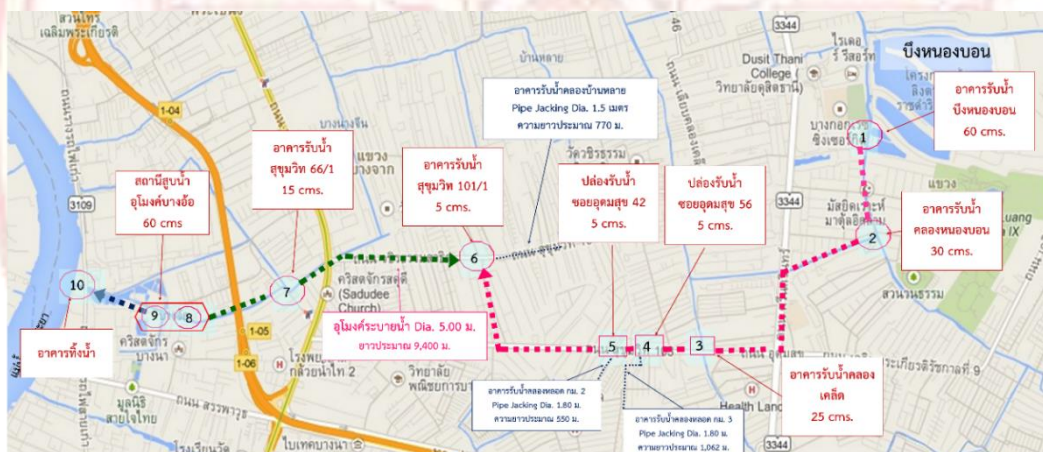
โครงการแก้มลิงบึงหนองบอน เริ่มขุดเมื่อปี พ.ศ. 2536 แล้วเสร็จเมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยมีพื้นที่ 644 ไร่ มีความลึกประมาณ 10 เมตร จัดสร้างเพื่อแก้ปัญหาน้ำท่วมกรุงเทพฯฝั่งตะวันออก ใช้บริหารจัดการน้ำช่วงฤดูฝน ระหว่างเดือน พฤษภาคม ถึง พฤศจิกายน โดยสามารถรับน้ำส่วนเกินจากคลองหนองบอนและคลองมะขามเทศ เมื่อน้ำในพื้นที่ลดลง จึงค่อย ๆ ปล่อยน้ำออกจากบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา และใช้พื้นที่ดังกล่าวเก็บกักน้ำฝนเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภคช่วงฤดูแล้ง ระหว่างเดือน ธันวาคม ถึง เมษายน สำหรับแก้มลิงในพื้นที่ดังกล่าวสามารถเก็บกักน้ำปริมาณ 7,000,000 ลูกบาศก์เมตร โดยแบ่งเป็นปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าระดับกักเก็บต่ำสุด (Dead Storage) 2,000,000 ลูกบาศก์เมตร และปริมาณน้ำที่สามารถพร่องได้ 5,000,000 ลูกบาศก์เมตร ปัจจุบันพื้นที่บางส่วนของบึงหนองบอน ถูกพัฒนาให้เป็นสวนสาธารณะและเป็นศูนย์กีฬาทางน้ำแห่งแรกของกรุงเทพมหานคร



ภาพที่ 2-1 ภาพบึงหนองบอน

2.2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำจากบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำจากบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา เป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.00 เมตร ความยาวอุโมงค์ประมาณ 9,400 เมตร มีอาคารรับน้ำจำนวน 7 แห่ง ประกอบด้วย อาคารรับน้ำบึงหนองบอน อาคารรับน้ำคลองหนองบอน อาคารรับน้ำคลองเคล็ด อาคารรับน้ำคลองหลอด กม.2 อาคารรับน้ำคลองหลอด กม.3 อาคารรับถนนสุขุมวิท 101/1 และอาคารรับน้ำซอยสุขุมวิท 66/1 สถานีสูบน้ำจำนวน 1 แห่ง และอาคารทิ้งน้ำจำนวน 1 แห่ง มีเส้นทางขุดเจาะอุโมงค์แสดงดังภาพที่ 2-2 ซึ่งอาคารรับน้ำบึงหนองบอน ตั้งอยู่บริเวณบึงหนองบอนและรับน้ำจากบึงเข้าสู่อุโมงค์ระบายน้ำ ทำให้การระบายน้ำของบึงหนองบอนมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น อาคารรับน้ำบึงหนองบอนมีระดับธรณีประตูดุอยู่ที่ระดับ - 7.50 ม.รทก. และระดับน้ำออกแบบต่ำสุดเท่ากับ - 7.00 ม.รทก. มีความสามารถระบายน้ำลงสู่อุโมงค์เท่ากับ 60 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

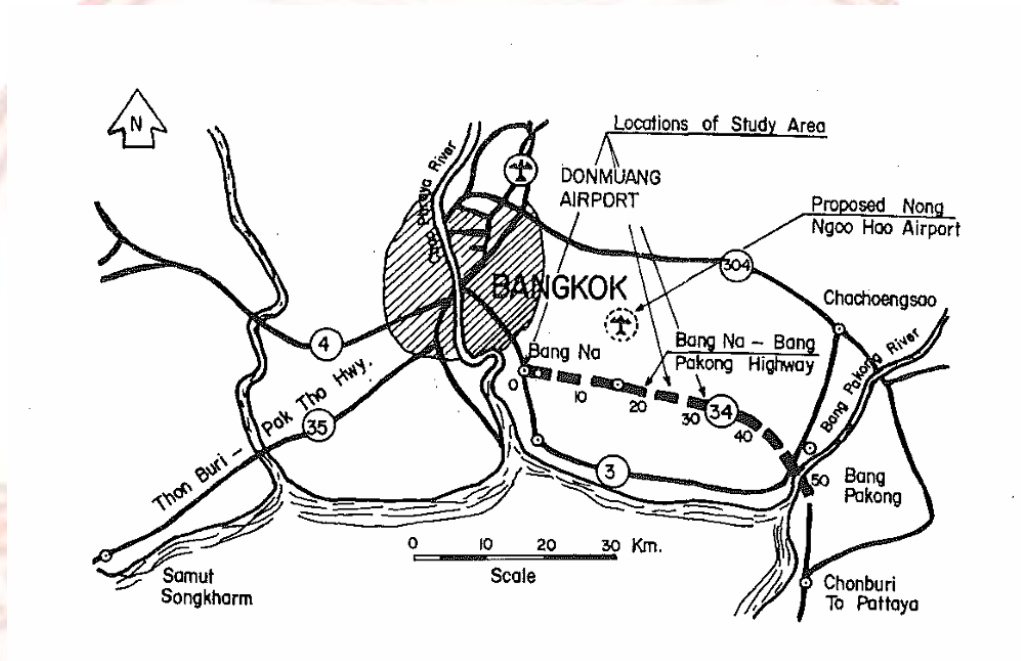


ภาพที่ 2-2 เส้นทางขุดเจาะอุโมงค์และตำแหน่งอาคารรับน้ำ สถานีสูบน้ำ และอาคารทิ้งน้ำ

2.3 ชั้นดินบริเวณถนนบางนา-บางปะกง

บริเวณทางหลวงบางนา-บางปะกง จากกิโลเมตรที่ 0 ถึง กิโลเมตรที่ 25 มีลักษณะชั้นดินที่เกิดจากการตกตะกอนในทะเล (Soft Marine Clay) โดยชั้นดินดังกล่าวเกิดการทับถมเป็นเวลากว่า 2,000 ปี มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนประมาณ 15 เมตรจากผิวดิน (Cox, 1981) ทั้งนี้ตะกอนบริเวณปากแม่น้ำจะเกิดการสะสมตัวเป็นดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำแผ่กว้างออกไปเรื่อย ๆ เนื่องจากกระแสน้ำที่ไหลจากแม่น้ำมาปะทะกับน้ำทะเลในบริเวณปากอ่าว ทำให้ความเร็วของน้ำใน

แม่น้ำลดลงจึงเกิดการสะสมตัว และดินบริเวณนี้จึงเป็นตะกอนดินเหนียวเม็ดเล็ก นอกจากนี้ในสมัย Holocene มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลอยู่หลายครั้งจากสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง ทำให้มีการรुक้าของน้ำทะเลเกิดขึ้นทั่วโลก ซึ่งอิทธิพลนี้เองทำให้เกิดการสะสมตัวของตะกอนชั้นบน ที่มีเนื้อนุ่มเรียกว่า ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (สิริสัญญา และ วรากร, 2560) โดยตำแหน่งทางหลวง แสดงดังภาพที่ 2-3 และเนื่องจากบึงหนองบอนตั้งอยู่บริเวณบางนา กม.5 ทำให้บริเวณดังกล่าวมีชั้น ดินแบบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2-3 ทางหลวงบางนา-บางปะกง (Cox, 1981)

2.4 สาเหตุการวิบัติของลาดดิน

สาเหตุการวิบัติของลาดดินส่วนใหญ่มีเหตุผลจากธรรมชาติ แต่บางกรณีเกิดจากการกระทำของมนุษย์ โดยสาเหตุการวิบัติของลาดดินมี 2 สาเหตุหลักคือ การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือนในดิน (Increased in Shear Stress) และ การลดลงของกำลังรับแรงเฉือนในดิน (Decreased in Shear Strength) (วรรณวรงค์, 2561)

2.4.1 การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือนในดิน (Increased in Shear Stress)

2.4.1.1 แรงกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำที่ส่วนบนของลาดดิน ส่งผลให้เกิดแรงต้านทานแรงเฉือนของลาดดินเพิ่มขึ้น

2.4.1.2 ค่าแรงดันน้ำในรอยแตกบริเวณส่วนบนของลาดดิน แรงดันน้ำจะทำให้ Shear Stresses เพิ่มขึ้นและทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติ

2.4.1.3 การเพิ่มของน้ำหนักดินเนื่องจากความชื้นในดินเพิ่มขึ้น การแทรกซึมของน้ำในลาดดินทำให้ความชื้นในดินเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลให้น้ำหนักดินมากขึ้น

2.4.1.4 การขุดบริเวณด้านล่างของลาดดิน การขุดดินทำให้ความลาดชันเพิ่มขึ้น เสถียรภาพของดินลดลง

2.4.1.5 การลดลงของระดับน้ำบริเวณฐานของลาดดิน แรงดันน้ำจากภายนอกที่กระทำบริเวณส่วนล่างของลาดดินมีผลต่อเสถียรภาพของดิน หากระดับน้ำลดลงเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงเพราะหน่วยแรงเฉือนในดินเพิ่มขึ้น แต่หากกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแรงดันในโพรงดินลดลงไม่ทันแรงดันน้ำภายนอกจะทำให้ลาดดินมีเสถียรภาพลดลง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Rapid Drawdown

2.4.1.6 การสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว แผ่นดินไหวกระทำต่อลาดดินทั้งความเร่งแนวราบและแนวตั้ง เกิดเป็นวงจรการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในดิน หากการสั่นสะเทือนไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงของดินเปลี่ยนไปเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงเมื่อมีแรงพลศาสตร์มากระทำในทิศทางตรงกันข้าม และหากการสั่นสะเทือนส่งผลให้กำลังรับแรงของดินลดลง ปัญหาเสถียรภาพของดินจะยิ่งรุนแรงขึ้น

2.4.2 การลดลงของกำลังรับแรงเฉือนในดิน (Decreased in Shear Strength)

2.4.2.1 การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในโพรงดิน ส่งผลให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิภาพของดินลดลง และความสามารถในการรับน้ำหนักของดินลดลง

2.4.2.2 รอยแตกบริเวณผิวดิน ที่เกิดจากดินแห้งทำให้เกิดแรงดึงบริเวณผิวบนของลาดดิน

2.4.2.3 การบวมตัวของดิน การบวมตัวของดินส่งผลให้กำลังการรับแรงของดินลดลง โดยส่วนใหญ่เกิดกับดินเหนียวซึ่งมีค่าการระบายน้ำต่ำ

2.4.2.4 การเกิด Slickensides มักเกิดในดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง ซึ่งเป็นผลของการเกิดแรงเฉือนบนระนาบที่แตกต่างกันของการเคลื่อนตัว

2.4.2.5 การสลายตัวของ Clayey Rock Fills ซึ่งวัสดุ Clay Shales และ Clay Stones มักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในงานดินถม แต่เมื่อวัสดุเหล่านี้เปียก เนื่องจากน้ำฝนหรือน้ำใต้ดิน จะเกิดการแยกตัวของดินเหนียวการบวมตัวของดินเหนียวในช่องว่างของวัสดุถมนี้ ส่งผล ทำให้กำลังการรับแรงของชั้นดินถมลดลงและไม่มีเสถียรภาพ

2.4.2.6 การคืบภายใต้แรงกระทำเป็นเวลานาน ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูงจะเสียรูป เมื่อได้รับแรงกระทำเป็นเวลานานซึ่งอาจเกิดการวิบัติได้แม้ว่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าน้อยกว่า Short-Term Strength การคืบนี้จะรุนแรงขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงซ้ำไปซ้ำมา ในหลายเงื่อนไข เช่น Freeze-Thaw และ Wet-Dry

2.4.2.7 การชะล้าง การชะล้างเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำ ในโพรงดิน การชะล้างเกลื่อนจากน้ำในโพรงดินเหนียวทะเล (Marine Clays) ส่งผลให้ดิน มีความไวสูง คือเสื่ยกำลังเมื่อได้รับการกระทบกระเทือน

2.4.2.8 Strain Softening ดินเปราะจะแสดงพฤติกรรมแบบ Strain Softening คือ ภายหลังจากจากจุด Peak บนกราฟ Stress-Strain หน่วยแรงเฉือนจะลดลงเมื่อความเครียด เพิ่มขึ้น ทำให้เกิด Progressive Failure

2.4.2.9 การผุกร่อน หินหรือดินแข็งถูกทำให้กำลังรับแรงลดลงโดยการผุกร่อน ทั้งกระบวนการทางกายภาพ (Physical process) คือการทำให้ดินแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ และกระบวนการทางเคมี (Chemical process) คือการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน

2.4.2.10 Cyclic Loading ภายใ้ Cyclic Loading พันธะระหว่างอนุภาคของเม็ดดินเกิดการแตกหักและค่าแรงดันน้ำในโพรงดินเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ดินสูญเสียกำลัง

2.5 ลักษณะการวิบัติของลาดดิน

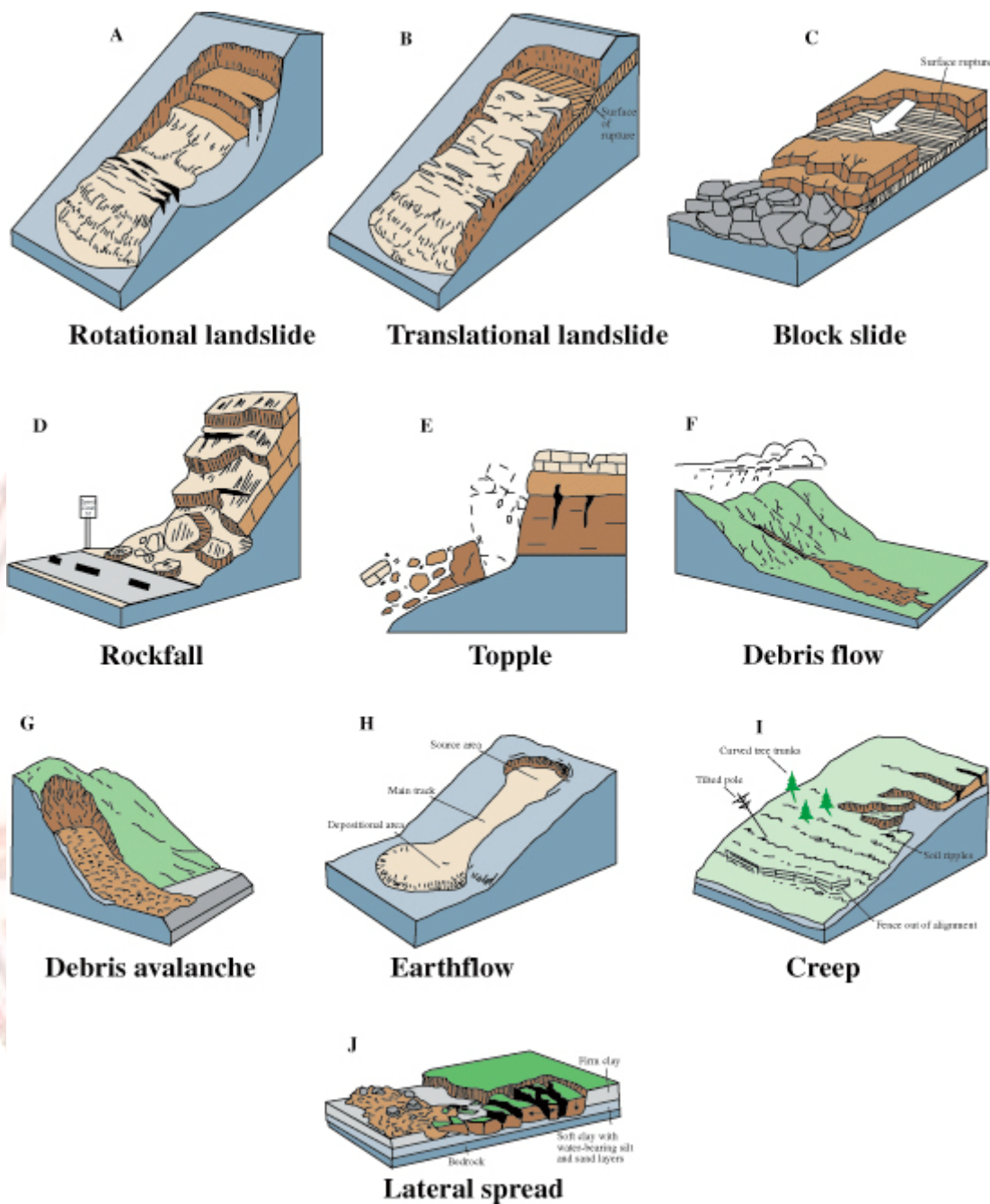
การวิบัติของลาดดินเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น การเคลื่อนที่ของมวลดินซึ่งเกิดจากเหตุการณ์ตามธรรมชาติหรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การขุดดิน การถมดิน ดังแสดงในภาพที่ 2-4 โดยจำแนกประเภทการวิบัติดังนี้ (Varns, 1978)

2.5.1 การร่วงหล่น (Fall) คือการเคลื่อนตัวอย่างกะทันหันของมวลสารทางธรณีวิทยา เช่น หินและก้อนหินซึ่งหลุดออกจากทางลาดชันหรือหน้าผา และมีการตกอย่างอิสระโดยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก การร่วงหล่นนี้มักมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องน้อยหรือไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง

2.5.2 การเคลื่อนหมุน (Rotational Slides) คือการวิบัติแบบที่ดินแตกออกจากลาดดินบริเวณส่วนบนของลาดดินและมีลักษณะเป็นส่วนโค้ง มีการหมุนรอบแกนที่ขนาดก้นพื้นแต่ตรงข้ามกับด้านที่มีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้น มักเกิดกับวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Materials)

2.5.3 การเคลื่อนที่แนวระนาบ (Transitional Slides) คือการวิบัติที่มีการเคลื่อนที่ของดินในแนวระนาบขนาดก้นพื้นผิวดิน มักเกิดจากลาดดินดังกล่าวมีชั้นดินเหนียวอ่อนแทรกตัวอยู่หรือมีความไม่ต่อเนื่องทางธรณีวิทยา เช่น รอยเลื่อน หรือมีรอยต่อระหว่างหินและดิน

2.5.4 การเลื่อนไหล (Flow) คือการวิบัติที่ดินจะเกิดการไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง มีลักษณะคล้ายนาฬิกาทราย มักเกิดกับดินเม็ดละเอียด (Fine - Grained) ดินเหนียว หรือ ทราย และดินดังกล่าวอยู่ภายใต้สภาวะการอิ่มตัวด้วยน้ำ



ภาพที่ 2-4 ประเภทการวิบัติของลาดดิน (Varns, 1978)

2.6 หลักเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน สำหรับการสูบน้ำออกจากบึงกักเก็บน้ำ

ใช้หลักการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ PLAXIS 2D ซึ่งโปรแกรมจะ

แสดงผลด้านการเคลื่อนตัวและเสถียรภาพของลาดดิน กรณีการสูบน้ำออกจากบึงในระดับต่าง ๆ ในการวิเคราะห์จะคำนึงถึงกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยแบบจำลองดังกล่าวใช้กฎการพิบัติแบบ Mohr-Coulomb

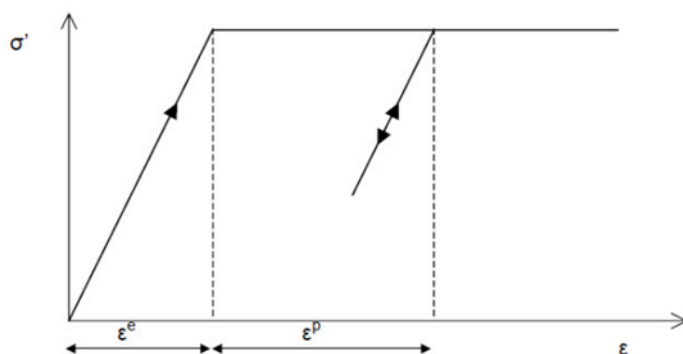
Coulomb (1776) เสนอความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่ระนาบใดๆ ของมวลดินในรูปแบบสมการเชิงเส้นตรงแสดงขอบเขตการพิบัติของมวลดิน ดังสมการที่ 2.1

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

โดยที่ τ = กำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength)
 c = ค่า Cohesion
 σ = หน่วยแรงบนระนาบพิบัติ (Normal Stress on the Failure Plane)
 ϕ = มุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction)

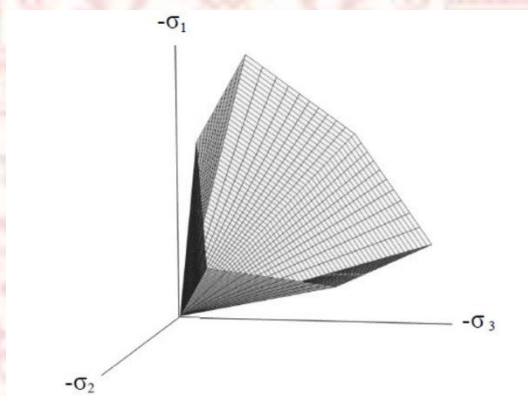
2.7 แบบจำลอง Mohr-Coulomb (Elasto-Plastic)

แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์เป็นการจำลองพฤติกรรมดินแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นและพลาสติกสมบูรณ์ (Linear Elastic Perfectly Plastic) ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ถ้าดินอยู่ในสภาวะอีลาสติก ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่เกิดความเครียดคงค้างเมื่อทำการเพิ่มแรง-ถอนแรง



ภาพที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแบบจำลองมอร์-คูลอมบ์

มีพารามิเตอร์ 2 ตัวที่สำคัญในการกำหนดฟังก์ชันคราก (yield function) คือ มุมแรงเสียดทาน (friction angle, ϕ) และค่าแรงยึดเหนี่ยว (cohesion, c) ลักษณะของฟังก์ชันครากของแบบจำลองมอร์-คูลอมบ์เป็นรูปกรวยหกเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 พื้นผิวคราก (yield surface) แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์

แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์มีพารามิเตอร์ที่สำคัญ 5 ตัว

E : ยั่งโมดูลัส (kN/m^2)

ν : อัตราส่วนปัวซอง

ϕ : มุมแรงเสียดทาน

c : แรงยึดเหนี่ยว (kN/m^2)

φ : มุมไคเลชั่น

ค่า Young' Modulus (E) ของชั้นดินกรุงเทพฯ ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ เปรียบเทียบจากผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของระบบป้องกันดินพังกับการวิเคราะห์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ อ้างอิงจากงานวิจัยของ (วันชัย, 2544) มีค่าดังนี้

- สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay)

Young' Modulus (Eu) = 500 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

- สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay)

Young' Modulus (Eu) = 500 ถึง 600 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

- สำหรับชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay)

Young' Modulus (Eu) = 700 ถึง 1000 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

- สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งมากและดินดาน (Very Stiff Clay to Hard Clay)

Young' Modulus (Eu) = 1000 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

- สำหรับชั้นดินทราย (Sand)

Young' Modulus (Eu) = 200 ถึง 400 เท่าของค่า SPT N-Value (t/m²)

โดยกำหนดขอบเขตของ Yield Surface ด้วยกฎของ Mohr-Coulomb ซึ่งรูปแบบของ ฟังก์ชันจำแนกออกเป็น 3 สมการดังสมการที่ 2.2 ถึง 2.4

$$f_1 = \frac{1}{2}|\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin\phi - C\cos\phi \leq 0 \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

$$f_2 = \frac{1}{2}|\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\phi - C\cos\phi \leq 0 \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

$$f_3 = \frac{1}{2}|\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin\phi - C\cos\phi \leq 0 \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

2.8 พฤติกรรมการทรุดตัวของดิน

คือการยุบตัวในแนวดิ่งของมวลดินจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ดินเกิดการทรุดตัวและอาจส่งผลให้โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนดินเกิดการเคลื่อนตัวเสียหายได้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.8.1 การทรุดตัวทันที (Immediate Settlement) เป็นการทรุดตัวแบบอีลาสติกที่เกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้างหรือภายหลังจากการก่อสร้าง ซึ่งจะเกิดขึ้นและจบลงในระยะเวลาอันสั้น การประมาณค่าการทรุดตัวของดินประเภทนี้สามารถคำนวณได้โดยอาศัยทฤษฎีอีลาสติก (Steinbrenner, 1934; Janbu et. al., 1956; Harr, 1966)

2.8.2 การทรุดตัวขั้นแรกหรือการทรุดตัวอัดตัวคายน้ำ (Primary or Consolidation Settlement) จะเกิดขึ้นจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำภายหลังการทรุดตัวทันที อันเนื่องมาจากมีแรงมากระทำต่อมวลดิน มวลดินจะพยายามจัดเรียงโครงสร้างให้แน่นมากขึ้นโดยการบีบอัดช่องว่างระหว่างเม็ดดินให้เล็กลง ส่งผลให้น้ำในโพรงดินระบายออกไปยังที่ที่มีความดันต่ำกว่าจึงทำให้เกิดการทรุดตัวของมวลดิน กระบวนการนี้ใช้เวลานานในการเกิดและสิ้นสุดลง โดยจะมีระยะเวลานานมากขึ้นหากมวลดินนั้นมีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ เช่น ดินเหนียว เป็นต้น ดังนั้นการทรุดตัวนี้จึงสัมพันธ์กับเวลา

ค่าการทรุดตัวคายน้ำ และอัตราการทรุดตัวคายน้ำของดินเหนียวสามารถคำนวณหาได้โดยอาศัยทฤษฎีอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ (One-dimensional primary Consolidation) ของ Terzaghi มีสมมติฐานดังนี้

2.8.2.1 เป็นดินเหนียวที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอตลอดทั้งชั้น

2.8.2.2 ดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

2.8.2.3 การไหลของน้ำอยู่ในแนวดิ่งเพียงทิศทางเดียว

2.8.2.4 การไหลของน้ำเป็นแบบ Laminar Flow

2.8.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในดินคงที่

2.8.2.6 การทรุดตัวเกิดจากน้ำในโพรงดินไหลออกจากมวลดินเท่านั้น เมื่อดินเป็นวัสดุที่ไม่สามารถกดอัดได้

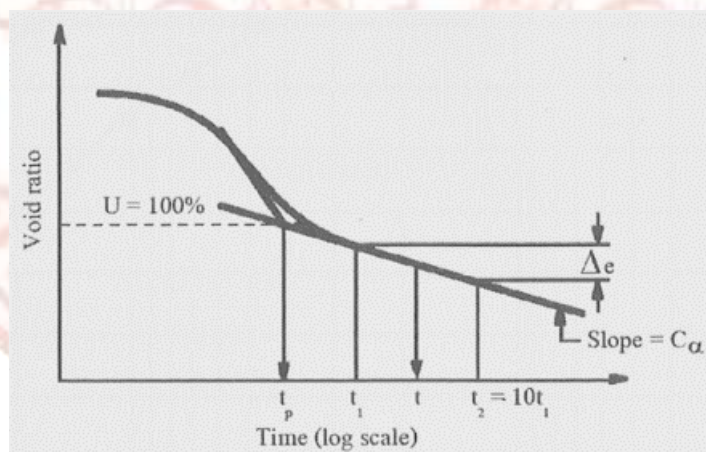
2.8.3 การทรุดตัวขั้นที่สอง (Secondary Settlement) จากทฤษฎีของ Terzaghi กล่าวว่า ถ้าความเค้นประสิทธิผลคงที่ อัตราส่วนช่องว่างของดินเหนียวจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่สำหรับดินบางชนิดหลังจบขั้นตอนการทรุดตัวขั้นต้น ความดันในช่องว่างหายไปด้วยและความเค้นประสิทธิผลคงที่ ดังนั้นทำให้อัตราส่วนช่องว่างจะลดลงไปอีกและการทรุดตัวยังคงเกิดต่อไปเพียงแต่อัตราการเกิดช้าลง สามารถนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราช่องว่างและ Log ของเวลาได้ดังภาพที่ 2-7 โดยการทรุดตัวขั้นที่สองหาได้จากสมการที่ 2.5

$$C'_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad (\text{สมการที่ 2.5})$$

เมื่อ C'_α = สัมประสิทธิ์การทรุดตัวครั้งที่สอง

Δe = อัตราส่วนช่องว่างที่เปลี่ยนไป

t_2, t_1 = เวลา (นาที)



ภาพที่ 2-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราช่องว่างและ Log ของเวลา (วรรณวงศ์, 2558)

2.9 Finite Element Method

ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นมักประกอบไปด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลเฉลยแม่นยำที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้จึงประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ กับบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นหรือกล่าวได้ว่า ผลเฉลยแม่นยำตรงที่ประกอบไปด้วย

ค่าต่าง ๆ จำนวนมากเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้น มาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหด้วยเอลิเมนต์ (Element)

หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบกันให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในปัญหาทางกายภาพคล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง แล้วจึงแก้ทั้งระบบสมการเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น

โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนทั่วไปประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ซึ่งในขั้นตอนนี้ถือเป็นหัวใจของการศึกษาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการสร้างสมการของเอลิเมนต์ให้อยู่ในรูปแบบสมการสามารถทำได้โดยวิธีการโดยตรง วิธีการแปรผัน และวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมเข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวม

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตลงในระบบสมการรวม แล้วจึงแก้สมการรวมเพื่อหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้หาค่าต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียรูป (Displacement) ตามจุดต่อต่างๆ ของโครงสร้างก็จะสามารถหาค่าความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ตามลำดับ (ปราโมทย์, 2560)

จากข้อมูลรูปร่างของลาดดิน ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน และอัตราการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอน จึงได้นำมาวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสารนิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม Plaxis 2D

ในการคำนวณสัดส่วนความปลอดภัย จากการสมมติแนวการวิบัติเป็นส่วนของวงกลม (Brinkgreve and Vermeer, 1998) หลักการโดยสังเขปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการค่อย ๆ ลดกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยตัวคูณรวมดังสมการ 2.6 เรียกวิธีดังกล่าวว่า Phi-c-reduction

$$\Sigma Msf = \frac{\tan\phi_{input}}{\tan\phi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}} \quad (2.6)$$

เมื่อเริ่มคำนวณ ΣMsf ถูกตั้งไว้ที่ 1.0 หลังจากที่กำลังรับแรงเฉือนของดินค่อยๆลดลงจนกระทั่งเกิดการวิบัติแล้วค่าสัดส่วนความปลอดภัยจะคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.7

$$FS = \frac{\text{Available Strength}}{\text{Strength at failure}} = \Sigma Msf \text{ at failure} \quad (2.7)$$

การคำนวณ Factor of Safety ด้วยวิธี Phi-c-reduction นั้น มีเงื่อนไขที่คำนวณหยุดในกรณีที่ ไม่เกิดการวิบัติ โดยการเข้าสู่สภาวะเสถียร (Convergence Criteria) โปรแกรมจะตรวจสอบการเข้าสู่สมดุล (convergence) ของการคำนวณ เมื่อไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญในการเสียรูป(displacement) หรือค่าการเคลื่อนตัว การคำนวณจะหยุดแสดงว่าระบบเข้าสู่สภาวะเสถียร ถ้าในขั้นตอนนี้ยังไม่พบการวิบัติ ค่า ΣMsf ที่คำนวณได้ในขั้นตอนสุดท้ายจะแสดงถึงความเสถียรของดินไม่เกิดการเสียรูปที่มีนัยสำคัญ (No Significant Deformation) เมื่อค่าการเคลื่อนตัวหรือการเสียรูปของดินไม่เพิ่มขึ้นอย่างมากตามการลดค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดิน (เช่น c และ ϕ) การคำนวณจะหยุดโดยสรุปว่าดินมีความเสถียร และไม่เกิดการวิบัติ ในกรณีนี้ ค่า ΣMsf สุดท้ายจะแสดงถึงปัจจัยความปลอดภัยของดินในสภาวะที่ยังคงเสถียร

2.10 PLAXIS Program

เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของดินและหิน โดยใช้วิธีเมทริกซ์จำกัด (FEM) ซอฟต์แวร์นี้ถูกพัฒนาโดย Bentley Systems และเป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ทางธรณีเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก ซึ่ง PLAXIS 2D สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคได้หลากหลายเช่น การออกแบบฐานราก การออกแบบกำแพงกันดิน การออกแบบเขื่อน การออกแบบอุโมงค์ การออกแบบบ่อน้ำ เป็นต้น โดยโปรแกรมนี้มีส่วนสำคัญ 3 ขั้นตอนคือ

2.10.1 Input เป็นส่วนใช้ในการกำหนดลักษณะขอบเขตแบบจำลองของชั้นดิน และคุณสมบัติของรูปร่างของแบบจำลอง (Geometry) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในหัวข้อดังนี้

2.10.1.1 ในการกำหนดขอบเขตชั้นดิน (Soil Layer) โครงสร้างประกอบ (Structures) ขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction Stage) และขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลอง (Boundary Condition)

2.10.1.2. รูปแบบของเอลิเมนต์ (Element) สามารถกำหนดเป็น Geotextiles, Anchors, Interface Element และ Tunnels

