

ผลกระทบของมุมลาด ความหนาแกนเขื่อนและความแข็งแกนเขื่อนต่อ
แรงดันน้ำ การทรุดตัวและเสถียรภาพของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต
INFLUENCE OF THICKNESS AND STIFFNESS OF ASPHALT CONCRETE
CORE ON PORE WATER PRESSURE AND DAM SETTLEMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2568
KMITL-2025-EN-M-097-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF THICKNESS AND STIFFNESS OF ASPHALT CONCRETE
CORE ON PORE WATER PRESSURE AND DAM SETTLEMENT

THANAKORN OBCHOEI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING
AND CONSTRUCTION MANAGEMENT
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2025
KMITL-2025-EN-M-097-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของความหนาและความแข็งของแกนเข็มนาอสฟัลต์คอนกรีตต่อแรงดันน้ำและการทรุดตัวของเข็มนา
นักศึกษา	นายธนกร ออบเชย
รหัสประจำตัว	66016045
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิรุฬห์ คำชุม

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อ

เข็มนาอสฟัลต์คอนกรีตเป็นทางออกที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับปัญหาการขาดแคลนวัสดุ ดินเหนียวในการก่อสร้างเข็มนา ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุ เข็มนาที่ไม่มีแกนดินเหนียวมักต้องใช้พื้นที่ก่อสร้างจำนวนมากและวัสดุถมเพื่อชะลอการซึมของน้ำผ่านโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การลดปริมาณของวัสดุถมอาจส่งผลกระทบต่อความคุ้มครองการซึมของเข็มนาและเสถียรภาพโดยรวม การใช้แกนอสฟัลต์คอนกรีตที่ซึมผ่านไม่ได้เป็นหนึ่งทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ในการลดปริมาณวัสดุถมที่จำเป็นสำหรับการก่อสร้างเข็มนา การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อประเมินความหนาแกน และความแข็งแกนของเข็มนาที่แตกต่างกัน ในสถานการณ์ที่มีและไม่มีแกนเข็มนาเป็นองค์ประกอบ ปัจจัยผลกระทบ เช่น การกระจายแรงดันน้ำในเข็มนาตามระนาบพิบัติ การทรุดตัวและเสถียรภาพโดยรวมของเข็มนา การวิเคราะห์ครอบคลุมเงื่อนไขต่างๆ รวมถึงขั้นตอนการก่อสร้างแล้วเสร็จและความผันผวนของระดับน้ำ ครอบคลุมตั้งแต่สถานการณ์ทั่วไปไปจนถึงสถานการณ์ที่รุนแรง เช่น เหตุการณ์การการลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยเป็นค่อยไป ผลการศึกษาพบว่าการใช้แกนอสฟัลต์คอนกรีตช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเข็มนาได้และการศึกษาครั้งนี้ยืนยันถึงประโยชน์ของการใช้เข็มนาแกนอสฟัลต์คอนกรีตในการปรับปรุงความสมบูรณ์ของโครงสร้าง และลดการพังทลายวัสดุดั้งเดิม ดังนั้นจึงส่งเสริมความยั่งยืนและความยืดหยุ่นในการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับเข็มนา

Thesis	Influence of thickness and stiffness core on pore water pressure and dam settlement
Student	Mr. Thanakorn Obchoei
Student ID.	66016045
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering Environmental Engineering and Construction Management
Year	2025
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Viroon Kamchoom

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

ABSTRACT

Asphalt concrete core dams represent a potential solution to address the shortage of clay materials in dam construction, thereby reducing construction durations and expenses associated with transporting such materials. Dams without a clay core often require significant amounts of construction area and fill material to effectively slow down water seepage through the structure. However, reducing the volume of fill material could potentially compromise the dam's seepage control and overall stability. Employing an impermeable asphalt concrete core as a cutoff wall offers the possibility of minimizing the quantity of fill materials required for dam construction. This study employs finite element analysis to assess how varying dam slopes and core stiffness, in scenarios with and without core components, impact factors such as the distribution of pore water pressure along failure planes and the overall stability of the dam. The analysis covers a range of conditions, including the completion phase of construction and fluctuations in water levels, spanning from typical to extreme scenarios, such as rapid and gradual drawdown events. The study found that the use of asphalt concrete cores enhances the operational efficiency of dams. This study confirms the benefits of utilizing asphaltic concrete core dams in improving structural integrity and minimizing reliance on supplementary fill materials, thereby promoting sustainability and resilience in dam engineering practices.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร. วิรุพท์ คำชุม ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบการณ์ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับโครงการนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (RE-KRIS/FF67/007) โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม รวมถึงทุนหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (C04F670066) จากสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ ทางผู้ประพันธ์ขอขอบคุณทุนวิจัยโครงการ Monozukuri Degree ร่วมกับบริษัท N.E.E. Engineering & Construction Co.,Ltd.ที่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้อย่างดี

