

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำและเสถียรภาพความลาด
เขื่อนคลองสิียด จังหวัด ฉะเชิงเทรา โดย
โปรแกรม Seep/w และ Slope/w
The study of seepage and stability of Klong Siyad Dam
Chachoengsao Province by
Program Seep/w and Slope/w

จักรภัทร พันธรักษ์พงษ์
ชลิษฐ์พงศ์ เจริญดี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำและเสถียรภาพความลาด
เขื่อนคลองสีียด จังหวัด ฉะเชิงเทรา โดย
โปรแกรม Seep/w และ Slope/w
The study of seepage and stability of Klong Siyad Dam
Chachoengsao Province by
Program Seep/w and Slope/w

จักรภัทร พันธรักษ์พงษ์
ชลิษฐ์พงศ์ เจริญดี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

The study of seepage and stability of Klong Siyad Dam
Chachoengsao Province by
Program Seep/w and Slope/w

CHAKRAPAT PANTARAKPHONG
CHALITPONG CHARONEDEE


A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำและเสถียรภาพความลาด
เขื่อนคลองสียัด จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยโปรแกรม Seep/w และ Slope/w

นักศึกษา นายจักรภัทร พันธรักษ์พงษ์ รหัสนักศึกษา 56010154
นายชลิษฐ์พงศ์ เจริญดี รหัสนักศึกษา 56010276

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สมเกียรติ ขวัญพุกษ์
อ.อุบะ ศิริแก้ว

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.สมเกียรติ ขวัญพุกษ์	
ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์	
อาจารย์อุบะ ศิริแก้ว	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 เมษายน 2560 เวลา 15.30-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธาชั้น 1 (ห้องประชุมภาควิชา)

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจน์ชนเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

.....31..... พฤษภาคม 2560

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำและเสถียรภาพความลาด
เขื่อนคลองสี่แยก จังหวัด ฉะเชิงเทรา โดย
โปรแกรม Seep/w และ Slope/w

นาย จักรภัทร พันธรักษ์พงษ์ รหัสประจำตัว 56010154

นาย ชลธิษฐ์พงศ์ เจริญดี รหัสประจำตัว 56010276

ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ

อ.อุบะ ศิริแก้ว

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

โครงการเขื่อนคลองสี่แยก อำเภอบางปะอิน จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นเขื่อนดินแบบแบ่งโซนซึ่งมีความยาว 2,460 เมตร สูงประมาณ 27.50 เมตร มีความจุของอ่าง 420 ล้านลูกบาศก์เมตร ระดับเก็บกัก +65.100 ม.รทก ระดับน้ำสูงสุด +65.450 ม.รทก ระดับน้ำต่ำสุด +51.500 ม.รทก ผลการตรวจสอบสภาพตัวเขื่อน พบว่ามีร่องรอยของน้ำรั่วซึมบริเวณด้านท้ายเขื่อน จึงได้ทำการศึกษาและสาเหตุของน้ำรั่วซึมบริเวณดังกล่าวด้วยข้อมูลจากการเจาะสำรวจตัวอย่างดินในเขื่อนและเครื่องมือตรวจวัดในสนามได้แก่ พิโซมิเตอร์ (Piezometer) หลุมวัดระดับน้ำใต้ดิน (Observation well) รวมทั้งวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Geostudio2012 จากผลการศึกษาพบว่าน้ำลอดรั่วซึมผ่านฐานรากเขื่อนในปริมาณประมาณ 500,000 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งได้ผันน้ำดังกล่าวสู่ระบบคูคลองส่งน้ำ และทำการติดตั้ง relief well เพิ่ม ส่วนความมั่นคงลาดของเขื่อนดิน (Slope Stability) ในกรณีที่มีการเก็บกักน้ำสูงสุด +65.450 ม.รทก พบว่ามีค่า Safety factor ต่ำสุดของหน้าตัด กม.0+600 กม.1+050 และ กม.1+240 เท่ากับ 2.186 1.595 และ 3.110 ตามลำดับ

The study of seepage and stability of Klong Siyat Dam Chachoengsao Province by Program Seep/w and Slope/w

Mr.CHAKRAPAT PANTARAKPHONG Student 56010154
Mr.CHALITPONG CHARONEDEE Student 56010276

Asst.Prof. Somkiat Khwanpurk
Uba Sirikaew
Academic Year 2016

Abstract

(Seepage and slope stability analysis of Klong Siyat Dam, Chasoengsao Province)

Klong Siyat Dam, located in Tha Takiab District of Chasoengsao, is a zone earth dam with the length and height of 2,460 m and 27.50 m. The reservoir capacity is about 420 million cubic meters. The impound, maximum and minimum water level are at the elevation of +65.100 m, +65.450 m and +51.500 m above mean sea level, respectively. As there is a Leakage at the downstream toe, it is necessary to investigate the cause of the leakage. The study is carried out by an application of the field observation, soil boring logs, piezometer data and seep/w. The amount of the leakage passed through the contact zone of the dam and the foundation is about 500,000 cubic meters per year. The factor of safety of the dam at water level of + 65.450 m (MSL) of the cross section at the STA 0+600, STA 1+050 and STA 1+240 show the value of 2.186, 1.595 and 3.110.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้รับความกรุณาจาก ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ์ ท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และ อ.อุษะ ศิริแก้ว ท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา(ร่วม) ซึ่งคอยให้คำแนะนำ ให้ความรู้ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ประกอบด้วย ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบุญ , ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ์ , อ.อุษะ ศิริแก้ว และ ดร.ศลิษา ไชยพุทธ ซึ่งท่านเป็นกรรมการในการสอบ โดยท่าน เหล่านี้ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ของท่าน จนสามารถ นำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆในหลักสูตรทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการเรียน สุดท้ายสำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้บุพการีและผู้มีพระคุณทุกท่านตลอดจนครูปาอาจารย์ทุกสถาบันที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

จักรภัทร พันธรักษ์พงษ์

ชลิษฐ์พงศ์ เจริญดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
2.1 ชนิดและตำแหน่งเครื่องมือวัดพฤติกรรม.....	3
2.2 รายละเอียดที่สำคัญของเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนที่ใช้งานได้.....	4
2.3 กระบวนการเกิดการไหลซึมในเขื่อนดินถมหินถม	7
2.3.1 เส้นทางการไหลซึม.....	7
2.3.2 กลไกการเริ่มต้นการกัดเซาะ.....	9
2.3.3 กลไกการเกิดการกัดเซาะต่อเนื่อง.....	19
2.3.4 แนะนำการใช้โปรแกรม SEEP/W 2012 และ Slope/W.....	22
บทที่ 3 แผนการวิจัยและการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1. การรวบรวมข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดในสนาม.....	26
3.2. วิเคราะห์การไหลของน้ำในเขื่อน อ้างอิงจากตำแหน่ง Piezometer.....	26
3.3. สร้างแบบจำลองเขื่อนดินถมด้วยโปรแกรม Seep/W.....	29
3.4 เส้นทางการไหลของน้ำ ทั้ง 2 วิธี มาศึกษาหาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบกัน.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 หาค่าความมั่นคงของลาดดินด้วยโปรแกรม Slope/W.....	34
3.6 สรุปผลการลองและวิเคราะห์ผล.....	34
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	35
4.1 ผลจากเครื่องมือวัดระดับน้ำในเขื่อน.....	35
4.2 ผลการวัดจากเครื่องมือวัด Standpipe Wells.....	37
4.3 ผลการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำที่ได้จากเครื่องมือวัด Piezometer.....	39
4.4. ผลการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W.....	40
4.5. ผลการวิเคราะห์ความเสถียรภาพลาดตัวเขื่อนด้วยโปรแกรม Slope/W.....	44
บทที่ 5 สรุปผลและวิเคราะห์ผล.....	45
5.1 สรุปผล.....	45
5.2 วิเคราะห์ผล.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก ก.....	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขนาดของรอยแยกแตกภายในตัวเขื่อน เนื่องจากรูปร่างของฐานรากเขื่อน.....	13
ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการเกิดการกัดเซาะต่อเนื่อง (Continuation Erosion).....	20
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลการวัดจากเครื่องมือวัด Piezometer	27
ตารางที่ 3.2 ค่าระดับน้ำ ของ Piezometer เขื่อนสิียด วันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2554	28
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนดินถม ที่ STA 0+600.....	29
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนดินถม ที่ STA 1+050.....	30
ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนดินถม ที่ STA 1+240.....	31
ตารางที่ 4.1 ตารางค่าระดับความสูงน้ำจากเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์.....	36
ตารางที่ 4.2 ค่าความสูงน้ำจาก Standpipe Wels.....	38
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า Phreatic level จากการตรวจวัด ค่ากับ แบบจำลอง ค่าความสูง ของระดับน้ำในท่อ Stand pipe.....	43

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ตำแหน่งหน้าตัดที่ติดตั้ง Piezometer และตำแหน่งของ Observation Well.....	3
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งการติดตั้ง Piezometer	5
รูปที่ 2.3 รายละเอียดของหลุมวัดระดับน้ำใต้ดิน.....	6
รูปที่ 2.4 กระบวนการพิบัติของเขื่อนเนื่องจากการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน.....	8
รูปที่ 2.5 กระบวนการพิบัติของเขื่อนเนื่องจากการไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน	8
รูปที่ 2.6 กระบวนการพิบัติของเขื่อนเนื่องจากการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนสู่ฐานรากเขื่อน.....	8
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างผลการทดสอบ Hole erosion เพื่อหา Critical shear stress.....	10
รูปที่ 2.8 ลักษณะปัญหาของรูปร่างของฐานรากเขื่อน.....	13
รูปที่ 2.9 บริเวณที่อาจเกิด Contact erosion.....	15
รูปที่ 2.10 ผลกระทบจากการ Contact erosion.....	16
รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิด Suffusion (Busch, 1993).....	17
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างขนาดคละที่มีศักยภาพที่จะเกิด Suffusion (Wan and Fell, 2008).....	17
รูปที่ 2.13 Comparison of erosion losses measured in filter tests to dams with poor and good filter performance (Foster 1999, Foster and Fell 2001).....	20
รูปที่ 3.1 แสดงเส้นทางการไหลของน้ำอ้างอิงจาก ตำแหน่ง Piezometer.....	29
รูปที่ 3.2 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนถม ที่ STA 0+600.....	30
รูปที่ 3.3 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนถม ที่ STA 1+050.....	31
รูปที่ 3.4 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนดินถม ที่ STA 1+240.....	32
รูปที่ 3.5 สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Seep/W.....	32
รูปที่ 3.6 วิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W.....	33
รูปที่ 3.7 แสดงเส้นทางการไหลของน้ำผ่านเขื่อนดิน.....	33
รูปที่ 3.8 เส้นทางการไหลของน้ำคำนวณด้วยโปรแกรม Seep/W.....	34
รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ความมั่นคงลาดเขื่อนดินถม.....	34
รูปที่ 4.1 ค่าความสูงน้ำจาก พิโซมิเตอร์ ที่ตำแหน่ง P-25 STA 1+240.....	35
รูปที่ 4.2 ค่าความสูงน้ำจาก พิโซมิเตอร์ ที่ตำแหน่ง P-27 STA 1+240.....	35
รูปที่ 4.3 ค่าระดับแรงดันน้ำของ standpipe well ณ รูปตัดที่กม. 0+600.....	37
รูปที่ 4.4 ค่าระดับแรงดันน้ำของ standpipe well ณ รูปตัดที่กม. 1+050.....	37
รูปที่ 4.5 ค่าระดับแรงดันน้ำของ standpipe well ณ รูปตัดที่กม. 1+300.....	38
รูปที่ 4.6 เส้นทางการไหลของน้ำจากเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์	39
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W ที่ STA 0+600.....	40
รูปที่ 4.8 แสดงค่าความสูงน้ำที่ตำแหน่งหลุม B1-B4 ณ หน้าตัด STA 0+600.....	40
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W ที่ STA 1+050.....	41
รูปที่ 4.10 แสดงค่าความสูงน้ำที่ตำแหน่งหลุม B5-B7 ณ หน้าตัด STA 1+050.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W ที่ STA 1+300.....	42
รูปที่ 4.12 แสดงค่าความสูงน้ำที่ตำแหน่งหลุม B9-B11 ณ หน้าตัด STA 1+300.....	42
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของระดับน้ำที่จาก ท่อ Stand pipe กับ Model.....	43
รูปที่ 4.14 สัดส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ณ หน้าตัดต่างๆ.....	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

โครงการเขื่อนคลองสี่ด อำเภอนาทะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา ได้มีการดำเนินการก่อสร้าง ตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2539 แล้วเสร็จปี พ.ศ.2545 ปัจจุบันเขื่อนคลองสี่ดได้มีอายุการใช้งานรวมทั้งสิ้น 14 ปี ซึ่งตัวเขื่อนคลองสี่ดมีลักษณะ เป็นเขื่อนดินถม มีความยาว 2,460 เมตร สูงประมาณ 27.50 เมตร สามารถกักเก็บปริมาณน้ำได้ถึง 420 ล้านลูกบาศก์เมตร ระดับน้ำสูงสุด +65.450 ม.รทก. ระดับน้ำต่ำสุด +51.500 ม.รทก. ในเดือนมิถุนายน พ.ศ.2558 เป็นช่วงที่โครงการประสบปัญหาเรื่องภัยแล้ง เจ้าหน้าที่กรมชลประทานได้ตรวจพบความผิดปกติของตัวเขื่อน โดยได้พบน้ำไหลรั่วซึมออกบริเวณด้านท้ายเขื่อนดินหลัก เจ้าหน้าที่จึงได้ดำเนินการปรับปรุงซ่อมแซมโดยการนำหินคลุกไปถมบริเวณด้านท้ายเขื่อนและปรับปรุงซ่อมแซมทางระบายน้ำเพื่อลดแรงดันของน้ำที่ไหลรั่วซึมออกมา ถึงแม้ว่าจะสามารถวัดประมาณน้ำที่ไหลรั่วซึมออกมาได้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย และไม่พบตะกอนดินที่ถูกพัดพามากับน้ำ แต่ยังมี การตรวจพบรอยแยกบริเวณตัวเขื่อนใกล้กับ Spillway ทำให้ไม่สามารถมั่นใจในความปลอดภัยของตัวเขื่อนได้ จึงต้องมีการตรวจสอบพฤติกรรมการไหลของน้ำและความมั่นคงของเขื่อน โดยการเก็บข้อมูลและนำวิเคราะห์ความมั่นคงของตัวเขื่อนโดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับข้อมูลของเครื่องมือวัดในสนาม

1.2. วัตถุประสงค์

- 1.2.1. เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลพฤติกรรมการไหลของน้ำในตัวเขื่อนดินที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์และข้อมูลเครื่องมือวัดในสนาม
- 1.2.2. เพื่อศึกษาทฤษฎีและการนำไปใช้การวิเคราะห์ปัญหาการรั่วซึมของน้ำในเขื่อนดินด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์
- 1.2.3. เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาเป็นแนวทางในการศึกษาหาสาเหตุการรั่วซึมของน้ำตัวเขื่อนและศึกษาหาวิธีการป้องกันการไหลรั่วซึมของเขื่อนดิน

1.3. ขอบเขต

1.3.1. นำข้อมูลการตรวจวัดของเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์ (Piezometer) และข้อมูลหลุมวัดระดับน้ำใต้ดิน (Observation Well) ที่ STA 0+600 , 1+050 และ 1+240 ตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2554 ถึง ปี พ.ศ. 2558 มาทำการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำในเขื่อนดินคลองสี่แยก อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา

1.3.2. วิเคราะห์การรั่วซึมของน้ำบริเวณด้านท้ายเขื่อนโดยการสร้างแบบจำลองที่เป็นไปได้ โดยความละเอียดของเกณฑ์เป็นไปตามข้อมูลที่มีอยู่ และใช้โปรแกรมทางไฟไนต์อิลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข ด้วยโปรแกรม Seep/W และ Slope/W

1.4. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการศึกษางานโครงการงานมีการศึกษาขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีกระบวนการเกิดการไหลซึมในเขื่อนดินถมและกลไกการเริ่มต้นการกัดเซาะรวมทั้งการแปลงผลค่าจากเครื่องมือวัด

2. รวบรวมข้อมูลการวัดของเครื่องมือวัด Piezometer และ Observation Well ที่ STA 0+600 , 1+050 และ 1+240

3. ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองเขื่อนดินด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์อิลิเมนต์ Seep/W และ Slope/W

4. สร้างแบบจำลองเขื่อนดินด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์อิลิเมนต์ Seep/W และ Slope/W

5. รวบรวมผลการวิเคราะห์นำมาเปรียบเทียบข้อมูลเส้นทางการไหลของน้ำในสนามจากเครื่องมือวัดและข้อมูลเส้นทางการไหลของน้ำที่ได้จากโปรแกรมทางไฟไนต์อิลิเมนต์ Seep/W

6. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในกรณีที่เส้นทางการไหลของน้ำมีผลทำให้กำลังดินลดต่ำลง

7. วิเคราะห์ผลและเขียนรายงาน

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบการเปรียบเทียบข้อมูลพฤติกรรมการไหลของน้ำในตัวเขื่อนดินที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์และข้อมูลเครื่องมือวัดในสนาม

2. ได้เข้าใจทฤษฎีและการนำไปใช้การวิเคราะห์ปัญหาการรั่วซึมของน้ำและเสถียรภาพของเขื่อนดิน

3. เข้าใจวิธีการแปลงค่าข้อมูลจากเครื่องมือวัดในสนาม Piezometer และ Observation Well