2.10.1.3. ชนิดของเอลิเมนต์ (Element) ที่สามารถกำหนดในโปรแกรม PLAXIS ประกอบด้วย 6-node triangular element และ 15 - node triangular element สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาใน 2 มิติ (2D Analysis)

2.10.1.4. แบบจำลองของชั้นดิน (Soil Model) มีทั้งหมด 5 แบบ คือ Linear Elastic, Mohr-Coulomb, Soft-Soil model, Hardening Soil model และ Soft - Soil (creep) model

2.10.2 Calculation มีขั้นตอนการคำนวณที่แยกจากกันชัดเจนระหว่าง Plastic Calculation, Consolidation Analysis และ Update Mesh Analysis ดังนั้นในการวิเคราะห์จะมีขั้นตอนในการคำนวณมากกว่าหนึ่งขั้นตอน ดังต่อไปนี้

2.10.2.1. Automatic Load Stepping สามารถกำหนดลำดับ และเวลาของขั้นตอนการเพิ่มของน้ำหนักกระทำ (Load) ได้โดยอัตโนมัติ

2.10.2.2. Arc-Length Control ในการคำนวณหาค่าน้ำหนักกระทำที่ทำให้โครงสร้างเกิดการพิบัติ (Collapse Load) และกลไกของการพิบัติ (Failure Mechanisms) โปรแกรม PLAXIS จะใช้หลักการ Arc-Length Control ซึ่งเป็นหลักการทาง Mechanical Engineering เข้ามาใช้ในการควบคุมและตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์

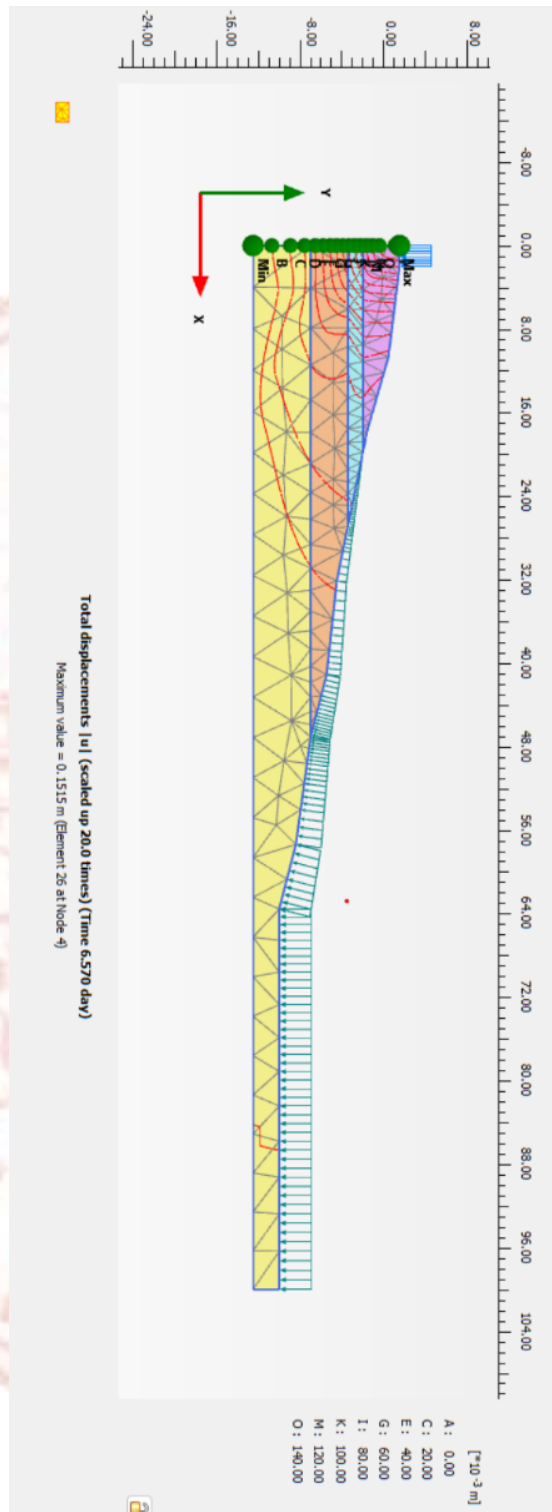
2.10.2.3. Stage Construction สามารถที่จะจำลองลำดับขั้นตอนของการก่อสร้าง เช่น สามารถจำลองลำดับของงานขุด (Excavation) และงานถมได้ใกล้เคียงกับลำดับขั้นตอนของการก่อสร้างจริงที่เกิดขึ้นในสนาม

2.10.2.4. Safety Factor โปรแกรมมีหลักการพิเศษที่เรียกว่า Phi – c- Reduction สามารถใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของการก่อสร้างได้โดยตรงจากวิธี Finite Element

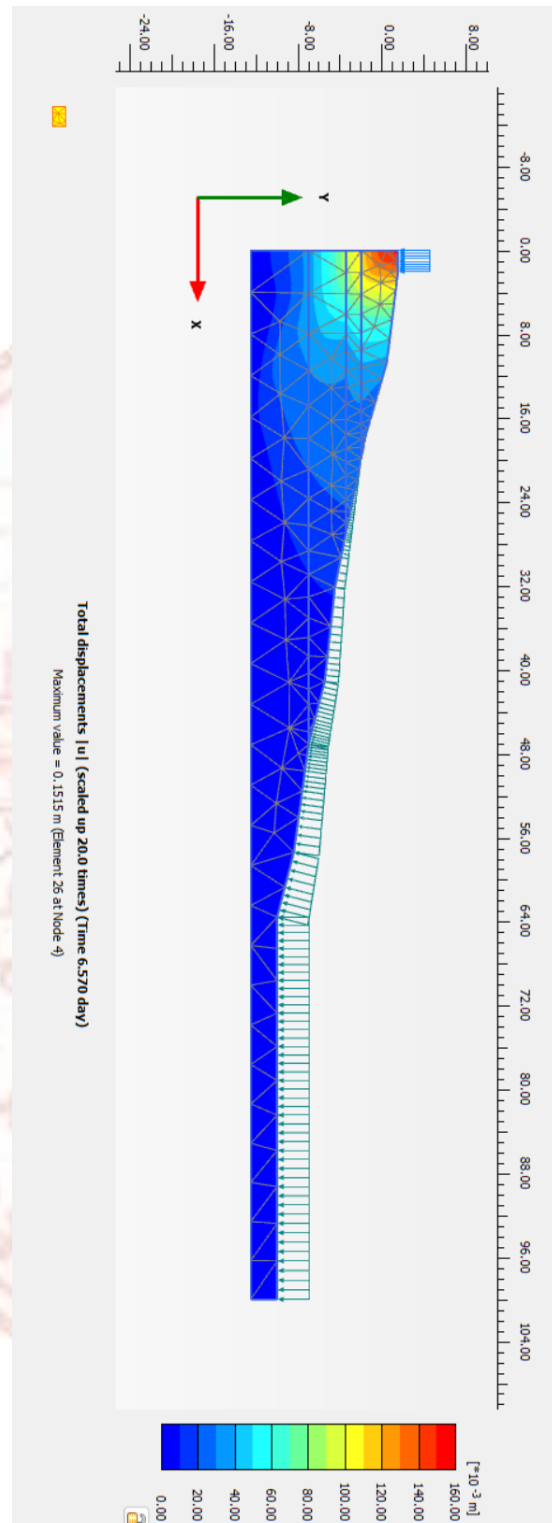
2.10.3 Output

ใช้สรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการป้อนข้อมูลใน Input และผลการคำนวณจาก Calculation รูปแบบการแสดงผลของโปรแกรม PLAXIS มีดังนี้

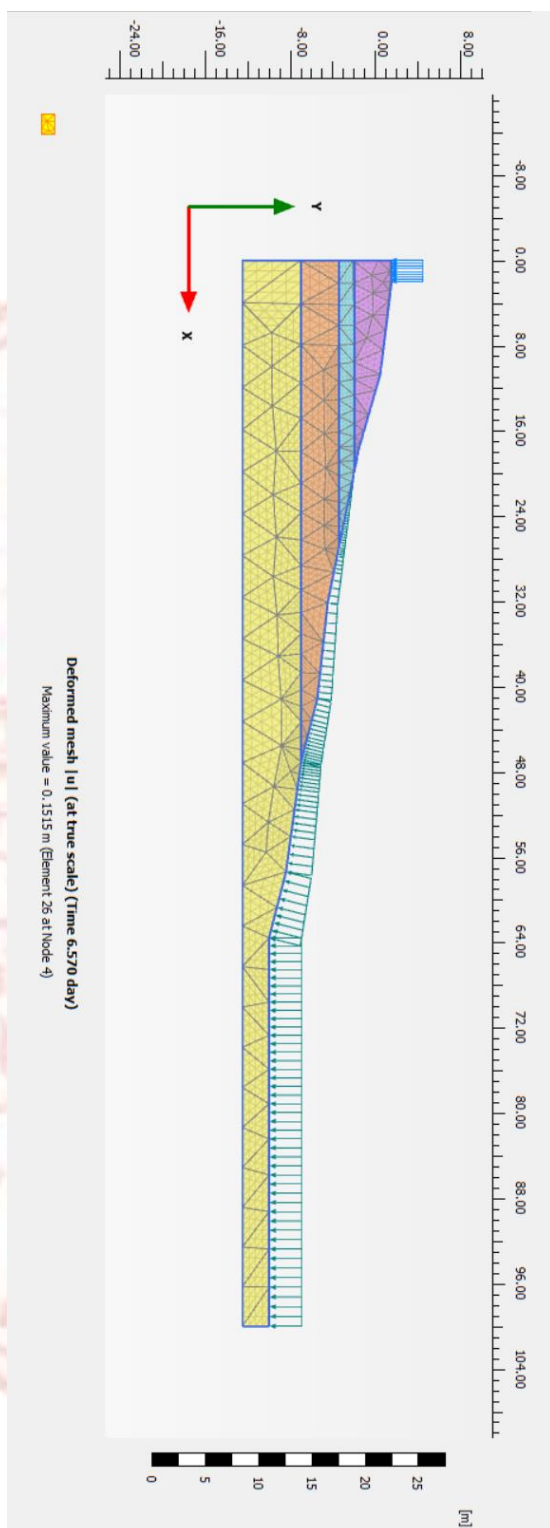
2.10.3.1 แสดงผลในรูปของ Contour Line, Contour Shading, Deformed Mesh, Displacement Arrows, Cross-Sections ดังแสดงในภาพที่ 2-8 ถึง 2-12 นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันพิเศษที่สามารถแสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) เพื่อใช้ในการติดตามและตรวจสอบพฤติกรรมของชั้นดินที่เกิดจากการก่อสร้างในแต่ละขั้นตอนได้



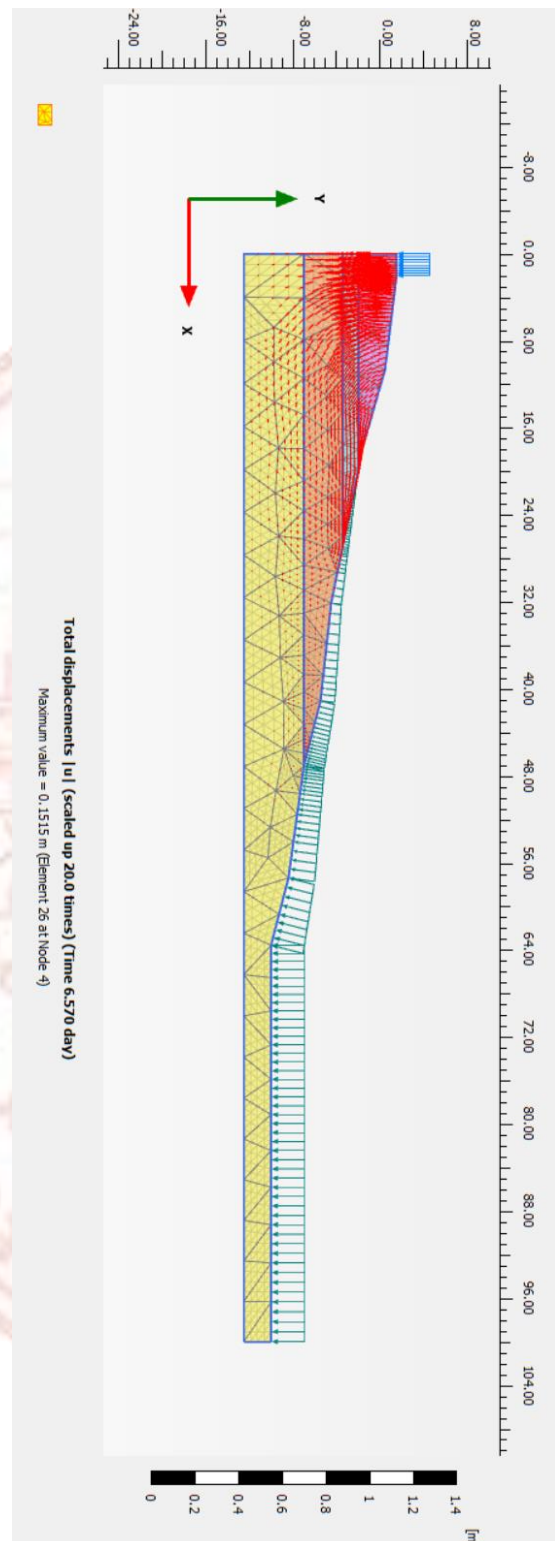
ภาพที่ 2-8 การแสดงผลในรูปของ Contour Line



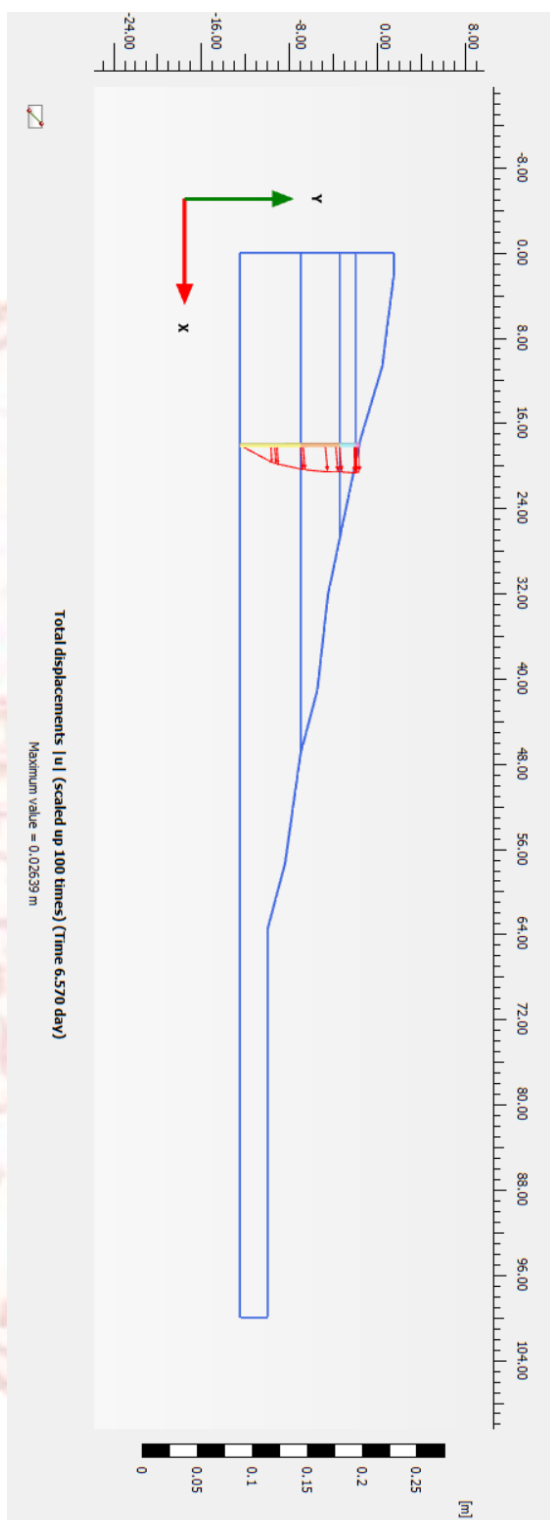
ภาพที่ 2- 9 การแสดงผลในรูปของ Contour Shading



ภาพที่ 2- 10 การแสดงผลในรูปของ Deformed Mesh



ภาพที่ 2- 11 การแสดงผลในรูปของ Displacement Arrows



ภาพที่ 2- 12 การแสดงผลในรูปของ Cross-Sections

2.10.3.2 รูปแบบตารางผลการคำนวณที่ได้สามารถแสดงค่าในรูปแบบของตาราง และสามารถนำค่าในตารางที่ได้จากโปรแกรมนี้อิงเชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรมอื่น เช่น Microsoft Excel ดังแสดงในภาพที่ 2-13

Soil element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	u_x ▲ [10 ⁻³ m]	u_y ▲ [10 ⁻³ m]	u ▲ [10 ⁻³ m]
Clus. 1 - El. 1 2 Soil_1_1	143	1	0.000	-2.000	0.000	-113.181	113.181
	175	2	2.150	-2.000	14.045	-105.858	106.786
	74	3	1.397	-0.241	7.715	-134.428	134.649
	138	4	1.075	-2.000	7.190	-111.385	111.617
	60	5	1.773	-1.121	13.730	-122.525	123.292
	54	6	0.698	-1.121	6.088	-128.026	128.171
	137	7	0.537	-2.000	3.586	-112.753	112.810
	139	8	1.612	-2.000	10.709	-109.073	109.598
	59	9	1.962	-1.560	14.493	-114.631	115.544
	61	10	1.585	-0.681	11.464	-129.128	129.636
	55	11	1.048	-0.681	8.743	-133.283	133.569
	53	12	0.349	-1.560	2.700	-120.967	120.997
	56	13	0.887	-1.560	6.790	-119.918	120.111
	57	14	1.424	-1.560	10.781	-117.796	118.288
	58	15	1.236	-1.121	10.238	-125.973	126.388

ภาพที่ 2- 13 การแสดงผลในรูปแบบของตาราง

2.11 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Francisco et.al (2011) ได้ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินตาม Eurocode7(EN7) ในรูปของ อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S) เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์หระหวางวิธี ที่นำเสนอโดย Fellenius และ Bishop (Rigid – Plastic Method) กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า วิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันแต่การวิเคราะห์แบบ FEM ให้ผลดีกว่าในแง่ของการ แสดงให้ทราบถึงพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของลาดดินและการกระจายหน่วยแรงในลาดดินได้อย่าง ชัดเจน

วรารกร และคณะ (2542) ได้อธิบายไว้ว่า กรณีลาดดินธรรมชาติหรือลาดเขาที่มีการตัดถนน ผ่าน หรือลาดบ่อที่มีการขุดเพื่อกักเก็บน้ำ อาจไม่เกิดการเลื่อนถล่มในระหว่างการก่อสร้างหรือในช่วง ที่มีความชื้นในมวลดินที่ต่ำ เพราะเมื่อมวลดินยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ความชื้นที่อยู่ในมวลดินจะเกิด แรงตึงผิวที่ช่วยยึดเกาะระหว่างมวลดินทำให้มวลดินแข็งแรงขึ้น เมื่อลาดดินเผชิญการเปลี่ยนแปลง ของสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป เช่นเมื่อฤดูฝนมีฝนตกเป็นปริมาณสูงทำให้ระดับน้ำใต้ดิน ดินมีความชื้นมากขึ้น ทำให้แรงตึงผิวในดินถูกทำลาย ค่าความดันน้ำในมวลดินเป็นบวก กำลัง ประสิทธิภาพของดินจะลดลงจนถึงจุดวิกฤติที่เกิดการพังทลายของลาดดินได้

มลชน และวีรยา (2563) ได้ศึกษาอิทธิพลของการลดระดับน้ำต่อเสถียรภาพความลาดของ เชื้อนดินแบบแบ่งส่วนด้วยวิธีสมมูลจำกัด พบว่าการลดลงของระดับน้ำในเขื่อนนั้นส่งผลต่อ เสถียรภาพความลาดชันของเขื่อนโดยเฉพาะด้านเหนือน้ำ เนื่องจากระดับน้ำที่ลดลงนั้น ทำให้แรงดัน น้ำในเขื่อนด้านเหนือน้ำลดลง ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของลาดดินบริเวณดังกล่าว และการลดระดับน้ำ ที่มากกว่า $\frac{1}{4}$ เท่าเมื่อเทียบกับความต่างของระดับกักเก็บปกติและระดับกักเก็บต่ำสุดนั้นให้ผลการ วิเคราะห์ที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยระหว่าง 1.30 – 1.00

พิทักษ์ชน และวีรยา (2559) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดิน ด้วยวิธีสมมูลจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าแตกต่างกันเมื่อมี การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ โดยการคำนวณด้วยวิธีสมมูลจำกัดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยคงที่ ในช่วงที่ระดับน้ำมีระดับต่ำกว่า 2.00 เมตร และมีค่าลดลงเมื่อมีระดับน้ำสูงกว่า 2.00 เมตร ขึ้นไป แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ลดลงตั้งแต่เริ่มมีระดับน้ำ สูงขึ้น 0.50 เมตร และค่อย ๆ ลดลงตามระดับน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าระดับน้ำมีผลต่อการคำนวณ

ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า สาเหตุเป็นเพราะการแบ่งแบบ 15 Node Triangular Element จะมีความละเอียดและสอดคล้องกับธรรมชาติมากกว่าวิธีสมมูลจำกัดที่เป็นเพียงการแบ่งชิ้นส่วนเพียงระนาบเดียว

Mohamad et.al (2019) ได้ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินของ MRSM Bentong, Pahang ด้วยวิธีสมมูลจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม SLOPE/W และ PLAXIS 2D ในการศึกษา เมื่อทำการศึกษพบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ได้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับวิธีสมมูลจำกัด แต่การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พิสูจน์แล้วว่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์รูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อน เช่นที่พบในประเทศมาเลเซีย

Sherard et al. (1963) จากหนังสือเรื่องเขื่อนดินและเขื่อนหินถม กล่าวว่า การพังทลายของลาดดินที่เกิดจากการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว จากการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่ลาดดินจะพังทลายเมื่อลดระดับน้ำจนถึงครึ่งหนึ่งของระดับกักเก็บน้ำต่ำสุด เช่น กรณีเขื่อน San Luis ใน California (ICOLD, 1980) เป็นเขื่อนดินที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก สูง 100 เมตร ยาว 5,500 เมตร เขื่อนเกิดการพังทลายของลาดดินเนื่องจากการลดระดับน้ำแบบ Rapid Drawdown ซึ่งทำการลดระดับน้ำด้วยอัตรา 0.30 เมตร/วัน และทำการลดระดับน้ำลงถึง 55 เมตร ส่งผลให้ดินเกิดการเสียเสถียรภาพ

กนกกร กันณรงค์ (2558) ได้ทำการศึกษาเรื่องการทรุดตัวชั้นดินเหนียวกรณีไม่มีและมีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบระบายน้ำตามแนวตึง บริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ โดยทำการศึกษด้วยโปรแกรม Plaxis แบบ 2 มิติ ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในแนวตึง (kv) สำหรับดินเหนียวอ่อนที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 2 ตัน/ม² เท่ากับ 5.5×10^{-5} เมตร/วัน และค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในแนวราบ (kh) เท่ากับ 1.4×10^{-5} เมตร/วัน

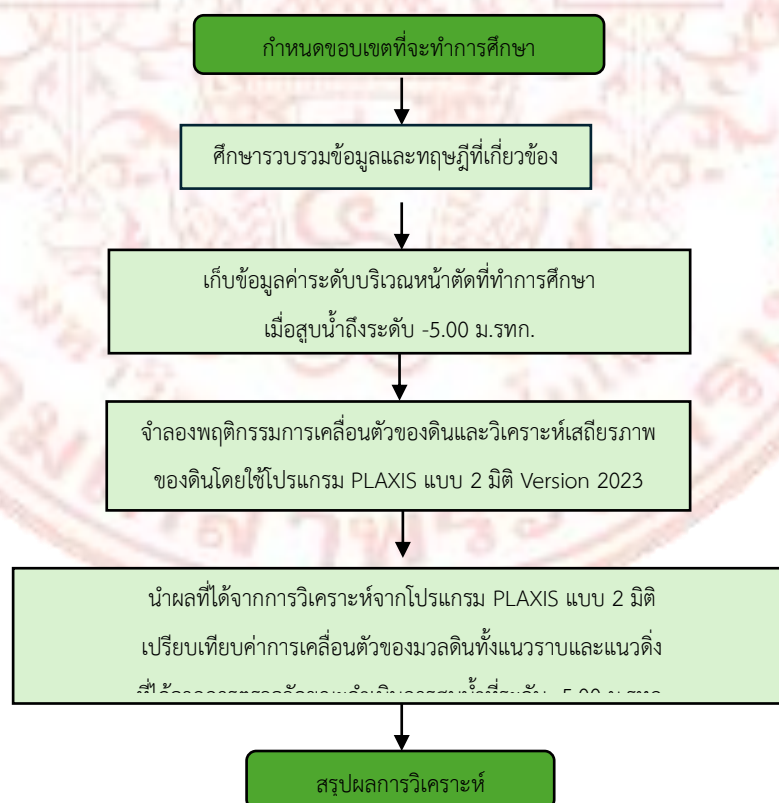
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

สารนิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของลาดดินของแก้มลิงบึงหนองบอน ขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ของโปรแกรม PLAXIS แบบ 2D เป็นการศึกษาวิเคราะห์โดยการจำลองพฤติกรรมดินด้วยแบบจำลองของ Mohr-Coulomb และนำผลวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดขณะดำเนินการสูบน้ำถึงระดับ -7.00 ม.รทก.

3.1 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการวิจัยสามารถสรุปเป็นแผนภาพงานวิจัยดังภาพที่ 3-1

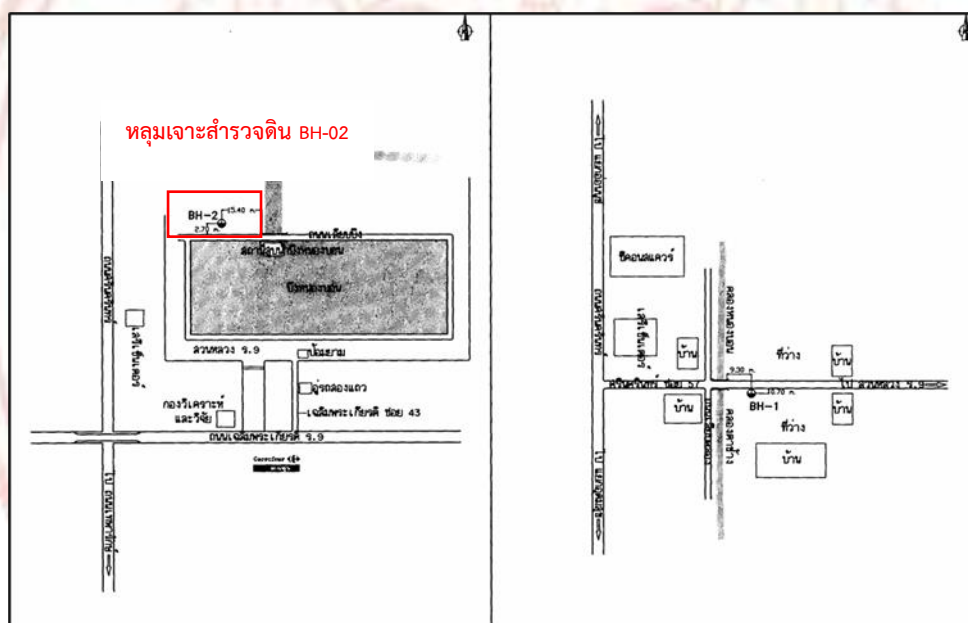


ภาพที่ 3-1 แผนภาพวิธีดำเนินการวิจัย

3.2 ข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของลาดดิน

3.2.1 ข้อมูลชั้นดินบริเวณแก้มลิงบึงหนองบอน

บริเวณแก้มลิงบึงหนองบอนจะมีการก่อสร้างโครงการอุโมงค์ระบายน้ำจากบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา จึงมีการเจาะสำรวจดินบริเวณแนวโครงการ ซึ่งบริเวณแก้มลิงบึงหนองบอน มีการเจาะสำรวจดินจำนวน 1 หลุม คือหลุมเจาะ BH-2 ดำเนินการเจาะสำรวจโดย บริษัท เอส ที เอส อินสตรูเมนต์ จำกัด เมื่อวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2553 ความลึกที่เจาะสำรวจเท่ากับ 40 เมตรจากระดับผิวดินขณะสำรวจ ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ BH-2 แสดงดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ตำแหน่งเจาะสำรวจชั้นดินหลุมเจาะ BH-2

การเจาะสำรวจได้กระทำโดยใช้เครื่องเจาะชนิด Rotary ดิตรบบ Hydraulic เพื่อใช้กดกระบอกตัวอย่างแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample) วิธีการเจาะในช่วง 1-2 เมตรแรก ใช้วิธีการเจาะโดยใช้ Power Auger และที่ระดับความลึกลงไปใช้วิธีเจาะแบบ Wash Boring จนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะสำรวจ ขณะทำการเจาะได้ใช้ปลอกเหล็ก (Casing) และน้ำพาสต Bentonite ใส่เพื่อป้องกันหลุมพังทลาย

การเก็บตัวอย่างดิน ได้เก็บตัวอย่างแบบคงสภาพโดยใช้กระบอกบางขนาด 3 นิ้ว ยาว 50 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง จากนั้นเปลี่ยนเป็นเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) ในชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทราย โดยใช้กระบอกผ่าซีกแบบมาตรฐาน พร้อมกับทำการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) ขณะทำการเก็บตัวอย่างทั้ง 2 แบบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 1587 และ D 1586 ตามลำดับ

การทดสอบ SPT กระทำโดยการตอกกระบอกผ่าซีกมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 34.9 มิลลิเมตร (1½ นิ้ว) ภายนอก 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) เพื่อเก็บตัวอย่าง การตอกใช้ตุ้มหนัก 63.5 กิโลกรัม ยกสูง 76 เซนติเมตร นับจำนวนครั้งที่ตอกซึ่งทำให้กระบอกผ่าจมลงไปในดินได้ 45 เซนติเมตร ถือจำนวนครั้งที่ตอกในระยะ 30 เซนติเมตร หลังเป็นค่า SPT N – Value มีหน่วยเป็น ครั้ง/30เซนติเมตร ซึ่งค่านี้จะบอกความแน่นหรือกำลังของดินได้อย่างคร่าว ๆ

ตัวอย่างดินที่ได้จากสนามจะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของดินต่อไป โดยมี การทดสอบดังนี้

- ความชื้นในมวลดินตามธรรมชาติ (Natural Moisture Content)
- ความหนาแน่นเปียก (Wet Density) ของตัวอย่างดินเหนียว
- ทดสอบ Atterberg Limits เฉพาะบางตัวอย่างดินเหนียว
- ทดสอบ Sieve Analysis เฉพาะบางตัวอย่างดินทราย
- ทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนแบบอันเดรน (Undrain) โดยการทำให้ Unconfined Compression Test เฉพาะบางตัวอย่างดินเหนียว
- ทดสอบ Consolidation Tests เฉพาะบางตัวอย่างดินเหนียว

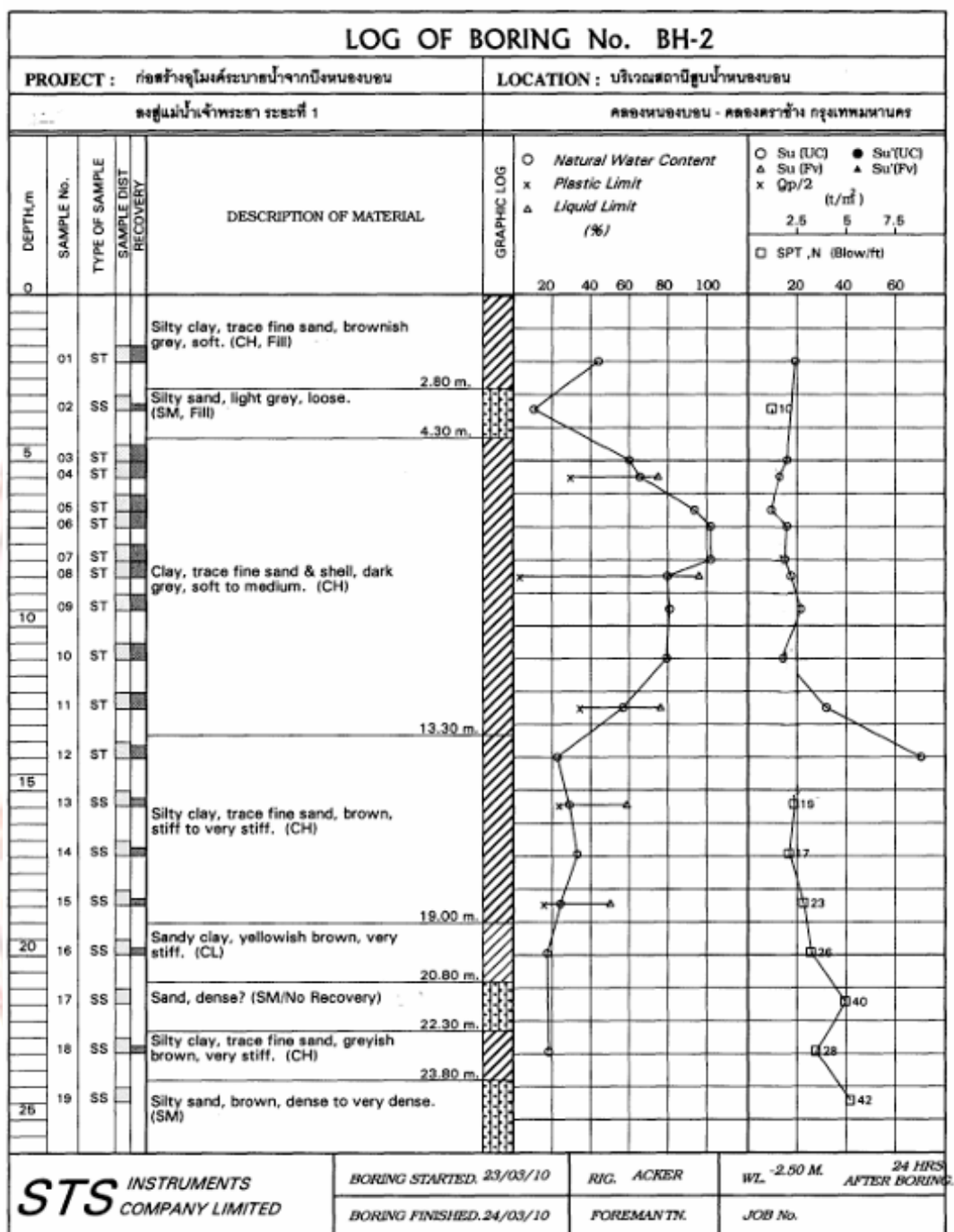
จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปลักษณะชั้นดินที่ได้จากการเจาะสำรวจหลุม เจาะ BH-2 ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ลักษณะชั้นดินที่ได้จากการเจาะสำรวจหลุม BH-2