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

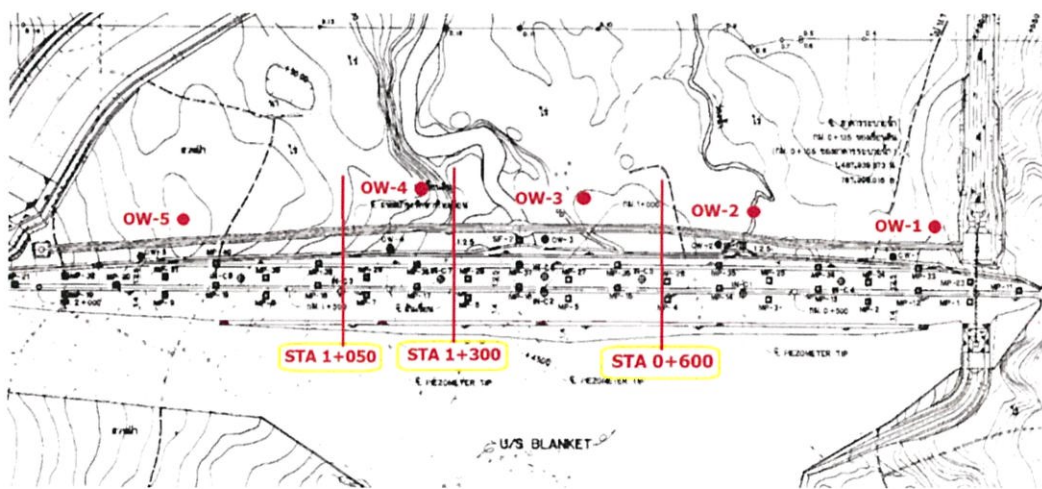
เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนสียัด

ในระหว่างการก่อสร้างเขื่อน เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนถูกติดตั้งเพื่อวัตถุประสงค์ที่จะได้นำข้อมูลมาใช้ประเมินความปลอดภัยของเขื่อนทั้งในระหว่างการก่อสร้าง ตลอดจนถึงระหว่างการใช้งานเขื่อน ปัจจุบันเครื่องมือที่ติดตั้งในระหว่างการก่อสร้างได้เสียหายหรือถูกรื้อถอนไป ในบทนี้ได้สรุปตำแหน่งและเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนที่ยังคงใช้งาน และรายละเอียดที่สำคัญของเครื่องมือเหล่านั้น

2.1 ชนิดและตำแหน่งเครื่องมือวัดพฤติกรรม

เครื่องมือวัดพฤติกรรมของเขื่อนสียัด แบ่งตามพฤติกรรมทางวิศวกรรมเขื่อนที่ตรวจวัดได้ เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เครื่องมือวัดพฤติกรรมการเคลื่อนตัว และเครื่องมือวัดพฤติกรรมการไหลซึม

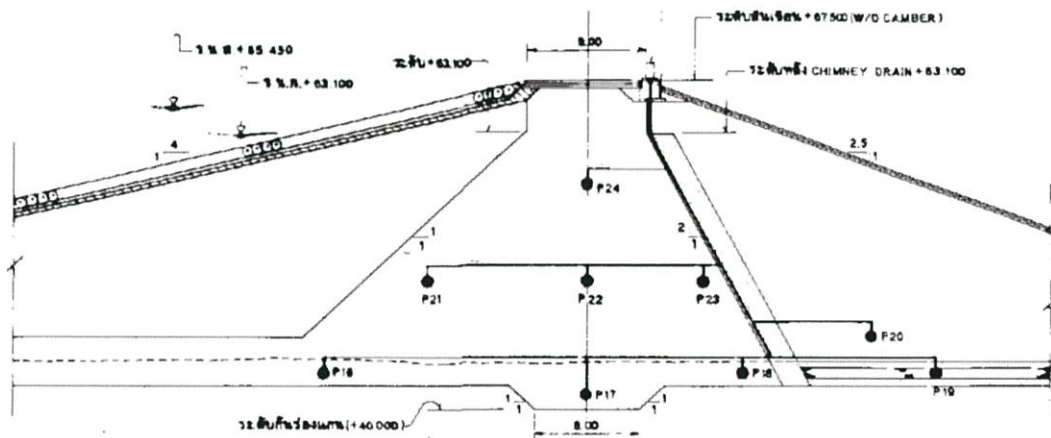
1. เครื่องมือวัดพฤติกรรมการเคลื่อนตัว ประกอบด้วย Surface monument และ Inclinator ปัจจุบันไม่มีการอ่านค่าจากเครื่องมือเหล่านี้ จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลในพฤติกรรมการเคลื่อนตัวได้
2. เครื่องมือวัดพฤติกรรมการไหลซึม ประกอบด้วย พิโซมิเตอร์ (Piezometer) หลุมวัดระดับน้ำใต้ดิน (Observation Well) และฝายวัดอัตราการไหลซึม (Seepage Measuring Weir) จำนวนและตำแหน่งของเครื่องมือวัดดังกล่าวแสดงดัง รูปที่ 2-1 พิโซมิเตอร์ถูกติดตั้งเป็นหน้าตัด มีตำแหน่งดังแสดงใน รูปที่ 2-2 รายละเอียดของหลุมวัดระดับน้ำใต้ดิน แสดงใน รูปที่ 2-3



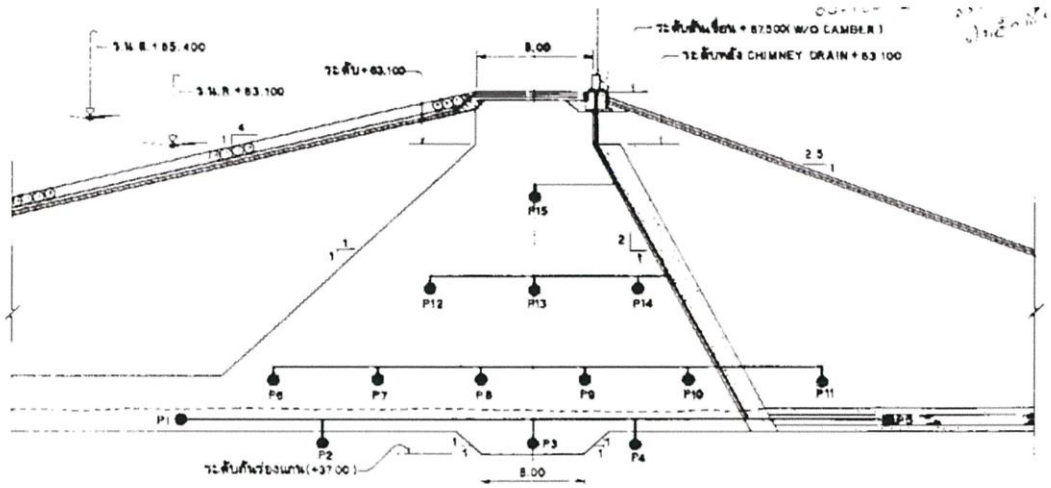
รูปที่ 2.1 ตำแหน่งหน้าตัดที่ติดตั้ง Piezometer และตำแหน่งของ Observation Well

2.2 รายละเอียดที่สำคัญของเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนที่ใช้งานได้

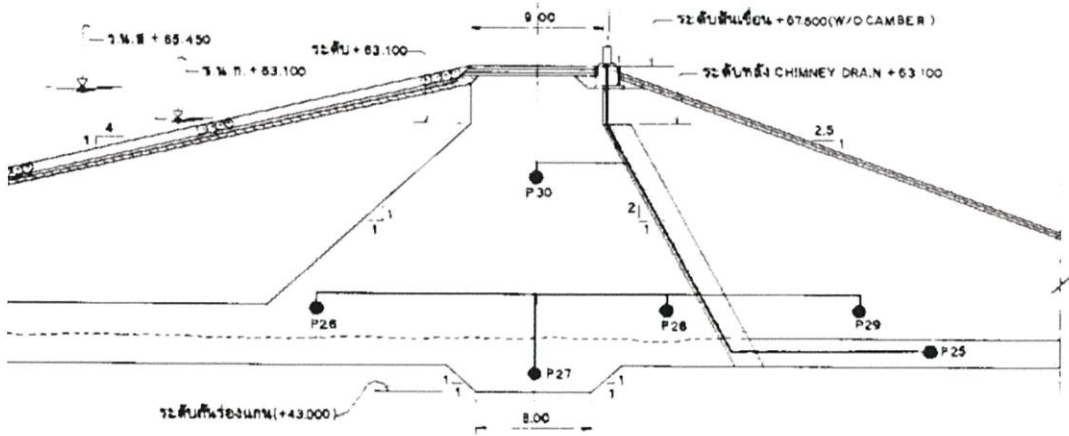
Piezometer เป็นแบบ Vibrating wire จำเป็นต้องอ่านค่าด้วยเครื่องอ่าน ได้เป็นความถี่หรือความยาวคลื่น หรือหน่วยเฉพาะสำหรับแต่ละผู้ผลิต การแปลงค่าอ่านที่ได้ให้เป็นความดันน้ำ จำเป็นต้องอาศัยค่าคงตัวของเครื่องมือ ซึ่งแต่ละหัวจะมีค่าไม่เท่ากัน หรืออาจกล่าวได้ว่าหากนำค่าอ่านจาก Piezometer หัวหนึ่งไปใช้ค่าคงตัวของหัวอื่น ย่อมจะได้ค่าความดันที่ผิดไปจากเดิม หลุมวัดระดับน้ำใต้ดิน มีความลึกตั้งแต่ 10 ถึง 20 เมตร โดยประมาณ ซึ่งเป็นความลึกที่ถึงชั้นดิน ทำให้สามารถการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในชั้นดินฐานรากและตัวเขื่อนได้ รายละเอียดของหลุมวัดระดับน้ำใต้ดินแสดงในรูปที่ 2-2 ฝ่ายวัดอัตราการไหลซึม เป็นแบบ V-Notch weir มีเพียงตำแหน่งเดียวติดตั้งที่บริเวณท้ายน้ำใกล้กับลำน้ำเดิม คาดว่าสามารถรวบรวมน้ำที่ไหลซึมได้เฉพาะจากบริเวณดังกล่าวที่เป็นหน้าตัดลึกที่สุด



รูปตัดแสดงการติดตั้ง Piezometer ที่ ก.ม 0+600



รูปตัดแสดงการติดตั้ง Piezometer ที่ ก.ม 1+050



รูปตัดแสดงการติดตั้ง Piezometer ที่ ก.ม 1+300

รูปที่ 2.2 ตำแหน่งการติดตั้ง Piezometer

2.3.กระบวนการเกิดการไหลซึมในเขื่อนดินถมหินถม

เนื่องจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนที่ใช้งานได้ในปัจจุบัน มีเพียงแต่กลุ่มเครื่องมือวัดพฤติกรรมการไหลซึม ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำองค์ความรู้ในปัจจุบันเรื่องพฤติกรรมการไหลซึมของ ICOLD (2012) มาแนะนำเสนอเพื่อเป็นฐานความรู้สำหรับการตีความทำความเข้าใจพฤติกรรมที่เขื่อนแสดงออก

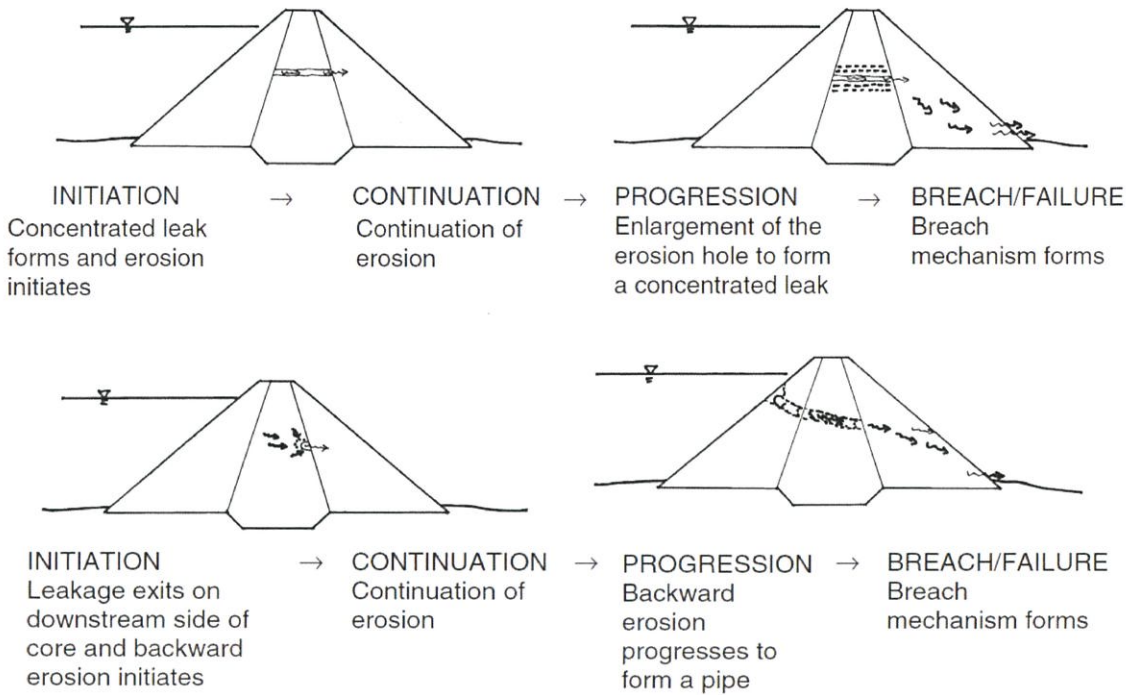
2.3.1. เส้นทางการไหลซึม

เส้นทางการไหลซึมแบ่งเป็น 3 เส้นทาง อันได้แก่

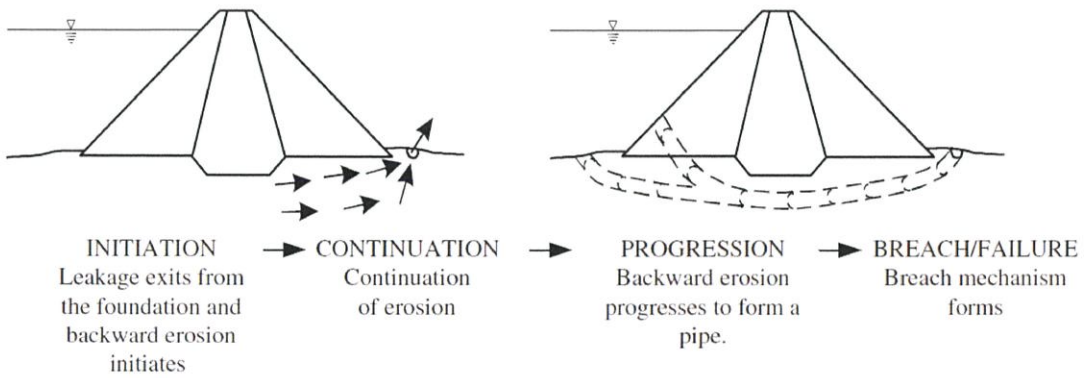
- การไหลซึมผ่านตัวเขื่อน (Seepage through embankment)
- การไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน (Seepage through dam foundation)
- การไหลซึมผ่านตัวเขื่อนสู่ฐานรากเขื่อน (Seepage through embankment into dam foundation)

โดยมีกลไกที่ทำให้เริ่มกระบวนการของการไหลซึมจนนำไปสู่การพิบัติได้ และการตอบสนองของเครื่องมือที่ได้ติดตั้ง โดยเส้นทางการไหลซึมทั้งสามต่างมีกระบวนการที่นำไปสู่การพิบัติ 4 ขั้นตอน ได้แก่

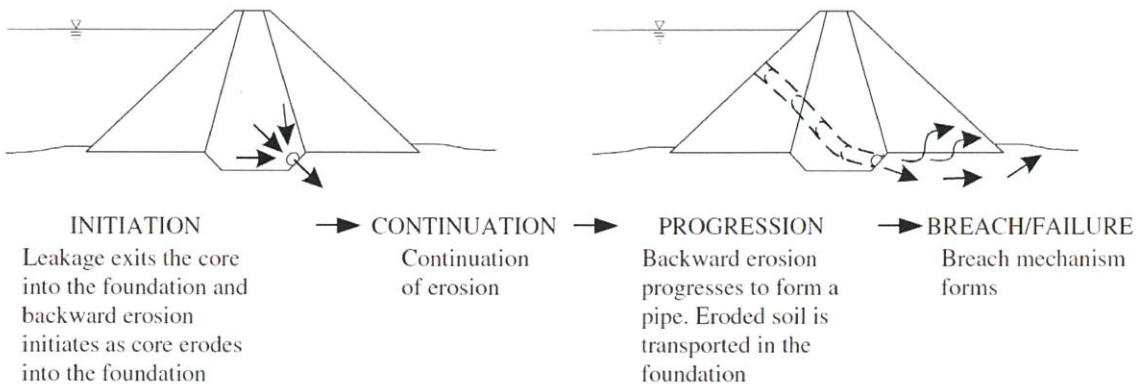
- Initiation ขั้นตอนการกัดเซาะเริ่มต้นขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นทางของการไหล และวัสดุ
- Continuation ขั้นตอนการกัดเซาะต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลจากการกรอง (filtering)
- Progression ขั้นตอนการกัดเซาะพัฒนา ดินที่ถูกกัดเซาะได้เชื่อมต่อกันเป็นโพรงและมีขนาดใหญ่ขึ้น
- Breach formation and Failure ขั้นตอนการเกิดการพิบัติ วัสดุสูญเสียไปจากการพัดพา นำไปสู่การทรุดตัวของสันเขื่อนหรือการเคลื่อนตัวจากความดันน้ำที่สูง จนทำให้น้ำล้นข้ามสันเขื่อนได้ แต่ละเส้นทางการไหลซึมจะมีการพัฒนาดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถึง 2.6



รูปที่ 2.4 กระบวนการพิบัติของเขื่อนเนื่องจากการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน (Fell et al, 2005)



รูปที่ 2.5 กระบวนการพิบัติของเขื่อนเนื่องจากการไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน



รูปที่ 2.6 กระบวนการพิบัติของเขื่อนเนื่องจากการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนสู่ฐานรากเขื่อน