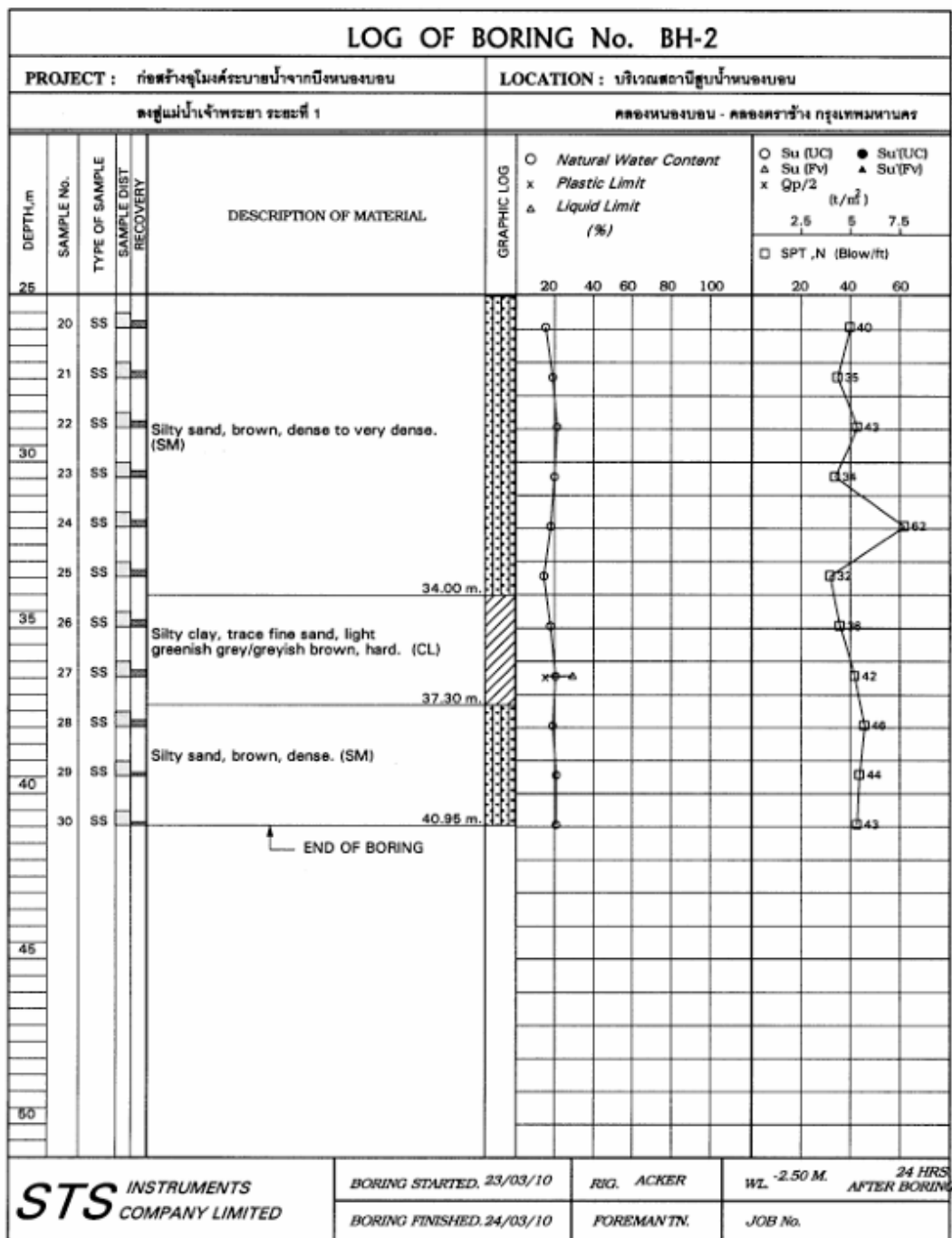
ความลึก (เมตร)	ชนิดดิน	S_u (T/m ²)	ค่า SPT- N (ครั้ง/ฟุต)
0.00 - 2.00	ดินและทรายถม	2.10	-
2.00 - 3.75	ดินเหนียวอ่อนปนซิลต์	2.10	-
3.75 - 7.00	ดินเหนียวอ่อนปานกลาง	1.30	-
7.00 - 12.00	ดินเหนียวอ่อนปานกลางถึงแข็ง	2.28	-
12.00 - 19.00	ดินเหนียวปนซิลต์แข็งถึงแข็งมาก	8.03	-

ซึ่งจากการเจาะสำรวจพบว่ามีลักษณะชั้นดินที่พบแบ่งเป็น 5 กลุ่ม มีคุณสมบัติและลักษณะชั้นดินดังแสดงในภาพที่ 3-3 สรุปได้ดังนี้

1. ความลึกตั้งแต่ 0.00 ถึง 2.00 เมตร พบทรายถม
2. ความลึกตั้งแต่ 2.00 ถึง 3.75 เมตร พบดินเหนียวอ่อน สีเทาเข้ม ที่ความลึกนี้มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) 2.10 ตัน/ม²
3. ความลึกตั้งแต่ 3.75 ถึง 7.00 เมตร พบดินเหนียวอ่อนปานกลาง สีเทาเข้ม มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) 1.30 ตัน/ม²
4. ความลึกตั้งแต่ 7.00 ถึง 12.00 พบดินเหนียวอ่อนปานกลางถึงแข็ง สีเทาเข้ม มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) 2.28 ตัน/ม²
5. ความลึกตั้งแต่ 12.00 ถึง 19.00 เมตร พบดินเหนียวปนซิลต์แข็งถึงแข็งมาก มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) 8.03 ตัน/ม²



ภาพที่ 3-3 ผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-2



ภาพที่ 3-3 ผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-2 (ต่อ)

3.2.2 ความสามารถกักเก็บน้ำภายในแก้มลิงบึงหนองบอนที่ระดับน้ำต่างๆ

บึงหนองบอนเป็นแก้มลิงที่มีความลึกประมาณ 10 เมตร มีความสามารถในการจุน้ำ 7,000,000 ลูกบาศก์เมตร โดยแบ่งเป็นระดับระดับกักเก็บต่ำสุด (Dead Storage) 2,000,000 ลูกบาศก์เมตร และปริมาณน้ำที่สามารถพร่องได้ 5,000,000 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งในการจำลองการพร่องระดับน้ำในบึงหนองบอนจะทำการพร่องน้ำในส่วนของปริมาณน้ำที่สามารถพร่องได้เท่านั้น โดยระดับน้ำกักเก็บสูงสุดของบึงหนองบอนเท่ากับ 0.00 ม.รทก. และเมื่อคำนวณความจุของบึงหนองบอนตามพื้นที่หน้าตัด พบว่าที่ระดับ -7.00 ม.รทก. จะเป็นระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดที่สามารถพร่องน้ำได้ และสามารถสรุปความจุในแต่ละระดับน้ำได้ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ความจุสะสมในแก้มลิงบึงหนองบอนที่ระดับน้ำต่างๆ

ระดับน้ำ (ม.รทก.)	ความจุน้ำ (ลบ.ม.)	ความจุสะสม (ลบ.ม.)
0.00	208,353	5,277,533
-0.50	206,584	4,861,712
-1.00	204,817	4,449,428
-1.50	196,004	4,040,677
-2.00	194,248	3,649,547
-2.50	192,493	3,261,930
-3.00	190,741	2,877,820
-3.50	188,991	2,497,214
-4.00	187,243	2,120,106
-4.50	178,542	1,746,492
-5.00	176,809	1,390,275
-5.50	175,079	1,037,522
-6.00	173,351	688,228
-6.50	171,626	342,389
-7.00	0	0

3.2.3 อัตราการพร่องน้ำลงอุโมงค์บริเวณอาคารรับน้ำบึงหนองบอน

เนื่องจากอาคารรับน้ำสามารถระบายน้ำลงสู่อุโมงค์ได้ไม่น้อยกว่า 60 ลบ.ม./วินาที สามารถคำนวณอัตราการสูบน้ำที่ระดับต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 อัตราการสูบน้ำที่ระดับต่าง ๆ

ระดับน้ำ (ม.รทก.)	ความจุสะสม (ลบ.ม.)	อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./วินาที)	เวลาที่ใช้ในสูบน้ำ (Day)
0.00	5,277,533	60	0.00
-1.00	4,449,428	60	0.16
-2.00	3,649,547	60	0.15
-3.00	2,877,820	60	0.15
-4.00	2,120,106	60	0.15
-5.00	1,390,275	60	0.14
-6.00	688,228	60	0.14
-7.00	Daed Storage	0	-

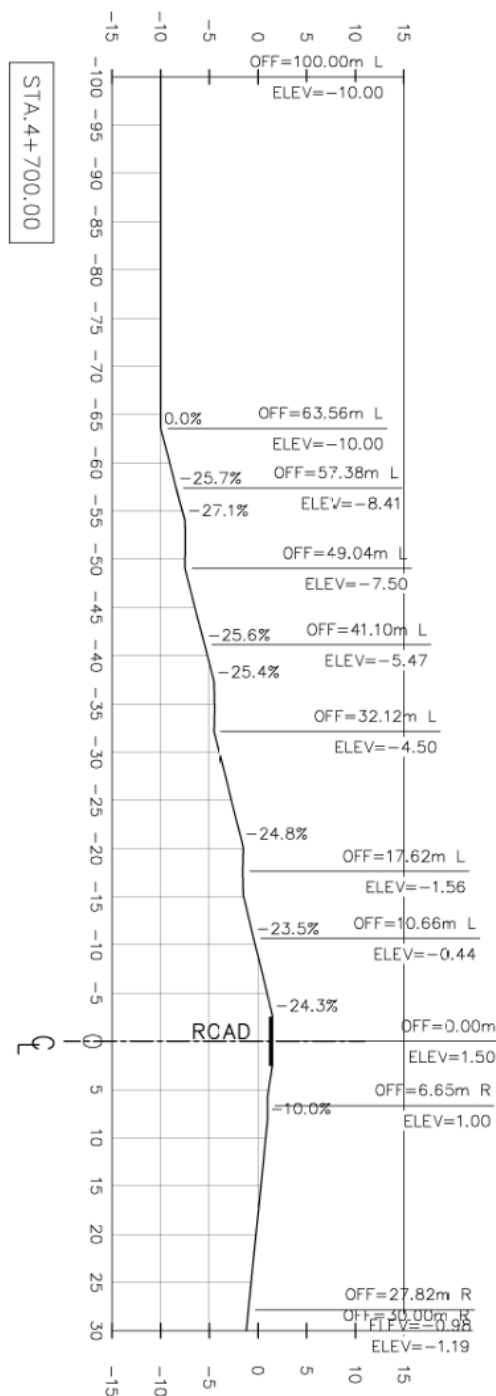
โดยจะทำการพร่องน้ำด้วยอัตราสูบน้ำ 60 ลบ.ม./วินาที โดยจะทำการสูบน้ำลงครั้งละ 1 เมตร สลับกับการหยุดสูบน้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เนื่องมาจากในข้อกำหนดเฉพาะงานของโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองบอนนั้น กำหนดให้เครื่องสูบน้ำแต่ละเครื่องจะทำงานได้ไม่เกิน 2,500 ชั่วโมง/ปี เมื่อเฉลี่ยแล้ว 1 วันจะสามารถเปิดเครื่องสูบน้ำได้เป็นเวลาไม่เกิน 7 ชั่วโมง เป็นสาเหตุให้ต้องกำหนดเงื่อนไขในการเปิดเครื่องสูบน้ำให้เป็นเช่นนี้ และเพื่อป้องกันการเกิด Rapid Drawdown ที่เกิดจากการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วภายในบึงหนองบอนด้วย

3.2.4 ภาพตัดขวางของจุดที่ต้องการวิเคราะห์

ในสารนิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาลาดดินของแก้มลิงบึงหนองบอนจำนวน 4 Sections ได้แก่ Sta.4+700 , Sta.5+050 , Sta.5+150 และ Sta. 5+450 โดยเลือกจากตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุดในกรณีที่เกิดระดับน้ำลงจนถึงระดับ -7.00 ม.รทก. แสดงดังภาพที่ 3-4 โดยรายละเอียดของหน้าตัดที่ได้ทำการศึกษาแสดงในภาพที่ 3-5 ถึง 3-12



ภาพที่ 3-4 ตำแหน่งหน้าตัดที่เลือกวิเคราะห์

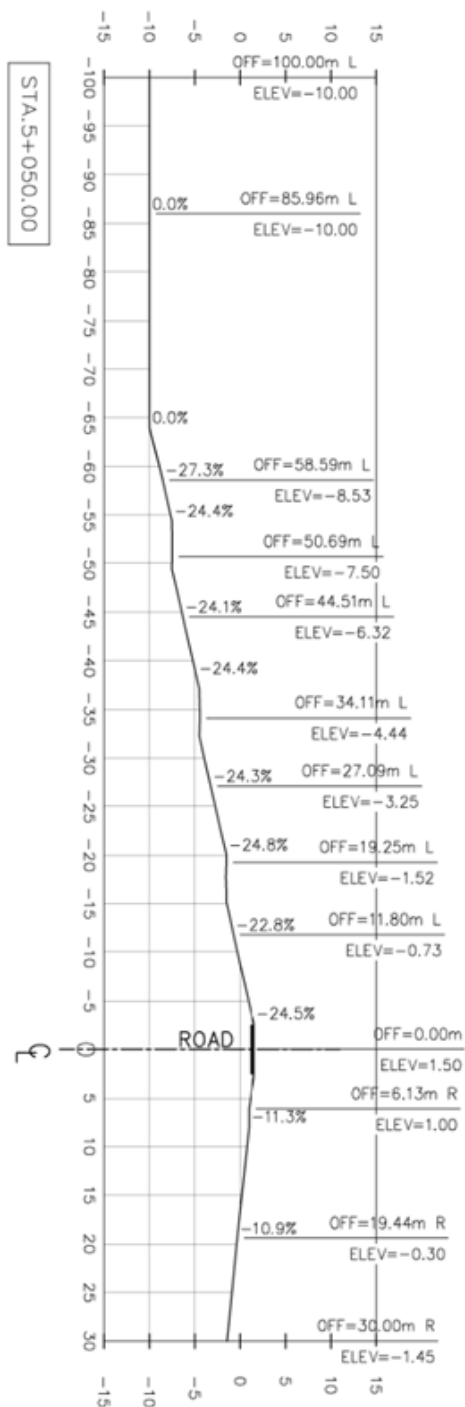


ภาพที่ 3-5 รายละเอียดหน้าตัดที่เลือกศึกษา Section 1. Sta.4+700

จากภาพที่ 3-5 เป็นภาพตัดที่บริเวณ Sta.4+700 โดยระยะทางจากจุด Center Line ถึงบริเวณที่มีความลึกสูงสุดของบึงหนองบอนมีความยาวเท่ากับ 100 เมตร หลังจากนั้นจะมีคันดินทอดตัวเข้ามาด้านในบึงหนองบอนทำให้มี Slope ของดินเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-6 มีถนนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ซึ่งเป็นสาเหตุที่ผลเจาะสำรวจดินที่ระดับ 0.00 – 2.80 เมตร พบวัสดุถม และมีความลึกของลาดดินสูงสุดเท่ากับ 10 เมตร



ภาพที่ 3-6 คันดินภายในบึงหนองบอนบริเวณ Sta.4+700

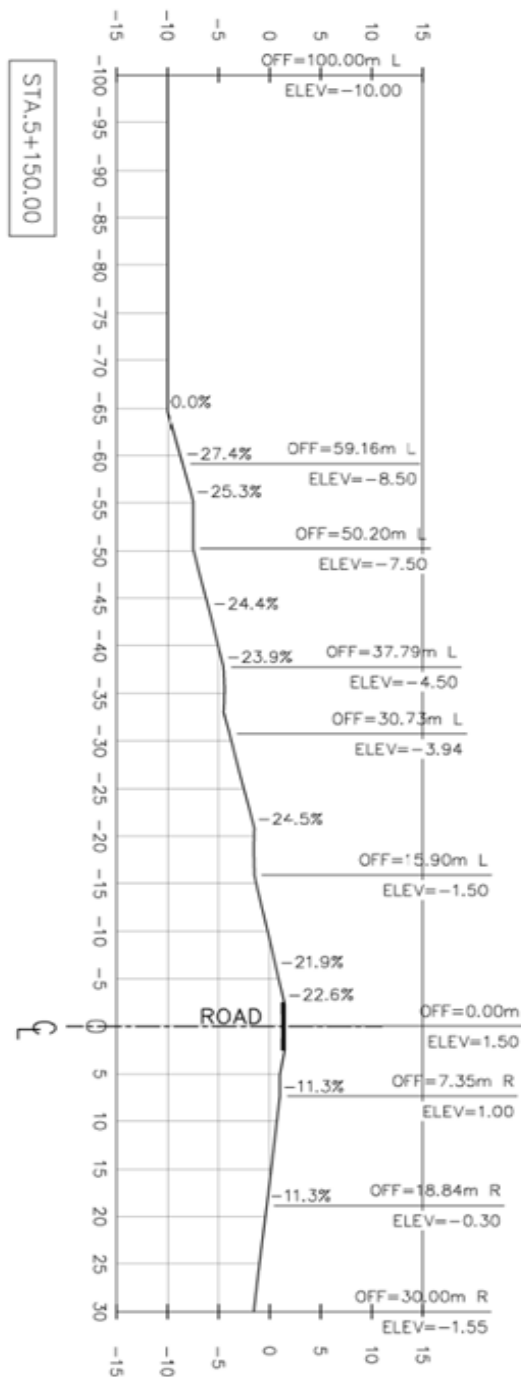


ภาพที่ 3-7 รายละเอียดหน้าตัดที่เลือกศึกษา Sta.5+050

จากภาพที่ 3-7 เป็นภาพตัดที่บริเวณ Sta.5+050 โดยระยะทางจากจุด Center Line ถึงบริเวณที่มีความลึกสูงสุดของบึงหนองบอนมีความยาวเท่ากับ 100 เมตร หลังจากนั้นจะมีคันดินทอดตัวเข้ามาด้านในบึงหนองบอนทำให้มี Slope ของดินเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-8 มีถนนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ซึ่งเป็นสาเหตุที่ผลเจาะสำรวจดินที่ระดับ 0.00 – 2.80 เมตร พบวัสดุถม และมีความลึกของลาดดินสูงสุดเท่ากับ 10 เมตร



ภาพที่ 3-8 คันดินภายในบึงหนองบอนบริเวณ Sta.5+050

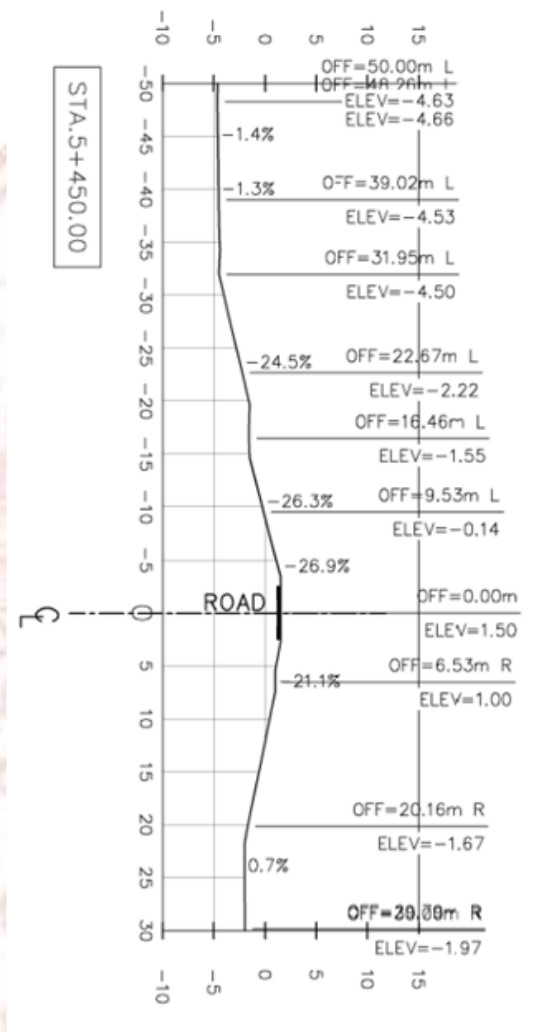


ภาพที่ 3-9 รายละเอียดหน้าตัดที่เลือกศึกษา Sta.5+150

จากภาพที่ 3-9 เป็นภาพตัดที่บริเวณ Sta.5+150 โดยระยะทางจากจุด Center Line ถึงบริเวณที่มีความลึกสูงสุดของบึงหนองบอนมีความยาวเท่ากับ 100 เมตร หลังจากนั้นจะมีคันดินทอดตัวเข้ามาด้านในบึงหนองบอนทำให้มี Slope ของดินเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-10 มีถนนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ซึ่งเป็นสาเหตุที่ผลเจาะสำรวจดินที่ระดับ 0.00 – 2.80 เมตร พบวัสดุถม และมีความลึกของลาดดินสูงสุดเท่ากับ 10 เมตร



ภาพที่ 3-10 คันดินภายในบึงหนองบอนบริเวณ Sta.5+150



ภาพที่ 3-11 รายละเอียดหน้าตัดที่เลือกศึกษา Sta.5+400

จากภาพที่ 3-11 เป็นภาพตัดที่บริเวณ Sta.5+050 โดยระยะทางจากจุด Center Line ถึงบริเวณที่มีความลึกสูงสุดของบึงหนองบอนมีความยาวเท่ากับ 50 เมตร สาเหตุที่บริเวณนี้มีระยะทางสั้นที่สุดเนื่องจากมีคันดินที่ทอดตัวเข้ามาด้านในบึงหนองบอน ดังแสดงในภาพที่ 3-12 และมีถนนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ซึ่งเป็นสาเหตุที่ผลเจาะสำรวจดินที่ระดับ 0.00 – 2.80 เมตร พบวัสดุถม และมีความลึกลาดดินสูงสุดเท่ากับ 4.66 เมตร



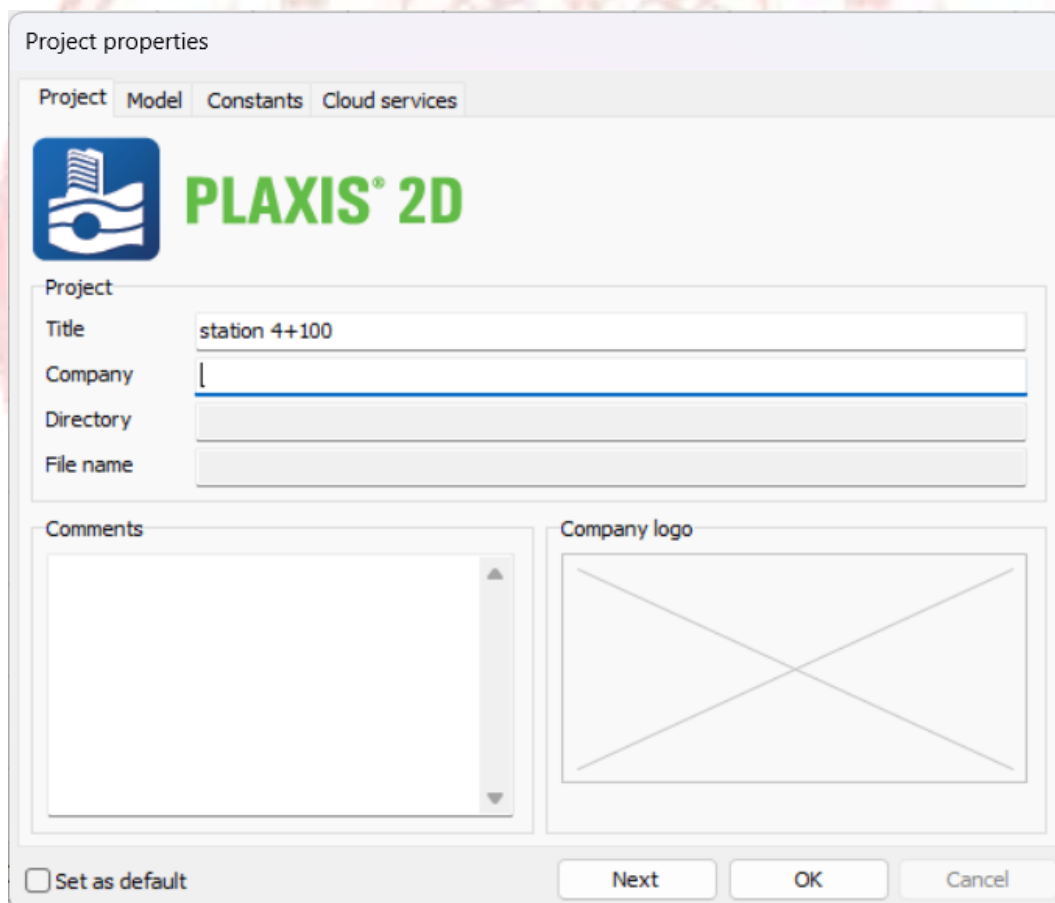
ภาพที่ 3-12 คันดินภายในบึงหนองบอนบริเวณ Sta.5+450

3.3 การกรอกค่า INPUT ข้อมูลที่ต้องใช้สำหรับวิเคราะห์ของโปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ

การกรอกค่า INPUT ข้อมูลที่ต้องใช้สำหรับวิเคราะห์ของโปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ คือ การกำหนดขอบเขตที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ โดยข้อมูลที่ต้องกรอกค่าลงในโปรแกรมได้แก่ ข้อมูลชั้นดิน ภาพตัดขวางของจุดที่ต้องการวิเคราะห์ อัตราการสูบน้ำที่ระดับต่าง ๆ

3.3.1 การกรอกค่า INPUT ลงในโปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ

เปิดโปรแกรมเลือก Start New Project และตั้งชื่อ Model ลงในช่อง Title ดังแสดงในภาพที่ 3-13



Project properties

Project Model Constants Cloud services

PLAXIS[®] 2D

Project

Title station 4+100

Company

Directory

File name

Comments

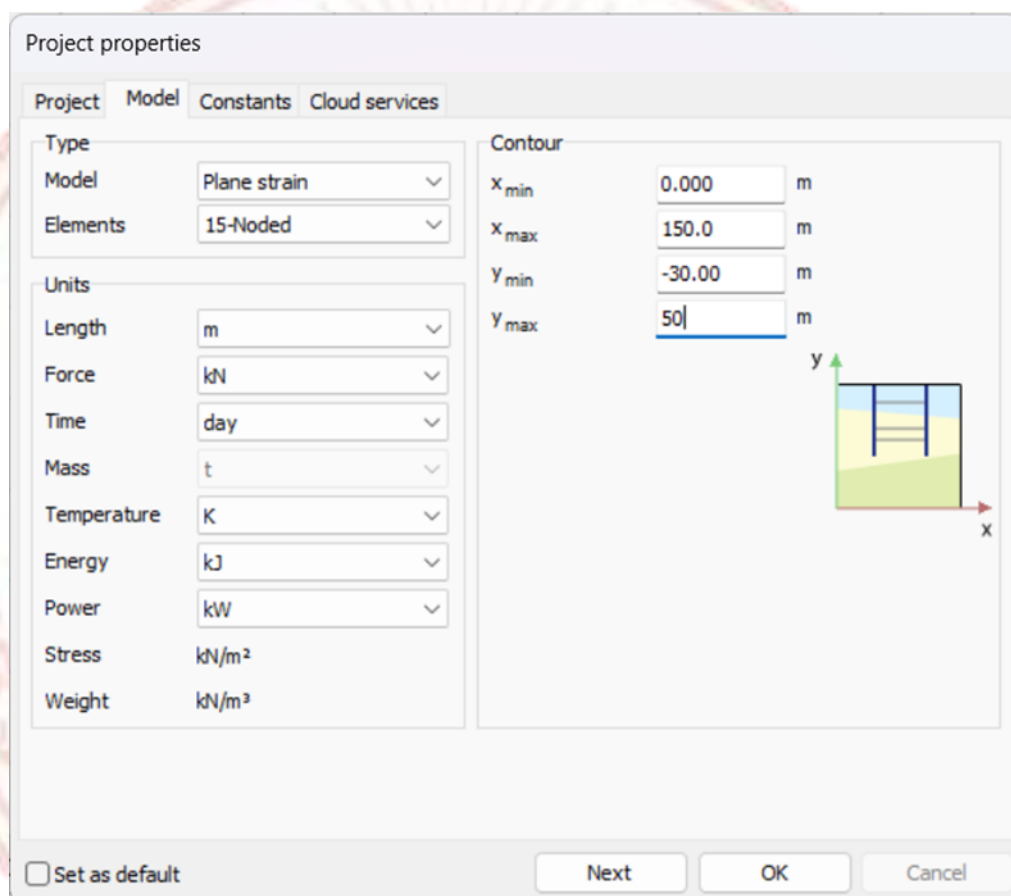
Company logo

☐ Set as default

Next OK Cancel

ภาพที่ 3-13 การตั้งชื่อ Model

หลังจากนั้นกำหนดชนิดของแบบจำลองเป็นแบบ Plane Strain เลือก Element จำนวน 15 Nodes ซึ่งเป็นจำนวนเอลิเมนต์สูงสุดของโปรแกรมที่สามารถกำหนดได้เพื่อให้ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมแม่นยำ และกำหนดหน่วยของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความยาว เวลา เป็นต้น และกำหนดขอบเขตของแบบจำลองเนื่องจากแบบจำลองนี้จำลองหน้าตัดความยาว 100 เมตร จึงกำหนดขอบเขตในแกน X เท่ากับ 150 เมตร ขอบเขตในแกน Y เท่ากับ -30 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 การกำหนดตัวแปรและการตั้งค่าขอบเขตของแบบจำลอง

กำหนด Soil Property และการกรอกข้อมูล Soil Parameter โดยการใช้เครื่องมือ Show Materials และเลือกประเภทข้อมูลเป็น Soil & Interface จากนั้นทำการกรอกค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการเจาะสำรวจดังแสดงในตารางที่ 3-4 โดยกรอกในแถบเครื่องมือ General, Mechanical และ Ground Water

ตารางที่ 3-4 พารามิเตอร์ของชั้นดิน

Parameter	Symbol	Soil Layer			
		1	2	3	4
	Depht (m.)	0.00-2.00	2.00-3.45	3.45-7.00	7.00-12.50
Soil Model		MC	MC	MC	MC
Unit Weights (kN/m ³)	γ	17.27	16.38	15.21	15.01
Young's Modulus (kN/m ²)*	E	8,240	8,240	5,100	11,183
Poissons Ratio	ν	0.35	0.35	0.35	0.35
Permeability in Horizontal Direction (m/day)**	k_x	1.4×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.4×10^{-5}
Permeability in Vertical Direction (m/day)**	K_h	5.5×10^{-5}	5.5×10^{-5}	5.5×10^{-5}	5.5×10^{-5}
The undrained shear strength (kN/m ²)	Su	20.6	20.6	12.75	22.37

* วันชัย เทพารักษ์ (2544)

** กนกอร (2558)

โดยค่าพารามิเตอร์ที่กรอกค่าได้จากการเจาะสำรวจดินและได้จากงานวิจัยอ้างอิง ดังนี้

1. Unit Weights เป็นค่าที่ได้จากการเจาะสำรวจดินรายละเอียด แสดงดังภาพที่ ก-1 และ ก-2 ภาคผนวก ก
2. ในส่วนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ได้จากการเจาะสำรวจดิน ภาพที่ 3-3 ซึ่งได้ทำการเฉลี่ยในแต่ละช่วง Layer ดินแล้ว แสดงดังตาราง 3-1 และทำการแปลงค่าให้อยู่ในหน่วยกิโลนิวตัน/ตารางเมตร เนื่องจากเป็นหน่วยที่ใช้ในการกรอกค่าของโปรแกรม
3. ค่า Permeability อ้างอิงจากงานวิจัยของ กนกอร (2558) ได้ทำการศึกษาเรื่องการทรุดตัวชั้นดินเหนียวกรณีไม่มีและมีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบระบายน้ำตามแนวตั้ง บริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ โดยทำการศึกษาด้วยโปรแกรม Plaxis แบบ 2 มิติ ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในแนวดิ่ง (kv) สำหรับดินเหนียวอ่อนที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 2 ตัน/ม² เท่ากับ 5.5×10^{-5} เมตร/วัน และค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในแนวราบ (kh) เท่ากับ 1.4×10^{-5} เมตร/วัน

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการพิจารณาการเคลื่อนตัวแบบ Short term จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของดิน และในการคำนวณ Factor of Safety โปรแกรมจะทำการทอนค่าพารามิเตอร์ลงเองอัตโนมัติ

ในการกรอกค่าพารามิเตอร์ของดินในแถบเครื่องมือ General จะทำการเลือก Soil Model เป็นชนิด Mohr-Coulomb และกำหนดชนิดการ Drainage เป็นประเภท Undrained A จากนั้นกรอกค่า Unit Weight ของดิน ดังแสดงในภาพที่ 3-15

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		2
Soil model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Undrained A
Colour		RGB 218, 161, 232
Comments		
Unit weights		
γ_{unsat}	kN/m ³	17.27
γ_{sat}	kN/m ³	17.27
Void ratio		
e_{init}		0.5000
γ_{init}		0.3333

Warnings
This material is not yet valid.
[Show full feedback](#)

Next OK Cancel

ภาพที่ 3-15 ค่าพารามิเตอร์ของดินชั้นที่ 1 แถบเครื่องมือ General

เมื่อกรอกค่าในแถบเครื่องมือ General แล้วเสร็จ จะทำการกรอกค่าในแถบเครื่องมือ Mechanical เป็นอันดับถัดมา ซึ่งค่าที่ต้องกรอกในแถบเครื่องมือนี้คือ Young's Modulus, Poissons Ratio และ Cohesion ดังแสดงในภาพที่ 3-16