2.3.2 กลไกการเริ่มต้นการกัดเซาะ

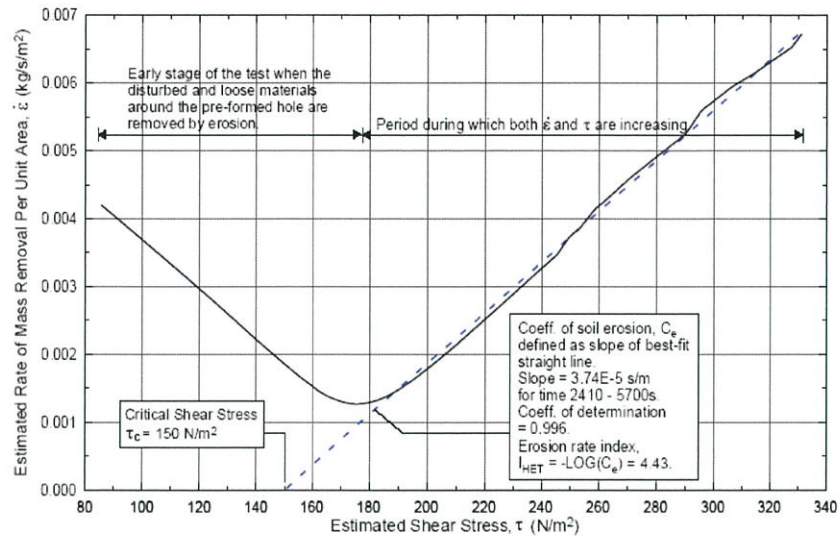
ในการประเมินความปลอดภัยเชื่อมต่อการพิบัติจากการไหลซึมจึงจำเป็นต้องระบุให้ได้ว่า เชื้อนได้เข้าสู่ขั้นตอนการเริ่มต้น(Initiation) แล้วหรือไม่ การเริ่มต้นที่ทำให้เม็ดดินเริ่มถูกพัดพานี้มีกลไกของการเกิด แบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ ได้แก่

- Concentrated leak เป็นการกัดเซาะจากการไหลซึมผ่านวัสดุที่มีรอยแตก และหากวัสดุไม่มีความต้านทานแรงดึงของน้ำที่ไหลซึมผ่านรอยแตกนั้นได้ การกัดเซาะก็จะเริ่มขึ้น
- Backward erosion เป็นการกัดเซาะจากจุดทางออกที่อยู่ด้านท้ายน้ำย้อนกลับไปยังด้านเหนือหน้า วัสดุที่ถูกกัดเซาะไม่มีความเหนียว เม็ดดินจึงสูญเสียเสถียรภาพถูกพัดให้ลอยตัวออกไป
- Contact erosion เป็นการกัดเซาะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของวัสดุที่มีความชื้นน้ำแตกต่างกัน เช่น รอยต่อระหว่างดินเหนียวแกนเชื่อมกับฐานรากที่เป็นกรวด ความเร็วของการไหลซึมทำให้เม็ดดินถูกพัดพาและวัสดุเม็ดหยาบกว่าไม่เป็นวัสดุกรองของเม็ดดินที่ถูกพัดพา
- Suffusion เป็นการพัดพาเม็ดดินละเอียดออกจากมวลดิน ที่มีขนาดคละไม่ตีไม่เป็นชั้นกรองในตัวเอง (Self-filtering)

ก. Concentrated leak

กลไกที่แรงดึงจากการไหลซึมเกิดขึ้นได้กระทำที่ผนังของช่องว่างภายในมวลดิน หรือผนังของรอยแตก หากแรงดึงมีค่ามากเพียงพอจะทำให้เกิดการกัดเซาะให้เม็ดดินถูกพัดพาจากผนังได้

ผลงานวิจัยในปัจจุบันได้สรุปตัวแปรสำคัญที่ระบุการพัดพาของเม็ดดินเหนียวที่ดินต้านทานแรงดึงของน้ำที่ไหลซึม คือ **Critical shear stress** ของดิน ซึ่งทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการที่วัดอัตราการกัดเซาะที่ผิวดิน ณ ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนต่างๆ เช่น เครื่องมือ rotating cylinder (Masch, Espey and Moore, 1963) pinhole test (Reddi, Lee and Bonala, 2000) Hole Erosion Test (HET) and Slot Erosion Test (SET) (Wan and Fell, 2004a, 2004b) ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นค่าหน่วยแรงเฉือนของน้ำที่ทำให้ดินเริ่มถูกพัดพา ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 โดยเรียกหน่วยแรงเฉือนนี้ว่า critical shear stress ซึ่งโดยทั่วไปดินบดอัดจะมีค่า critical shear stress อยู่ระหว่าง 0 ถึง 150 N/m² ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน ได้แก่ ความเหนียว (Plasticity) ปริมาณของเม็ดดินเหนียว (Clay content)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างผลการทดสอบ Hole erosion เพื่อหา Critical shear stress (Wan and Fell, 2004)

การวิเคราะห์หา Critical shear stress สำหรับกรณีแกนดินเหนียวที่ไม่มีรอยแตก Reddi, Lee and Bonala (2000) แสดงการวิเคราะห์หา shear stress จากการการไหลซึมในเนื้อดิน ซึ่งได้สมมติให้ดินมีเส้นทางเดินของน้ำของช่องว่างในมวลดิน (Pore tube)

$$\tau = \frac{\Delta P R}{L} \quad (1)$$

เมื่อ τ = wall shear stress, N/m^2

ΔP = hydraulic pressure difference, N/m^2

R = radius of the pore tube, m

L = length of the pore tube, m

เมื่อพิจารณาความซึมน้ำของดิน (intrinsic permeability) ให้สัมพันธ์กับ pore tube

$$K = \frac{nR^2}{8} \quad (2)$$

เมื่อ K = intrinsic permeability, m^2

n = porosity of the soil

และความสัมพันธ์ระหว่างความซึมน้ำของดินกับสัมประสิทธิ์ความซึมได้

$$K = \frac{k\eta}{\rho g} \quad \text{----3)}$$

เมื่อ k = hydraulic conductivity, m/s

η = viscosity of fluid, kg/m.s (1.005x10⁻³ สำหรับน้ำ)

ρ = density of eroded fluid, kg/m³

แทนสมการที่ 2) และ 3) ในสมการที่ 1) จะได้

$$\tau = 1.414 \frac{\Delta P}{L} \left(\frac{K}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \text{----4)}$$

ในขณะที่ Khilar, Floger and Gray (1985) ได้เสนอการวิเคราะห์หา critical hydraulic gradient จาก critical shear stress จากสมการด้านล่าง ซึ่งวิเคราะห์ด้วยแนวทางเดียวกัน

$$i_c = \frac{\tau_c}{2.828\gamma_w} \left(\frac{n}{K}\right)^{\frac{1}{2}} \text{----5)}$$

ซึ่งในทางปฏิบัติ i_c จะมีค่าสูงมาก (มากกว่า 200) ตัวอย่างเช่นในกรณีของเขื่อนศรีนครินทร์ที่ประมาณค่า i_c ได้เท่ากับ 212 ดังนั้นการพิจารณาความปลอดภัยของเขื่อนจึงไม่นำกรณีการไหลซึมผ่านแกนดินเหนียวที่ไม่มีรอยแตกมาพิจารณา

สำหรับกรณีแกนดินเหนียวที่มีรอยแตก รอยแตกเกิดจากการหดตัวที่แตกต่าง รอยแตกตามขวางที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำแผ่นดินไหว ผลจาก hydraulic fracturing บริเวณที่ตัวเขื่อนเหนือท่อ outlet หรือตัวเขื่อนเหนือฐานรากที่ชัน

Wan and Fell (2004) เสนอแบบจำลอง สำหรับวิเคราะห์หา shear stress ของน้ำที่ไหลผ่านช่องเปิดหรือรอยแตกในการทดสอบ hole erosion หรือ slot erosion ดังสมการด้านล่าง

$$\tau_t = \rho_w g s_t \frac{\phi_t}{4} \quad \text{----6)}$$

เมื่อ

τ_t = hydraulic shear stress at time t, N/m²

ρ_w = density of eroded fluid, kg/m³

S_t = hydraulic gradient across the sample at time t

ϕ_t = diameter of the preformed hole at time t, m

ในสนามการเกิด concentrated leak จะเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเกิดรอยแตก หรือมีความโปร่งน้ำขึ้น หรือเกิด hydraulic fracturing แล้วจึงเกิดกระบวนการกัดเซาะ ซึ่งจะเริ่มต้นได้หากหน่วยแรงเฉือนของน้ำมีค่าสูงกว่า critical shear stress ของดินถม แกนดินเหนียวที่มี critical shear stress ต่ำกว่า 20 N/m^2 ย่อมเกิดการกัดเซาะได้โดยง่าย แต่หากการบดอัดดินเป็นไปอย่างดีจนดินมี critical shear stress มากกว่า 200 N/m^2 การเกิดการกัดเซาะย่อมเป็นไปได้ยาก

สำหรับรอยแตกที่มีความกว้างคงที่ ค่าเฉลี่ยของ hydraulic shear stress ที่ผิวรอยแตกประมาณได้จาก

$$\tau \cong \frac{\rho_w g W_c H}{2L} \text{ ----7)}$$

เมื่อ

τ = average hydraulic shear stress along the surface of crack, N/m^2

W_c = width of uniform open crack, m

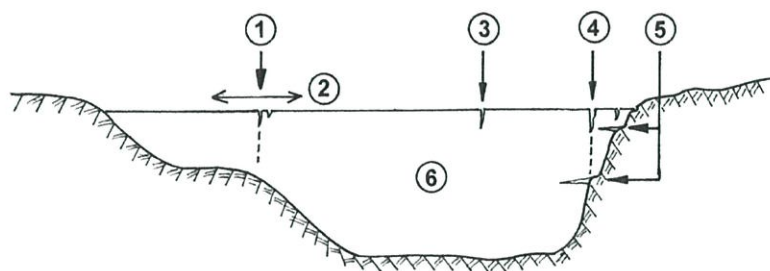
H = hydraulic head at the upstream end of the crack, m

L = length of the crack, m

Vertical transverse crack

$$\tau = \frac{\rho_w g H^2}{2(W+H)L} \text{ ----8)}$$

ขนาดของรอยแตกจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดแรงเฉือนที่ผนังของรอยแตก ปัจจัยหนึ่งคือรูปร่างของร่องเขา ร่องเขาที่สม่่าเสมอมีตะพัก (Bench) และที่มุมของฐานยันเขา (Abutment) ลาดชันกว่า 30 องศา ย่อมทำให้เกิดรอยแตกได้ง่ายดังรูปที่ 2.8 ซึ่ง Fell et al (2005) ได้แนะนำขนาดของรอยแตกตามลักษณะของร่องเขาไว้ตารางที่ 2.1



- 1 Vertical crack due to lateral straining
- 2 Lateral straining caused by differential settlement
- 3 Vertical crack due to desiccation
- 4 Vertical crack due to sliding of core along steep abutment wall with steps (protrusions)
- 5 Horizontal cracks due to sliding of core along steep abutment wall with steps (protrusions)
- 6 Dam core

รูปที่ 2.8 ลักษณะปัญหาของรูปร่างของฐานรากเขื่อน

ตารางที่ 2.1 ขนาดของรอยแยกแตกภายในตัวเขื่อน เนื่องจากรูปร่างของฐานรากเขื่อน

Description	Situations similar to those shown in parts of:	Maximum Likely Depth of Cracking Below Dam Crest	Maximum Likely Crack Width at Depth Shown Below Dam Crest		
			1.5m	3m	6m
Uniform abutment without benches, gentle abutment slopes $< 30^\circ$, dam less than 15m high		3m	2mm	1mm	
Wide bench low in abutment, moderate abutment slopes $30^\circ < \text{to} < 45^\circ$; dam 15m to 30m high	Figure 2-5	5m	20mm	5mm	
Wide bench high in abutment, steep abutment slopes $45^\circ < \text{to} < 60^\circ$; dam 30m to 60m high	Figure 2-5	7m	40mm	20mm	2mm
Wide bench near crest in abutment, very steep abutment slopes $> 60^\circ$; dam $> 60\text{m}$ high	Figure 2-5	10m	60mm	35mm	7mm

ข. Backward erosion

รูปแบบการพังทลายจากการไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน ที่เริ่มเกิดการกัดเซาะของดินฐานรากจากด้านท้ายน้ำแล้วกัดย้อนหลังไปยังด้านเหนือน้ำ (Backward erosion) ซึ่งดินฐานรากด้านท้ายน้ำที่เรียกว่า จุดทางออก (Exit point) ไม่มีเสถียรภาพ สูญเสียหน่วยแรงประสิทธิผลและเริ่มการเกิดพังทลายจากความดันน้ำลักษณะ Boiling

ในทางทฤษฎีของ Terzaghi (1925) ได้อธิบายว่า เสถียรภาพของดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless soil) หรือดินที่มีค่า PI น้อยกว่า 7 จะเกิดขึ้นหากลาดระดับน้ำ (hydraulic gradient) ที่ทางออก (exit gradient, i_{exit}) มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติ (Critical hydraulic gradient) ดังสมการด้านล่าง ซึ่งโดยทั่วไปมักมีค่าประมาณ 1.0

$$i_c = \frac{\gamma_b}{\gamma_w} \text{----8)}$$

เมื่อ

i_c =Critical gradient when flotation occurs

γ_b =Buoyant weight of the saturated soil

γ_w =Unit weight of water

Perlzmaier (2007) ได้แปลงสมการของ Terzaghi ให้อยู่ในอีกรูปหนึ่งพร้อมอธิบายว่า ในดินไม่มีความเชื่อมแน่น การ heave เกิดขึ้นเมื่อความดันน้ำจากการไหลซึมทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินเท่ากับศูนย์ ในทำนองเดียวกันกับในดินเหนียวที่หน่วยแรงประสิทธิผลสัมพันธ์กับการเกิด hydraulic fracturing

$$i_c = \frac{(1-n)(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_w} \text{----9)}$$

เมื่อ

γ_s =Unit weight of the particle

ในดินที่มีเสถียรภาพภายใน ค่า i_c สำหรับการไหลซึมในแนวตั้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.83 ถึง 1.2 แต่สำหรับการไหลซึมในแนวราบระหว่างดินแกนเขื่อนกับชั้นกรอง ค่า i_c จะมีค่าต่ำกว่าการไหลซึมในแนวตั้ง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.58 ถึง 0.96

$$i_c = (0.7 \text{ to } 0.8) \frac{(1-n)(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_w} \text{----10)}$$

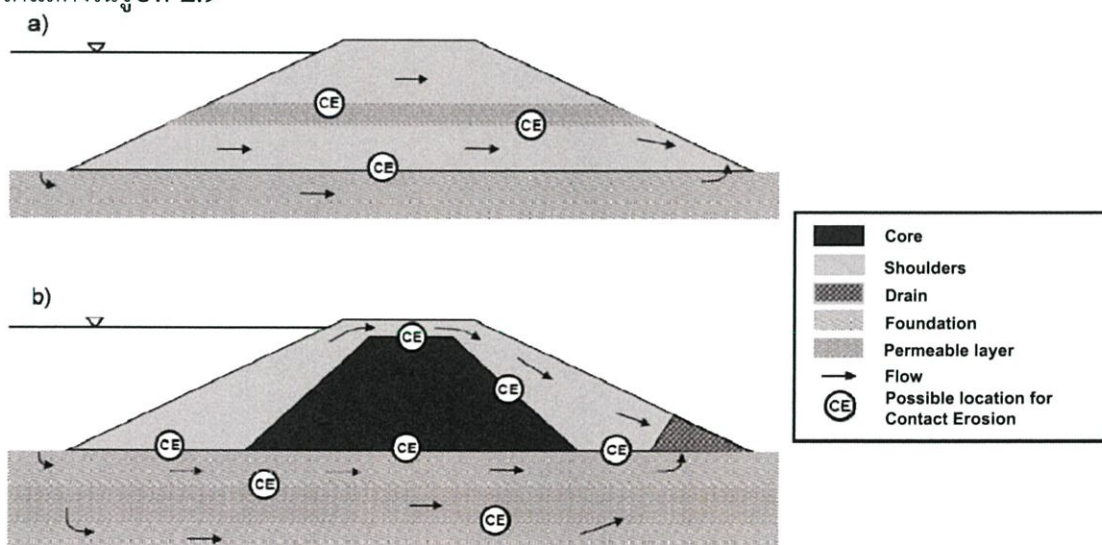
แต่จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของ Skempton and Brogan (1994) พบว่า หากเป็นดินที่มีเสถียรภาพภายใน (internal stability) มีค่า i_c ในการไหลในแนวราบจะมีค่าประมาณ 0.70 แต่ดินที่ไม่มีเสถียรภาพภายใน (internal instability) จะมีค่า i_c น้อยกว่า 0.17 อย่างไรก็ตาม หากชั้นกรองได้ออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบที่ดี ไม่เป็นชั้นกรองที่หยาบจนเกินไป การพัดพาออกจากชั้นกรองจะไม่เกิดขึ้น

ภายในตัวเขื่อนหรือในร่องแกนอาจเกิด Backward erosion ได้เมื่อดินแกนดินเหนียวมีค่า PI น้อยกว่า 7 และเกิดทางออกในบริเวณแกนดินเหนียวหรือร่องแกน ความดันน้ำทำให้เม็ดดินเสียเสถียรภาพและถูกพัดออกจากแกนดินเหนียวไป

สำหรับเขื่อนปากสักชลสิทธิ์ ไม่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิด Backward erosion เพราะค่า PI ของดินบดอัด สูงกว่า 7 อย่างมาก