Soil - Mohr-Coulomb - 2

General Mechanical Groundwater Thermal Interfaces Initial

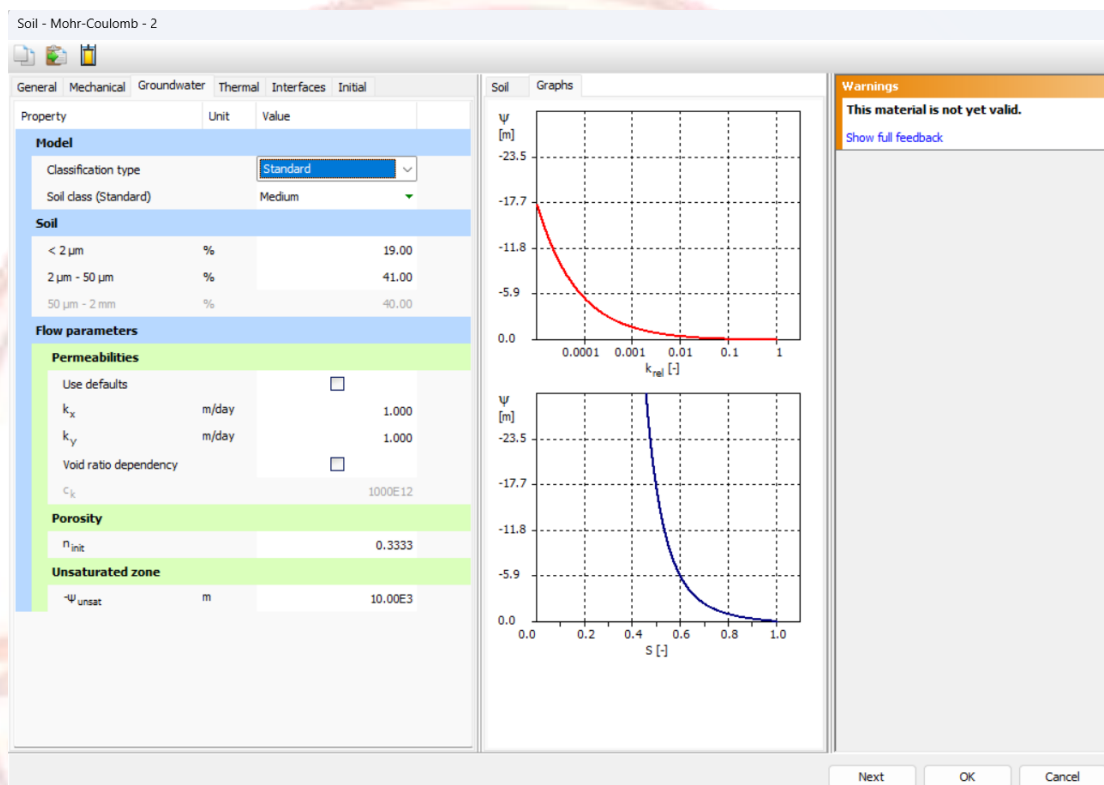
Property	Unit	Value
Stiffness		
E'_{ref}	kN/m ²	7210
ν (nu)		0.000
Alternatives		
G_{ref}	kN/m ²	3605
E'_{oed}	kN/m ²	7210
Depth-dependency		
E'_{inc}	kN/m ² /m	0.000
γ_{ref}	m	0.000
Wave velocities		
V_s	m/s	45.25
V_p	m/s	64.00
Strength		
Shear		
c'_{ref}	kN/m ²	19.33
ϕ' (phi)	°	0.000
ψ (psi)	°	0.000
Depth-dependency		
c'_{inc}	kN/m ² /m	0.000
γ_{ref}	m	0.000
Tension		
Tension cut-off		☒
Tensile strength	kN/m ²	0.000

Warnings
This material is not yet valid.
[Show full feedback](#)

Next OK Cancel

ภาพที่ 3-16 ค่าพารามิเตอร์ของดินชั้นที่ 1 แถบเครื่องมือ Mechanical

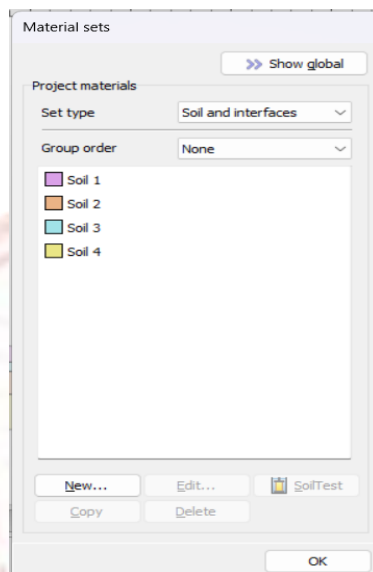
หลังจากนั้นจะทำการกรอกค่าในแถบเครื่องมือ Ground Water ในส่วนของหัวข้อ Permeability และเนื่องจากตัวอย่างดินที่ได้เจาะสำรวจไม่ได้ทำการทดสอบหาค่า Permeability จึงกำหนดให้ค่า Permeability ทั้งแนวราบและแนวดิ่งเท่ากัน ในส่วนของแถบเครื่องมือ Thermal, Interfaces และ Initial ไม่มีผลต่อการสร้างแบบจำลอง จึงใช้ค่า Automatic ที่โปรแกรมกำหนดไว้



ภาพที่ 3-17 ค่าพารามิเตอร์ของดินชั้นที่ 1 แถบเครื่องมือ Ground Water

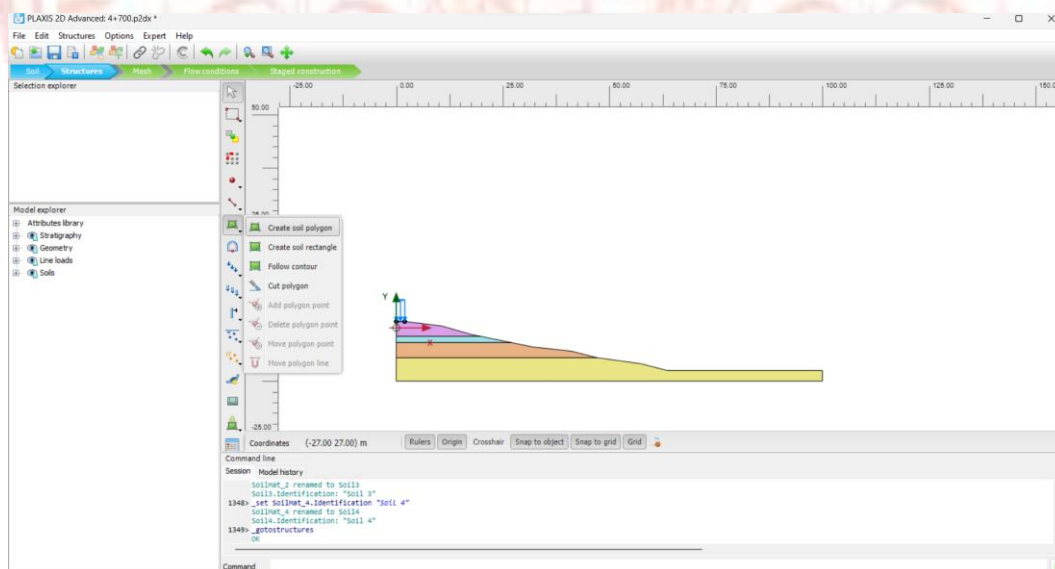
ของโปรแกรม PLAXIS 2D

เมื่อกรอกข้อมูล Soil Parameters ครบทุกชั้นดินแล้ว จะแสดงหน้าต่างดังภาพที่ 3-18



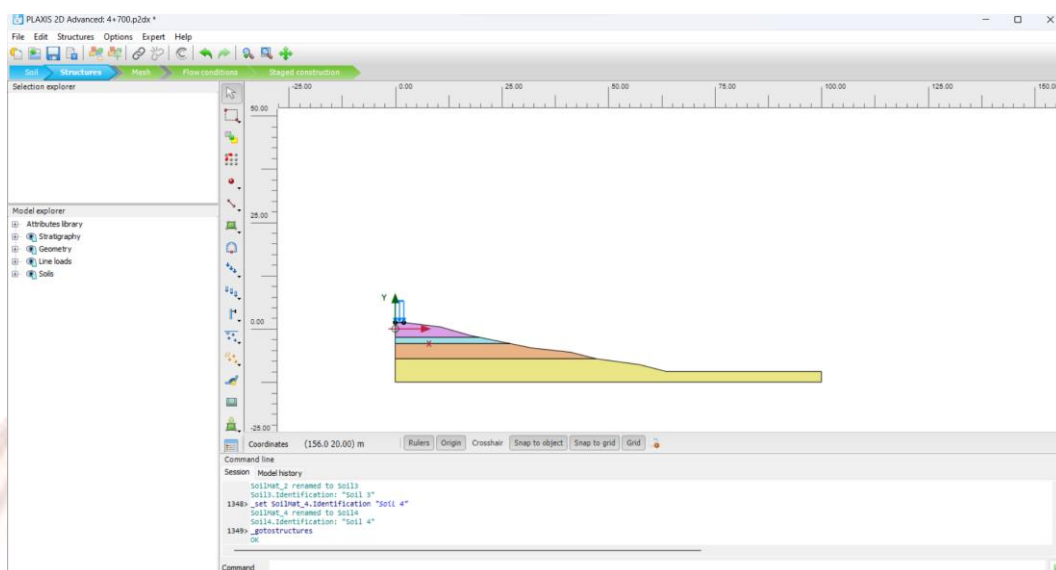
ภาพที่ 3-18 หน้าต่าง Material Sets เมื่อกรอกข้อมูลชั้นดินครบถ้วน

จากนั้นทำการวาดชั้นดินจากแถบ Structures เลือกเครื่องมือ Create soil polygon จากนั้นวาดลาดดินจากพิกัดที่ได้จาก Shop Drawing ของ Section นั้น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-19



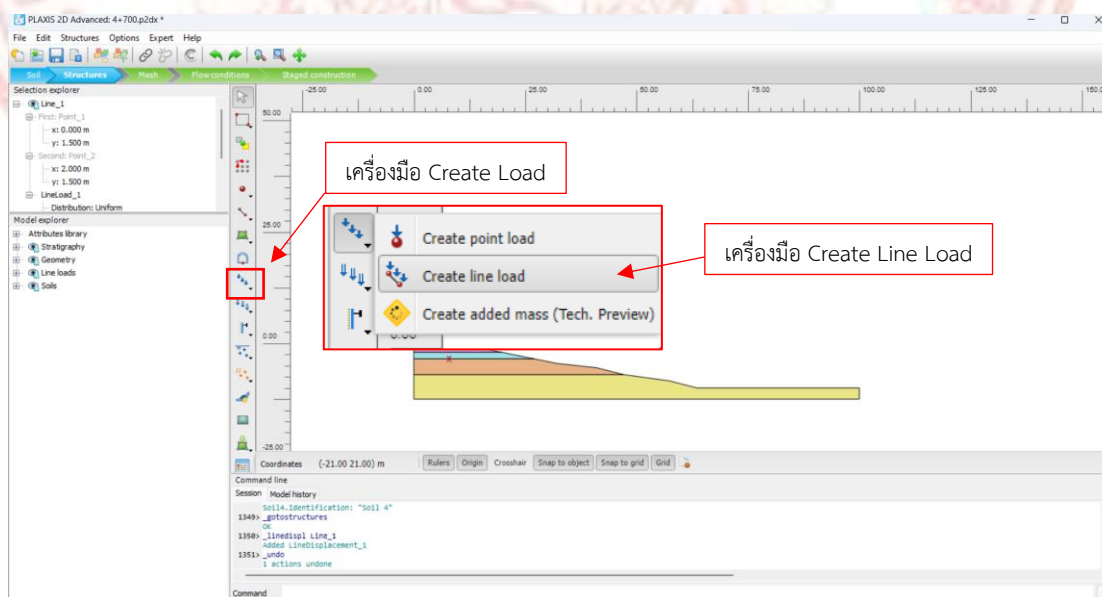
ภาพที่ 3-19 การวาดชั้นดินที่ต้องการวิเคราะห์

เมื่อวาดชั้นดินที่ต้องการวิเคราะห์แล้วเสร็จ จะได้การแสดงผลดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 หน้าต่างแสดงผลแบบจำลองเมื่อวาดเสร็จ

หลังจากนั้นทำการกรอกค่า Load ที่กระทำต่อชั้นดินเนื่องจากบริเวณรอบบึงหนองบอนเป็นถนนสำหรับให้ประชาชนใช้ออกกำลังกาย และถนนดังกล่าวอยู่ในตลอดช่วงความยาวของ Section ที่ทำการศึกษา ซึ่งการใส่ Load ทำได้โดยเลือกเครื่องมือ Create Load จากนั้นเลือก Create Line Load เลือกบริเวณที่ Load กระทำ และกรอกค่า Load ที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-21 การกรอกข้อมูล Load ที่กระทำต่อแบบจำลอง

เมื่อกำหนด Load แล้วเสร็จ เลือกแถบ Flow Condition จากนั้นเลือกเครื่องมือ Create Water Level ใส่ระดับน้ำที่ต้องการลดในแต่ละ Phase ดังแสดงในภาพที่ 3-15 ในแบบจำลองนี้จะทำการลดระดับน้ำครั้งละ 1 เมตร จากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึงระดับ -7.00 ม.รทก. โดยแต่ละ Phase จะทำการหา Safety Factor เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของลาดดิน รายละเอียดการลดระดับน้ำแสดงดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 การกำหนดค่าการลดระดับน้ำของแต่ละ Phase

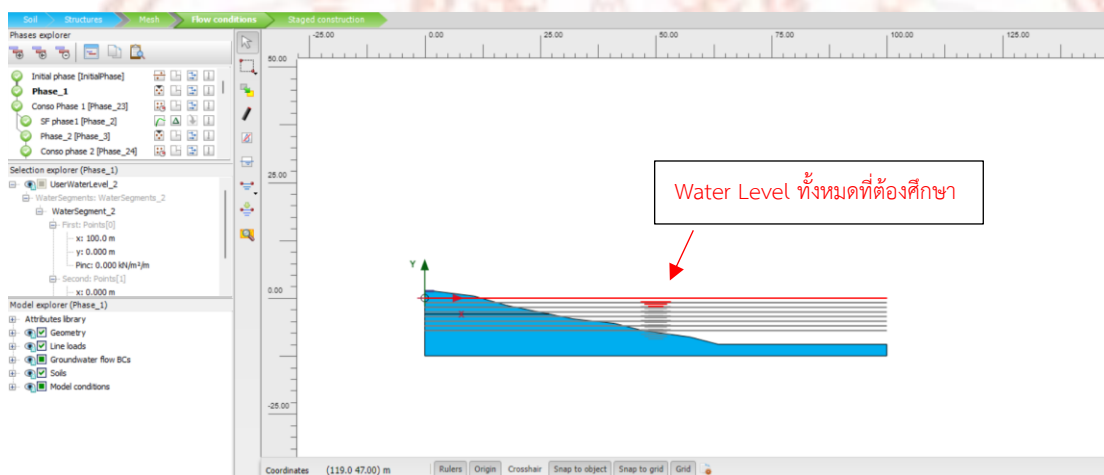
Phase No.	Activity	Duration (DAYS)
<u>Stage of construction</u>		
1	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ 0.00 ม.รทก.	-
<u>Stage of construction</u>		
2	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -1.00 ม.รทก.	-
<u>Stage of consolidation</u>		
3	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -1.00 ม.รทก.	0.50
<u>Stage of construction</u>		
4	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -2.00 ม.รทก.	-
<u>Stage of consolidation</u>		
4	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -2.00 ม.รทก.	0.50
<u>Stage of construction</u>		
5	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -3.00 ม.รทก.	-
<u>Stage of consolidation</u>		
6	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -3.00 ม.รทก.	0.50
<u>Stage of construction</u>		
7	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -4.00 ม.รทก.	-
<u>Stage of consolidation</u>		
8	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -4.00 ม.รทก.	0.50
<u>Stage of construction</u>		
9	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -5.00 ม.รทก.	-
<u>Stage of construction</u>		
10	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -5.00 ม.รทก.	0.50
<u>Stage of construction</u>		
11	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -6.00 ม.รทก.	-
<u>Stage of consolidation</u>		
12	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -6.00 ม.รทก.	0.50
<u>Stage of construction</u>		
13	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -7.00 ม.รทก.	-
<u>Stage of consolidation</u>		
14	ระดับน้ำในแก้มลิงบึงหนองบอนอยู่ที่ระดับ -7.00 ม.รทก.	0.50

ซึ่งจากตารางจะเห็นว่ามี Stage ที่ใช้ในการคำนวณ 2 Stage คือ

- 1) Stage Construction คือ การจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างในระหว่างกระบวนการก่อสร้างที่เป็นขั้นตอนตามลักษณะการก่อสร้างจริงที่ต้องการวิเคราะห์ การวิเคราะห์นี้ช่วยให้สามารถศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำแต่ละช่วงเวลา โดยมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงในสถานะของดินและเสถียรภาพของดินในระหว่างการก่อสร้าง ใน Stage นี้ประกอบไปด้วย Phase การทำงานต่าง ๆ เช่น Phase ในการคำนวณเสถียรภาพของลาดดิน และ Phase ที่กำหนดขั้นตอนการก่อสร้างโดยในสารนิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่การลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอน ซึ่งการทำงานของ Stage Construction มีขั้นตอนดังนี้
 - 1.1) การกำหนดขั้นตอนการก่อสร้าง โดยกำหนดขอบเขตที่ต้องการศึกษา รวมทั้งคุณสมบัติชั้นดิน
 - 1.2) การระบุพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงที่ต้องการ เช่น ระดับน้ำในบึงหนองบอนในแต่ละ Phase
 - 1.3) การวิเคราะห์ โปรแกรมจะทำการคำนวณการเสียรูปของลาดดิน, ความปลอดภัยและเสถียรภาพ, ลักษณะการกระจายแรงจาก Load ที่ใส่ลงไป ผลลัพธ์จะแสดงออกมาได้หลายรูปแบบ เช่น Deformation Mesh, Contour Shading
- 2) Stage Water Depletion (Consolidation) คือ กระบวนการที่ใช้ในการจำลองการยุบอัดตัวของดิน ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการก่อสร้างหรือหลังจากการสร้างเสร็จ การยุบอัดตัวของดินหมายถึงการลดลงของปริมาตรดินที่เกิดจากการสูญเสียของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นในช่วงเวลาหลังจากการเพิ่มโหลดใหม่ หรือการเปลี่ยนแปลงในระดับน้ำใต้ดิน มีขั้นตอนดังนี้
 - 2.1) การกำหนดขั้นตอนการก่อสร้าง กระบวนการนี้จะเป็นขั้นตอนเดียวกับ Stage Construction คือกำหนดขอบเขตที่ต้องการศึกษา รวมทั้งคุณสมบัติชั้นดิน
 - 2.2) การกำหนดพารามิเตอร์ เช่นค่าความซึมน้ำ (Permeability), กำหนดระยะเวลาที่ให้น้ำเกิดกระบวนการยุบอัดตัว
 - 2.3) การวิเคราะห์ ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในช่องว่าง และการเคลื่อนตัวของลาดดิน

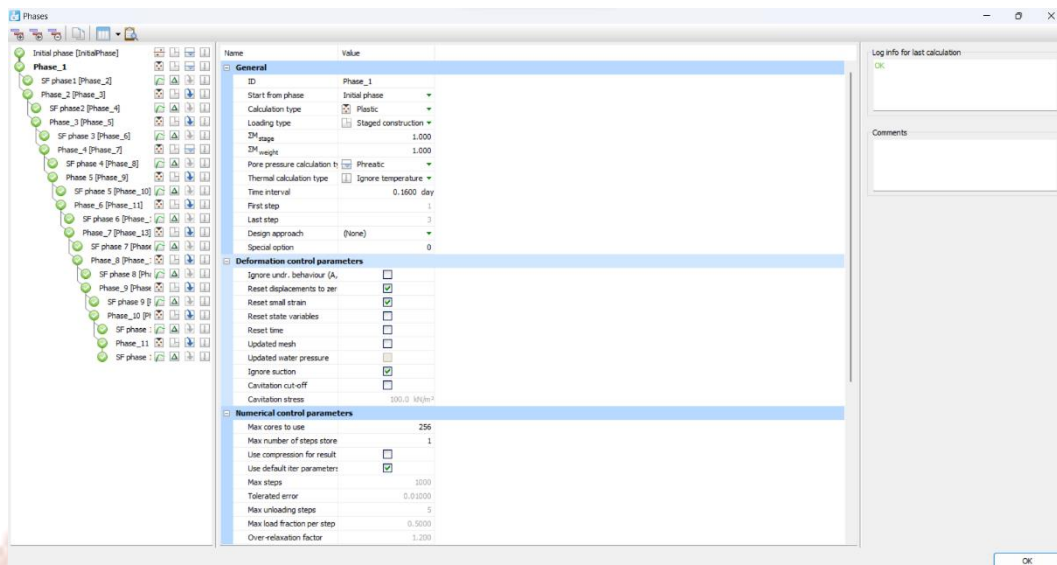
โดยมีขั้นตอนการกรอกค่าของ Flow Condition ใน Stage Construction ของหน้าตัดดิน Sta.4+700 ดังนี้

- 1) วาดเส้นระดับน้ำที่ต้องการศึกษาทั้งหมด จากเครื่องมือ Create Water Level ในการศึกษาการลดระดับน้ำในบึงหนองบอนครั้งนี้จะมีการกำหนด Water Level ทั้งหมด 8 ระดับคือจากระดับ 0.00 ม.รทก. ถึง -7.00 ม.รทก.ดังแสดงในภาพที่ 3-22 โดยการสูบน้ำในสภาวะการทำงานจริงจะยอมให้เครื่องสูบน้ำทำงานได้ไม่เกินวันละ 7 ชั่วโมง จึงต้องกำหนดให้เมื่อทำการลดระดับน้ำลง 1 เมตร ให้พักการสูบน้ำ ซึ่งช่วงที่พักรการทำงานของเครื่องสูบน้ำจะกำหนดให้เป็นช่วงที่เกิดพฤติกรรม Consolidation



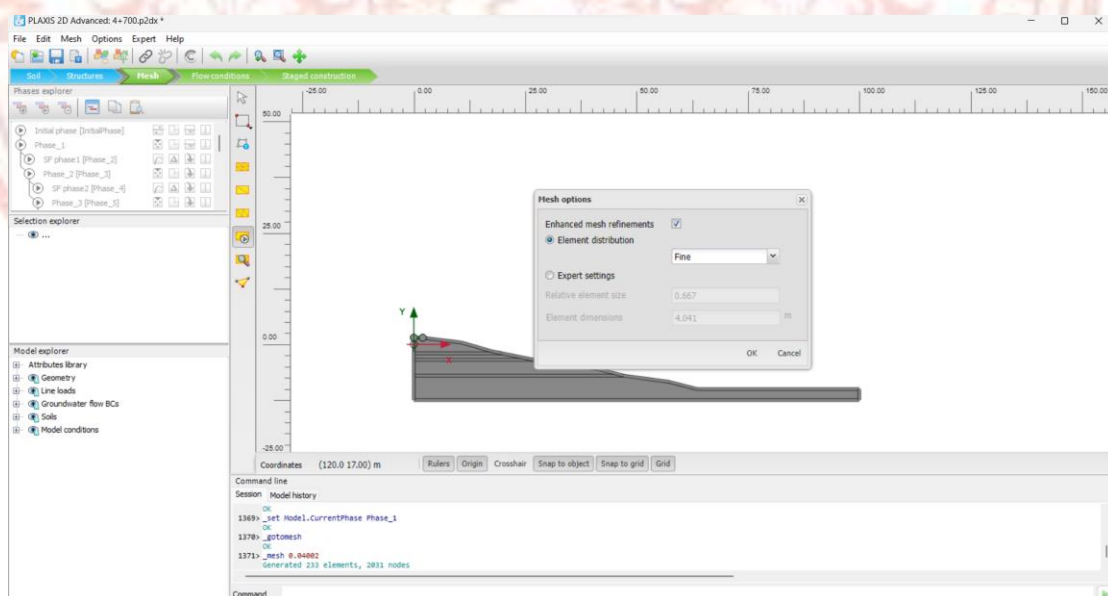
ภาพที่ 3-22 การกำหนดเส้นระดับน้ำที่ต้องการศึกษาในแบบจำลอง

- 2) การกำหนด Phase ที่เกี่ยวข้องกับการลดระดับน้ำและพารามิเตอร์ เช่น ระยะเวลาที่ใช้ในการลดระดับน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 3-23 ซึ่งเมื่อกำหนด Phase การลดระดับน้ำแล้ว จะเพิ่ม Phase Water Depletion (Consolidation) ให้ทำการคำนวณหลังจากคำนวณ Phase นี้แล้วเสร็จและ Phase สุดท้ายจะเป็นการคำนวณ Stability ของ Phase นั้น ๆ



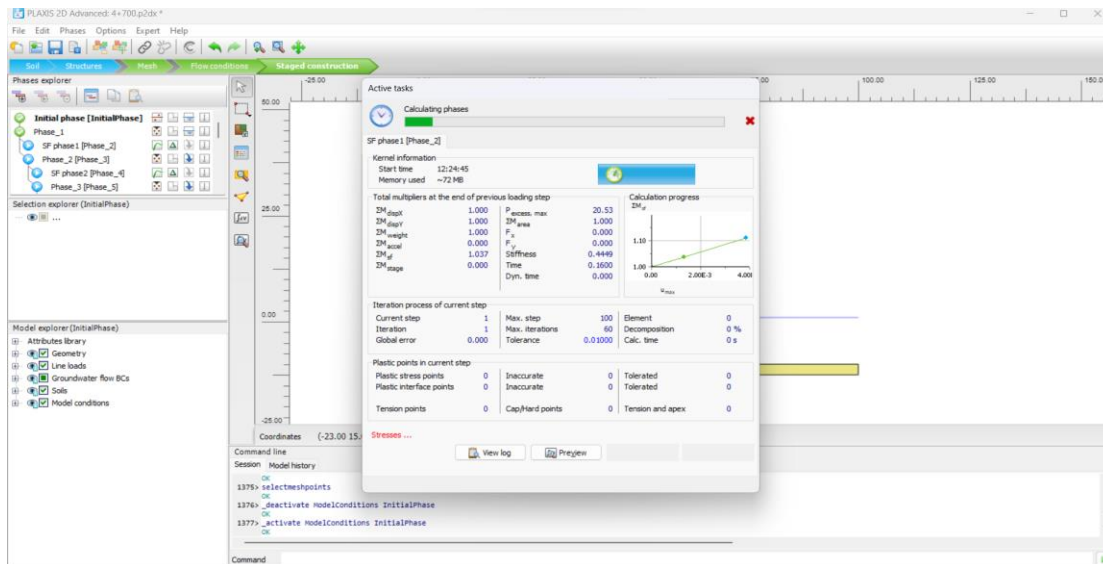
ภาพที่ 3-23 การกรอกค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการลดระดับน้ำ

- 3) เมื่อทำการกำหนด Phase ที่ต้องการศึกษาครบแล้ว หลังจากนั้นเลือกแถบ Mesh เลือกเครื่องมือ General Mesh เลือกความละเอียดของการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งความละเอียดของ Mesh ที่สูงจะทำให้การคำนวณสามารถคำนวณได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-24



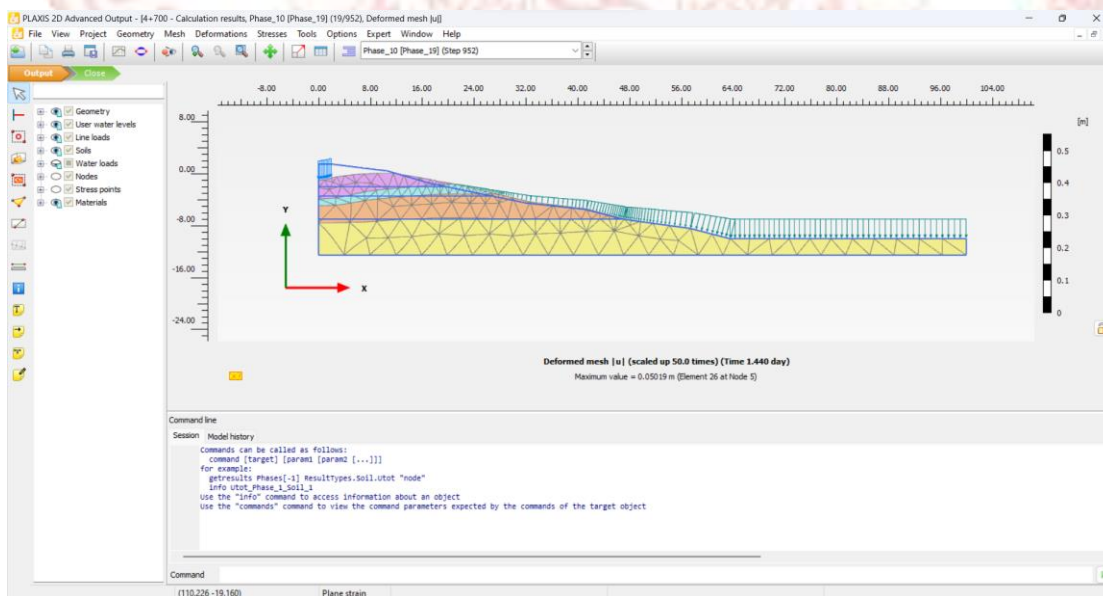
ภาพที่ 3-24 การเลือกความละเอียดของการวิเคราะห์ข้อมูล

- 4) จากนั้นเลือกแถบ State Construction เพื่อทำการคำนวณเสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของลาดดิน โดยเลือกเครื่องมือ Calculate โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงหน้าต่างขณะวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 3-25



ภาพที่ 3-25 หน้าต่างแสดงสถานะการวิเคราะห์ข้อมูลของโปรแกรม PLAXIS 2D

- 5) เมื่อโปรแกรมทำการวิเคราะห์แล้วเสร็จจะแสดงผลการวิเคราะห์ของแต่ละ Phase แสดงดังภาพที่ 3-26



ภาพที่ 3-26 หน้าต่างแสดงสถานะการวิเคราะห์ข้อมูลของโปรแกรม PLAXIS 2D

บทที่ 4

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของลาดดินบึงหนองบอนขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ของโปรแกรม PLAXIS แบบ 2D เป็นการวิเคราะห์โดยการจำลองพฤติกรรมดินด้วยแบบจำลองของ Mohr-Coulomb และนำผลวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดขณะดำเนินการสูบน้ำถึงระดับ -5.00 ม.รทก. โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

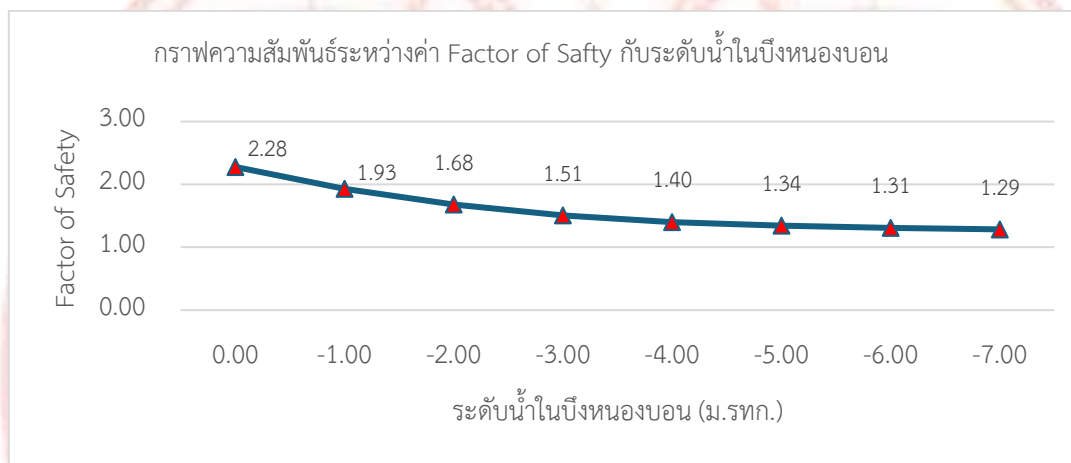
4.1 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. ด้วยโปรแกรม PLAXIS แบบ 2D

4.1.1 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. ของหน้าตัด Sta.4+700 จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเริ่มทำการลดระดับน้ำค่า Factor of Safety เท่ากับ 2.11 และเมื่อทำการลดระดับน้ำทำให้ค่า Factor of Safety ลดลงเรื่อย ๆ จนเมื่อทำการลดระดับน้ำลงจนถึงระดับ -7.00 ม.รทก. จะได้ค่า Factor of Safety เท่ากับ 1.23 ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 1.00 แสดงให้เห็นว่าลาดดินบริเวณ Sta.4+700 มีเสถียรภาพเพียงพอหากต้องการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนจนถึงระดับ -7.00 ม. ดังแสดงในภาพที่ 4-1



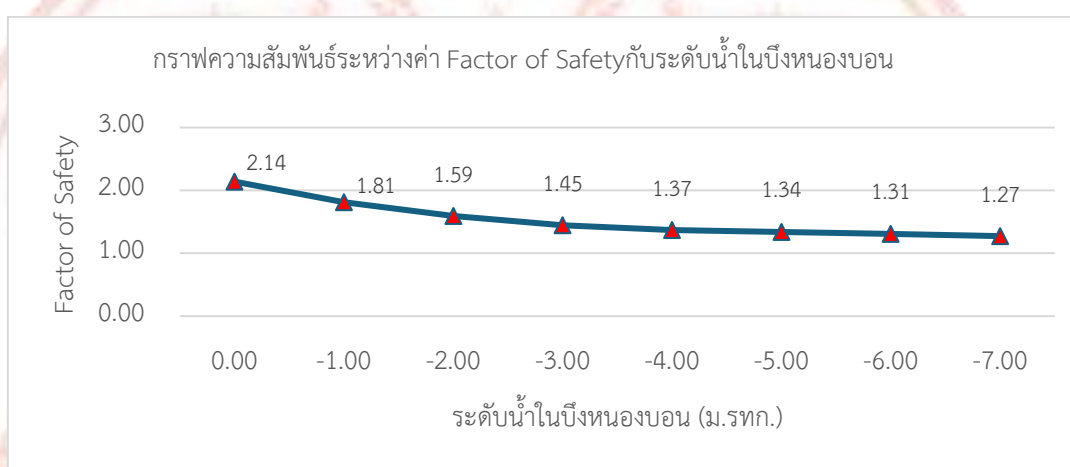
ภาพที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of Safety กับระดับน้ำในบึงหนองบอน
ของ Sta.4+700

4.1.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. ของหน้าตัด Sta.5+050 จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเริ่มทำการลดระดับน้ำค่า Factor of Safety เท่ากับ 2.28 และเมื่อทำการลดระดับน้ำทำให้ค่า Factor of Safety ลดลงเรื่อย ๆ จนเมื่อทำการลดระดับน้ำลงจนถึงระดับ -7.00 ม.รทก. จะได้ค่า Factor of Safety เท่ากับ 1.29 ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 1.00 แสดงให้เห็นว่าลาดดินบริเวณ Sta.5+050 มีเสถียรภาพเพียงพอหากต้องการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนจนถึงระดับ -7.00 ม. ดังแสดงในภาพที่ 4-2



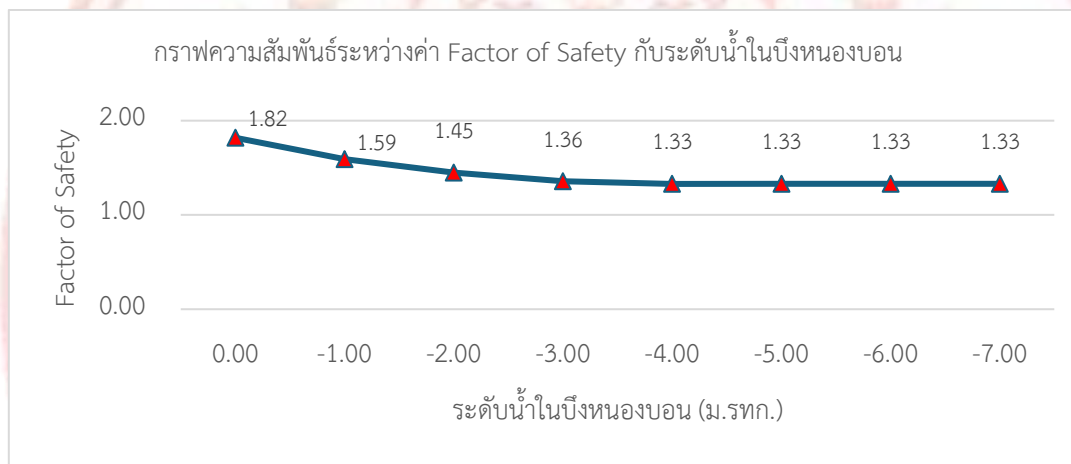
ภาพที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of Safety กับระดับน้ำในบึงหนองบอน
ของ Sta.5+050

4.1.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. ของหน้าตัด Sta.5+150 จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเริ่มทำการลดระดับน้ำค่า Factor of Safety เท่ากับ 2.14 และเมื่อทำการลดระดับน้ำทำให้ค่า Factor of Safety ลดลงเรื่อย ๆ จนเมื่อทำการลดระดับน้ำลงจนถึงระดับ -7.00 ม.รทก. จะได้ค่า Factor of Safety เท่ากับ 1.27 ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 1.00 แสดงให้เห็นว่าลาดดินบริเวณ Sta.5+150 มีเสถียรภาพเพียงพอหากต้องการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนจนถึงระดับ -7.00 ม. ดังแสดงในภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of Safety กับระดับน้ำในบึงหนองบอน
ของ Sta.5+150

4.1.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. ของหน้าตัด Sta.5+450 จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเริ่มทำการลดระดับน้ำค่า Factor of Safety เท่ากับ 1.82 และเมื่อทำการลดระดับน้ำทำให้ค่า Factor of Safety ลดลงเรื่อย ๆ จนเมื่อทำการลดระดับน้ำลงจนถึงระดับ -7.00 ม.รทก. จะได้ค่า Factor of Safety เท่ากับ 1.33 ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 1.00 แสดงให้เห็นว่าลาดดินบริเวณ Sta.5+150 มีเสถียรภาพเพียงพอหากต้องการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนจนถึงระดับ -7.00 ม. ดังแสดงในภาพที่ 4-4

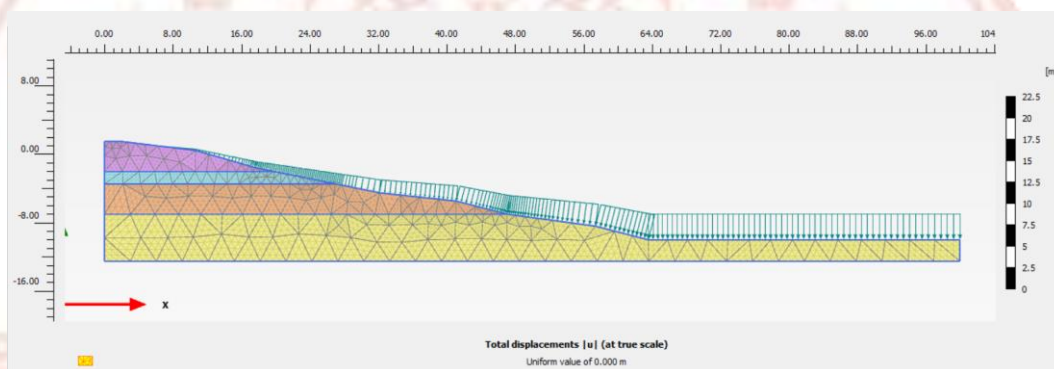


ภาพที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Factor of Safety กับระดับน้ำในบึงหนองบอน
ของ Sta.5+450

4.2 ผลการวิเคราะห์การเสีรูปของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. ของโปรแกรม PLAXIS แบบ 2D

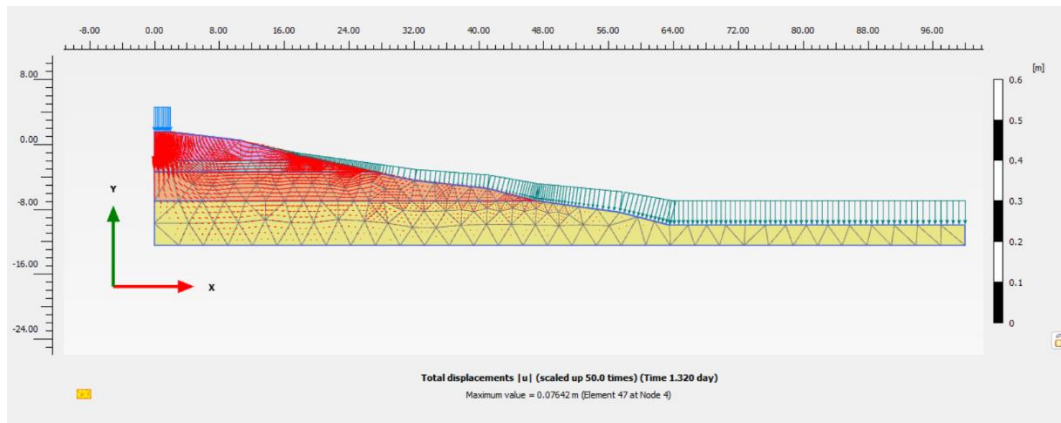
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเสีรูปของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. ที่หน้าตัด Sta.4+700 เมื่อทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนโดยการลดระดับน้ำดังตารางที่ 3-5 นั้น จะได้ค่า Total Deformation ในแต่ละ Phase ออกมา โดยค่าที่ได้จากการลดระดับน้ำและการจำลองการ Consolidation ในแต่ละ Phase มีค่าดังนี้

1) Phase 1 คือ Phase Initial ค่า Total Deformation เท่ากับ 0 ดังแสดงในภาพที่ 4-5

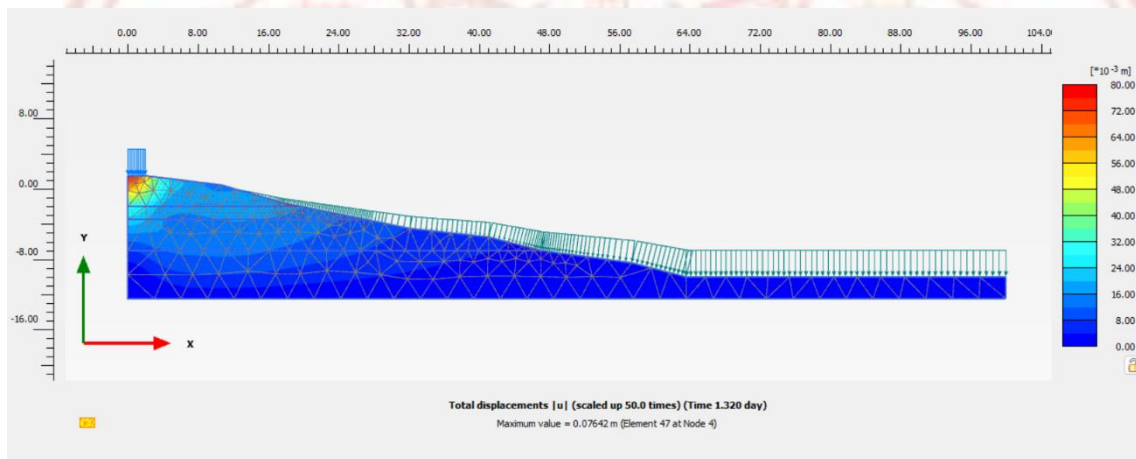


ภาพที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ของ Initial Phase

2) Phase 2 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 7.64 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงลงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-6 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-7 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสีรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

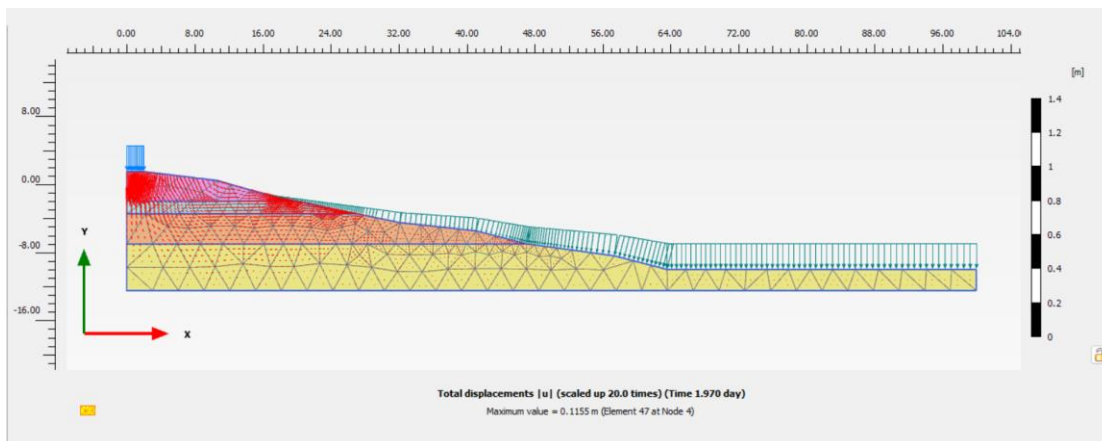


ภาพที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

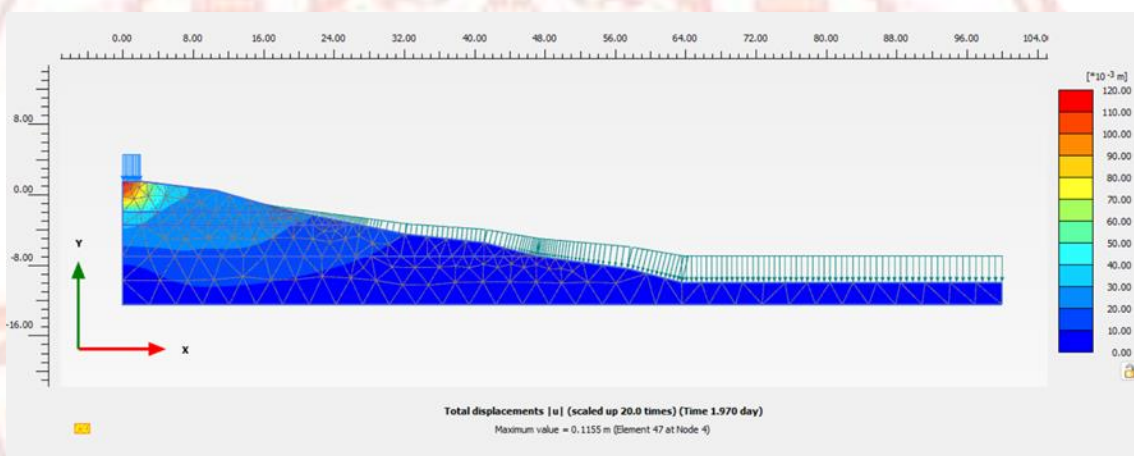


ภาพที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 3) Phase 3 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 11.55 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-8 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-9 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

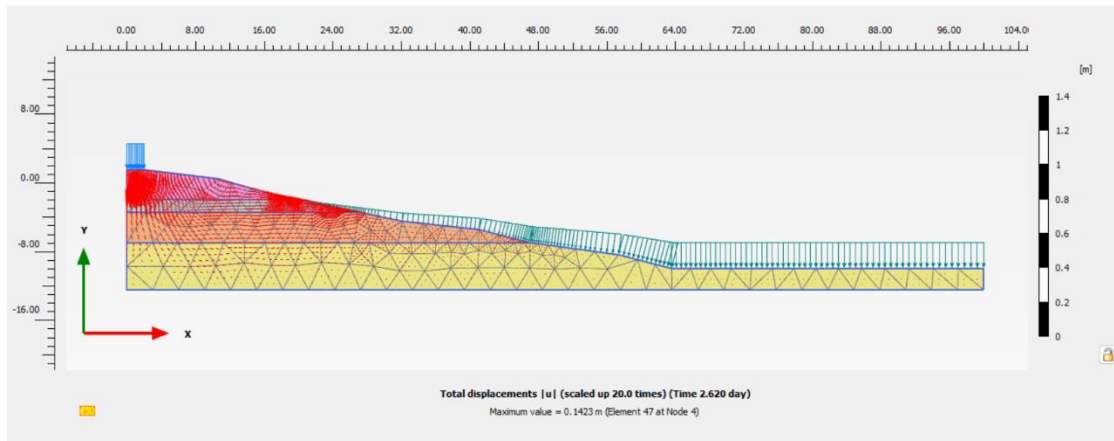


ภาพที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

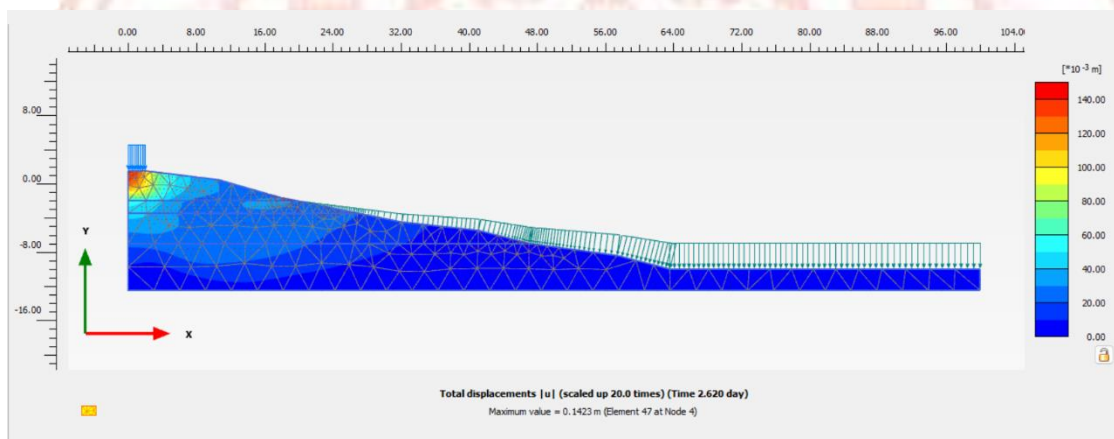


ภาพที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดิน Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 4) Phase 4 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 14.23 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-10 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-11 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

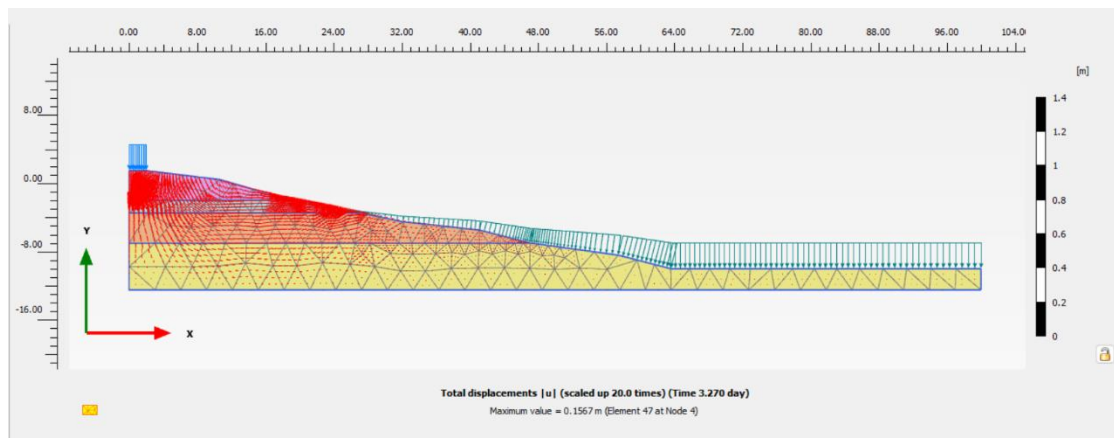


ภาพที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

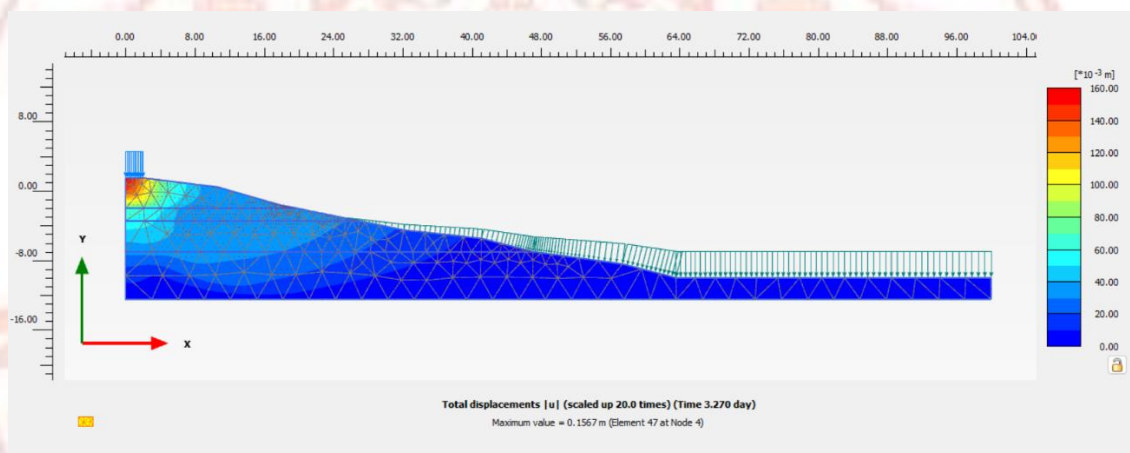


ภาพที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 5) Phase 5 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 15.67 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-12 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-13 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

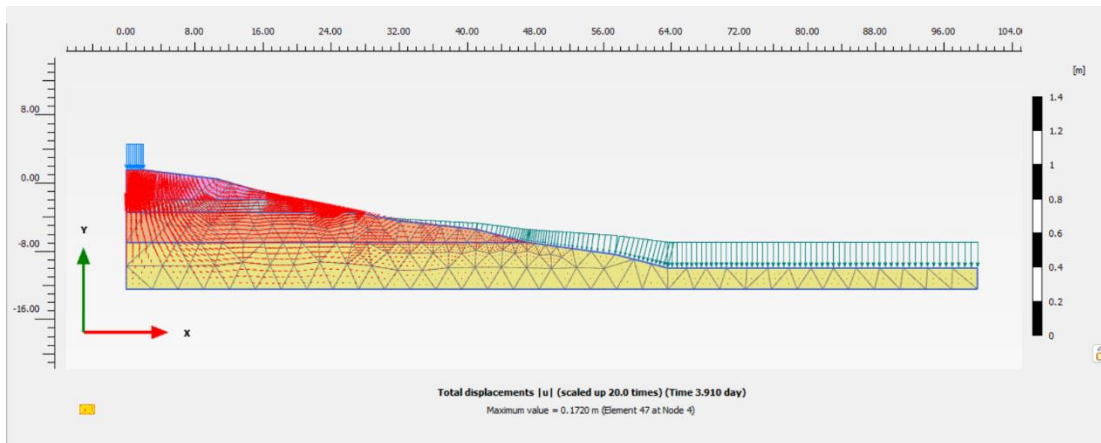


ภาพที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์ Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

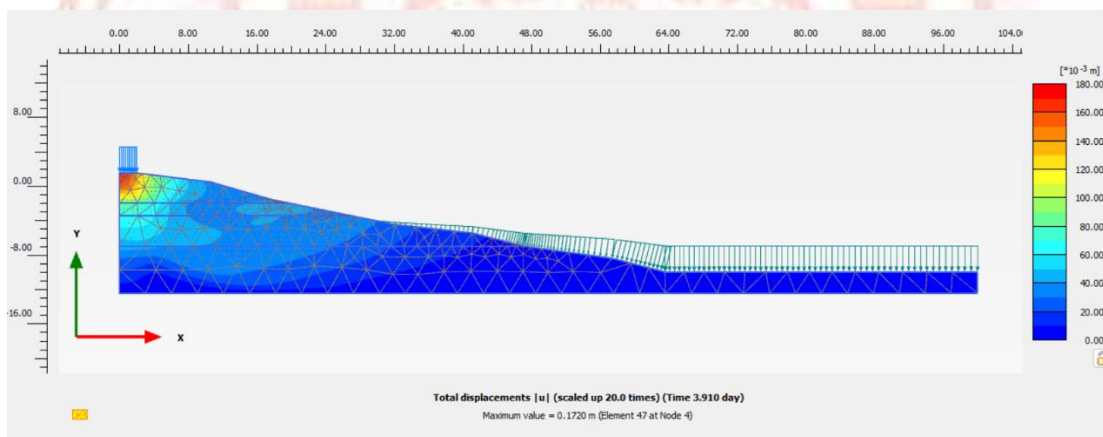


ภาพที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 6) Phase 6 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 17.20 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-14 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-15 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

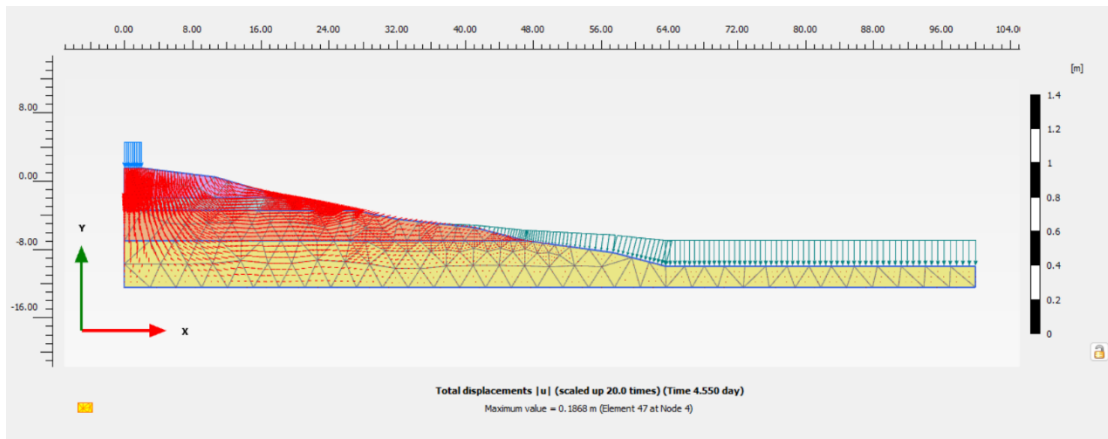


ภาพที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์ Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

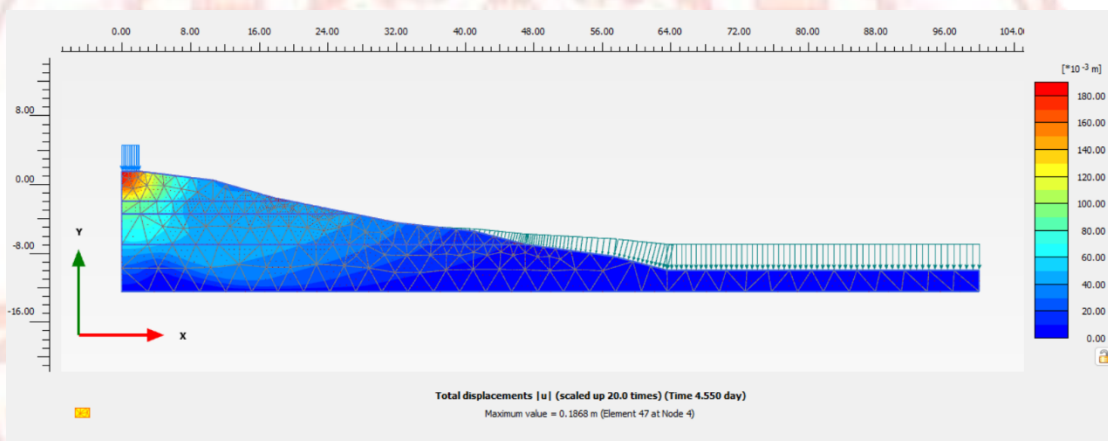


ภาพที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 7) Phase 7 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 18.68 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-16 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-17 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

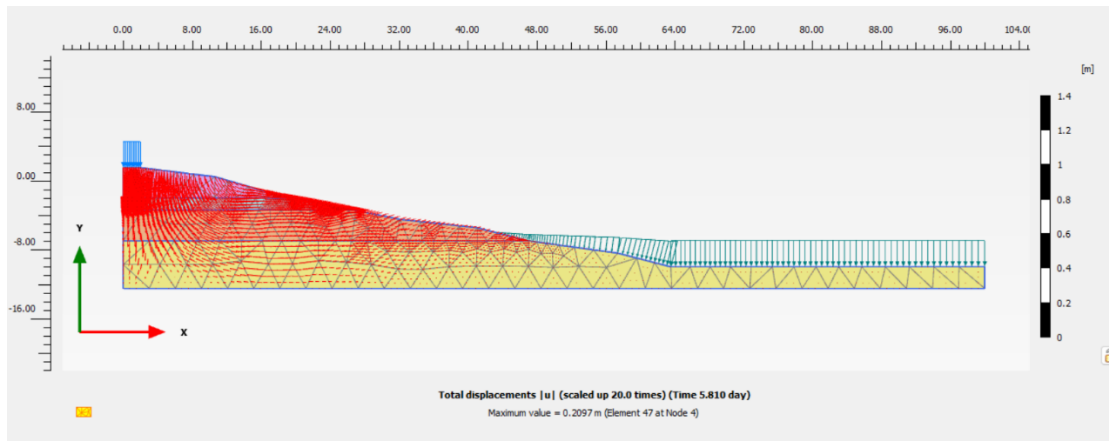


ภาพที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์ Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

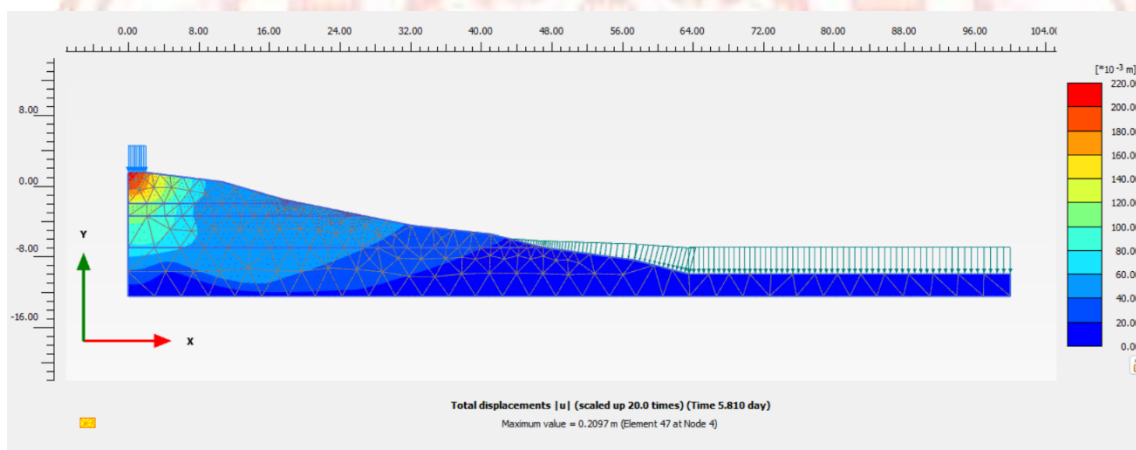


ภาพที่ 4-17 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 8) Phase 8 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 20.97 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-18 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-19 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ



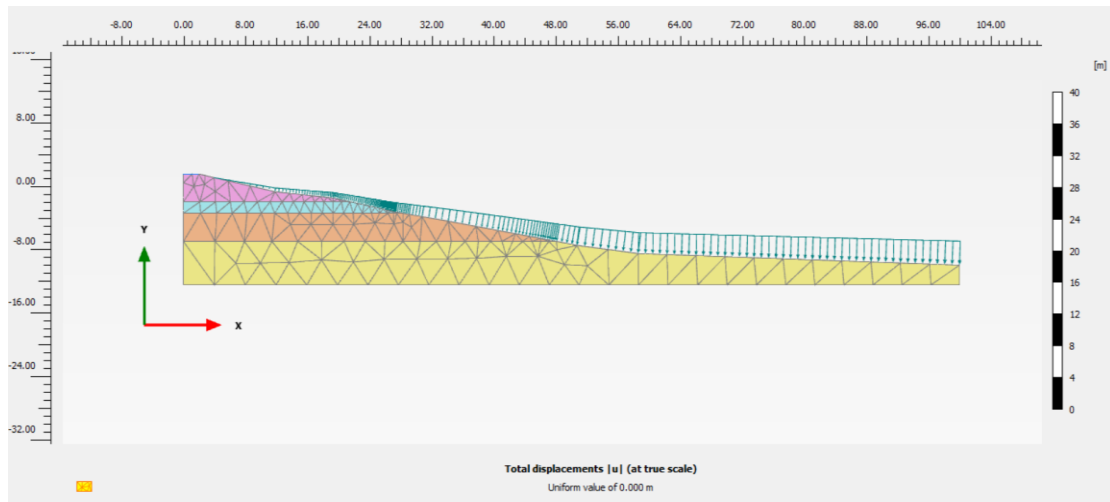
ภาพที่ 4-18 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows



ภาพที่ 4-19 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.4+700 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

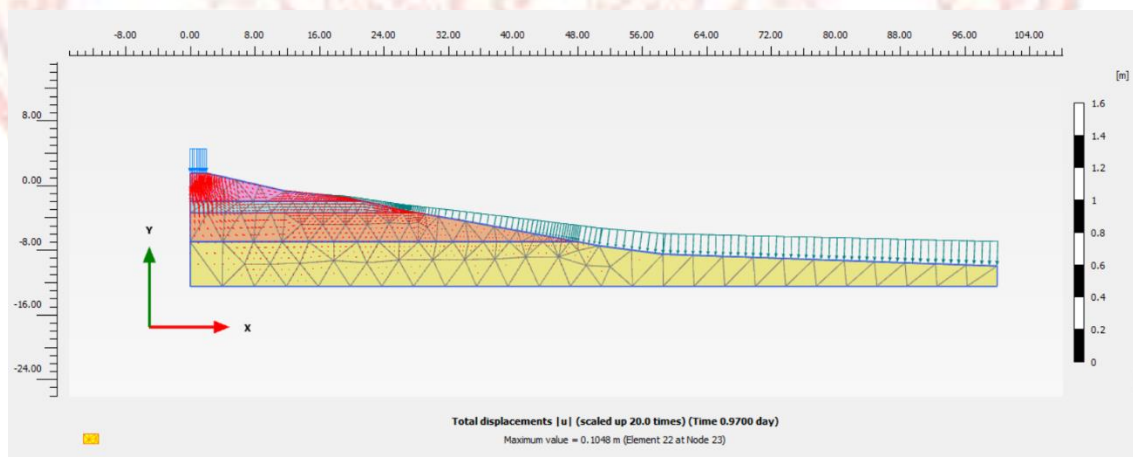
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. หน้าตัด Sta.5+050 เมื่อทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนโดยทำการลดระดับน้ำดังตารางที่ 3-5 นั้น จะได้ค่า Total Deformation ในแต่ละ Phase ออกมา โดยค่าที่ได้จากการลดระดับน้ำและการจำลองการ Consolidation ในแต่ละ Phase มีค่าดังนี้

- 1) Phase 1 คือ Phase Initial ค่า Total Deformation เท่ากับ 0 ดังแสดงในภาพที่ 4-20

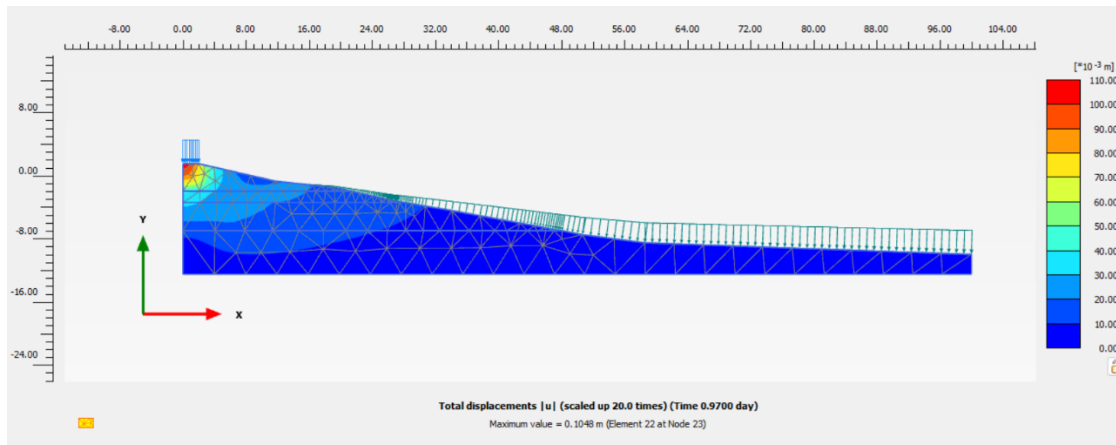


ภาพที่ 4-20 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ของ Initial Phase