ค. Contact erosion

Contact erosion เกิดขึ้น ณ รอยต่อระหว่างดินเม็ดหยาบกับดินเม็ดละเอียด และมีการไหลซึมขนานกับรอยต่อนั้น ทำให้เกิดการกัดเซาะในชั้นดินเม็ดละเอียด เช่น การไหลซึมผ่านฐานรากที่เป็นชั้นดินกรวดตะกอน ซึ่งอาจกัดเซาะฐานของดินเหนียวแกนเขื่อนได้ เม็ดดินอาจถูกพัดพาอาจไปตามชั้นดินกรวดตะกอนหากเป็น Filter กับดินแกนเขื่อน บริเวณที่อาจเกิด Contact erosion ได้แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 บริเวณที่อาจเกิด Contact erosion

ความเร็ววิกฤตที่ทำให้ดินเกิดการพัดพาไปพิจารณาจากขนาดของเม็ดดินที่ถูกกัดเซาะ สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น เช่น ทรายละเอียด และความเหนียวสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น ดังสมการ

$$U_c = 0.65n_D \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g d_{50}} \text{ สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น ---(11)}$$

เมื่อ

n_D the porosity of the gravel layer

ρ_s the density of the sand layer

ρ_w the density of the water

d_{50} the median diameter of sand grading curve

$$U_c = 0.65n_D \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g d_H \left(1 + \frac{\beta}{d_H^2}\right)}$$

สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น---

12)

เมื่อ

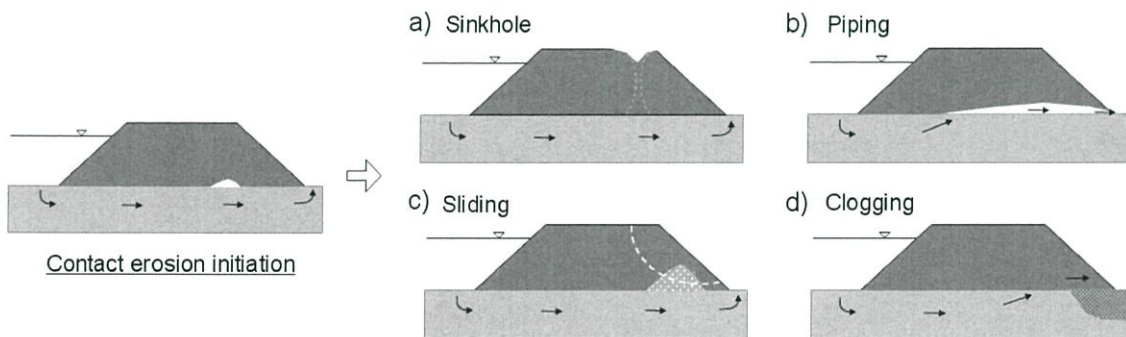
β the empirical parameter ที่เป็นฟังก์ชันกับความเชื่อมแน่นของดิน (5.3×10^{-9} ม.²)

9 ม.²)

d_H the effective diameter (harmonic) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$d_H = \left(\sum_{j=1}^m \frac{F_j}{d_j}\right)^{-1} \quad \text{---13)}$$

ผลกระทบจากกัดเซาะที่รอยต่อลักษณะนี้จะทำให้เกิดโพรงบริเวณที่ฐานตัวเขื่อนดังรูปที่ 2.9 และหลุมยุบอาจเกิดขึ้น การกัดเซาะที่รอยต่ออาจขยายจนเป็นโพรงต่อเนื่องไปถึงด้านท้ายน้ำ หรือความดันน้ำในลาดเขื่อนสูงจนนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของลาดเขื่อน การพัดพาเม็ดดินทำให้การระบายอุดตัน

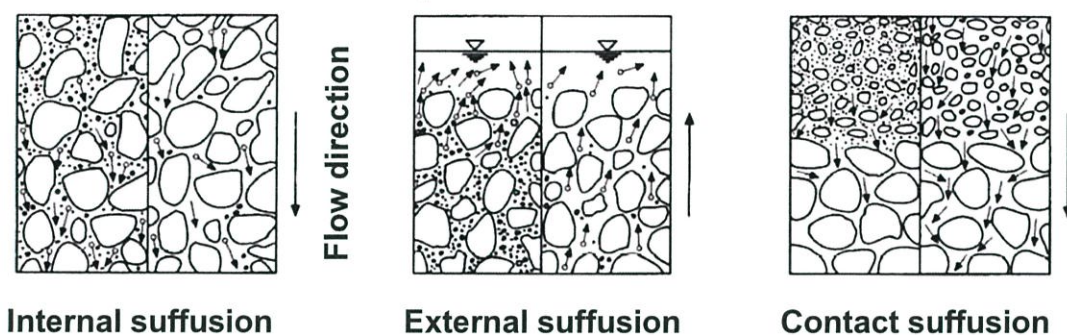


รูปที่ 2.10 ผลกระทบจากการ Contact erosion

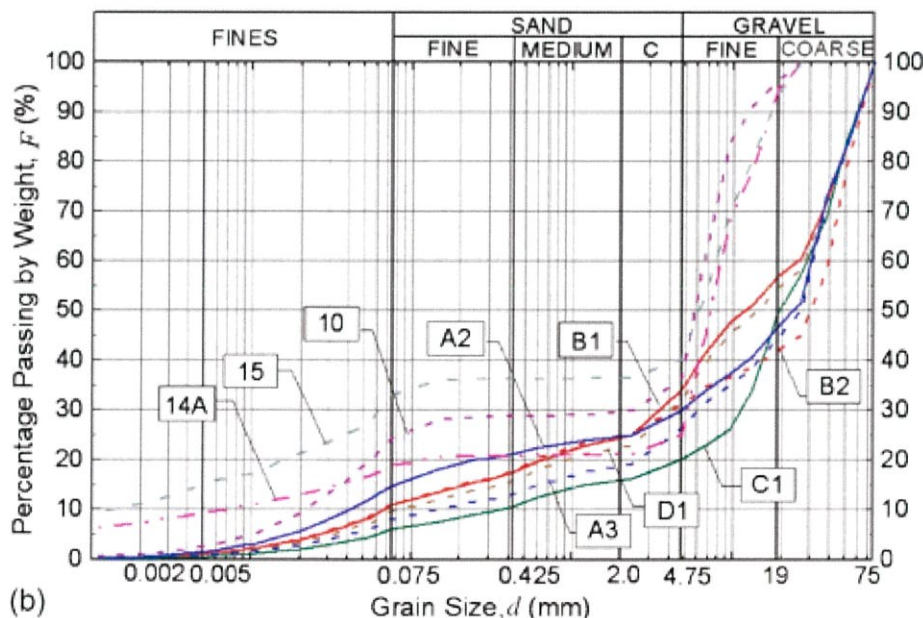
ง. Suffusion

เกิดขึ้นในดินเม็ดหยาบที่มีขนาดคละที่ไม่ดี หรือมีเม็ดดินช่วงหนึ่งหายไป โครงข่ายของดินเม็ดหยาบไม่ต่อเนื่อง ทำให้เหมือนดินเม็ดหยาบลอยอยู่เม็ดดินขนาดเล็กดังรูปที่ 2-11 ดินเม็ดละเอียดที่มีแรง

ประคองน้อยจะถูกพัดพาที่ละเล็กทีละน้อย เนื่องจากดินลักษณะนี้ไม่เป็น Filter ในตัวเอง แต่โดยปกติดินที่คัดเลือกมาก่อสร้างในงานเขื่อนจะมีขนาดคละที่ดี ขณะที่ดินฐานรากที่เป็นวัสดุโปร่งน้ำจะถูกซุดออกจึงไม่พิจารณากลไกลักษณะนี้ ตัวอย่าง grain size distribution ของวัสดุที่มีศักยภาพที่จะเกิด Suffusion แสดงในรูปที่ 2-11



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิด Suffusion (Busch, 1993)



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างขนาดคละที่มีศักยภาพที่จะเกิด Suffusion (Wan and Fell, 2008)

Li and Fannin (2008) ได้เสนอเงื่อนไขทางชลศาสตร์ของการเกิด suffusion ที่เริ่มต้นจากลาดระดับน้ำวิกฤติตามที่ Terzaghi แต่ Fannin and Li ได้ลดทอนให้ลาดระดับน้ำวิกฤติของวัสดุที่ไม่มีเสถียรภาพภายใน ตามสัดส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลภายในดินเม็ดละเอียด

$$i_c = \alpha i_{cT} = \alpha \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

เมื่อ

γ' the buoyant soil specific weight

γ_w the water specific weight

α the reduction factor ซึ่งเกิดขึ้นเพราะหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งภายในดินที่ไม่มีเสถียรภาพภายในมวลดินถูกลดทอนไปเนื่องจากโครงสร้าง ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลระหว่างเม็ดดินละเอียดลดลง (Skempton and Brogan, 1994)

$$\sigma_f' = \alpha \sigma_V'$$

เมื่อ

σ_V' หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งของมวลดิน

σ_f' หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งระหว่างเม็ดดินขนาดเล็ก

ค่าปัจจัยการลดทอนดังกล่าว (α) ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างเม็ดดิน ตามขนาดของเม็ดดินขนาดเล็กและเม็ดดินขนาดใหญ่

$$\alpha = 3.85 \frac{d_{85}}{O_{50}} - 0.616$$

เมื่อ

d_{85} the d_{85} of the finer fraction

O_{50} the effective constriction size of the coarser fraction

2.3.3. กลไกการเกิดการกัดเซาะต่อเนื่อง

หลังจากการกัดเซาะได้เริ่มขึ้น (initiation) การกัดเซาะอาจหยุดหรือเกิดขึ้นต่อได้ (Continuation)

ขึ้นอยู่กับการทำงานของกรรอก หากขนาดของช่องว่างภายในชั้นกรรอกเล็กพอที่จะดักเม็ดดิน (Base soil) ที่

ถูกพัดพามาได้การกัดเซาะก็จะหยุดลง (No erosion) ในทางตรงกันข้าม ชั้นกรรอกที่ออกแบบไม่ดีย่อมไม่ทำให้การกัดเซาะหยุดได้ การกัดเซาะคงดำเนินต่อไปในระดับต่างๆ ขึ้นกับประสิทธิภาพของกรรอก ดังตัวอย่างกรณีการบกรรอกของชั้นกรรอกในระดับต่างๆ ดังนี้

No erosion – ชั้นกรรอกหยุดการกัดเซาะได้

Some Erosion – ชั้นกรรอกหยุดการกัดเซาะได้หลังจากการเซาะไปแล้ว โดยอาจมีอัตราการไหลซึมเพิ่มขึ้น (อาจสูงไปถึง 100 l/sec)

Excessive Erosion – ชั้นกรรอกหยุดการกัดเซาะได้ แต่หลังจากเกิดการกัดเซาะไปมากแล้ว อัตราการไหลซึมที่ตรวจวัดได้อาจสูงถึง 100 ถึง 1000 l/sec.

Continuing Erosion – ชั้นกรรอกมีเม็ดดินหยาบเกินไปจนไม่สามารถหยุดการกัดเซาะได้ อาจมีการไหลซึมด้วยอัตราที่สูงกว่า 1000 l/sec และอัตราการไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จะเห็นว่าตัวชี้วัดที่สำคัญของขั้นตอนนี้คืออัตราการไหลซึมที่จะเพิ่มขึ้น และระดับความชุ่มชื้นของน้ำที่รั่วซึมออกมา หากความชุ่มชื้นมากย่อมแสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคเม็ดดินถูกกัดเซาะออกมาจำนวนมาก ในสนามจึงควรมีการตรวจสอบพื้นที่เปียกด้านท้ายเขื่อนและความชุ่มชื้นของน้ำที่ไหลซึมหรือรั่วซึม

ICOLD (2012) ได้สรุปเงื่อนไขของกรรอกที่จะไม่ทำให้เกิดการกัดเซาะต่อเนื่องไป ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ในการออกแบบจะต้องพิจารณาเงื่อนไขของการระบายด้วยเพื่อไม่ให้ความดันน้ำสะสมในตัวเขื่อน

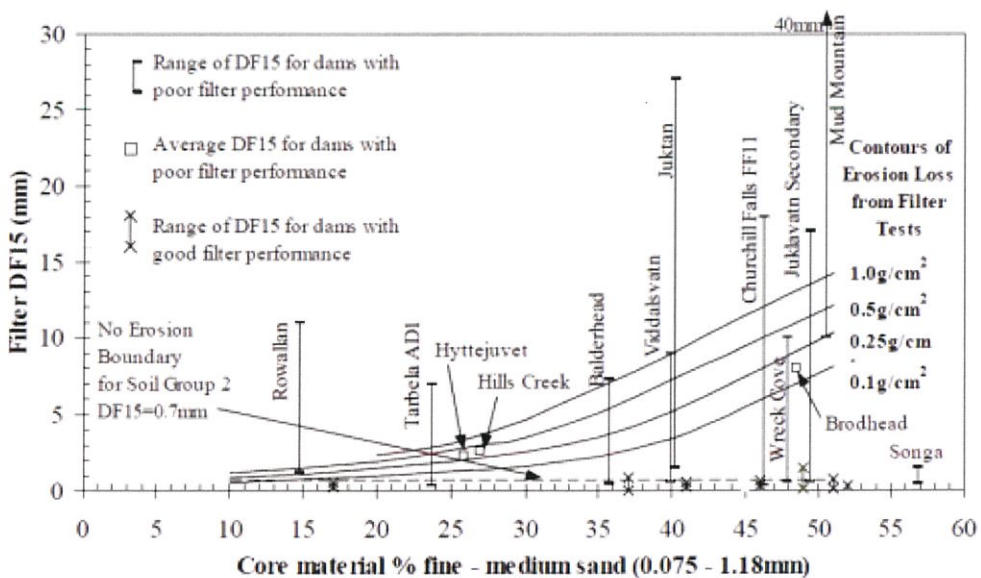
ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการเกิดการกัดเซาะต่อเนื่อง (Continuation Erosion)

Base Soil	Proposed Criteria for Excessive Erosion Boundary	Proposed Criteria for Continuing Erosion Boundary
Soils with $d_{95} < 0.3$ mm	$D_{15} > 9 d_{95}$	For all soils: $D_{15} > 9 d_{95}$
Soils with $0.3 < d_{95} < 2$ mm	$D_{15} > 9 d_{90}$	
Soils with $d_{95} > 2$ mm and fines content $> 35\%$	$D_{15} >$ the D_{15} value which gives an erosion loss of 0.25g/cm^2 in the CEF test (0.25g/cm^2 contour line in Figure 2-12)	
Soils with $d_{95} > 2$ mm and fines content $< 15\%$	$D_{15} > 9 d_{85}$	
Soils with $d_{95} > 2$ mm and fines content 15-35%	$D_{15} > 2.5 D_{15\text{design}}$, where $D_{15\text{design}}$ is given by: $D_{15\text{design}} = (35 - \text{pp}\% 0.075 \text{ mm}) (4d_{85} - 0.7) / 20 + 0.7$	

Notes:

(1) Criteria are directly applicable to soils with d_{95} up to 4.75 mm. For soils with coarser particles determine d_{85} and d_{95} using grading curves adjusted to give a maximum size of 4.75 mm.

(2). CEF is Continuing Erosion Filter test.



รูปที่ 2.13 Comparison of erosion losses measured in filter tests to dams with poor and good filter performance (Foster 1999, Foster and Fell 2001)

ก. กรณีการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน

สำหรับเส้นทางการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนสามารถแบ่งลักษณะของตัวเขื่อนที่ทำให้โอกาสของการกัดเซาะต่อเนื่องแตกต่างกันได้ดังตารางที่ 2-4

ข. กรณีการไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน

จะเกิดการไหลซึมต่อเนื่องแน่นอน หากจุดทางออกไม่มีการกรอง จะเกิดการกัดเซาะต่อเนื่องอย่างแน่นอน และหากมีการกรองที่ดีที่จุดทางออก ประสิทธิภาพของการกรองจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินและช่องว่างในชั้นกรอง ซึ่งหากมีประสิทธิภาพดีจะไม่เกิดการไหลซึมต่อเนื่อง

ค. กรณีการไหลซึมจากตัวเขื่อนสู่ฐานราก

การกัดเซาะเกิดต่อเนื่องได้ใน 2 ลักษณะ ได้แก่

1) การกัดเซาะผ่านรอยแตกในชั้นฐานราก ระดับของการกัดเซาะจะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดของรอยแตกที่จะเปิดให้เม็ดดินของแกนดินเหนียวผ่านไปได้

2) การกัดเซาะผ่านชั้นฐานรากที่เป็นชั้นดินเม็ดหยาบ ระดับของการกัดเซาะจะขึ้นอยู่กับดินเม็ดหยาบที่จะอนุญาตให้เม็ดดินของแกนดินเหนียวผ่านไปได้มากน้อยเพียงใด

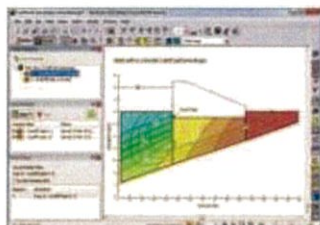
โดยสรุปจะพบว่าการกัดเซาะต่อเนื่องจากเกิดขึ้นได้อย่างแน่นอน หากชั้นกรองหรือฐานรากไม่สามารถดักเม็ดดินที่ถูกพัดพาได้ ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการไหลซึมสูงขึ้น แต่หากชั้นกรองสามารถดักเม็ดดินได้ การไหลซึมที่มากขึ้นจะค่อยๆ ลดลงและหยุดในที่สุด ดังนั้นขนาดคละของดินแกนดินเหนียว และชั้นกรอง รวมทั้งขนาดของรอยแตกของชั้นฐานรากที่เป็นหิน จึงเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการกัดเซาะต่อเนื่องได้

2.4. แนะนำการใช้โปรแกรม SEEP/W 2012 และ Slope/W



SEEP/W™ 2012

Groundwater seepage analysis.



Typical Applications

SEEP/W can model almost any groundwater problem including:

- Dissipation of excess pore pressure after reservoir drawdown
- Changes in pore-water pressure conditions within earth slopes due to infiltration of precipitation
- Mounding of the groundwater table beneath water retention structures such as lagoons and tailings ponds
- Effect of subsurface drains and injection wells
- Drawdown of a water table due to pumping from an aquifer
- Seepage flow quantities into excavations
- Use AIR/W and consider the true matric suction (U_a-U_w) mechanisms
- Integrate with TEMP/W and consider flow in freezing and thawing soils
- plus many more

Comprehensive and Powerful

SEEP/W is a finite element CAD software product for analyzing groundwater seepage and excess pore-water pressure dissipation problems within porous materials such as soil and rock. Its comprehensive formulation allows you to consider analyses ranging from simple, saturated steady-state problems to sophisticated, saturated / unsaturated time-dependent problems. SEEP/W can be applied to the analysis and design of geotechnical, civil, hydrogeological, and mining engineering projects.

Saturated / Unsaturated Flow

SEEP/W can model both saturated and unsaturated flow, a feature that greatly broadens the range of problems that can be analyzed. In addition to traditional steady-state saturated flow analysis, the saturated / unsaturated formulation of SEEP/W makes it possible to analyze seepage as a function of time and to consider such processes as the infiltration of precipitation. The transient feature allows you to analyze such problems as the migration of a wetting front and the dissipation of excess pore-water pressure.

Easy to Use

Defining a Seepage Problem

Beginning an analysis is as simple as defining the geometry by drawing regions and lines that identify soil layers, or by importing a DXF™ file. Then graphically apply boundary conditions and specify material properties. Material properties can be estimated from easily measured parameters like grain-size, saturated conductivity, saturated water content, and the air-entry value.

Viewing the Results

Once you have solved your seepage analysis, SEEP/W offers many tools for viewing results. Generate contours or x-y plots of any computed parameter, such as head, pressure, gradient, velocity, and conductivity. Velocity vectors show flow direction and rate. Transient conditions can be shown as a changing water table over time. Interactively query computed values by clicking on any node, Gauss region, or flux section. Then prepare the results for your report by adding labels, axes, and pictures, or export the results into other applications such as Microsoft® Excel® for further analysis.

Integrated with Other Applications

Dissipate excess pore-water pressures generated by SIGMA/W or QUAKE/W. Excess pore-water pressures generated by static loading (e.g., fill placement) or by dynamic motion during an earthquake can be brought into SEEP/W to study how long it takes to dissipate the excess pressures.

Use SEEP/W pore-water pressures in SLOPE/W

Using finite element computed pore-water pressures in SLOPE/W makes it possible to deal with highly irregular saturated / unsaturated conditions or transient pore-water pressure conditions in a stability analysis. For example, you can analyze changes in stability as the pore-water pressure changes with time.

Use SEEP/W data inside a CTRAN/W model for contaminant transport or a TEMP/W model for convective heat transfer analysis.

 **GeoStudio®**
One Model. One Tool. Many Analyses.



Requirements

- Microsoft® Windows® 7, Windows Vista®, or Windows® XP with Service Pack 3
- Intel® Pentium® 4 or better, or AMD Opteron™ or Athlon™ 64 or better (GeoStudio is optimized for multi-core Intel processors)
- 100 MB hard disk space
- 1024x768 screen resolution
- Microsoft® .NET 4.0 is required for Add-Ins
- An Internet connection is required to activate or renew a license



GeoStudio™

One Model. One Tool. Many Analyses.

SEEP/W is part of GeoStudio, an integrated tool containing GEO-SLOPE's leading suite of geotechnical modeling software products: SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W and VADOSE/W. Using GeoStudio means you can run all of these products in one environment, creating one model that is shared among all products.

For example, geometry and material properties created in one product are immediately available in all other products. Sharing the data lets you run several analyses on the same problem. You can use the results from one analysis in another, or import files created by previous versions of the software.

Features

- Analysis types include steady-state confined and unconfined flow, transient flow, 2-D flow in a cross-section or in plan view, and 3D axisymmetric flow
- Boundary condition types include total head, pressure head, or flux specified as a constant or a function of time; pressure head; transient flux as a function of computed head; review and adjustment of seepage face conditions
- Volumetric water content and conductivity functions can be estimated from basic parameters and grain-size functions
- Adaptive time stepping to ensure the use of optimal time steps in transient analyses with sudden changes in boundary conditions
- Flow path delineation
- plus many more!

Formulation

Soil Properties

The hydraulic conductivity of the soil is a function of the negative pore-water pressure in the unsaturated regions. The rate of change in water content is dependent on the pore-water pressure during transient processes. Hydraulic conductivity can be defined as anisotropic in two orthogonal directions.

Iterative Process

The nonlinear nature of the finite element equations is handled using an efficient radial search iterative scheme. Graphing tools are available during run-time to help you judge if convergence has been achieved. This has proved to be extremely useful in solving highly nonlinear flow systems.

Flux Quantities

SEEP/W computes the total flux across single or multiple lines drawn through the mesh.

Join a growing network

By acquiring GEO-SLOPE software, you are joining a group located in more than 100 countries, including practising engineers, university professors, regulators, researchers and students. You can be assured that we will support and continue to enhance the software's engineering capabilities, making it even more powerful and easy to use.

Get help when you need it

When you need assistance with your model, we have helpful services available. Attend one of our workshops, or communicate directly with our experienced numerical modeling professionals. We'll help you to create better models and to gain confidence in your results.

Try out SEEP/W now!

Experience SEEP/W for yourself today! Simply visit www.geo-slope.com/downloads/ to download the free evaluation software.



1400, 633 - 6th Avenue S.W.
Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5
Tel: (403) 269 2002
Fax: (403) 266 4851
E-mail: info@geo-slope.com
Web: <http://www.geo-slope.com>

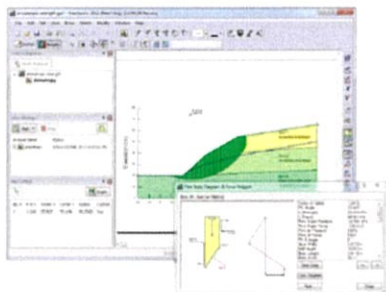
GEO-SLOPE, GeoStudio, SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W, VADOSE/W, and their logos are trademarks or registered trademarks of GEO-SLOPE International, Ltd. in Canada and/or other countries. Other trademarks are the property of their respective owners.

Copyright © 2012 GEO-SLOPE International Ltd. All rights reserved.



SLOPE/W™ 2012

Slope stability analysis.



Comprehensive and Powerful

SLOPE/W is the leading CAD software product for computing the factor of safety of earth and rock slopes. SLOPE/W can effectively analyze both simple and complex problems for a variety of slip surface shapes, pore-water pressure conditions, soil properties, analysis methods and loading conditions.

Using limit equilibrium, SLOPE/W can model heterogeneous soil types, complex stratigraphic and slip surface geometry, and variable pore-water pressure conditions using a large selection of soil models. Analyses can be performed using deterministic or probabilistic input parameters. Stresses computed by a finite element stress analysis may be used in addition to the limit equilibrium computations for the most complete slope stability analysis available.

Typical Applications

SLOPE/W can model almost any stability problem, including:

- Natural earth and rock slopes
- Sloping excavations
- Earth embankments
- Open-pit high walls
- Anchored retaining structures
- Berms at the toe of a slope
- Surcharges at the top of a slope
- Earth reinforcement, including soil nails and geofabrics
- Seismic and earthquake loading
- Tension cracks
- Partial and total submergence
- Line load at any point

- Unsaturated soil behavior
- plus many more!

With this comprehensive range of features, SLOPE/W can be used to analyze almost any slope stability problem you will encounter in your geotechnical, civil, and mining engineering projects.

Easy to Use

Defining a Stability Problem

Beginning an analysis is as simple as defining the geometry by drawing regions and lines that identify soil layers, or by importing a DXF™ file. Then choose an analysis method, specify soil properties and pore-water pressures, define reinforcement loads, and create trial slip surfaces.

Viewing the Results

Once you have solved your stability problem, SLOPE/W offers many tools for viewing the results. Display the minimum slip surface and factor of safety, or view each one individually. View detailed information about any slip surface, including the total sliding mass, a free body diagram and a force polygon showing the forces acting on each slice. Contour the factors of safety, or show plots of computed parameters. Then prepare the results for your report by adding labels, axes, and pictures, or export the results into other applications such as Microsoft® Excel® for further analysis.

Integrated with Other Applications

Use pore-water pressures from SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W or VADOSE/W

Using finite element computed pore-water pressures in SLOPE/W makes it possible to deal with highly irregular saturated/unsaturated conditions or transient pore-water pressure conditions in a stability analysis. For example, you can analyze changes in stability as the pore-water pressure changes with time.

Use stresses from SIGMA/W or QUAKE/W

Using finite element computed stresses in SLOPE/W allows you to conduct a stability analysis in addition to a static deformation or dynamic earthquake analysis. For example, you can compute the minimum factor of safety that will be reached during an earthquake, or you can find the resulting permanent deformation, if any, using a Newmark-type procedure.



Requirements

- Microsoft® Windows® 8, Windows® 7, Windows Vista®, or Windows® XP with SP 3
- Intel® Pentium® 4 or better, or AMD Opteron™ or Athlon™ 64 or better (GeoStudio is optimized for multi-core Intel processors)
- 100 MB hard disk space
- 1024x768 screen resolution
- Microsoft® .NET 4.0 is required for Add-Ins
- An Internet connection is required to activate or renew a license



One Model. One Tool. Many Analyses.

SLOPE/W is part of GeoStudio, an integrated tool containing GEO-SLOPE's leading suite of geotechnical modeling software products: SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W and VADOSE/W. Using GeoStudio means you can run all of these products in one environment, creating one model that is shared among all products.

For example, geometry and material properties created in one product are immediately available in all other products. Sharing the data lets you run several analyses in another, or import files created by previous versions of the software.



1400, 633 - 6th Avenue S.W.
Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5
Tel: (403) 269 2002
Fax: (403) 266 4851
E-mail: info@geo-slope.com
Web: <http://www.geo-slope.com>

Features

- Limit equilibrium methods include Morgenstern-Price, GLE, Spencer, Bishop, Ordinary, Janbu, and more
- Soil strength models include Mohr-Coulomb, Spatial Mohr-Coulomb, Bilinear, Undrained ($\Phi=0$), anisotropic strength, shear/normal function, and many types of strength functions
- Specify many types of interslice shear-normal force functions
- Pore-water pressure options include R_u coefficients, piezometric lines, pressure contours, a grid of values, spatial functions, or finite-element computed heads or pressures
- Define potential slip surfaces by a grid of centers and radius lines, blocks of slip surface points, entry and exit ranges, fully specified shapes, or automatic
- Use probabilistic soil properties, line loads, and piezometric lines
- Transient stability analyses
- plus many more!

Join a growing network

By acquiring GEO-SLOPE software, you are joining a group located in more than 100 countries, including practising engineers, university professors, regulators, researchers and students. You can be assured that we will support and continue

Get help when you need it

When you need assistance with your model, we have helpful services available. Attend one of our workshops, or communicate directly with our experienced numerical modeling professionals. We'll help you to create better models and to gain confidence in your results.

Try out SLOPE/W now!

Experience SLOPE/W for yourself today! Simply visit www.geo-slope.com/downloads/ to download the free evaluation software.

Formulation

SLOPE/W is formulated in terms of moment and force equilibrium factor of safety equations. For example, the Morgenstern-Price method satisfies both force and moment equilibrium. This general formulation makes it easy to compute the factor of safety for a variety of methods and to readily understand the relationships and differences among all the methods.

SLOPE/W can use finite element computed stresses from SIGMA/W or QUAKE/W to calculate a stability factor by computing both total shear resistance and mobilized shear stress along the entire slip surface. SLOPE/W then computes a local stability factor for each slice.

Probabilistic analysis can be performed by using normal distribution functions to vary soil properties and loading conditions. Using a Monte Carlo approach, SLOPE/W computes the probability of failure in addition to the conventional factor of safety.

GEO-SLOPE, GeoStudio, SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W, VADOSE/W, and their logos are trademarks or registered trademarks of GEO-SLOPE International, Ltd. in Canada and/or other countries. Other trademarks are the property of their respective owners.

Copyright © 2017 GEO-SLOPE International Ltd. All rights reserved.

3.2.1. ตัวอย่างการคำนวณ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลการวัดจากเครื่องมือวัด Piezometer

หมายเลข	ตำแหน่ง			อ่านค่าที่ 0	ระดับดินขณะอ่านค่า	อ่านค่า (H z)	อ่านค่า ครั้งที่ 2	อ่านค่า (F ² /1000)	แรงดันน้ำ (ksc)	Water Head (m)
	สถานี	ระยะออกฉาก	ระดับ							
P-1	1+050	U/S 27.00	40.00	3800	51.185	2563	2563	6568.97	16.28	1.63

ช่องที่ 1 หมายเลขตำแหน่ง Piezometer

ช่องที่ 2 หน้าตัดเขื่อนที่ P-1 ติดตั้ง

ช่องที่ 3 ระยะที่วัดจากกึ่งกลางของเขื่อนออกมาด้านหน้าเขื่อน 27 m ซึ่งเป็นตำแหน่ง Piezometer

หมายเลข P-1

ช่องที่ 4 ระดับ Piezometer หมายเลข P-1 ที่วัดจากระดับอ้างอิง

ช่องที่ 5 ค่าอ่านเริ่มต้นของ Piezometer หมายเลข P-1

ช่องที่ 6 ระดับดินขณะอ่านค่า

ช่องที่ 7 ค่าที่อ่านได้ ณ วันที่เก็บข้อมูล จาก Piezometer

ช่องที่ 8 ค่าที่อ่านจากการตรวจวัดครั้งที่ 2

ช่องที่ 9 B unit = (ช่องที่ 8)²/1000

ช่องที่ 10 แทนค่าใน สมการที่ (z.1)

$$P(\text{kPa}) = C.F.(L_i - L_c) - [T_k(T_i - T_c)] + [0.1(B_l - B_c)] \dots\dots\dots(z.1)$$

$$P(\text{kPa}) = 0.20284 \text{kPa} [(\text{ช่องที่ 6})^2 / 1000] - (\text{ช่องที่ 10})]$$

$$= 0.20284 \text{kPa} [(3800^2 / 1000) - (6568.97)]$$

$$= 1596.56 \text{ kPa}$$

เปลี่ยนหน่วยเป็น ksc จะได้ = 1596.56

$$= 1596.56 \times 0.010197$$

$$= 16.28 \text{ ksc}$$

ช่อง 11 Water Head = แรงดัน/10

$$= 1.63 \text{ m}$$

3.2.2. สร้างกราฟระหว่างความสูงน้ำ (Piezometer Head) กับระดับน้ำท้ายเขื่อน (Reservoir

Level)

ณ ช่วงเวลาใดๆ

3.2.3). วิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำในเขื่อนอ้างอิงจากตำแหน่ง Piezometer

1. รวบรวมเสตน้ำของแต่ละตำแหน่ง Piezometer ในหน้าตัดเขื่อนมาเขียนเป็นเส้นทางการไหลของน้ำ

ตัวอย่าง วิธีทำ

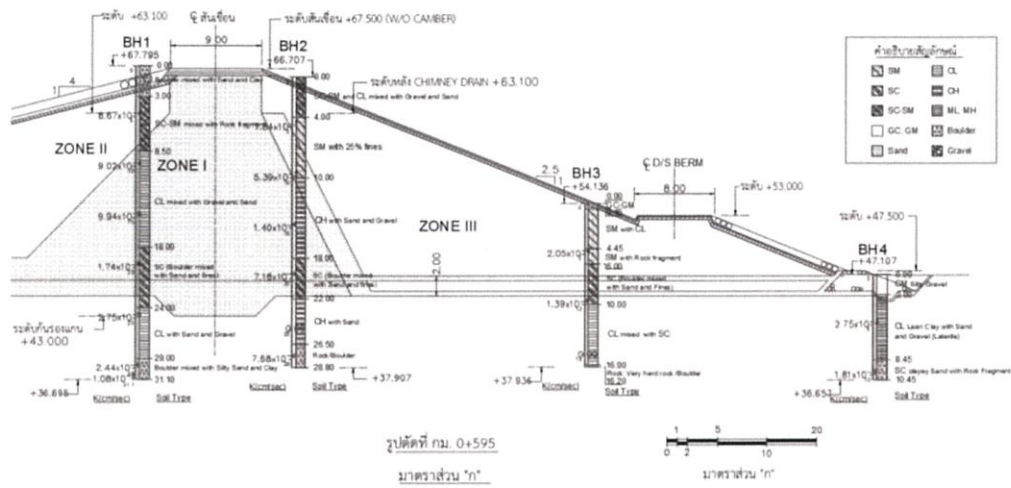
วันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2554 วัดระดับน้ำในเขื่อนได้ +62.710 m Total Head ของ Piezometer แต่ละหมายเลขที่ STA 1+050 มีค่าแสดงดังตาราง สามารถหาเส้นทางการไหลของน้ำได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าระดับน้ำ ของ Piezometer เขื่อนสิียด วันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2554

วันที่	Reservoir Level	Piezometer	off set (m)	Total Head (m)
20 ม.ค 54	+62.710	P1	-27	55
		P2	-16	54
		P3	0	53
		P4	8	52
		P5	27	51
		P6	-20	50
		P7	-12	49
		P8	-4	48
		P9	4	47
		P10	12	46
		P11	22	45
		P12	-8	44
		P13	0	43
		P14	8	42
		P15	0	41

2.) สร้างเส้นทางการไหลของน้ำในเขื่อนดินถมอ้างอิงจากตำแหน่ง Piezometer แสดงในรูปที่ 3.1

Soil Type vs Permeability(K)