- 2) Phase 2 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 10.48 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-21 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-22 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

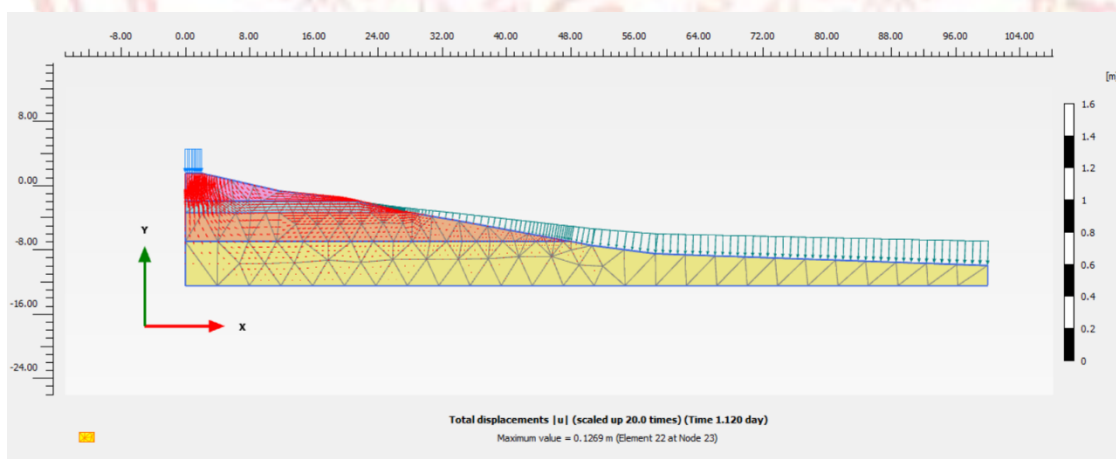


ภาพที่ 4-21 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

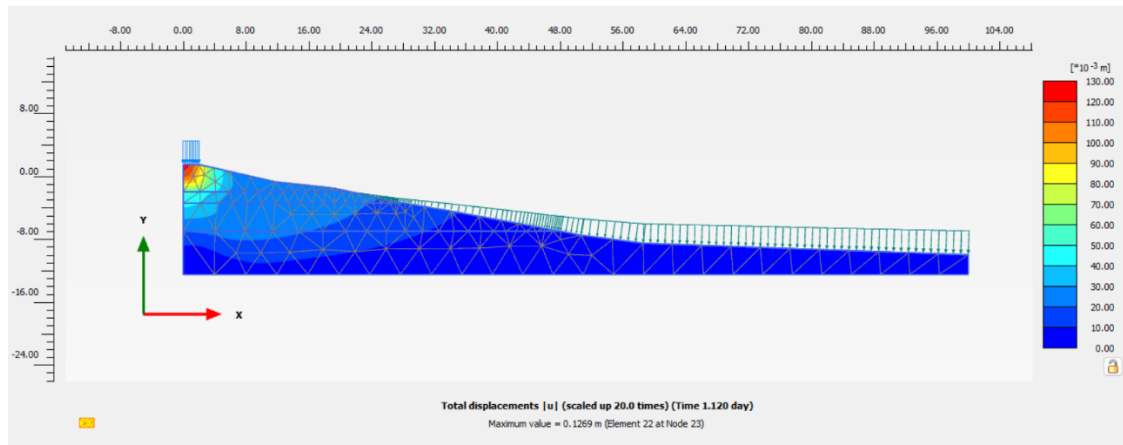


ภาพที่ 4-22 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 2) Phase 3 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 12.69 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-23 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-24 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ ทำให้เกิดการเสียรูปตั้งแต่ระยะ 0 - 64 เมตร จากจุด Center Line

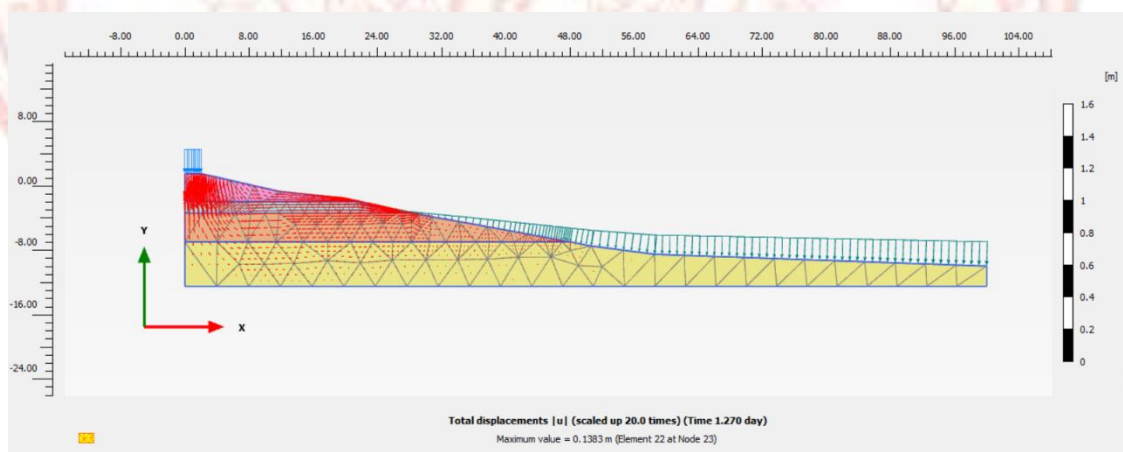


ภาพที่ 4-23 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

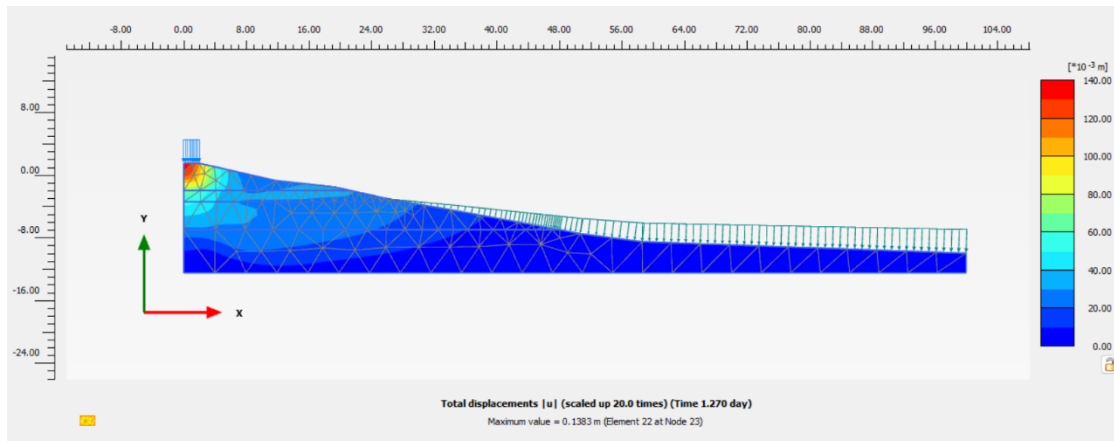


ภาพที่ 4-24 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 4) Phase 4 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 13.83 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-25 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-26 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

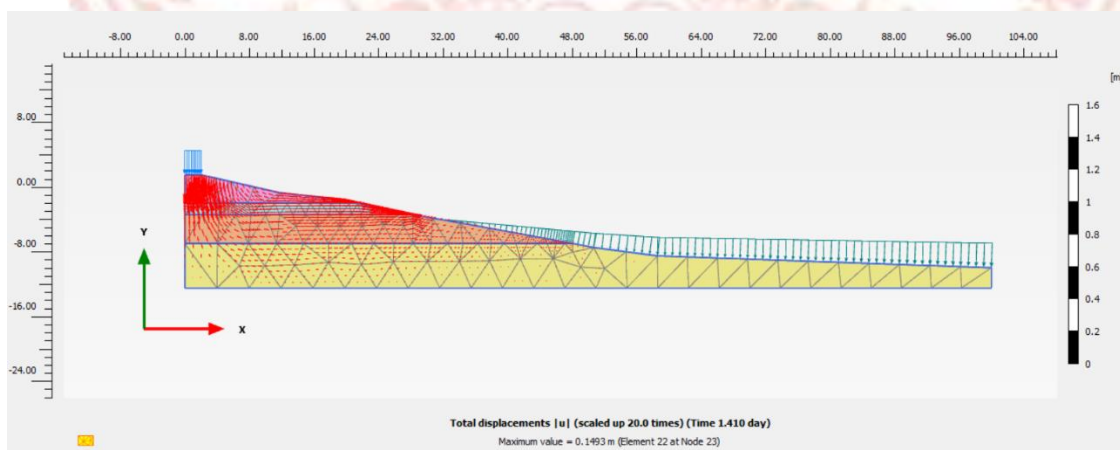


ภาพที่ 4-25 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

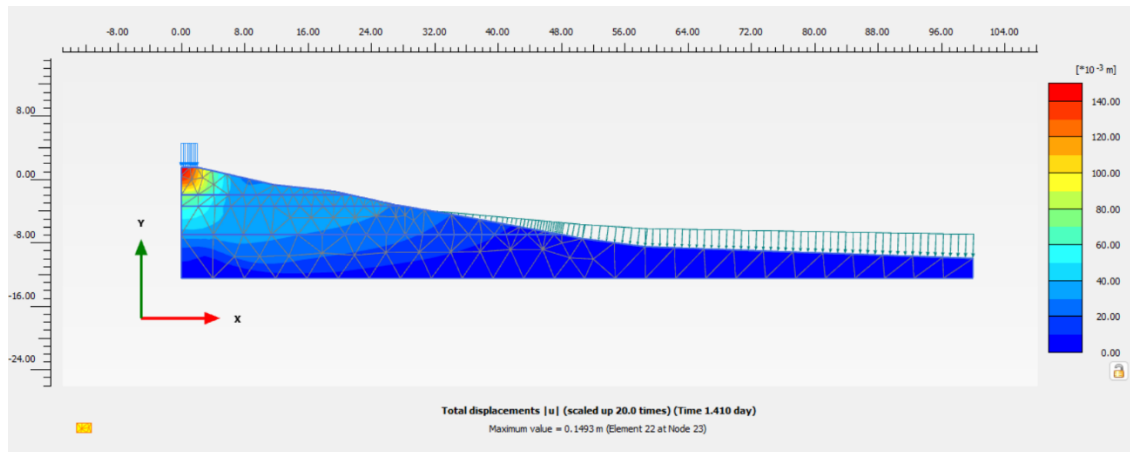


ภาพที่ 4-26 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 5) Phase 5 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 14.93 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-27 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-28 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

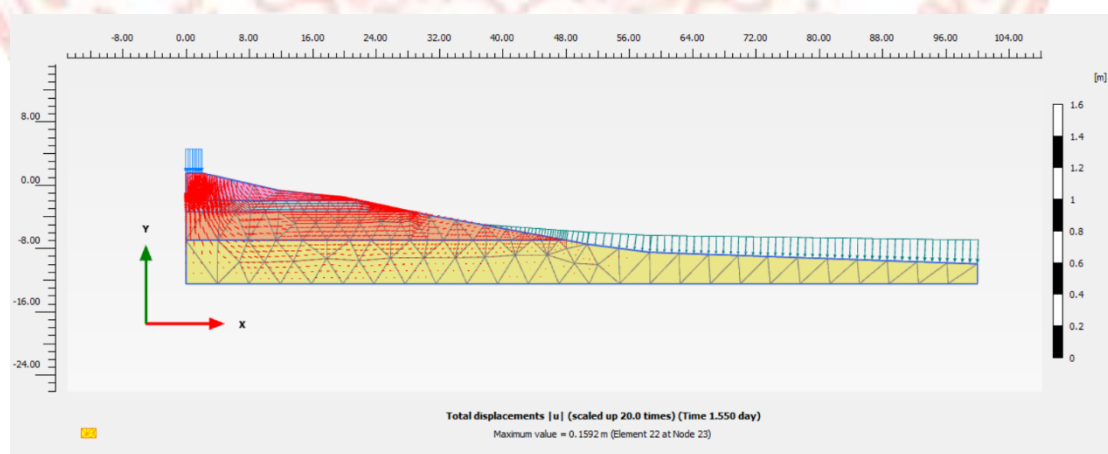


ภาพที่ 4-27 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

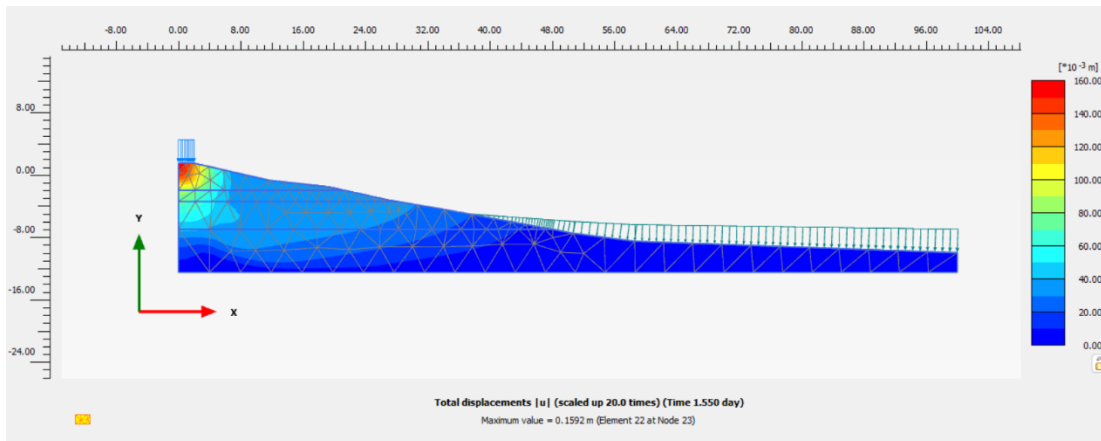


ภาพที่ 4-28 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 6) Phase 6 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 15.92 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-29 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-30 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

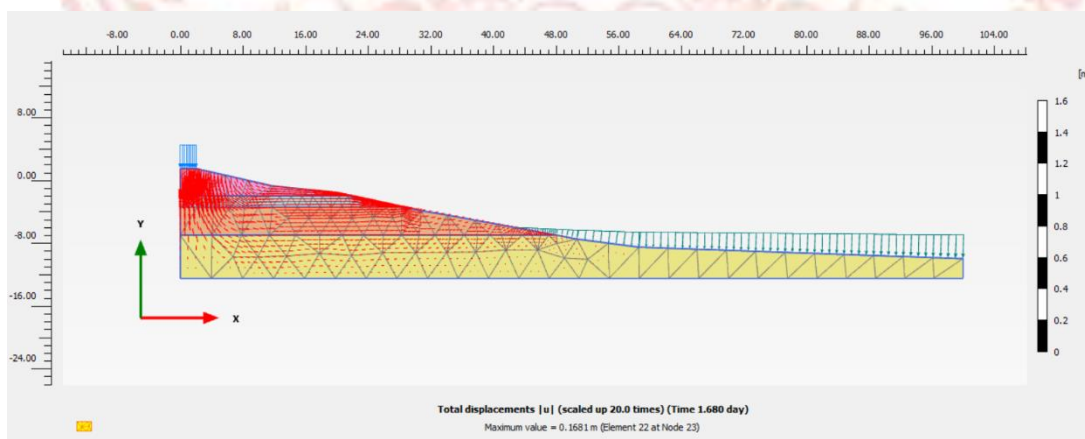


ภาพที่ 4-29 ผลการวิเคราะห์ Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

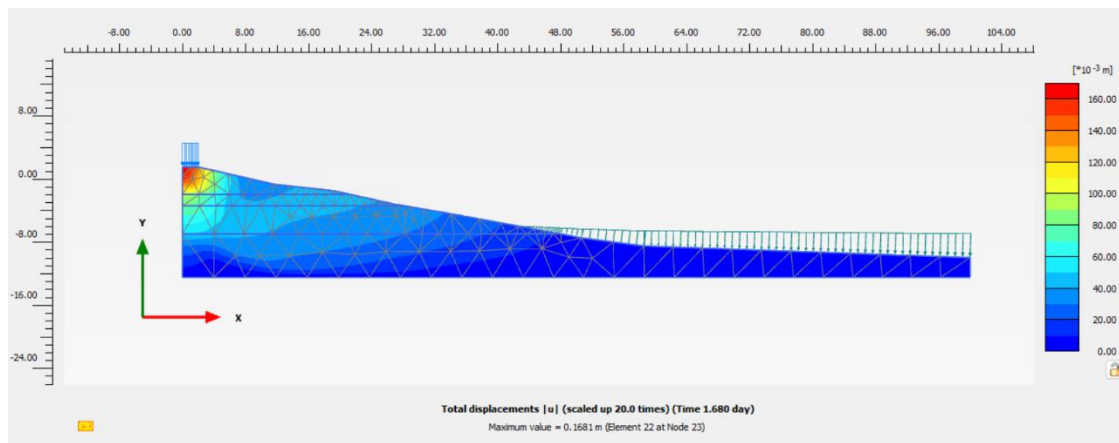


ภาพที่ 4-30 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 7) Phase 7 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 16.81 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-31 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-32 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

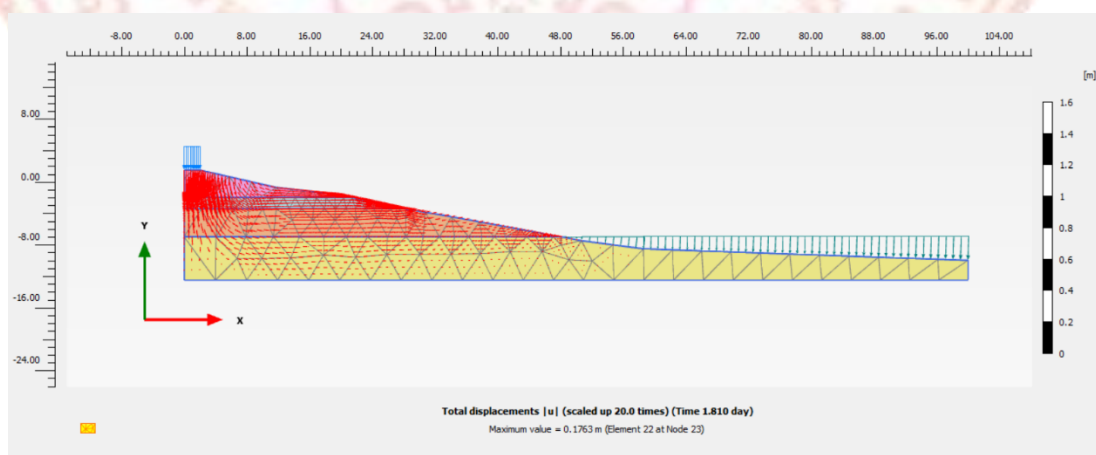


ภาพที่ 4-31 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

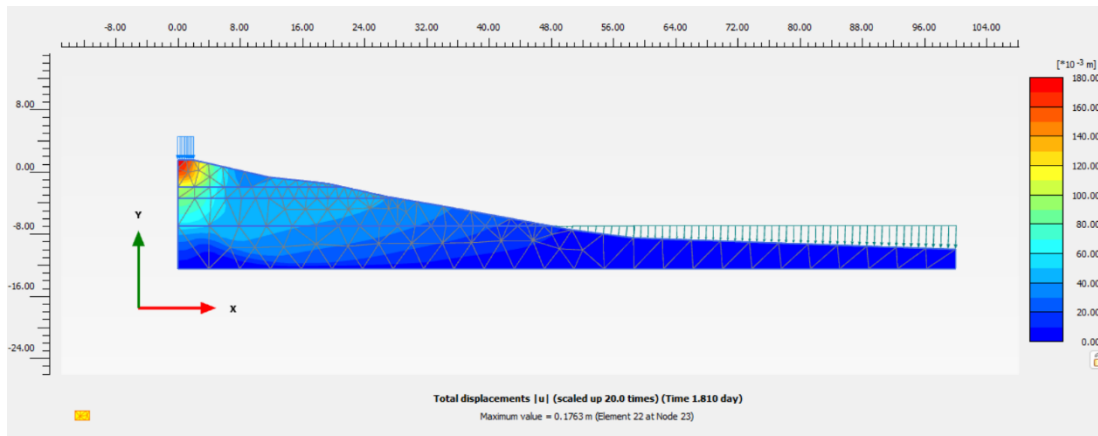


ภาพที่ 4-32 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

8) Phase 8 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 17.63 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-33 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-34 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ



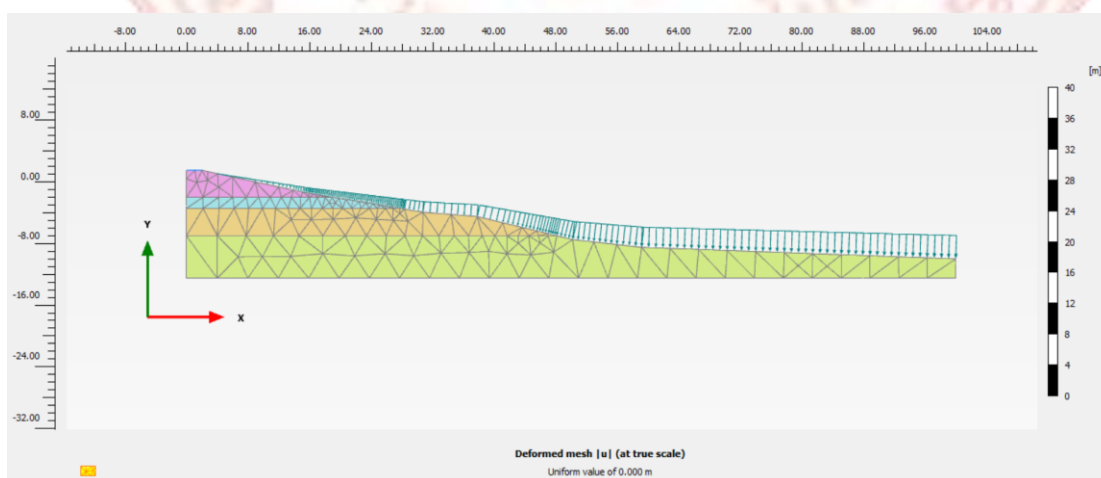
ภาพที่ 4-33 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows



ภาพที่ 4-34 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+050 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

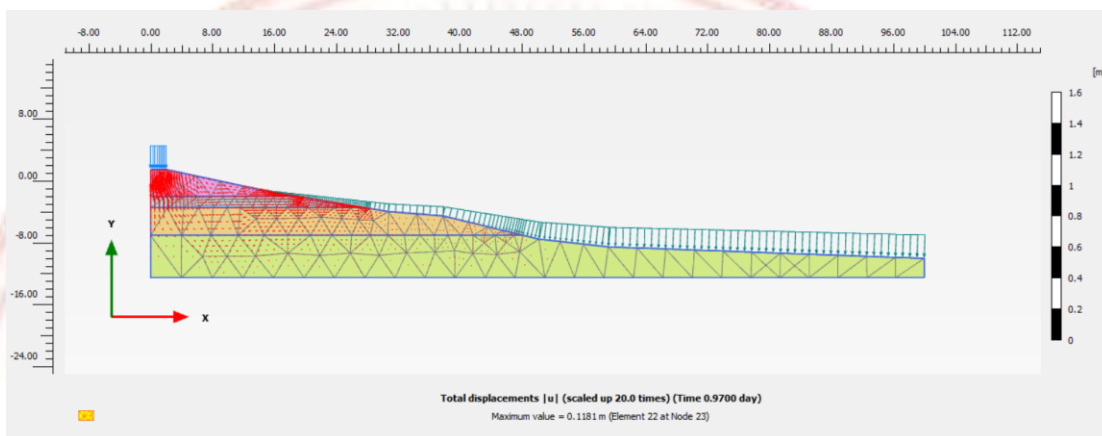
4.2.3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. หน้าตัด Sta.5+150 เมื่อทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนโดยทำการลดระดับน้ำดังตารางที่ 3-5 นั้น จะได้ค่า Total Deformation ในแต่ละ Phase ออกมา โดยค่าที่ได้จากการลดระดับน้ำและการจำลองการ Consolidation ในแต่ละ Phase มีค่าดังนี้

1) Phase 1 คือ Phase Initial ค่า Total Deformation เท่ากับ 0 ดังแสดงในภาพที่ 4-35

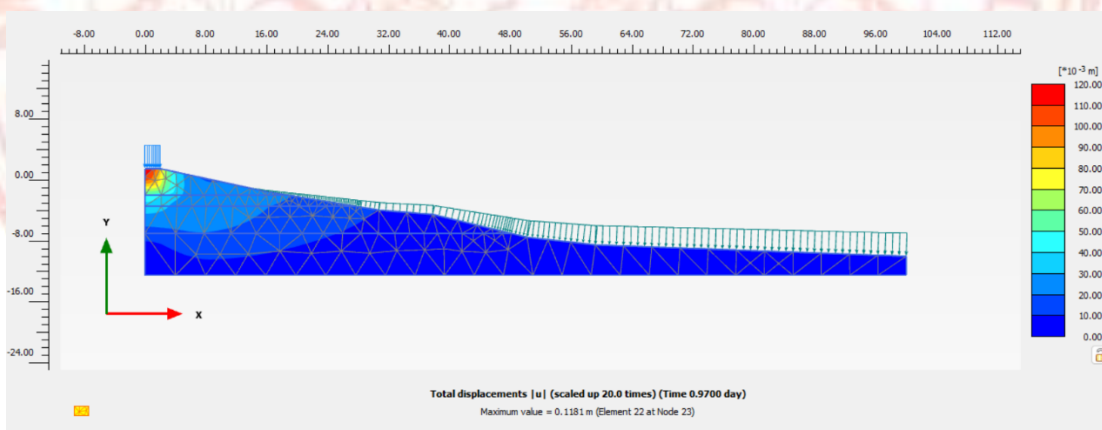


ภาพที่ 4-35 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ของ Initial Phase

- 2) Phase 2 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 11.41 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-36 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-37 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่า ค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

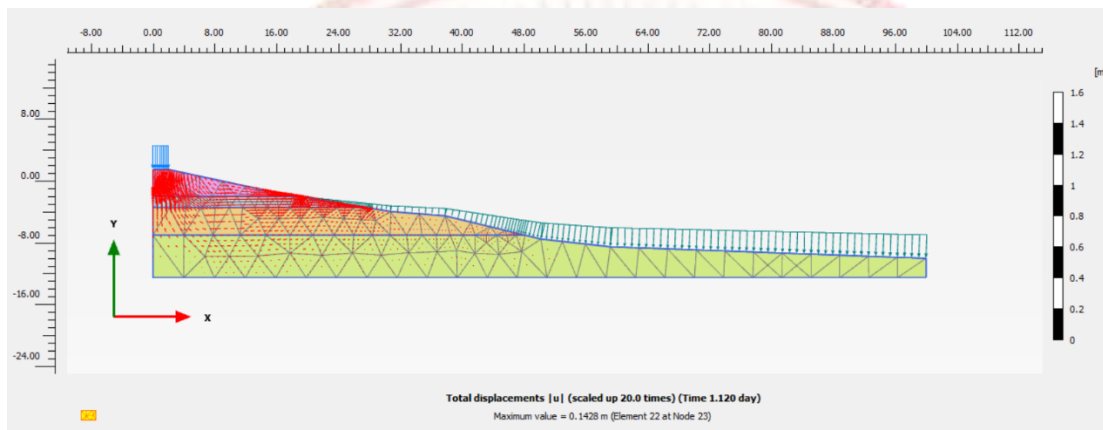


ภาพที่ 4-36 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

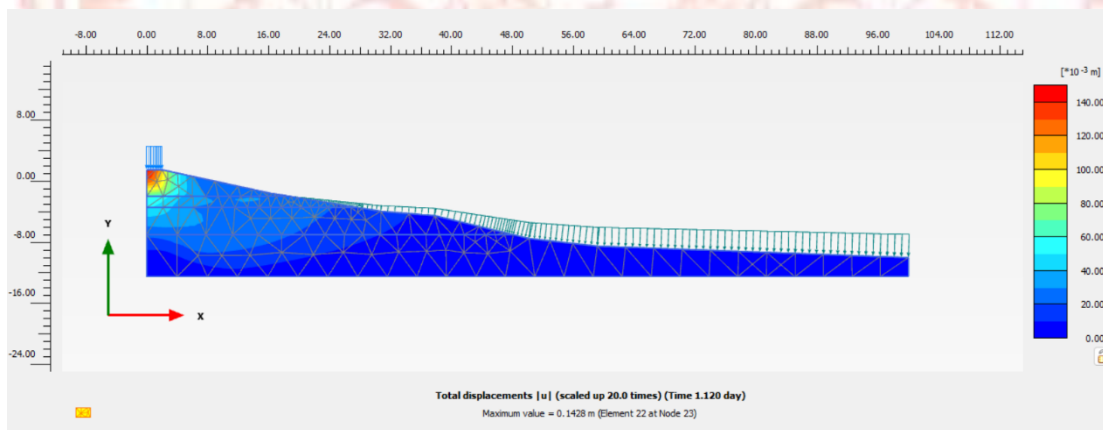


ภาพที่ 4-37 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 3) Phase 3 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 14.28 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-38 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-39 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ



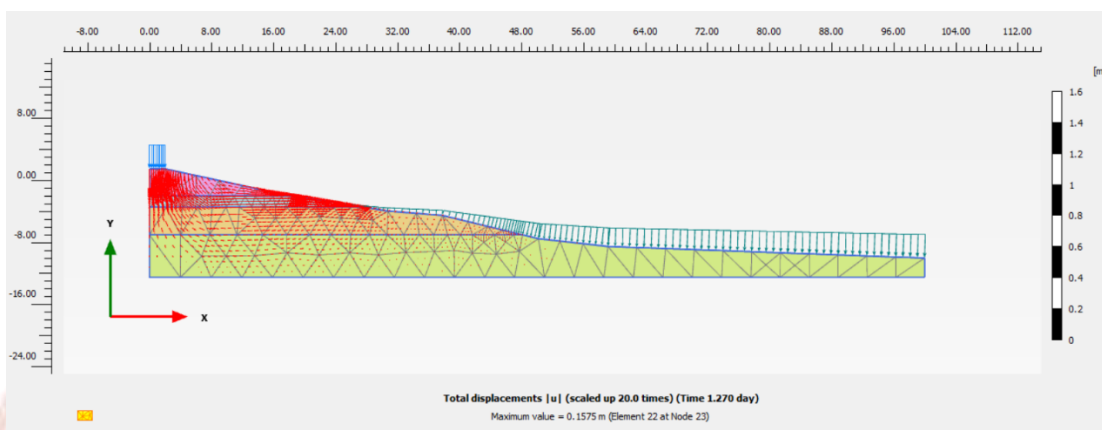
ภาพที่ 4-38 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows



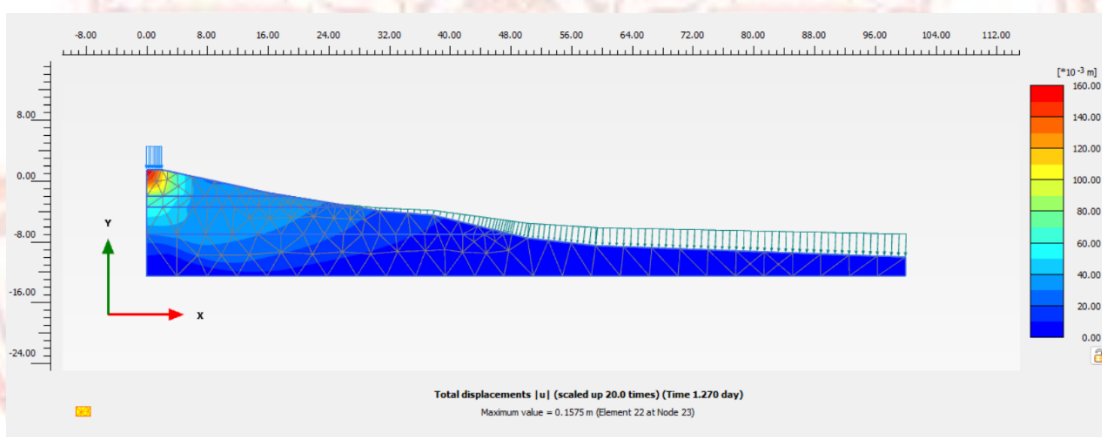
ภาพที่ 4-39 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 4) Phase 4 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 15.75 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-40 และรูปแบบ

Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-41 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่า ค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

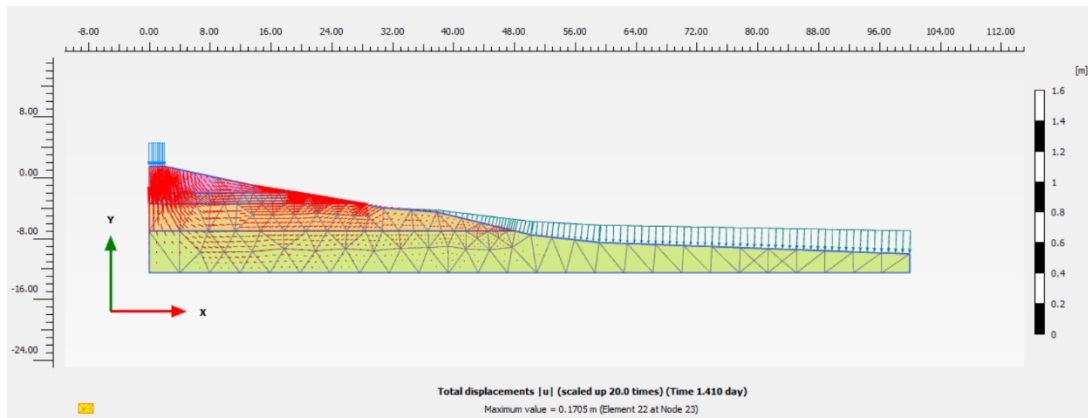


ภาพที่ 4-40 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

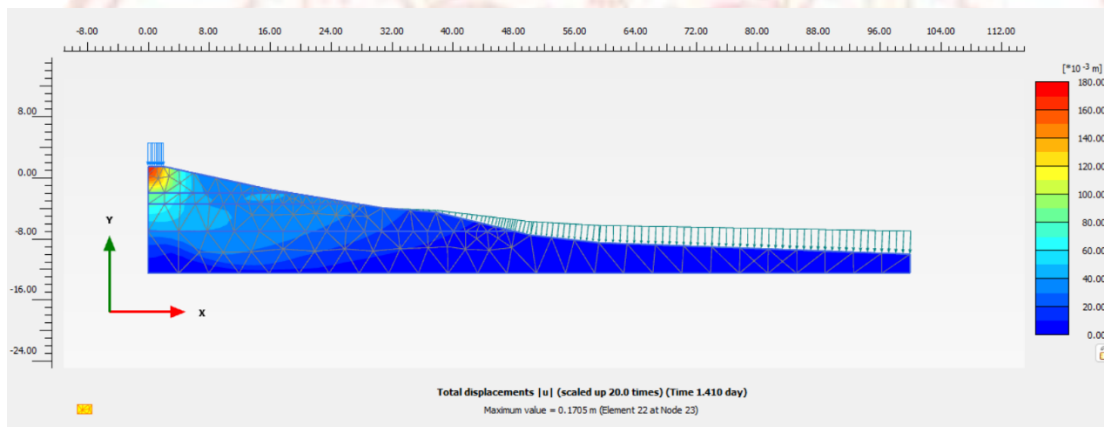


ภาพที่ 4-41 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 5) Phase 5 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 17.05 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงลงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-42 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-43 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่า ค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