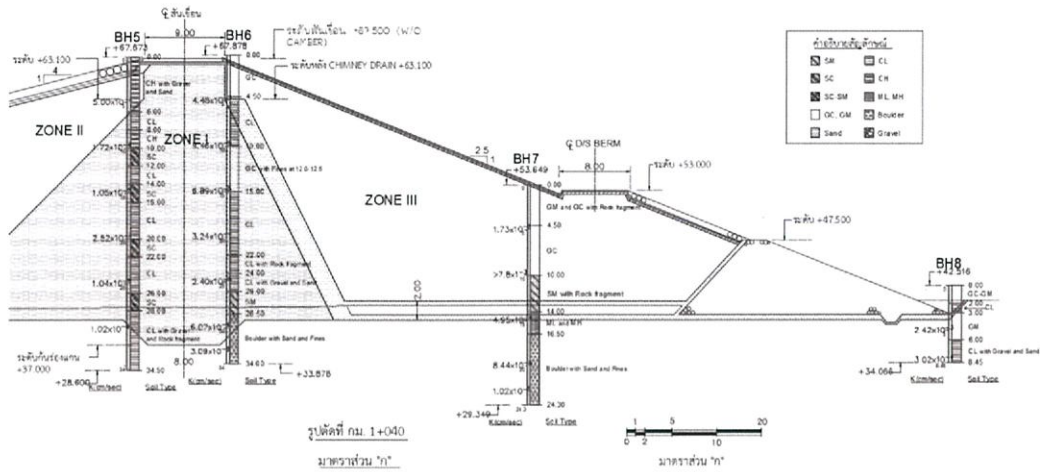


รูปที่ 3.2 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนถม ที่ STA 0+600

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนดินถม ที่ STA 1+050

Station/ Zone	Soil Group	Water Content		Unit Weight (t/m ³)		Permeability (m/sec)		Phi (°) <average>	Cohesive Strength(t/m ²)
		Range Value	Average	Range Value	Average	Range Value	Average		
1+040 Core	CL,SC CH, GC	0.40-0.48	0.45	1.88-1.97	1.9	2.52x10 ⁻⁶ to 1.04x10 ⁻⁷	6.3x10 ⁻⁷	16	4.2
II (U/S)	CL, CH SC	0.45-0.55	0.5	1.86-1.92	1.9	8.63x10 ⁻⁶ to 1.1x10 ⁻⁷	5.0x10 ⁻⁶	27	8.1
III (D/S)	GM, GC SC	0.3-0.4	0.4	1.85-1.86	1.85	8.63x10 ⁻⁶ to 1.1x10 ⁻⁷	2.05x10 ⁻⁶	24	6.9
Chimney	SM-SP		0.4		1.65	4.48x10 ⁻⁵ to 4.95x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁵	38	0
Blanket	SM		0.4		1.65	7.8x10 ⁻⁵ to 4.95x10 ⁻⁶	1.14x10 ⁻⁶	38	0
Contact 2 m thick	SM	0.314-0.402	0.4		1.9	6.07x10 ⁻⁶ to 6.89x10 ⁻⁷	1.4x10 ⁻⁶	30	0
Foundation	CL,SC	0.317-0.551	0.45	2.00-2.06	2.02	4.95x10 ⁻⁶ to 1.02x10 ⁻⁷	7.0x10 ⁻⁷	7	18

Soil Type vs Permeability(K)

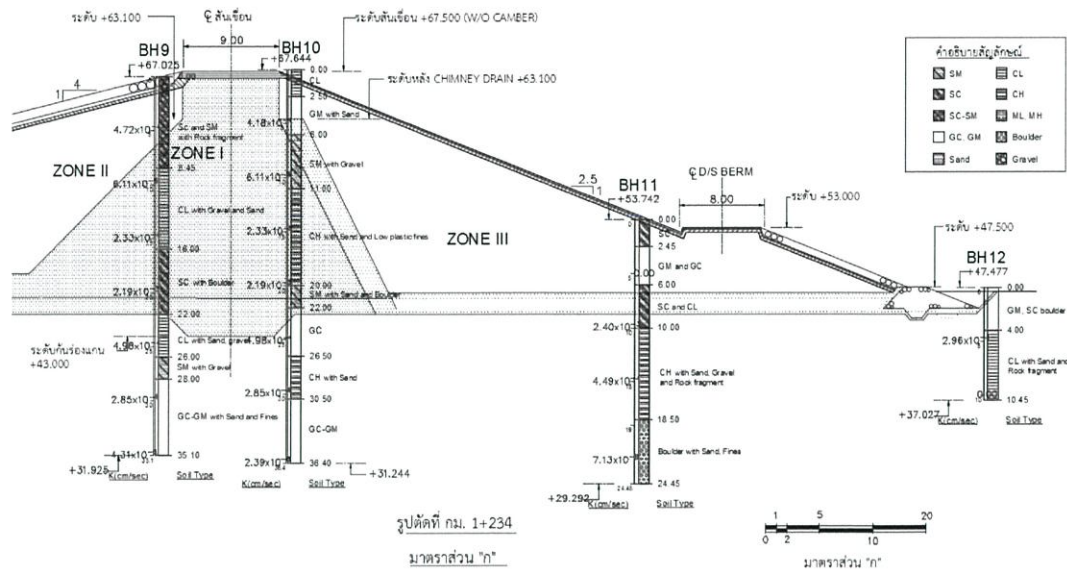


รูปที่ 3.3 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนถม ที่ STA 1+040

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนดินถม ที่ STA 1+240

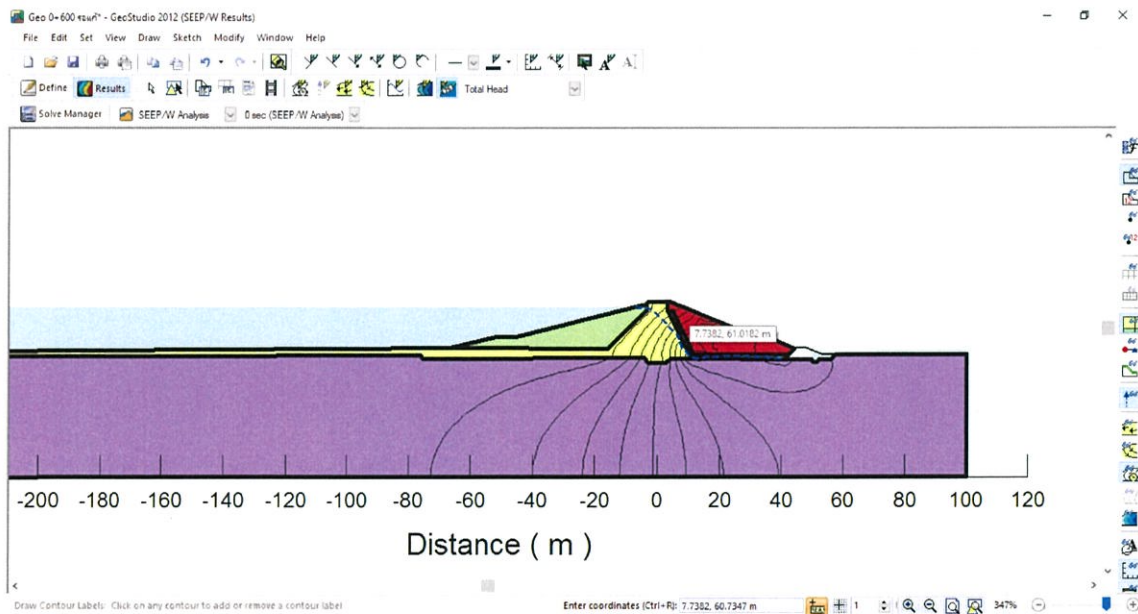
Staion/ Zone	Soil Group	Water Content		Unit Weight (t/m ³)		Permeability (m/sec)		Phi (°) <average>	Cohesive Strength(t/m ²)
		Range Value	Average	Range Value	Average	Range Value	Average		
1+234 Core	CL,SC	0.40-0.48	0.45	1.88-1.97	1.9	2.33x10 ⁻⁶ to 4.25x10 ⁻⁷	6.11x10 ⁻⁷	18	11
II (U/S)	CL, CH SC	0.3-0.45	0.35	1.76-1.87	1.83	8.63x10 ⁻⁶ to 1.1x10 ⁻⁷	4.72x10 ⁻⁶	27	8.1
III (D/S)	GM, GC SC	0.3-0.4	0.5		1.85	4.18x10 ⁻⁶ to 1.1x10 ⁻⁸	1.1x10 ⁻⁷	20	5
Chimney	SM-SP		0.355		1.65	4.48x10 ⁻⁵ to 4.95x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁵	38	0
Blanket	SM SC		0.4		1.87	7.8x10 ⁻⁵ to 6.11x10 ⁻⁷	2.4x10 ⁻⁶	38	0
Contact 2 m thick	SM		0.4		1.9		1.19x10 ⁻⁵	30	0
Foundation	CL,SC	0.317-0.551	0.45	2.00-2.06	2.02	4.95x10 ⁻⁶ to 1.02x10 ⁻⁷	7.0x10 ⁻⁷	7	18

Soil Type vs Permeability(K)



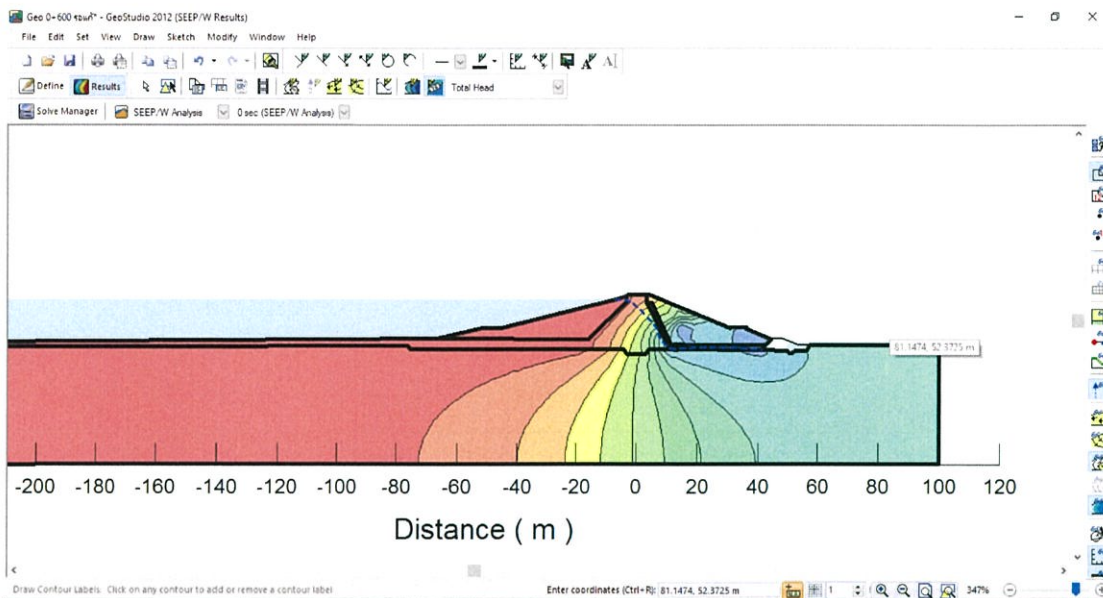
รูปที่ 3.4 คุณสมบัติของดินสำหรับทำแบบจำลองเขื่อนดินถม ที่ STA 1+240

3.2.2.) สร้างแบบจำลองเขื่อนดินถมด้วย โปรแกรม Seep/W ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Seep/W

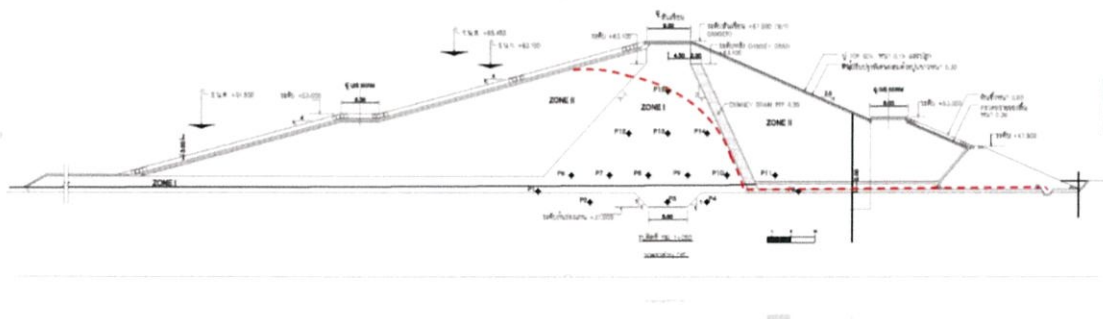
3.2.3.) วิเคราะห์ผลการทดลองจากโปรแกรม Seep/W ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W

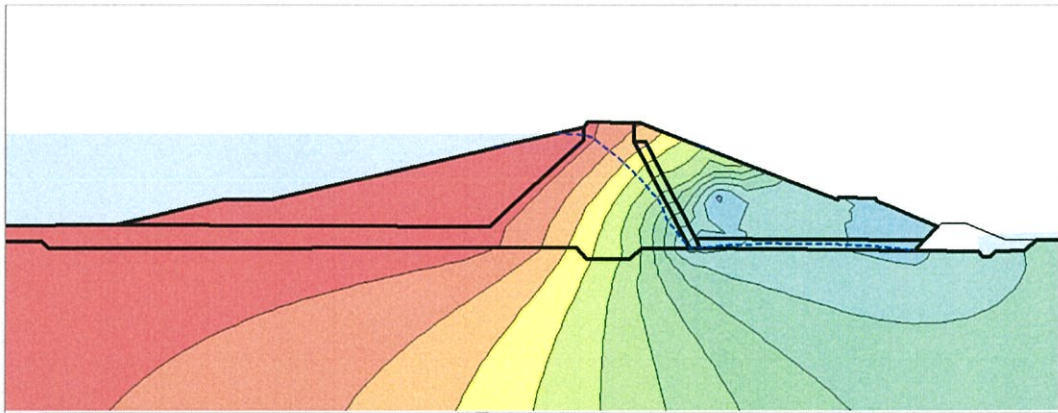
3.4 นำเส้นทางการไหลของน้ำ ทั้ง 2 วิธี มาศึกษาหาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบกัน

วิธีที่ 1 เส้นทางการไหลของน้ำที่อ้างอิงจากระดับน้ำในตำแหน่ง Piezometer ต่างๆ



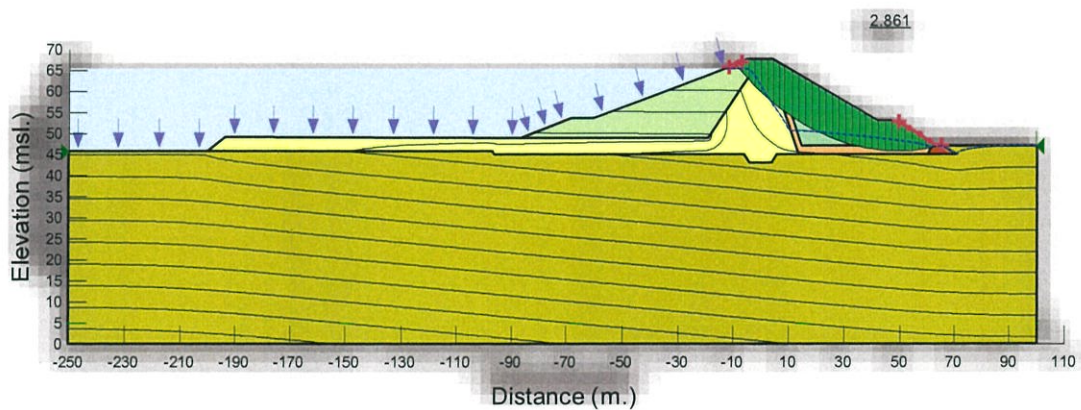
รูปที่ 3.7 แสดงเส้นทางการไหลของน้ำผ่านเขื่อนดิน

วิธีที่ 2 เส้นทางการไหลของน้ำที่คำนวณด้วยโปรแกรม Seep/W



รูปที่ 3.8 เส้นทางการไหลของน้ำคำนวณด้วยโปรแกรม Seep/W

3.5 หาค่าความมั่นคงของลาดดินด้วยโปรแกรม Slope/W



รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ความมั่นคงลาดเขื่อนดินถม

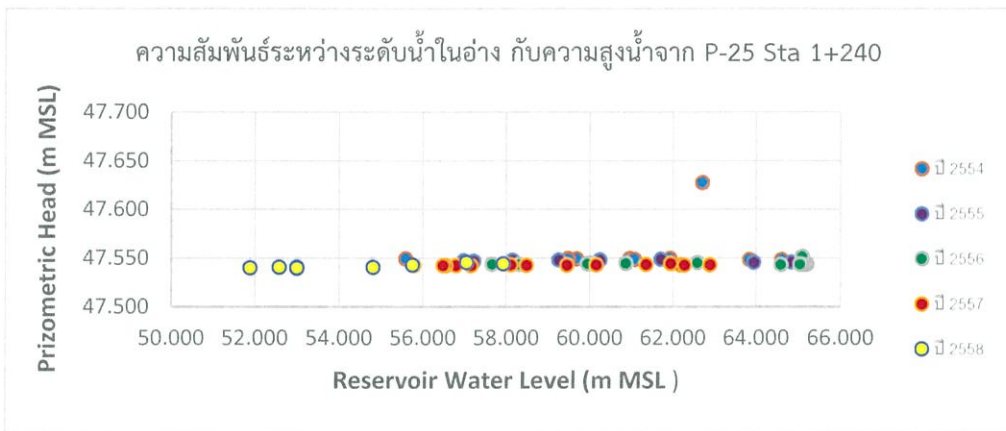
3.6 สรุปผลการลองและวิเคราะห์ผล

บทที่ 4 ผลการศึกษา

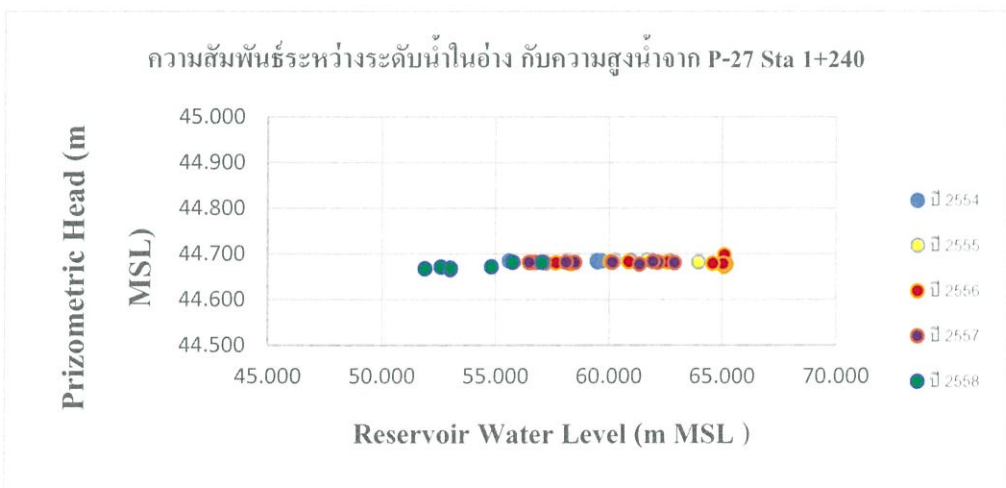
4.1 ผลจากเครื่องมือวัดระดับน้ำในเขื่อน

1.) ค่าความสูงน้ำจาก พิโซมิเตอร์ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดเขื่อนนั้น ไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ผลได้

เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระดับน้ำหลังเขื่อนในช่วงเวลาตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2554 ถึง ปี พ.ศ. 2558 ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าความสูงน้ำจาก พิโซมิเตอร์ ที่ตำแหน่ง P-25 STA 1+240



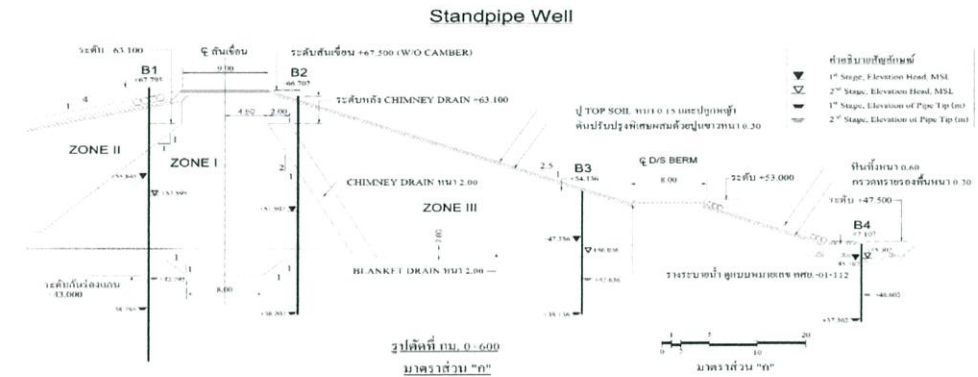
รูปที่ 4.2 ค่าความสูงน้ำจาก พิโซมิเตอร์ ที่ตำแหน่ง P-27 STA 1+240

ตารางที่ 4.1 ตารางค่าระดับความสูงน้ำจากเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์ ที่เก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ.2544 จากการบันทึกข้อมูลค่าความดันด้วย พิโซมิเตอร์ ที่หน้าตัดต่าง ๆ นั้นพบว่าค่าการอ่านที่จะนำไปแปลงเป็นค่าความดันน้ำที่ได้จากเครื่องมือวัดมีการเปลี่ยนค่าสัญญาณความถี่ไม่มีนัยยะสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำแต่อย่างใด

วันที่	Reservoir Level	Piezometer	off set (m)	Total Head (m)
20 ม.ค 54	62.71	P1	-27	41.63
		P2	-16	40.41
		P3	0	40.65
		P4	8	39.77
		P5	27	41.64
		P6	-20	44.8
		P7	-12	44.79
		P8	-4	44.66
		P9	4	44.79
		P10	12	44.69
		P11	22	44.64
		P12	-8	-
		P13	0	-
		P14	8	-
		P15	0	-

4.2 ผลการวัดจากเครื่องมือวัด Standpipe Wells

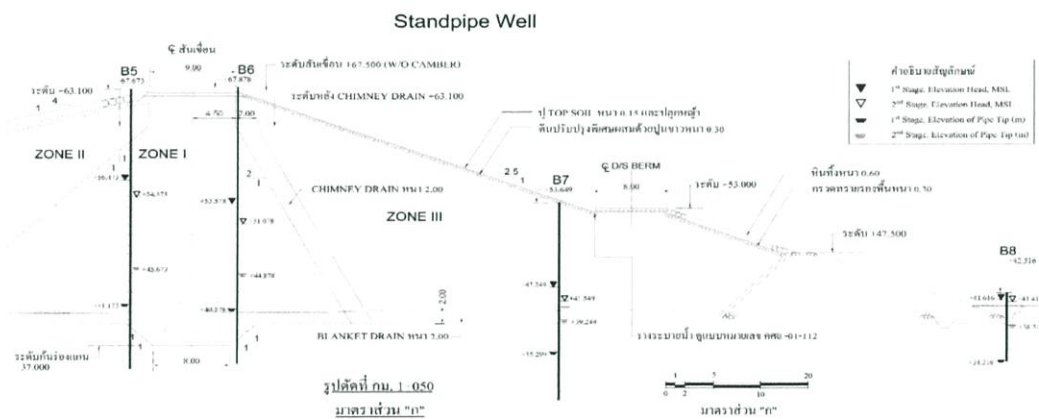
1.) ตำแหน่งหลุมเจาะ B1-B12



ระดับน้ำจาก Standpipe well Measured July 3, 2016

Bore Hole	STATION	Offset Dam Axis		Elevation above, msl	Pipe Tip depth (m)		Ground Water Depth, m at		Elevation Head, MSL		Remark
		U/S	D/S		1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage	
B1	0+594.807	7.872		67.795	29.0	25.0	12.0	14.2	55.845	53.595	
B2	0+594.249			7.605	66.707	28.5	-	15.2	-	51.507	-
B3	0+593.954			36.743	54.136	16.0	11.5	6.6	8.1	47.536	46.036
B4	0+588.174			65.544	47.102	9.8	6.5	2.0	1.8	45.102	45.302

รูปที่ 4.3 ค่าระดับแรงดันน้ำของ standpipe well ณ รูปตัดที่กม. 0+600 ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ +53.73 เมตร (รทก)

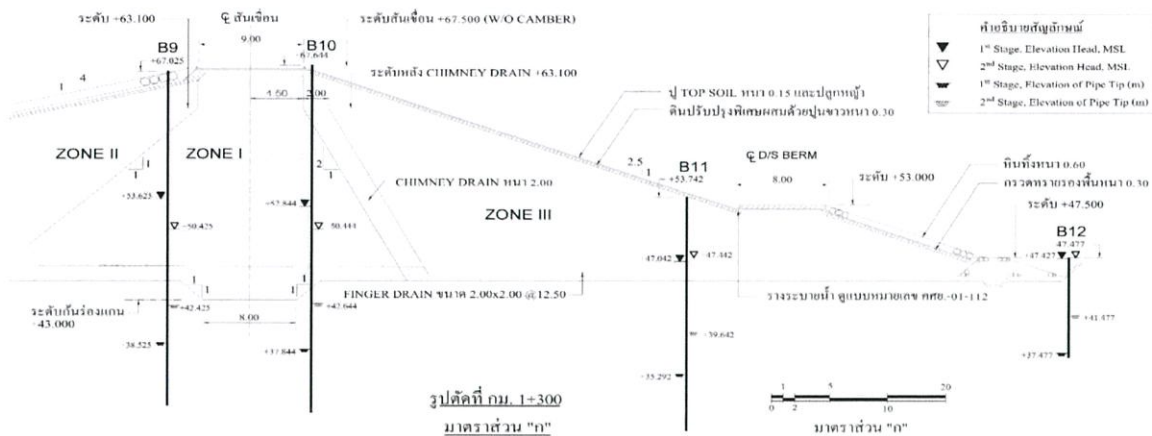


ระดับน้ำจาก Standpipe well Measured July 3, 2016

Bore Hole	STATION	Offset Dam Axis		Elevation above, msl	Pipe Tip depth (m)		Ground Water Depth, m at		Elevation Head, MSL		Remark
		U/S	D/S		1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage	
B5	1+040.162	6.311		67.673	26.5	22.0	11.2	13.3	56.473	54.373	
B6	1+042.218			4.718	67.878	27.3	23.0	14.3	16.8	53.578	51.078
B7	1+040.734			38.186	53.649	18.4	14.4	10.4	12.1	43.249	41.549
B8	1+041.079			84.869	42.516	8.3	4.0	0.9	1.1	41.616	41.416

รูปที่ 4.4 ค่าระดับแรงดันน้ำของ standpipe well ณ รูปตัดที่กม. 1+050 ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ +53.73 เมตร (รทก)

Standpipe Well



ระดับน้ำจาก Standpipe well

Measured July-3, 2016

Bore Hole	STATION	Offset-Dam Axis		Elevation above, msl	Pipe Tip depth (m)		Ground-Water Depth, m at		Elevation Head, MSL		Remark
		U/S	D/S		1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage	
B9	1+234.630	7.063		67.025	28.5	24.6	13.4	16.6	53.625	50.425	
B10	1+234.379		5.266	67.644	29.8	25.0	14.8	17.2	52.844	50.444	
B11	1+234.652		37.562	53.742	18.5	14.1	6.7	6.3	47.042	47.442	
B12	1+233.437		70.137	47.477	10.0	6.0	0.1	0.0	47.427	47.477	

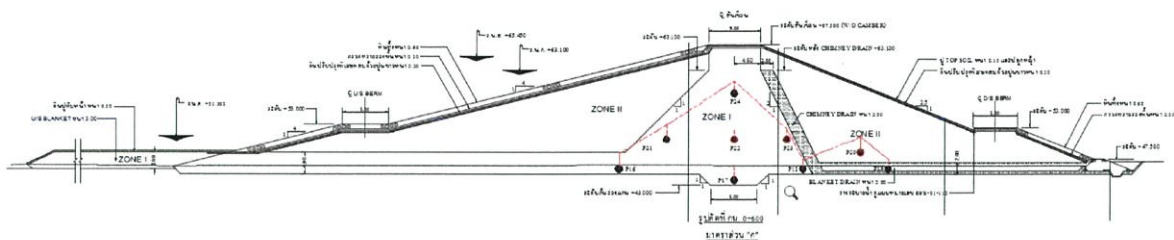
รูปที่ 4.5 ค่าระดับแรงดันน้ำของ standpipe well ณ รูปตัดที่กม. 1+300 ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ +53.73 เมตร (รทก)

2.) ค่าความสูงน้ำจาก Standpipe Wells ที่เก็บข้อมูล ณ วันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2560

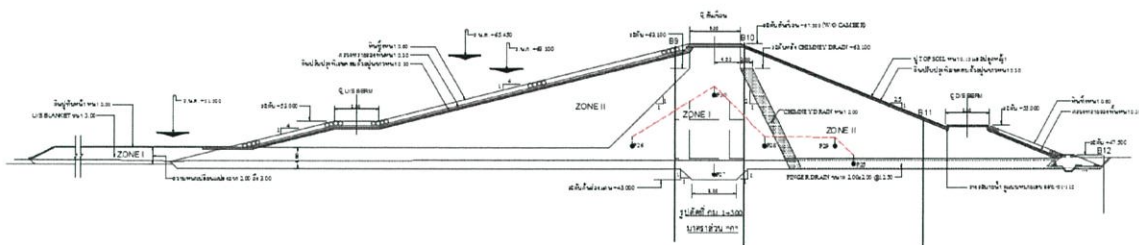
ตารางที่ 4.2 ค่าความสูงน้ำจาก Standpipe Wells ที่เก็บข้อมูล ณ วันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2560

Record of Water Head at Standpipe Wells						Measured 15-มี.ค.-16		Reservoir = +56.4 m MSL						
Bore Hole	STATION	Offset-Dam Axis		Elevation above, msl	Pipe Tip depth (m)		Tip Elev, m (MSL)		Ground-Water Depth, m at		Elevation Head, MSL		Height of Casing, m	Cut-off Elev., m
		U/S	D/S		1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage	1st Stage	2ndStage		
B1	0+594.807	7.872		67.795	29.00	24.75	38.8	43.0	13.70	14.16	54.095	53.635	0.570	42.795
B2	0+594.249		7.605	66.707	28.50	-	38.2	n/a	14.79	-	51.917	-	0.570	42.795
B3	0+593.954		36.743	54.136	16.00	11.50	38.1	42.6	8.77	7.68	45.366	46.456	0.284	42.795
B4	0+588.174		65.544	47.102	9.80	6.50	37.3	40.6	2.87	3.19	44.232	43.912	0.535	42.795
B5	1+040.162	6.311		67.673	26.50	22.00	41.2	45.7	12.54	12.70	55.133	54.973	0.524	39.200
B6	1+042.218		4.718	67.878	27.30	23.00	40.6	44.9	15.66	16.16	52.218	51.718	0.455	39.200
B7	1+040.734		38.186	53.649	18.35	14.40	35.3	39.2	12.91	12.25	40.739	41.399	0.505	39.200
B8	1+041.079		84.869	42.516	8.30	4.00	34.2	38.5	2.20	2.23	40.316	40.286	0.551	39.200
B9	1+234.63	7.063		67.025	28.50	24.60	38.5	42.4	10.94	11.20	56.085	55.825	0.702	42.425
B10	1+234.379		5.266	67.644	29.80	25.00	37.8	42.6	18.97	16.69	48.674	50.954	0.475	42.425
B11	1+234.652		37.562	53.742	18.45	14.10	35.3	39.6	5.86	5.95	47.882	47.792	0.493	42.425
B12	1+233.437		70.137	47.477	10.00	6.00	37.5	41.5	-	0.80	-	48.277	0.460	42.425

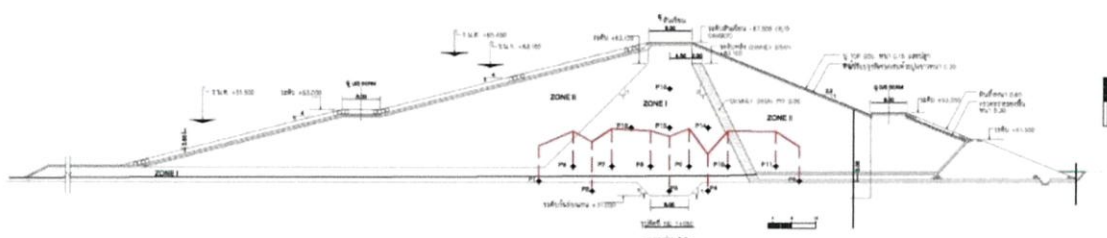
4.3 ผลการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำที่ได้จากเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์ มีค่าที่แปรปรวนเมื่อ
อ้างอิงกับเส้นทางการไหลของน้ำผ่านเขื่อนดินถมในอุคมคติ



รูปเส้นทางการไหลของน้ำจากเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์ ที่หน้าตัด 0+600



รูปเส้นทางการไหลของน้ำจากเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์ ที่หน้าตัด 1+050

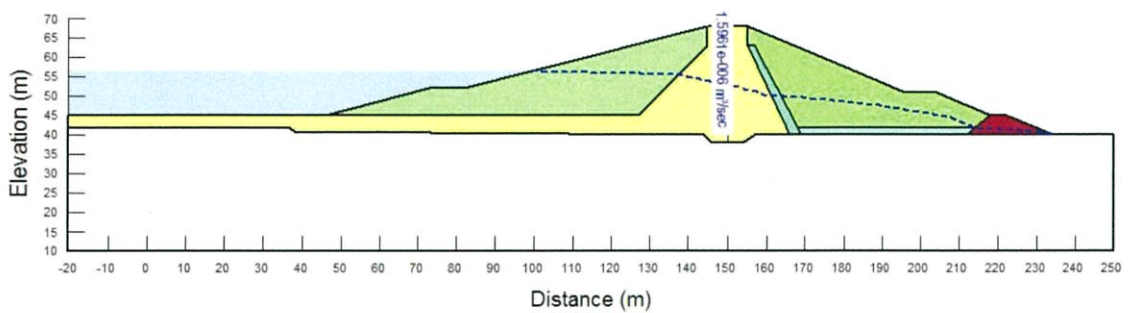


รูปเส้นทางการไหลของน้ำจากเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์ ที่หน้าตัด 1+300