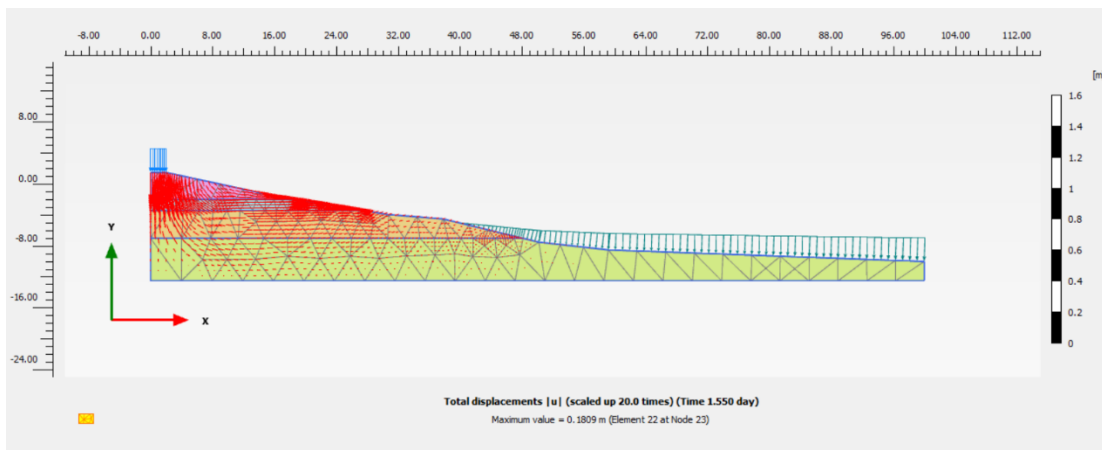


ภาพที่ 4-42 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

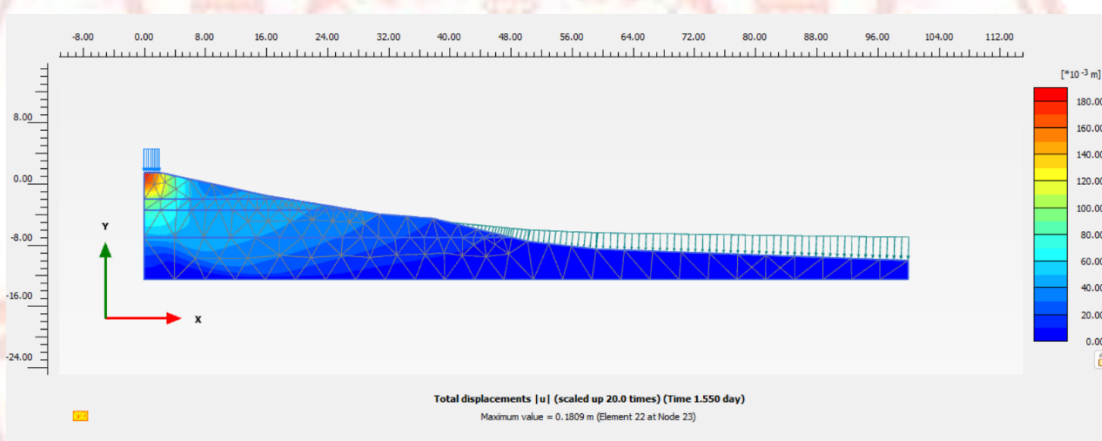


ภาพที่ 4-43 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 6) Phase 6 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 18.09 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-44 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-45 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

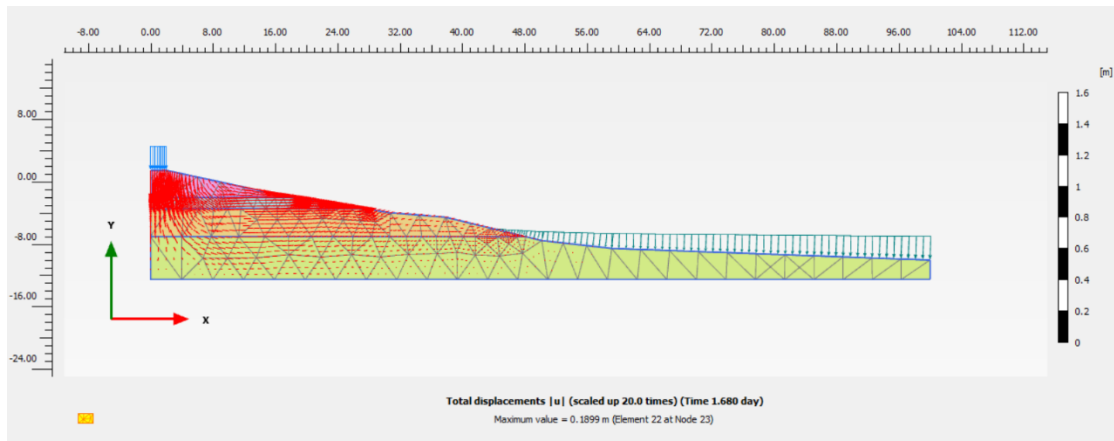


ภาพที่ 4-44 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

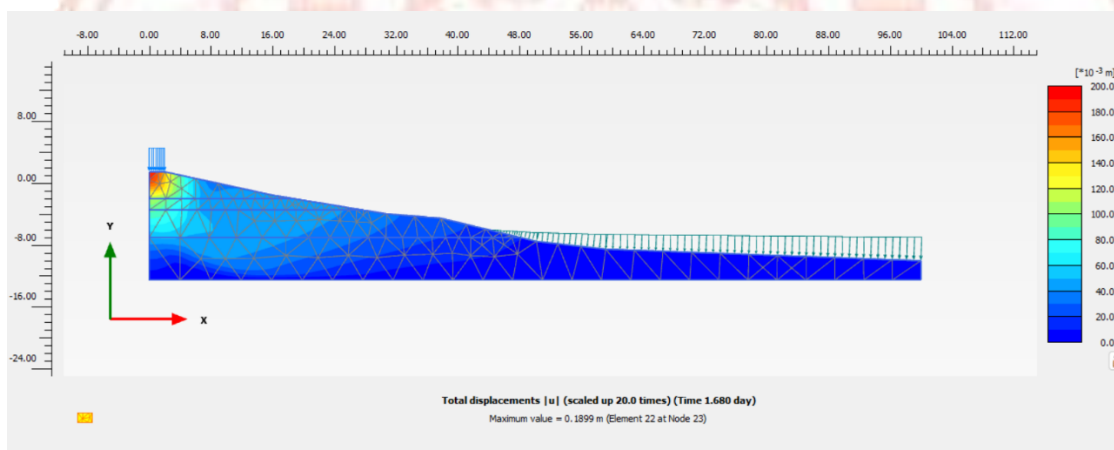


ภาพที่ 4-45 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 7) Phase 7 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 18.99 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-46 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-47 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

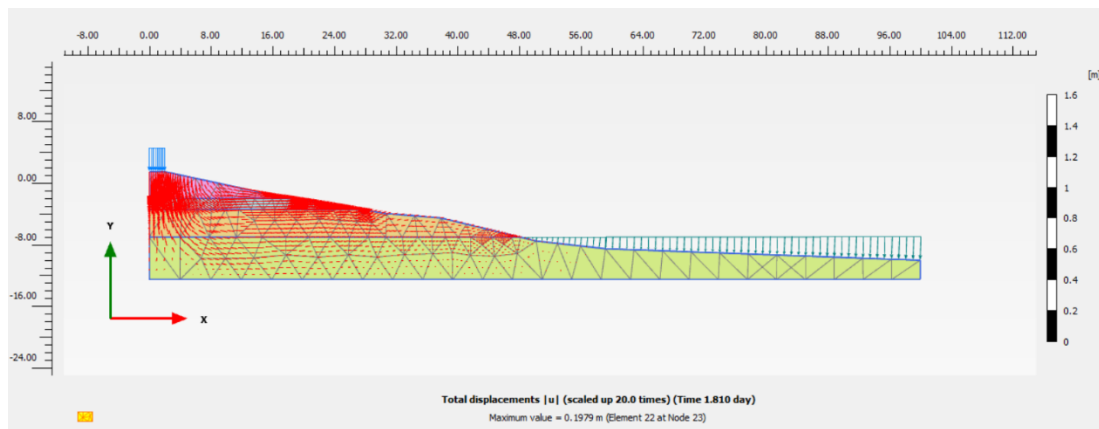


ภาพที่ 4-46 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

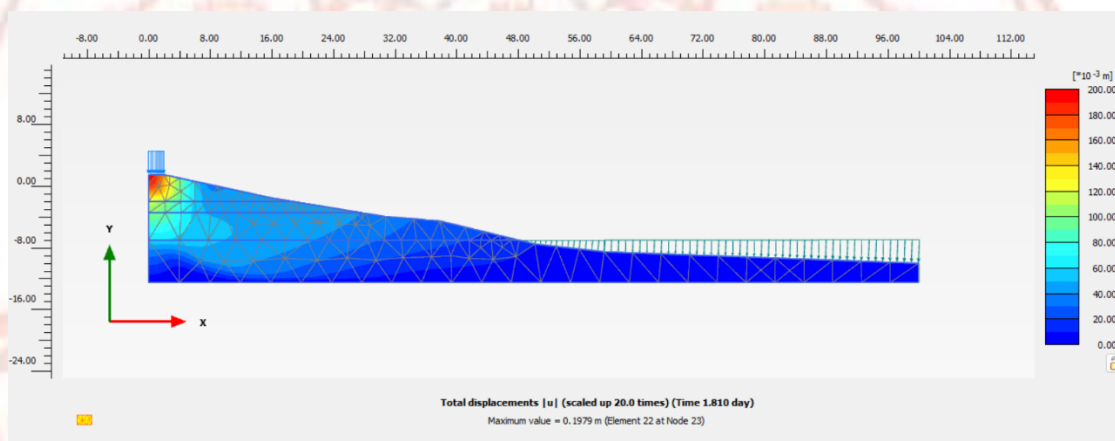


ภาพที่ 4-47 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 8) Phase 8 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 19.79 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-48 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-49 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ



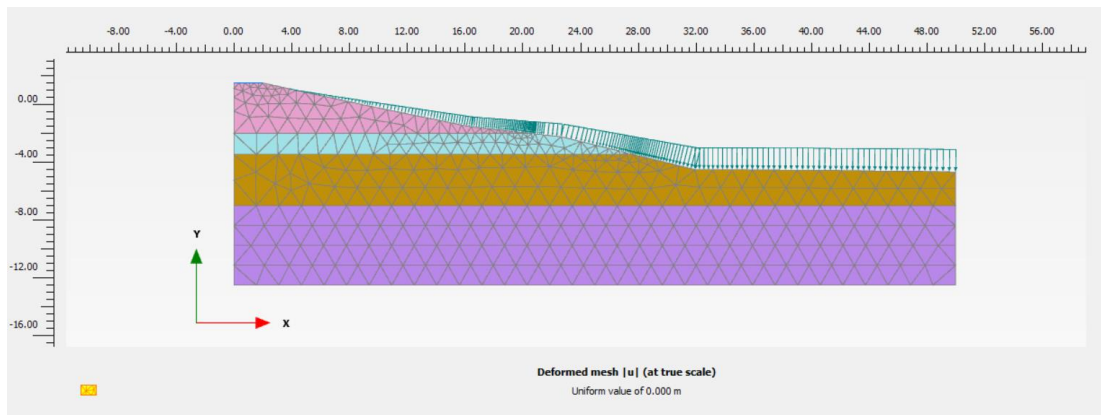
ภาพที่ 4-48 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows



ภาพที่ 4-49 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+150 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

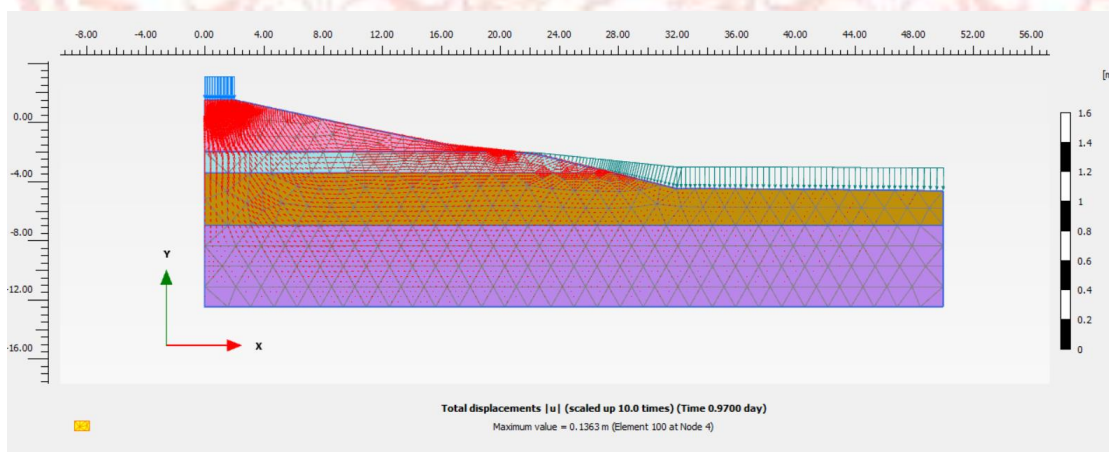
4.2.4 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของลาดดินขณะทำการพร่องน้ำออกจากบึงที่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. หน้าตัด Sta.5+450 เมื่อทำการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนโดยทำการลดระดับน้ำดังตารางที่ 3-5 นั้น จะได้ค่า Total Deformation ในแต่ละ Phase ออกมา โดยค่าที่ได้จากการลดระดับน้ำและการจำลองการ Consolidation ในแต่ละ Phase มีค่าดังนี้

1) Phase 1 คือ Phase Initial ค่า Total Deformation เท่ากับ 0 ดังแสดงในภาพที่ 4-50

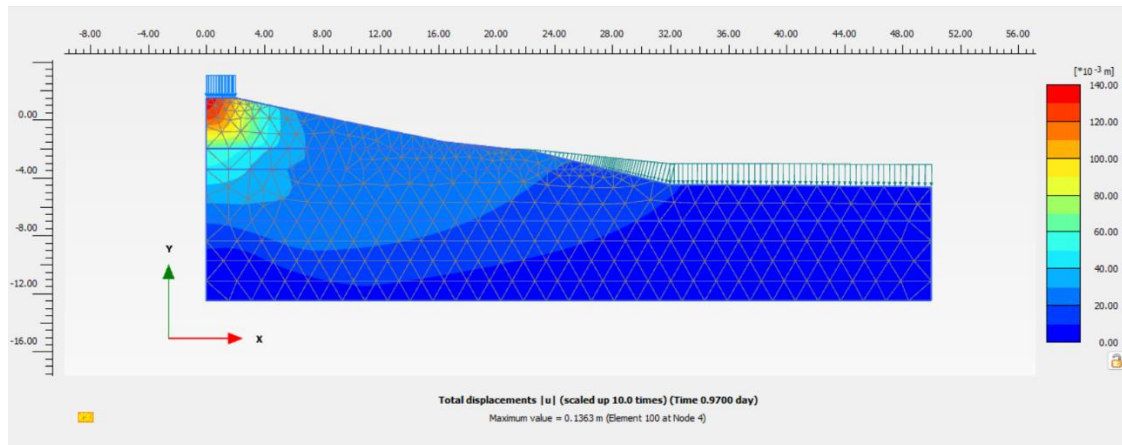


ภาพที่ 4-50 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ของ Initial Phase

2) Phase 2 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 13.63 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-51 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-52 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

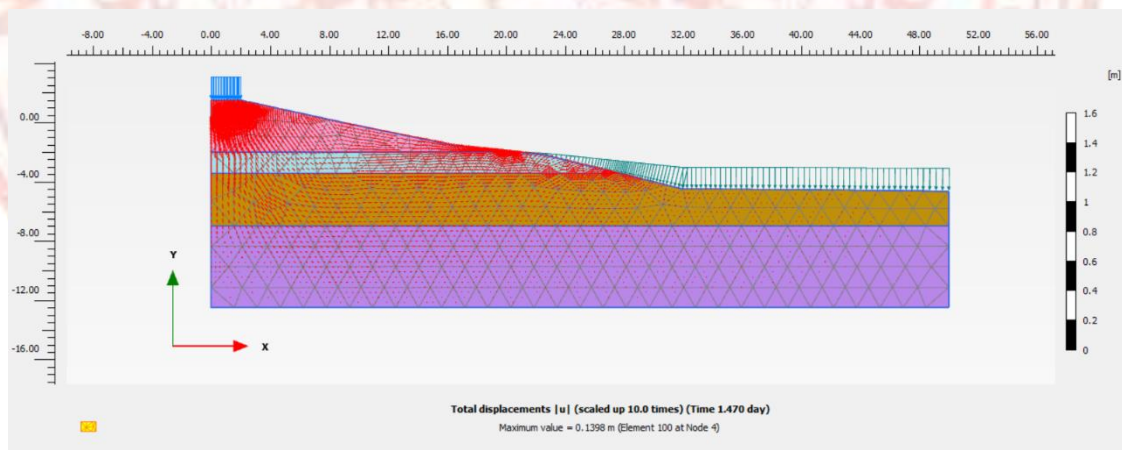


ภาพที่ 4-51 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

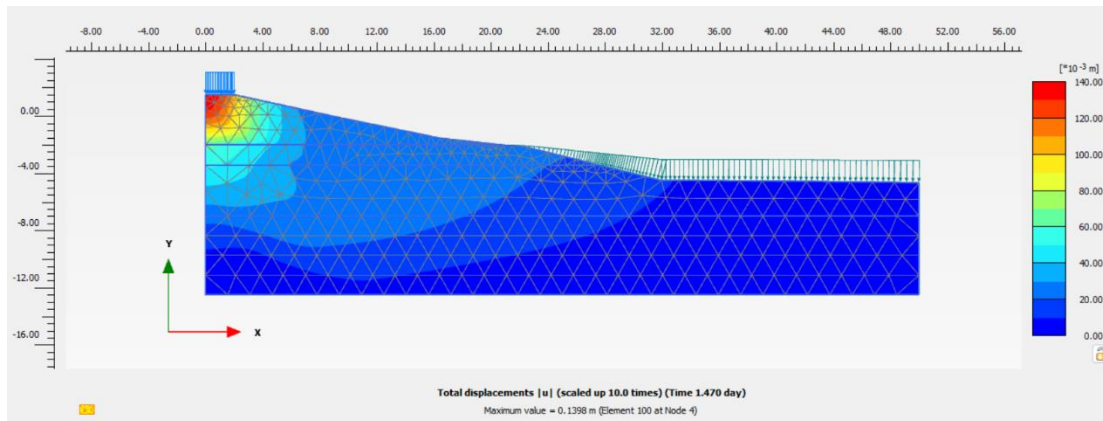


ภาพที่ 4-52 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -1.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 3) Phase 3 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 13.98 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-53 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-54 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

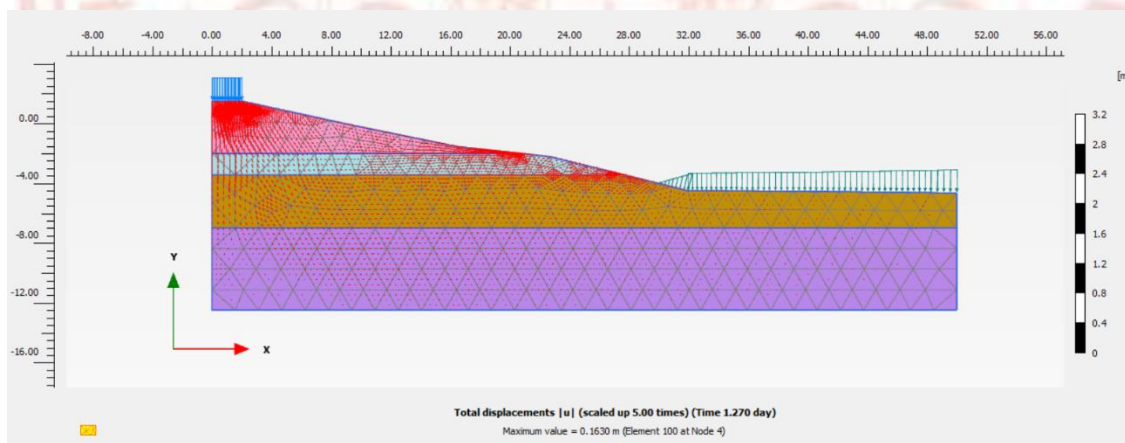


ภาพที่ 4-53 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

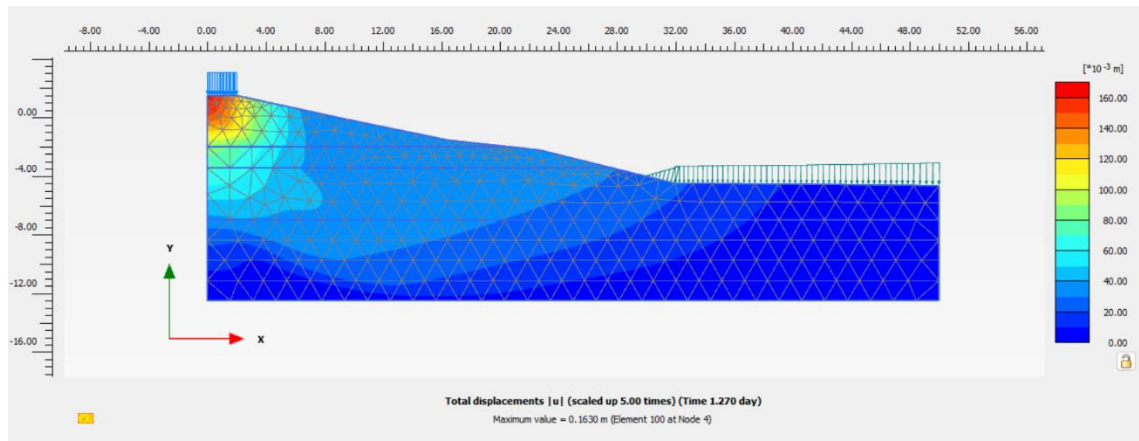


ภาพที่ 4-54 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -1.00 ม.รทก. จนถึง -2.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 4) Phase 4 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 16.30 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-55 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-56 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

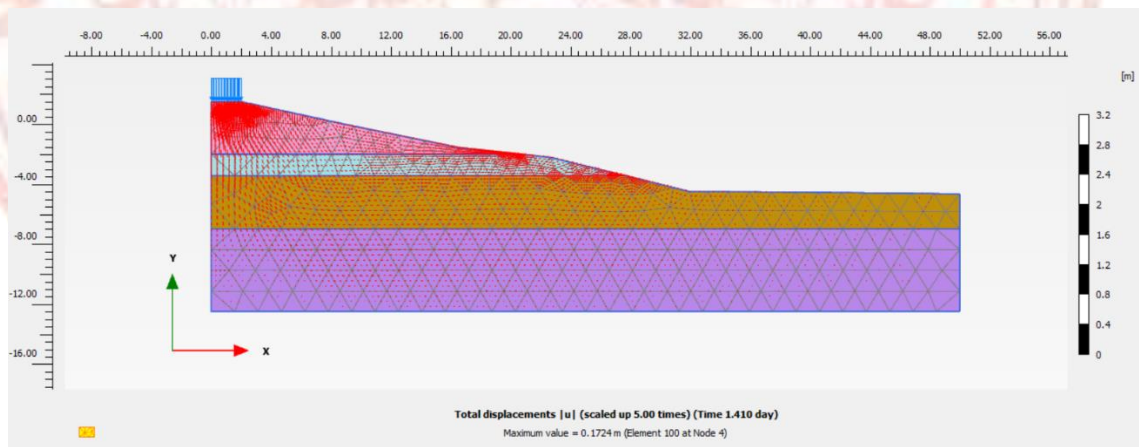


ภาพที่ 4-55 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

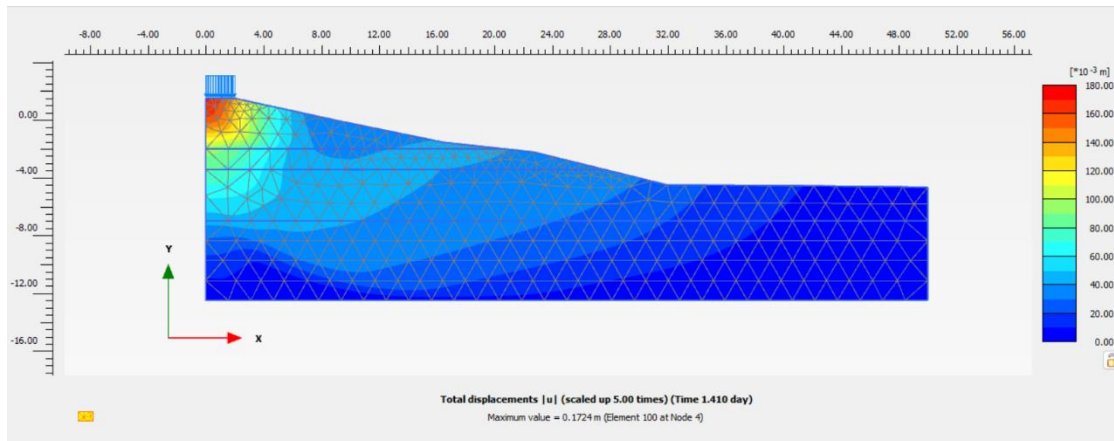


ภาพที่ 4-56 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -2.00 ม.รทก. จนถึง -3.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

5) Phase 5 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 17.24 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-57 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-58 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

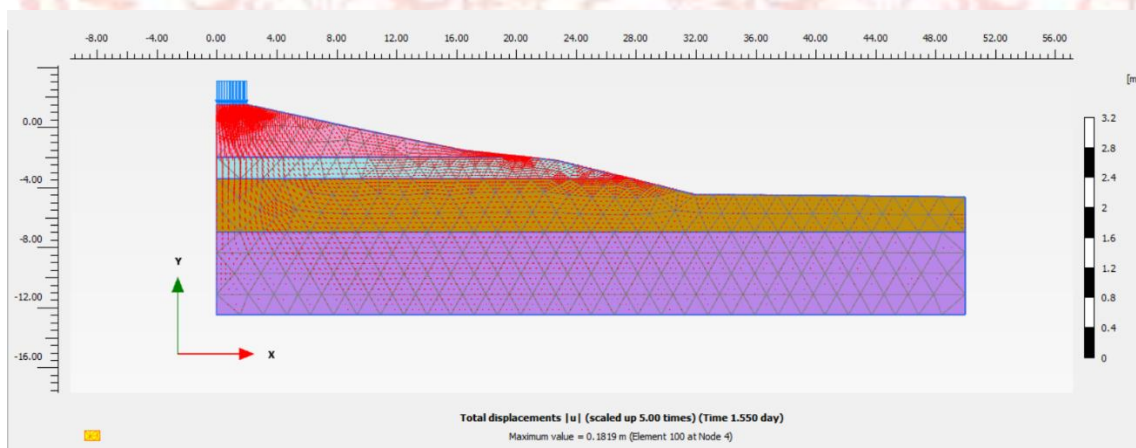


ภาพที่ 4-57 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

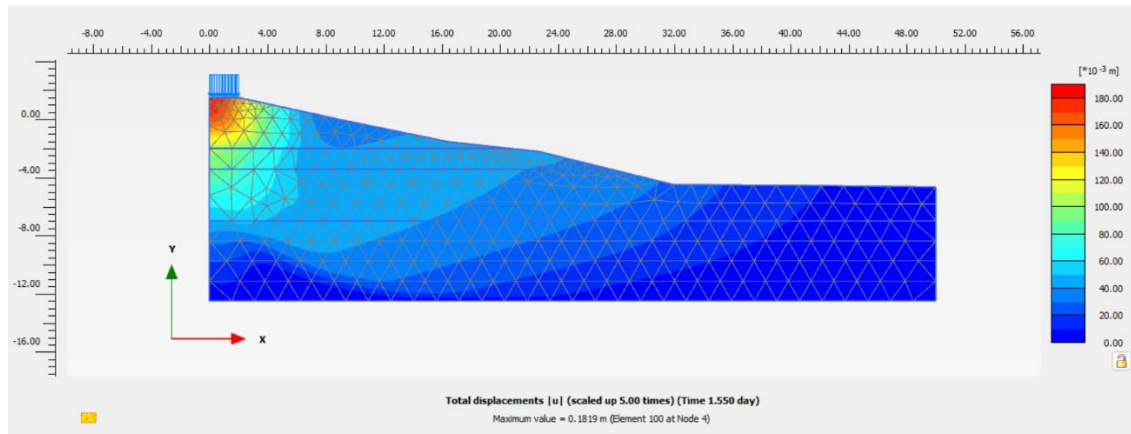


ภาพที่ 4-58 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -3.00 ม.รทก. จนถึง -4.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

- 6) Phase 6 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 18.19 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-59 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-60 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

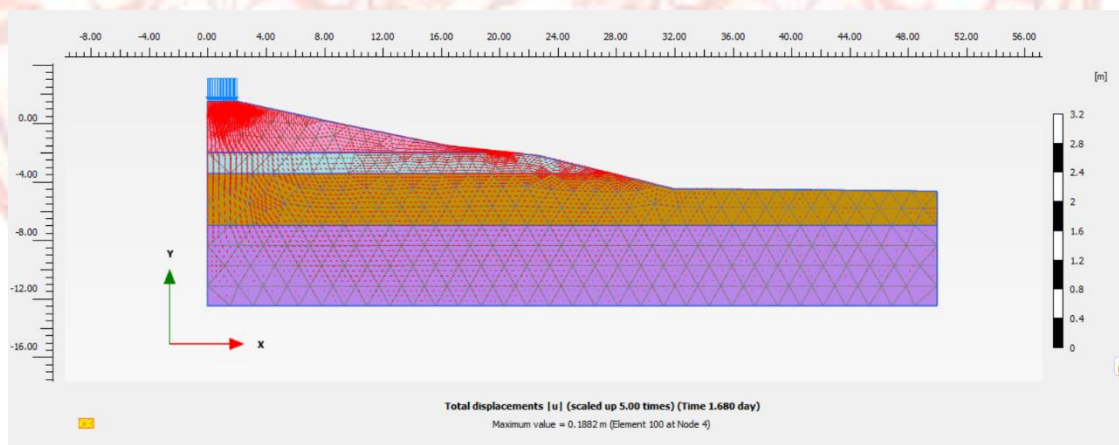


ภาพที่ 4-59 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

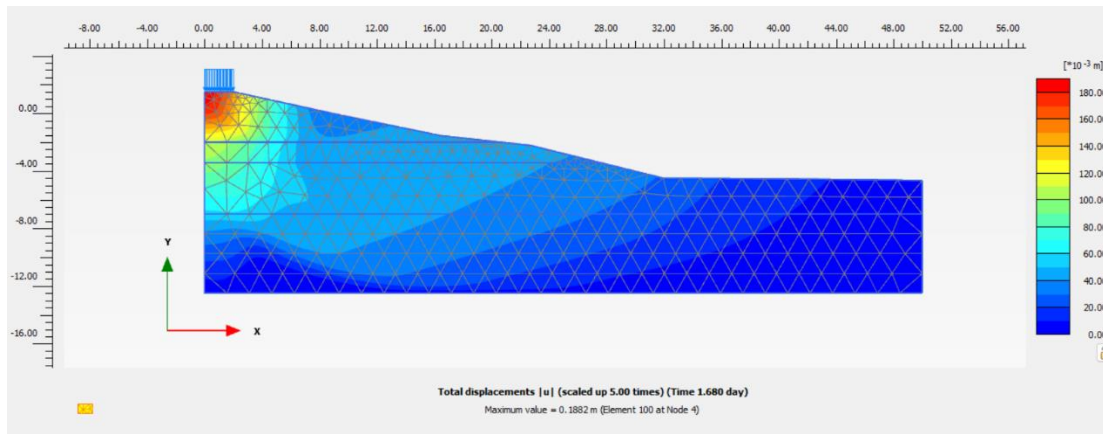


ภาพที่ 4-60 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -4.00 ม.รทก. จนถึง -5.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

7) Phase 7 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 18.82 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-61 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-62 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ