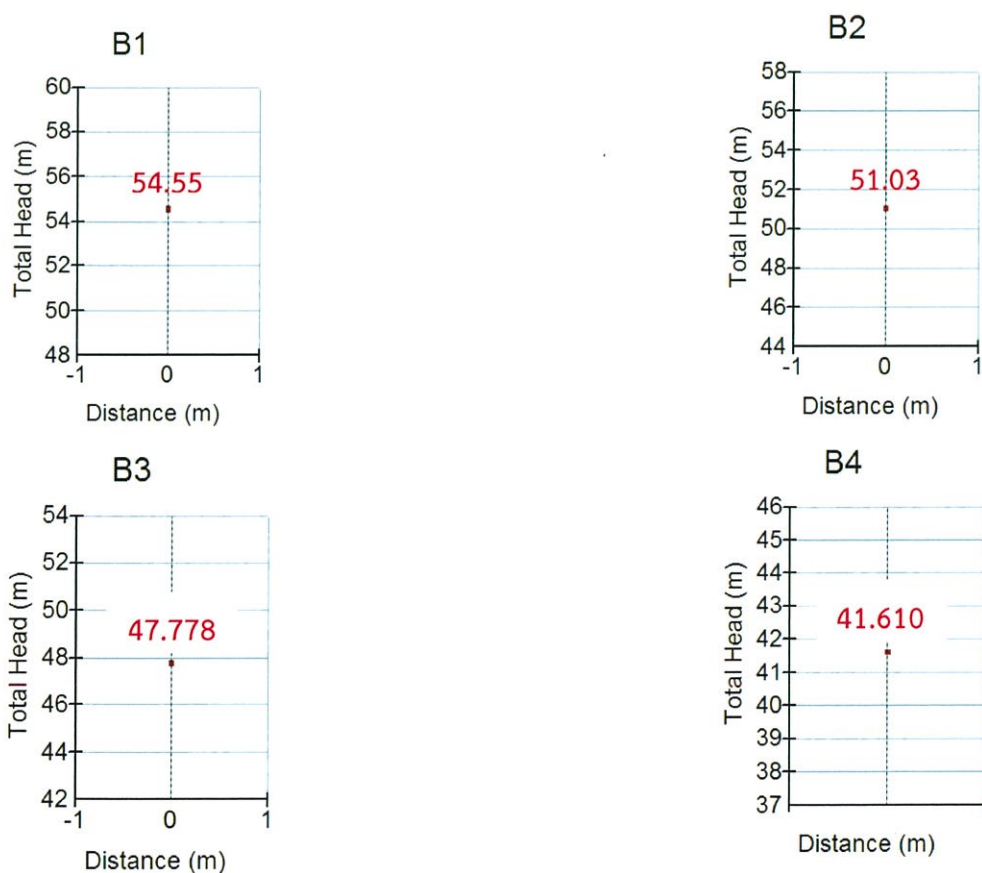
รูปที่ 4.6 เส้นทางการไหลของน้ำจากเครื่องมือวัด พิโซมิเตอร์

4.4. ผลการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W

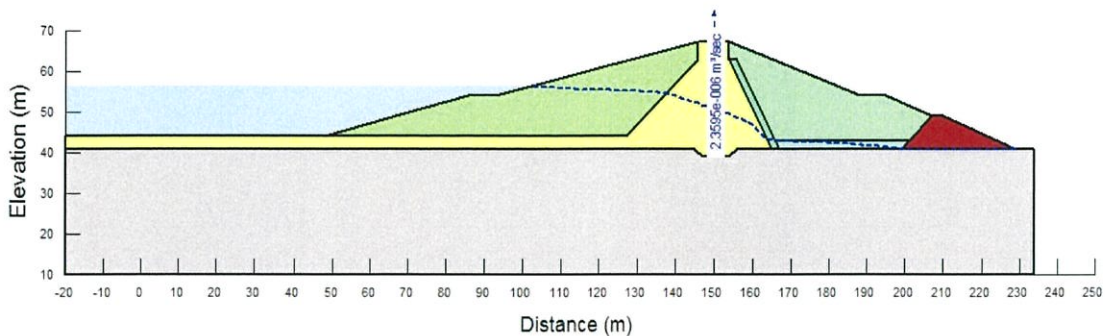
การวิเคราะห์อัตราการผ่านตัวเขื่อนทำโดยการนำข้อมูลการทดสอบดินทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการของแต่ละหน้าตัด จำลองในแบบจำลองตามขนาดของหน้าตัดต่างๆเพื่อเปรียบเทียบ Phreatic line ที่ตรวจวัดจาก Observation well ตามรูปที่ 4.8 ถึง 4.12 กับค่า total head ที่เป็นผลจากการจำลอง ที่กำหนดจุดวัดค่าระดับความสูงของ Total Head ให้ตรงกับตำแหน่งที่ติดตั้ง Stand pipe จากการเจาะสำรวจตามหน้าตัดต่างๆ ตัวอย่างการตรวจสอบแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด



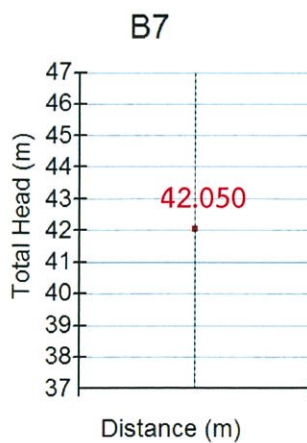
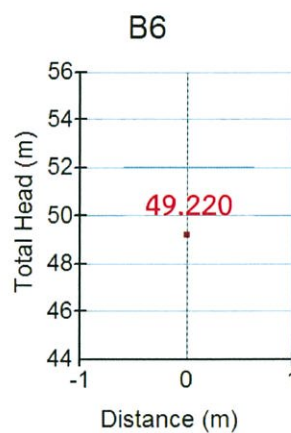
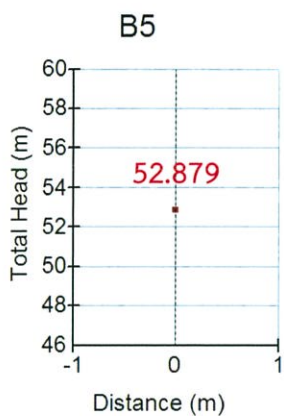
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W ที่ STA 0+600



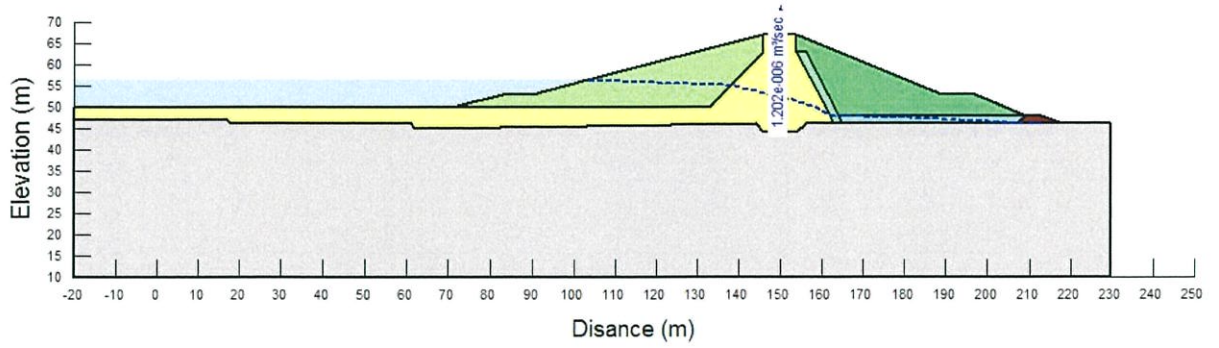
รูปที่ 4.8 แสดงค่าความสูงน้ำที่ตำแหน่งหลุม B1-B4 ณ หน้าตัด STA 0+600



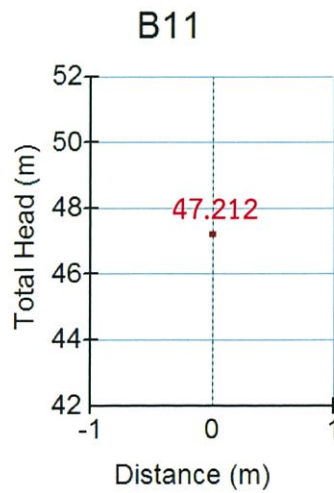
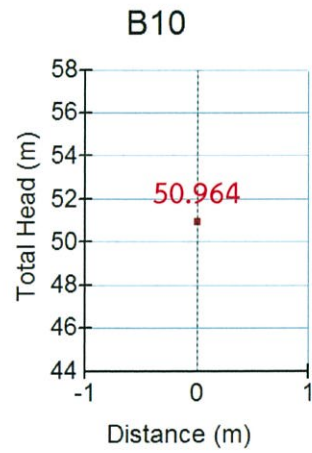
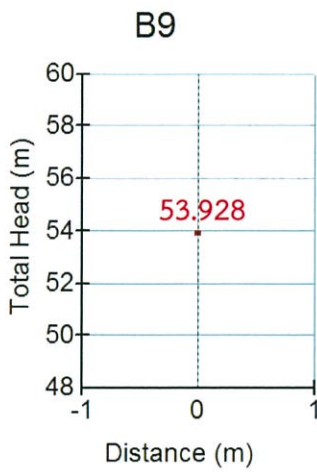
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W ที่ STA 1+050



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความสูงน้ำที่ตำแหน่งหลุม B5-B7 ณ หน้าตัด STA 1+050



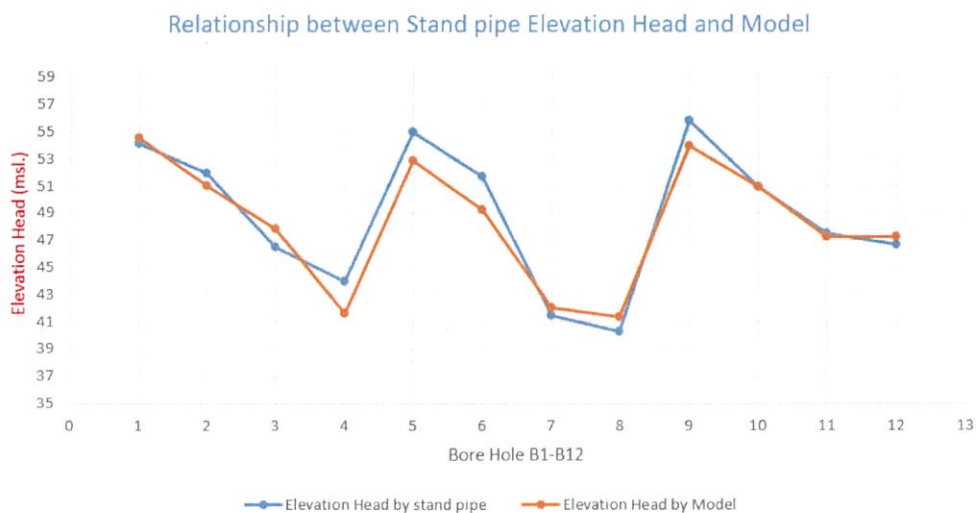
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การไหลของน้ำด้วยโปรแกรม Seep/W ที่ STA 1+300



รูปที่ 4.12 แสดงค่าความสูงน้ำที่ตำแหน่งหลุม B9-B11 ณ หน้าตัด STA 1+300

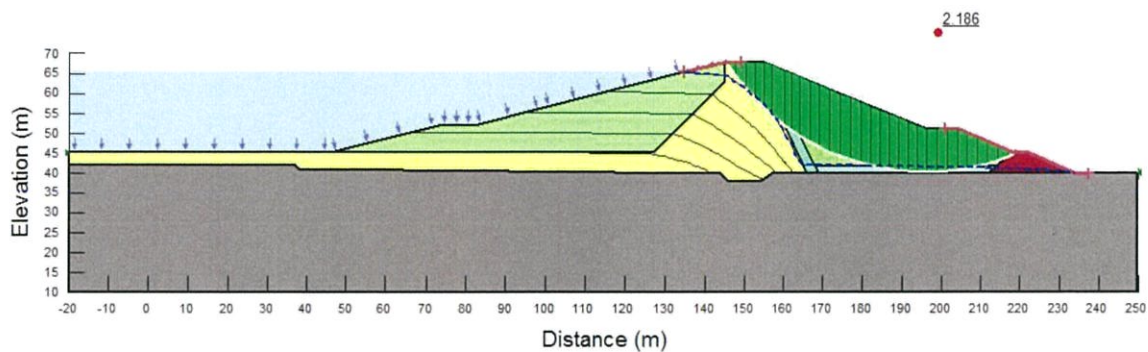
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า Phreatic level จากการตรวจวัด ค่ากับ แบบจำลอง ค่าความสูงของระดับน้ำในท่อ Stand pipe มีความสอดคล้องและกันเคียงกัน

Bore Hole	Station	Offset-Dam		Stand pipe well	Model
		Axis			
		U/S	D/S	Elevation Head (msl)	Elevation Head (msl.)
B1	0+594.807	7.872		54.095	54.544
B2	0+594.249		7.605	51.917	51.033
B3	0+593.954		36.743	46.456	47.778
B4	0+588.174		65.544	43.912	41.61
B5	1+040.162	6.311		54.973	52.879
B6	1+042.218		4.718	51.718	49.22
B7	1+040.734		38.186	41.399	42.05
B8	1+041.079		84.869	40.276	41.520
B9	1+234.63	7.063		55.825	53.928
B10	1+234.379		5.266	50.954	50.964
B11	1+234.652		37.562	47.492	47.212
B12	1+233.437		70.137	46.677	47.243

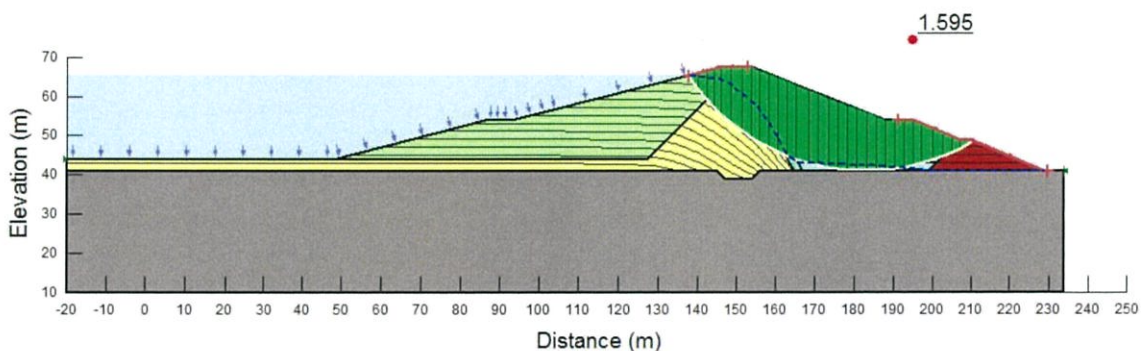


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของระดับน้ำที่จาก ท่อ Stand pipe กับ Model

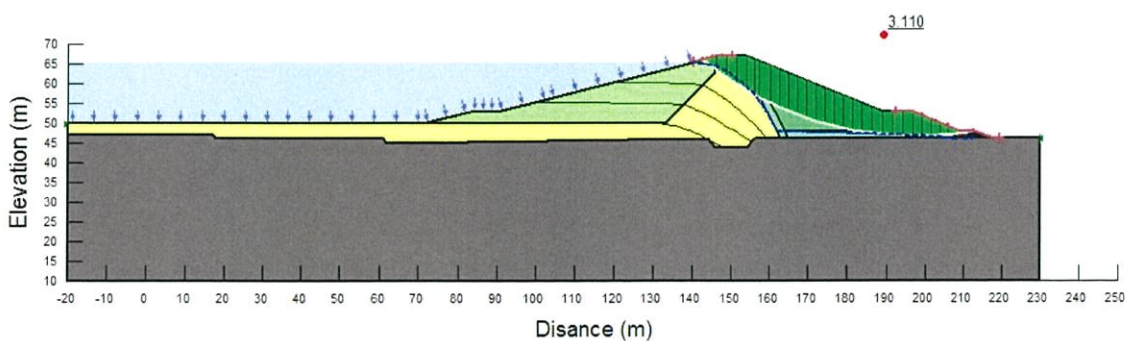
4.5. ผลการวิเคราะห์ความเสถียรภาพลาดตัวเชื่อมด้วยโปรแกรม Slope/W



รูป สัดส่วนความปลอดภัยต่ำสุดเมื่อวิเคราะห์เท่ากับ 2.186 ที่หน้าตัด 0+600



รูป สัดส่วนความปลอดภัยต่ำสุดเมื่อวิเคราะห์เท่ากับ 1.595 ที่หน้าตัด 1+050



รูป สัดส่วนความปลอดภัยต่ำสุดเมื่อวิเคราะห์เท่ากับ 3.110 ที่หน้าตัด 1+300

รูปที่ 4.14 สัดส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ณ หน้า ตัดต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

5.1 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

- ผลจากการตรวจวัดเส้นทางการไหลของน้ำผ่านตัวเชื่อมที่ได้จาก เครื่องตรวจวัด พีโซมิเตอร์ พบว่า ที่ STA 0+600, 1+050 และ 1+300 นั้นไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำได้ เนื่องจากค่าระดับน้ำใน พีโซมิเตอร์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับระยะเวลาที่เปลี่ยนไปตลอดการเก็บข้อมูล
- ในการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำ จึงได้ใช้ข้อมูลจาก ท่อ Stand Pipe ที่ B1 ถึง B12 เก็บข้อมูลเมื่อ วันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2559 มาใช้วิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำแทน โดยเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Seep/W
- ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Seep/W เมื่อเปรียบเทียบกับท่อ Stand pipe ดังตารางที่ 4.3 และกราฟความสัมพันธ์ของระดับน้ำในท่อ Stand pipe กับ Model พบว่าค่าความสูงของระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม Seep/W มีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับน้ำในท่อ Stand pipe
- ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Slope/W พบว่า ความมั่นคงความลาดของเขื่อน ในกรณี ที่เก็บกัก ระดับน้ำสูงสุด +65.450 msl ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของหน้าตัด 0+600 , 1+050 และ 1+300 เท่ากับ 2.168 , 1.595 และ 3.110 ตามลำดับ ซึ่งค่าความปลอดภัยของลาดเขื่อน มีค่ามากกว่า 1.5 แสดงว่า ความลาดเขื่อน ณ หน้าตัดต่างๆ อยู่ในเกณฑ์ที่ความปลอดภัย

เอกสารอ้างอิง

หน่วยวิจัยความปลอดภัยเขื่อน ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. รายงานการวิเคราะห์ผลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน โครงการวิเคราะห์และออกแบบซ่อมแซมเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี.

หน่วยวิจัยความปลอดภัยเขื่อน ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิเคราะห์และออกแบบซ่อมแซมเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี.

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. รายงานผลการเจาะสำรวจและทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ การศึกษาวิเคราะห์การไหลซึมผ่าน (Seepage) เพื่อการปรับปรุงเขื่อนคลองสีียด จังหวัดฉะเชิงเทรา.

โครงการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำคลองสีียด งานปรับปรุงอาคารระบายน้ำล้น แบบรายละเอียด

ภาคผนวก ก