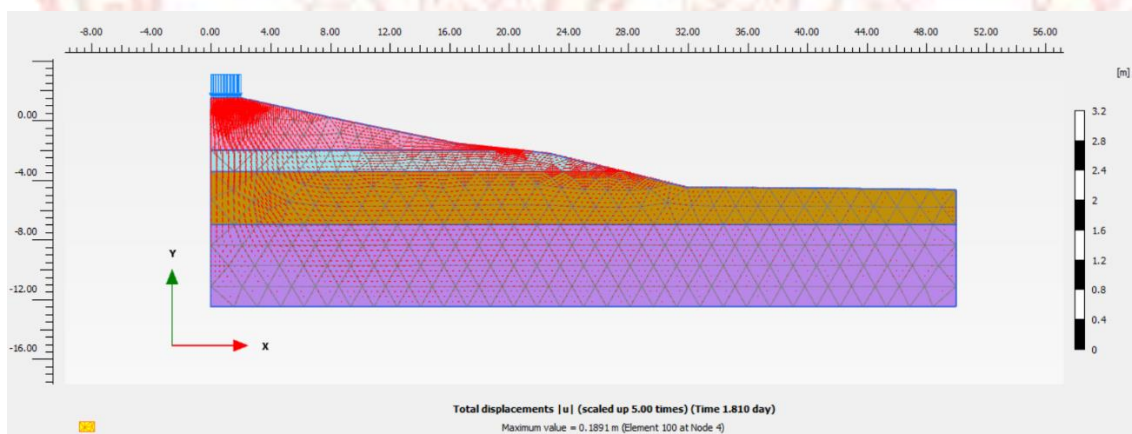


ภาพที่ 4-61 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows

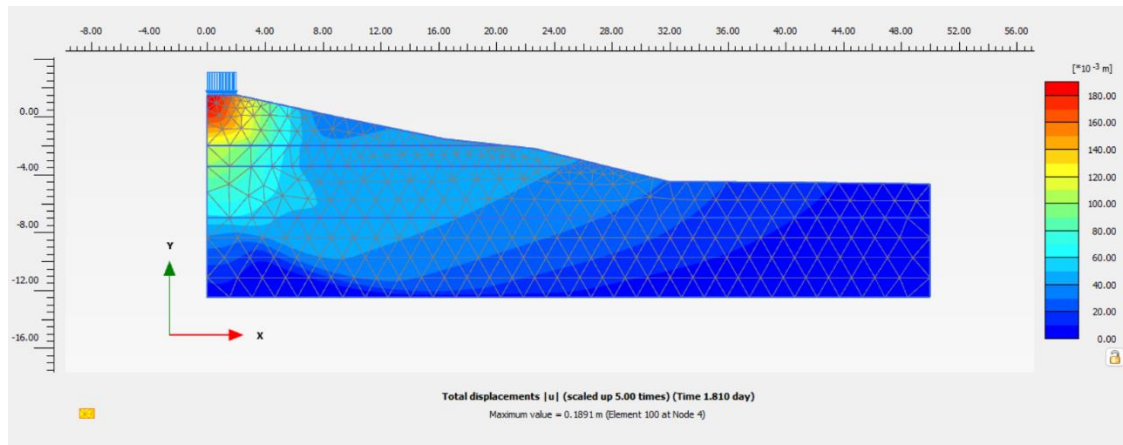


ภาพที่ 4-62 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -5.00 ม.รทก. จนถึง -6.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

8) Phase 8 คือ Phase ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ค่า Total Deformation เท่ากับ 18.91 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปแบบ Displacement Arrows ดังแสดงในภาพที่ 4-63 และรูปแบบ Contour Shade ดังแสดงในภาพที่ 4-64 และจากผลที่ได้จากทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเกิดบริเวณที่มี Load กระทำ



ภาพที่ 4-63 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Displacement Arrows



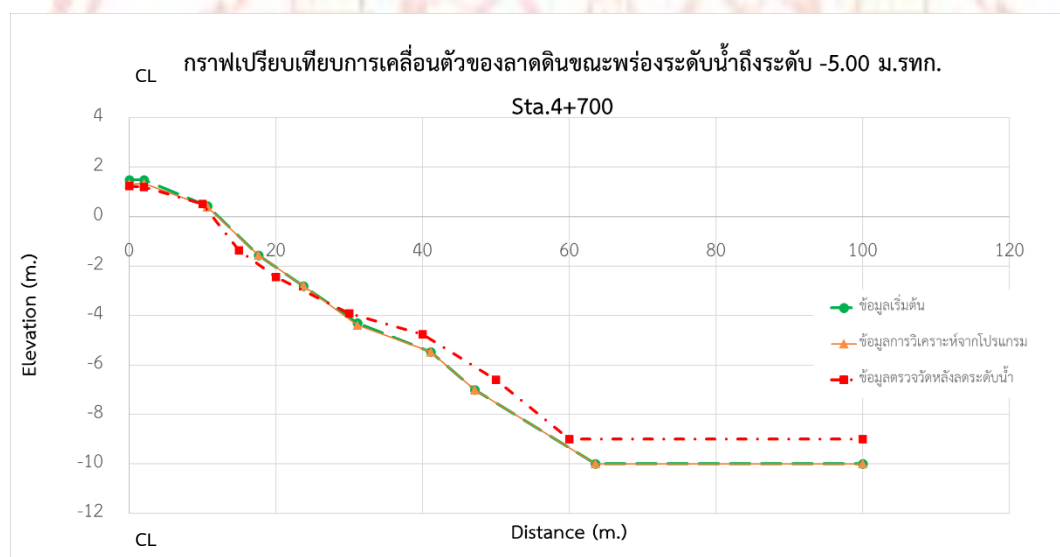
ภาพที่ 4-64 ผลการวิเคราะห์ Total Deformation ของลาดดินบริเวณ Sta.5+450 ที่ทำการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนลงจากระดับ -6.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. ในรูปแบบ Contour Shade

สรุปได้ว่าการจำลองการลดระดับน้ำจากระดับ 0.00 ม.รทก. จนถึง -7.00 ม.รทก. พบว่าที่หน้าตัด Sta.4+700 มีค่าการเสียรูปของลาดดินสูงสุดเท่ากับ 20.97 เซนติเมตร ที่หน้าตัด Sta.5+050 มีค่าการเสียรูปของลาดดินสูงสุดเท่ากับ 17.63 เซนติเมตร ที่หน้าตัด Sta.5+150 มีค่าการเสียรูปสูงสุดเท่ากับ 19.79 เซนติเมตร และที่หน้าตัด Sta.5+450 มีค่าการเสียรูปสูงสุด 18.91 เซนติเมตร

4.3 เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริงเมื่อดำเนินการสูบน้ำภายในบึงหนองบอนที่ระดับน้ำเท่ากับ -5.00 ม.รทก.

4.3.1 เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริงเมื่อดำเนินการสูบน้ำภายในบึงหนองบอนที่ระดับน้ำเท่ากับ -5.00 ม.รทก. ที่หน้าตัด Sta.4+700 แสดงดังภาพที่ 4-65

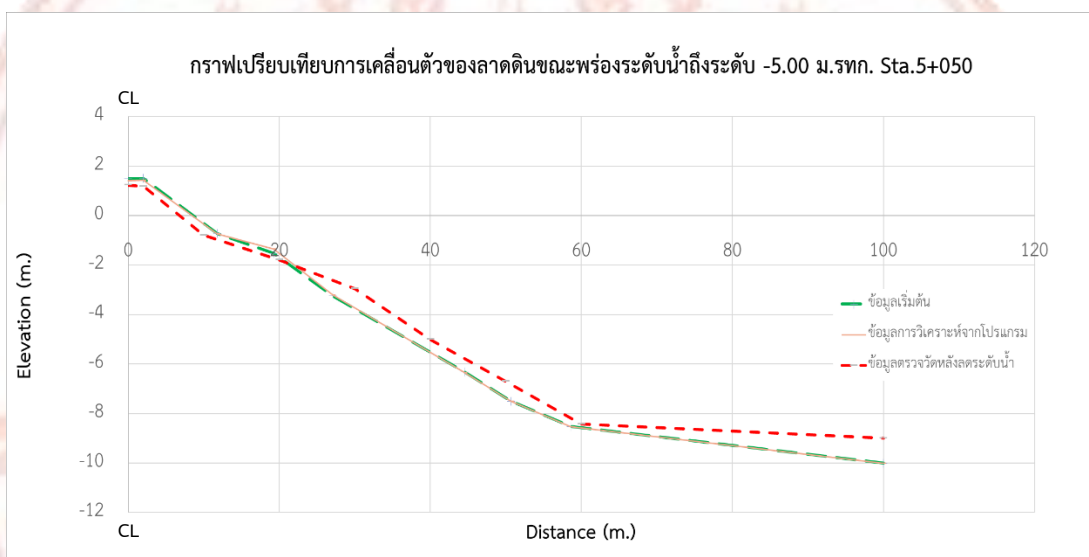
จากกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของดิน หลังทำการพร่องระดับน้ำถึงระดับ -5.00 ม.รทก. แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดหน้างานจริง มีค่าความแตกต่างกันสูงสุด 1 เมตร ที่บริเวณระยะทางเท่ากับ 60 – 100 เมตร จาก Center Line และแตกต่างกันต่ำสุดเท่ากับ 0.06 เมตร ที่บริเวณระยะทางเท่ากับ 0 – 2 เมตร จาก Center Line



ภาพที่ 4-65 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริง ที่หน้าตัด Sta.4+700

4.3.2 เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริงเมื่อดำเนินการสูบน้ำภายในบึงหนองบอนที่ระดับน้ำเท่ากับ -5.00 ม.รทก. ที่หน้าตัด Sta.5+050 แสดงดังภาพที่ 4-66

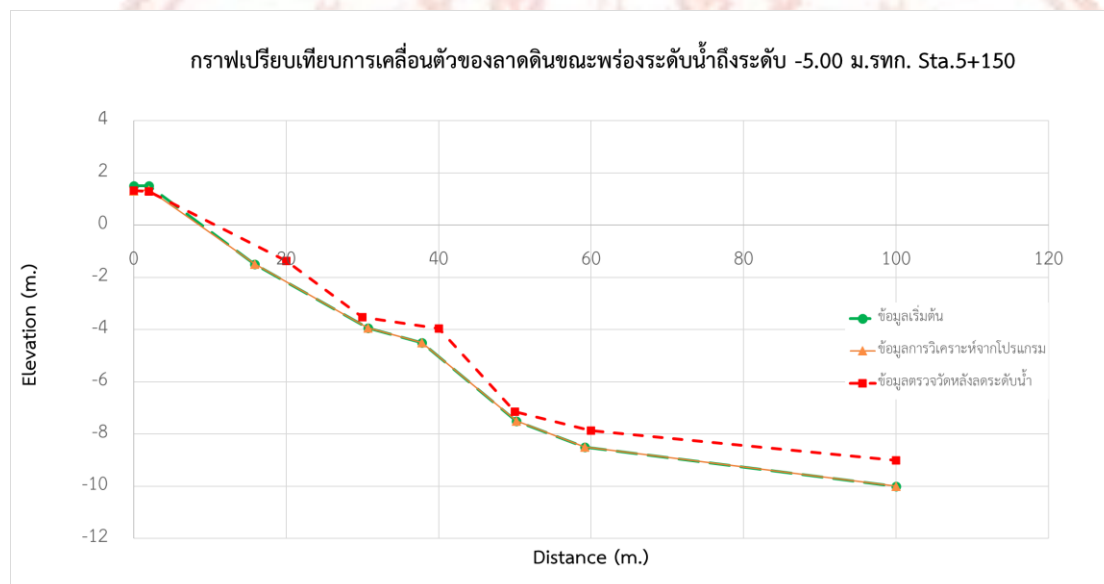
จากกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างหลังทำการพร่องระดับน้ำถึงระดับ -5.00 ม.รทก. แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดหน้างานจริง มีค่าความแตกต่างกันสูงสุด 1 เมตร ที่บริเวณระยะทางเท่ากับ 60 – 100 เมตร จาก Center Line และแตกต่างกันต่ำสุดเท่ากับ 0.00 เมตร ที่บริเวณระยะทางเท่ากับ 59 เมตร จาก Center Line



ภาพที่ 4-66 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริง ที่หน้าตัด Sta.5+050

4.3.3 เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริงเมื่อดำเนินการสูบน้ำภายในบึงหนองบอนที่ระดับน้ำเท่ากับ -5.00 ม.รทก. ที่หน้าตัด Sta.5+150 แสดงดังภาพที่ 4-67

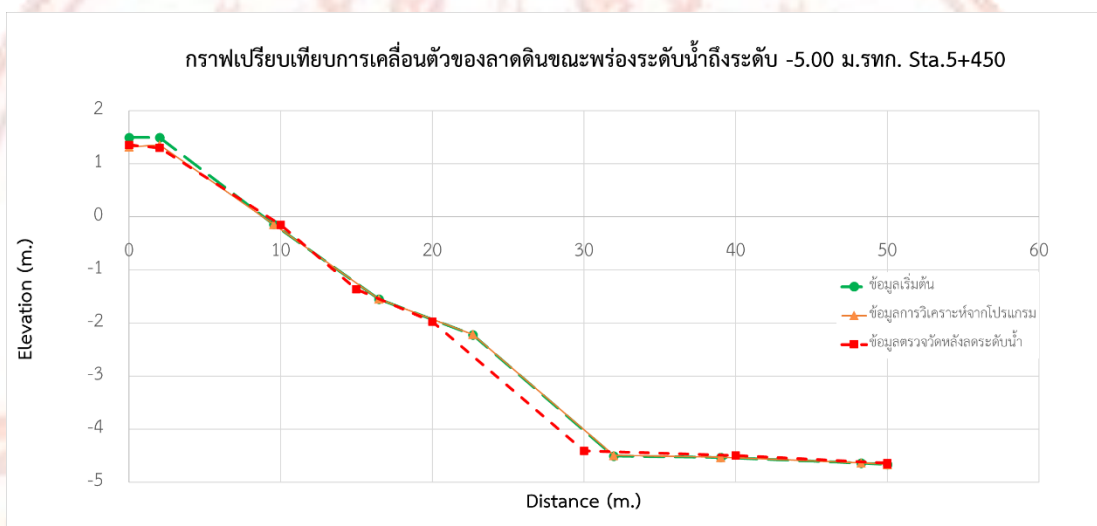
จากกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างหลังทำการพร่องระดับน้ำถึงระดับ -5.00 ม.รทก. แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดหน้างานจริง มีค่าความแตกต่างกันสูงสุด 1 เมตร ที่บริเวณระยะทางเท่ากับ 60 – 100 เมตร จาก Center Line และแตกต่างกันต่ำสุดเท่ากับ 0.00 เมตร ที่บริเวณระยะทางเท่ากับ 0 – 2 เมตร จาก Center Line



ภาพที่ 4-67 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริง ที่หน้าตัด Sta.5+150

4.3.4 เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริงเมื่อดำเนินการสูบน้ำภายในบึงหนองบอนที่ระดับน้ำเท่ากับ -5.00 ม.รทก. ที่หน้าตัด Sta.5+450 แสดงดังภาพที่ 4-68

จากกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างหลังทำการพร่องระดับน้ำถึงระดับ -5.00 ม.รทก. แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดหน้างานจริง มีค่าความแตกต่างกันสูงสุด 0.24 เมตร ที่บริเวณระยะทางเท่ากับ 15 – 20 เมตร จาก Center Line และแตกต่างกันต่ำสุดเท่ากับ 0.00 เมตร ที่บริเวณระยะทางเท่ากับ 40-50 เมตร จาก Center Line



ภาพที่ 4-68 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินภายในบึงหนองบอนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมจริง ที่หน้าตัด Sta.5+450

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพและพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวด้านข้าง จากการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนตั้งแต่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึง -7.00 ม.รทก. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ กับข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมของดินภายในบึงหนองบอนขณะสูบน้ำจนถึงระดับที่ได้ทำการวิเคราะห์ที่ระดับ -5.00 ม.รทก. ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การจำลองเสถียรภาพและพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการลดระดับน้ำภายในบึงหนองบอนตั้งแต่ระดับ 0.00 ม.รทก. ถึง -7.00 ม.รทก. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าลาดดินบึงหนองบอนที่ทำการศึกษาจำนวน 4 หน้าตัด ได้แก่ Sta.4+700 , Sta.5+050 , Sta.5+150 และ Sta.5+450 มีค่า Safety of Factor มากกว่า 1.0 ทุกหน้าตัด แสดงให้เห็นว่าลาดดินบึงหนองบอนมีเสถียรภาพเพียงพอหากต้องการพร่องน้ำออกจากบึงหนองบอนจนถึงระดับกักเก็บต่ำสุด และมีการเสียรูปของลาดดินสูงสุด 20.97 เซนติเมตร บริเวณหน้าตัด Sta.4+700

5.1.2 จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS แบบ 2 มิติ กับข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมของดินภายในบึงหนองบอนขณะสูบน้ำจนถึงระดับที่ได้ทำการวิเคราะห์ที่ระดับ -5.00 ม.รทก. ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D แตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง มีความแตกต่างกันระหว่างข้อมูลโดยมีค่าแตกต่างกันต่ำสุดเท่ากับ 0.0 เมตร และสูงสุดเท่ากับ 1.0 เมตร ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอาจเป็นผลจากการตรวจวัดระดับของลาดดินที่ไม่สามารถตรวจวัดที่จุดเดิมได้ และอาจเกิดจากระดับต่ำสุดของบึง

หนองบอนมีการสะสมตะกอนดินทำให้มีระดับสูงขึ้นจาก -10.00 ม.รทก. เป็น -9.00 ม.รทก. ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 นอกเหนือจากแบบจำลองชั้นดินแบบ Mohr-Coulomb ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการเคลื่อนตัวด้านข้างของดิน ยังสามารถใช้แบบจำลองชนิดอื่นในการวิเคราะห์เพิ่มเติมได้

5.2.2 ในการศึกษาสารนิพนธ์ฉบับนี้ ใช้ผลการเจาะสำรวจดินเพียงจุดเดียวเป็นข้อมูลสำหรับใช้ Input ข้อมูลลงในโปรแกรม Plaxis 2D ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ได้ ควรมีการเจาะสำรวจเพิ่มเติมหากต้องการความแม่นยำมากขึ้น

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

สำนักการระบายน้ำ (2563) “ข้อกำหนดเฉพาะงานโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองลองลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา”

สิริัญญา ทองชาติ, วรากร ไม่เรียง (2560) “เอกสารการสอนวิชาการออกแบบฐานราก”, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชลดา กาญจนกุล และ ประสาร จิตรเพ็ชร (2563) “การจำแนกประเภทและวิเคราะห์พฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำในมวลดินเชิงวิศวกรรมสำหรับงานออกแบบฐานรากและเสาเข็มในอาคารก่อสร้าง”, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

วันชัย เทพรักษ์ (2544) “การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของชั้นดินกรุงเทพฯ เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7 กรุงเทพมหานคร

วรรวรงค์ รัตนานิคม (2561) “แผนภูมิเสถียรภาพความลาดของชั้นดินเหนียวเนื้อเดียวที่มีกำลังรับแรงคงที่. ชลบุรี:มหาวิทยาลัยบูรพา

พรพจน์ ต้นแสง,ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร,เชาวน์ หอรัญติยกุล และอภิชาติ คำภะหล้า (2549) “การวิบัติของคันดินอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ในชั้นดินเหนียวกระจายตัวแทรกด้วยชั้นดินเหนียววมตัว.”เอกสารประกอบการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11 ภูเก็ต”

มนชล ศรีชัยกุล และวีรยา ฉิมอ้อย (2563) “อิทธิพลของการลดระดับน้ำต่อเสถียรภาพความลาดของเขื่อนดินแบบแบ่งส่วน.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 7 กรุงเทพมหานคร

พิทักษ์ชน พันธ์มั่ง และวีรยา ฉิมน้อย (2559) “การเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.” บทความวิจัยวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีปีที่ 24 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2559

ชัชวาลย์ วรรณไกรโรจน์. รายการคำนวณปริมาณความจุน้ำบึงหนองบอน. เอกสารประกอบการ
ประชุมติดตามงานประจำสัปดาห์โครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำ
เจ้าพระยา.สำนักงานสนามโครงการฯ.2566, เมษายน



ภาษาอังกฤษ

Varnes, D.J. (1978) "Slope Movement type and Process Landslides and Engineering Practice," Special Report 28. Highway Research Board, National Academy of Sciences, Washington. DC

Coulomb (1776) “Essai sur une application des regles de maximis et minimis
quelques problemes de statique, relatits a l’architecture” Memoires de
Mathematique de l’Academie Royale de Science 7, Paris.

Cox, J.B. (1981). “The settlement of a 55-km long highway on soft Bangkok clay.”
Proc. 10 th Int. Conference on Soil Mech. And Foundation Engrg., 1, 47-61.

Francisco F.Martin, Bruno D.S.S Valente, Castorina F.S.Vieira and Julio B.Martins.

(2011, Dec. 8). Slope Stability of Embankments. [Online] Available:

<http://www.lib.hpu.edu.cn>

Brinkgreve, R. B. J., & Vermeer, P. A. (1998). Plaxis manual. Version7.

Dancan, J.M. (1996). “State of the Art:Limit Equilibrium and Finite Element Analysis of
Slopes.” J.Geotech. Eng. Am. Soc. Civ. Eng., 122(7), 577-596

Griffiths, D.V., and Lane, P.A., (1996). “Slope Stability Analysis by Finite Element.”
Geotechnique., 49(3), 387-403

Steinbrenner, W., 1934, “Tafeln zur Setzungsberechnung” Die Stresse, Vol.1

Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjaernsl, B. (1956). “Veiledning Ved Losning Av
Fundamenteringsoppgaver.” Norwegain Geotechnical Institute Publication 16,
Oslo.

Harr, M.E. (1996). Foundations of Theoretical Soil Mechanics. McGraw Hill, New York.



ภาคผนวก





STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED SUMMARY OF TEST RESULTS																					
PROJECT			ก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำจากบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ระยะที่ 1										LOCATION			BY PT			OBSERVED W.L.		STANDARD PENETRATION(N) (blow/m)
DATE			7/4/2010			BORING No. BH-2			JOB No. 12651.14			LOCATION			BY PT			OBSERVED W.L.		-2.50 M.	
SAMPLE No.	DEPTH M.		WATER CONTENT %		ATTERBERG LIMIT %		WET UNIT WEIGHT g/cm ³	SIEVE ANALYSIS % FINER					CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH t/m ²					POCKET PENETRATION		
	FROM	TO	LL	PL	PI	No. 3/8"		No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	UNCONFINED SHEAR		FIELD VANE SHEAR	UU TEST						
ST-01	1.50	2.00	44.70				1.76		94	94	91	86	45	CH	2.40					1.3	
SS-02	3.00	3.45	11.60						94					SM						10	
ST-03	4.50	5.00	60.50				1.66							CH	2.00					1.3	
ST-04	5.00	5.50	65.80		75.10	30.30	44.80	1.63						CH	1.60					1.3	
ST-05	6.00	6.50	93.60				1.48							CH	1.20					1.3	
ST-06	6.50	7.00	102.00				1.45							CH	2.00					1.3	
ST-07	7.50	8.00	102.00				1.46							CH	1.90					1.3	
ST-08	8.00	8.50	80.00		96.10	4.30	55.80	1.50						CH	2.20					1.3	
ST-09	9.00	9.50	81.00				1.55							CH	2.70					1.3	
ST-10	10.50	11.00	79.50				1.53							CH	1.80					1.3	
ST-11	12.00	12.50	57.20		76.30	35.20	41.10	1.68						CH	4.00					1.3	
ST-12	13.50	14.00	23.70				2.04							CH	8.80					7.5	
SS-13	15.00	15.45	29.80		59.20	24.50	34.70	1.43						CH						15.0	
SS-14	16.50	16.95	34.00				1.91							CH	11.30					13.8	
SS-15	18.00	18.45	25.40		50.90	16.90	34.00	1.97						CH						12.5	
SS-16	19.50	19.95	18.60						94	94	91	86	45	CL						26	
SS-17	21.00	21.45			(No Recovery)									(SM)						40	
SS-18	22.50	22.95	19.40				2.16							CH						13.8	
SS-19	24.00	24.45			(No Recovery)									(SM)						42	
SS-20	25.50	25.95	16.40						100	98	93	77	25	SM						40	
SS-21	27.00	27.45	19.90											SM						35	

ภาพ ก-1 ข้อมูลดินของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำจากบึงหนองบอนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา

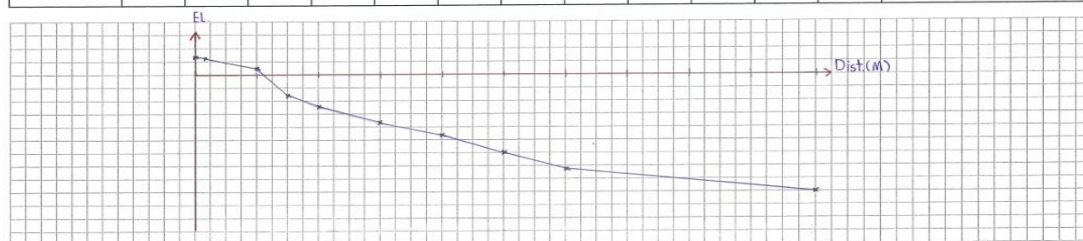
ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวัดระดับของลาดดินภายในบึงหนองบอน และรูปภาพการทรุดตัว



Cross Section ในบึงหนองบอน

STA.	Dist.	CL	2	10	15	20	30	40	50	60	100		หมายเหตุ
(4+700)	EL.	+1.25	+1.21	+0.91	-1.37	-2.43	-3.92	-4.76	-6.02	-7.14	-9.00		



วันที่ 11 ม.ค. 2566

ผู้บันทึกรายงาน

นริศ

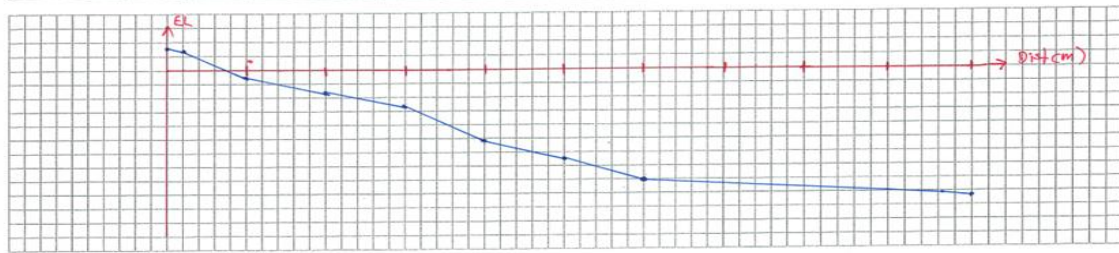
ตรวจสอบโดย

นางสาวนันทิกร อวดพร
วิศวกรโยธา

ภาพ ข-1 ผลตรวจวัดระดับของลาดดิน Sta.4+700

Cross Section ในบึงหนองบอน

STA.	Dist.	CL	2	10	15	20	30	40	50	60	100		หมายเหตุ
(5+050)	EL.	+1.23	+1.18	-0.79	ดินป่าไผ่	-1.79	-2.95	-5.01	-6.70	-8.02	-9.20		



วันที่ 11 ต.ค. 2566

ผู้บันทึกรายงาน

ธีรวิทย์

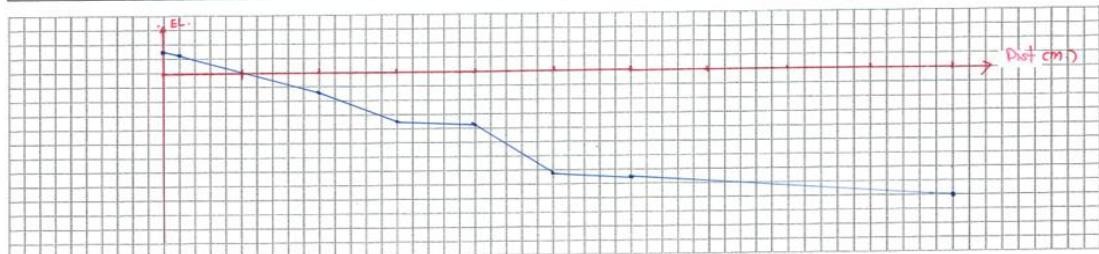
ตรวจสอบโดย

Spk.

ภาพ ข-2 ผลตรวจวัดระดับของลาดดิน Sta.5+050

Cross Section ในบึงหนองบอน

STA.	Dist.	CL	2	20	30	40	50	60	100				หมายเหตุ
(5+150)	EL.	+1.32	+1.29	-1.37	-3.53	-3.96	-7.14	-7.26	-9.00				



วันที่ 11 ต.ค. 2566

ผู้บันทึกรายงาน

ธีรวิทย์

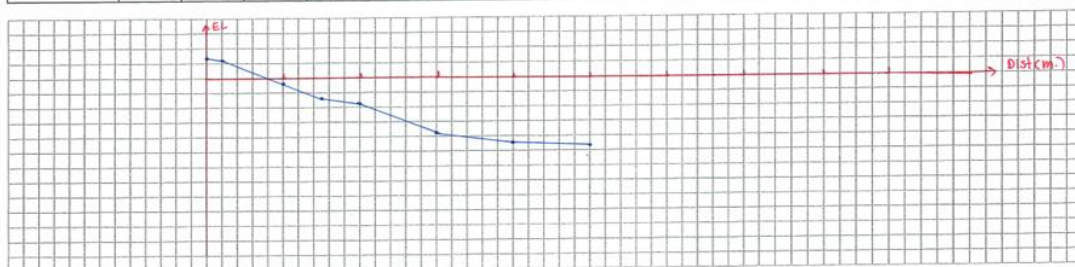
ตรวจสอบโดย

Spk.

ภาพ ข-3 ผลตรวจวัดระดับของลาดดิน Sta.5+15

Cross Section ในบึงหนองบอน

STA.	Dist.	CL	0	2	10	15	20	30	40	50			หมายเหตุ
(5+450)	EL.	+1.35	-	+1.30	-0.15	-1.36	-1.97	-3.92	-4.90	-4.48			



วันที่ 11 ต.ค. 2566

ผู้บันทึกรายงาน

ผู้ร่าง

ตรวจสอบโดย

Sylla

ภาพ ข-4 ผลตรวจวัดระดับของลาดดิน Sta.5+450





ภาพ ข-5 การเคลื่อนตัวของดินที่ตรวจวัดจริงของ Sta.4+700



ภาพ ข-6 การเคลื่อนตัวของดินที่ตรวจวัดจริงของ Sta.5+050



ภาพ ข-7 การเคลื่อนตัวของดินที่ตรวจวัดจริงของ Sta.5+150



ภาพ ข-8 การเคลื่อนตัวของดินที่ตรวจวัดจริงของ Sta.5+450



ภาคผนวก ค

ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Plaxis 2 D

ตาราง ค-1 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม
Plaxis 2 D ของหน้าตัด Sta.4+700

Sta.4+700						
ข้อมูลก่อนตบ		ข้อมูลจาก Plaxis		ข้อมูลตรวจวัดจริง		ค่าความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม Plaxis กับ ตรวจวัดจริง (m.)
Distance (m.)	Elevation (m.)	Distance (m.)	Elevation (m.)	Distance (m.)	Elevation (m.)	
0.0	1.5	0.00	1.31	0.00	1.25	0.06
2.0	1.5	2.00	1.35	2.00	1.21	0.14
10.7	0.4	10.66	0.41	10.00	0.51	0.10
17.6	-1.6	17.62	-1.55	15.00	-1.37	0.18
23.7	-2.8	23.74	-2.79	20.00	-2.43	0.36
31.1	-4.3	31.13	-4.39	30.00	-3.92	0.47
41.1	-5.5	41.10	-5.47	40.00	-4.76	0.71
47.1	-7.0	47.08	-7.00	50.00	-6.59	0.41
63.6	-10.0	63.56	-10.00	60.00	-9.00	1.00
100.0	-10.0	100.00	-10.00	100.00	-9.00	1.00

ตาราง ค-2 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม

Plaxis 2 D ของหน้าตัด Sta.5+.050

Sta.5+050						
ข้อมูลก่อนลดน้ำ		ข้อมูลจาก Plaxis		ข้อมูลตรวจวัดจริง		ค่าความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม Plaxis กับ ตรวจวัดจริง (m.)
Distance (m.)	Elevation (m.)	Distance (m.)	Elevation (m.)	Distance (m.)	Elevation (m.)	
0.00	1.50	0.00	1.36	0.00	1.23	-0.13
2.00	1.50	2.00	1.39	2.00	1.18	-0.21
11.80	-0.73	11.80	-0.73	10.00	-0.79	-0.06
19.25	-1.52	19.25	-1.52	20.00	-1.79	-0.27
27.09	-3.25	27.09	-3.24	30.00	-2.95	0.29
44.51	-6.32	44.51	-6.34	40.00	-5.01	1.33
50.69	-7.50	50.69	-7.50	50.00	-6.70	0.80
58.59	-8.53	58.59	-8.53	60.00	-8.53	0.00
100.00	-10.00	100.00	-10.00	100.00	-9.00	1.00

ตาราง ค-3 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม
Plaxis 2 D ของหน้าตัด Sta.5+150

Sta.5+150						
ข้อมูลก่อนตบ		ข้อมูลจาก Plaxis		ข้อมูลตรวจวัดจริง		ค่าความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม Plaxis กับ ตรวจวัดจริง (m.)
Distance	Elevation	Distance	Elevation	Distance	Elevation	
(m.)	(m.)	(m.)	(m.)	(m.)	(m.)	
0	1.5	0	1.32	0	1.32	0.00
2	1.5	2	1.36	2	1.29	-0.07
15.9	-1.5	15.9	-1.50	20	-1.37	0.13
30.73	-3.94	30.73	-3.93	30	-3.53	0.40
37.79	-4.5	37.79	-4.50	40	-3.96	0.54
50.2	-7.5	50.2	-7.50	50	-7.14	0.36
59.16	-8.5	59.16	-8.50	60	-7.86	0.64
100	-10	100	-10.00	100	-9	1.00

ตาราง ค-4 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม

Plaxis 2D ของหน้าตัด Sta.5+450

Sta.5+450						
ข้อมูลก่อนลดน้ำ		ข้อมูลจาก Plaxis		ข้อมูลตรวจวัดจริง		ค่าความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม Plaxis กับ ตรวจวัดจริง (m.)
Distance (m.)	Elevation (m.)	Distance (m.)	Elevation (m.)	Distance (m.)	Elevation (m.)	
0	1.5	0	1.32	0	1.35	0.03
2	1.5	2	1.36	2	1.3	-0.06
9.53	-0.14	9.53	-0.14	10	-0.15	-0.01
16.46	-1.55	16.46	-1.54	15	-1.36	0.18
22.67	-2.22	22.67	-2.21	20	-1.97	0.24
31.95	-4.5	31.95	-4.49	30	-4.4	0.09
39.02	-4.53	39.02	-4.53	40	-4.49	0.04
48.26	-4.63	48.26	-4.63	50	-4.63	0.00
50	-4.66	50	-4.66	50	-4.66	0.00

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	พลอยไพลิน ทองอินทร์
ชื่อการค้นคว้าอิสระ	การวิเคราะห์เสถียรภาพและการเสียดรูปของลาดดินเนื่องจากกระบายน้ำของบึงหนองบอนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง
ประวัติ	ประวัติการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา พ.ศ.2562 ประวัติการทำงาน พ.ศ.2563-ปัจจุบัน วิศวกรโยธา บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด (มหาชน)