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนปัญหาทางวิจัยจากนางสาวธนวรรณ วรรณวงศ์ จากฝ่ายวิจัยและพัฒนาวิศวกรรมการบริหารจัดการน้ำ ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิศวกรรม สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน ที่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้อย่างดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณนางโสภารัตน์ ออบเชยผู้เป็นมารดาและนางสาวฐิตาภา ออบเชยผู้เป็นพี่สาว อันเป็นที่เคารพรักอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้ผู้จัดทำมีวันนี้ได้ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบพระคุณนายสมศักดิ์ ออบเชย บิดาผู้ล่วงลับที่ได้ให้กำลังใจตลอดการมีชีวิตอยู่ขณะที่ข้าพเจ้ากำลังศึกษาอยู่

ธนกร ออบเชย

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.1 ประเภทของเขื่อน.....	3
2.1.1 เขื่อนคอนกรีต.....	3
2.1.1.1 เขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก (concrete gravity dam).....	3
2.1.1.2 เขื่อนคอนกรีตโค้ง (concrete arch dam).....	4
2.1.1.3 เขื่อนคอนกรีตค้ำยัน (concrete buttress dam).....	4
2.1.2 เขื่อนถม.....	5
2.1.2.1 เขื่อนดินเนื้อเดียว.....	5
2.1.2.2 เขื่อนถมแบ่งส่วน.....	6
2.1.2.3 เขื่อนหินลาดหน้า.....	7
2.1.2.4 เขื่อนถมด้วยระบบสูบ.....	8

2.2 เชื้อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต	8
2.2.1 แอสฟัลต์	9
2.2.2 คอนกรีต	10
2.2.3 แอสฟัลต์คอนกรีต	10
2.2.4 ข้อดีของแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานแกนเชื้อน	11
2.2.5 ข้อเสียของแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานแกนเชื้อน	11
2.3 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)	12
2.3.1 โปรแกรมPlaxis 2D	12
2.3.2. แบบจำลองมอร์-คูลอมป์ (Mohr-Coulomb Model)	12
2.3.2.1 Young's Modulus (E)	13
2.3.2.2 Poisson's ratio (ν)	13
2.3.2.3 Friction angle (ϕ)	14
2.3.2.4 Cohesion (c)	14
2.3.2.5 Dilation angle (ψ)	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.4.1 การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเชื้อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตในสภาวะปกติ	15
2.4.2 การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเชื้อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตในสภาวะแผ่นดินไหว	16
2.4.2 การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของแกนเชื้อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	20
3.1 ขนาดเชื้อนและพารามิเตอร์	20
3.1.1 ขนาดแบบจำลองเชื้อน	20
3.1.2 พารามิเตอร์ดิน	22
3.1.2.1 แกนเชื้อน (Core)	23
3.1.2.2 ชั้นดินฐานราก (Foundation)	23

3.1.2.3	ชั้นกรอง (filter)	24
3.1.2.4	ชั้นดินถม (Random Zone)	24
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	25
3.2.1	ความหนาแน่นของแกนเขื่อน	25
3.3.2	ความแข็งแรงของแกนเขื่อน	25
3.3	ขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา	26
3.3.1	หลังการก่อสร้างเสร็จ (End of Construction)	26
3.3.2	ระดับน้ำกักเก็บต่ำสุด (Minimum Water Level)	27
3.3.3	ระดับน้ำกักเก็บปกติ (Normal Water Level)	27
3.3.4	ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด (Maximum Water Surface)	28
3.3.5	ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown)	28
3.3.6	ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ (Slow Drawdown)	28
3.4	ขั้นตอนการก่อสร้างแบบจำลอง	29
3.4.1	การสร้างดินฐานราก	29
3.4.2	การสร้างแกนเขื่อน	31
3.4.3	การสร้างชั้นกรอง	32
3.1.2.4	ชั้นดินถม	33
3.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์	34
3.5.1	การวิเคราะห์ gravity loading	34
3.5.2	การวิเคราะห์การไหลซึม	35
3.5.3	การวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย	36
บทที่ 4	ผลการศึกษา	37
4.1	แรงดันน้ำ (Pore Water Pressure: PWP)	37
4.1.1	แรงดันน้ำที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ	37

4.1.1 แรงดันน้ำที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	39
4.1.3 แรงดันน้ำที่ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ	41
4.2 การทรุดตัวของเขื่อน (Settlement of Dam).....	43
4.2.1 การทรุดตัวเมื่อเพิ่มความหนาแกน ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว.....	43
4.2.2 การทรุดตัวเมื่อเพิ่มความแข็งแรงแกน ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	45
4.3 การเคลื่อนตัวของแกนเขื่อน (Core Deformation)	47
4.3.1 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความหนาแกน	47
4.3.2 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความแข็งแรงแกน	49
4.4 ระบายพิบัติ (Failure Plan).....	51
4.4.1 ระบายพิบัติเมื่อเพิ่มความหนาแกน	51
4.4.2 ระบายพิบัติเมื่อเพิ่มความแข็งแรงแกน	52
4.5 อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety)	54
4.5.1 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อเพิ่มความหนาแกนแอสฟัลต์คอนกรีต.....	55
4.5.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อเพิ่มความแข็งแรงของแกนเขื่อน.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	57
เอกสารอ้างอิง	58
ประวัติผู้เขียน.....	63

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 ลักษณะและขนาดเขื่อนที่ใช้ในการศึกษา	20
ตารางที่ 3.2 สรุปรามิเตอร์เขื่อนที่ใช้ในการวิเคราะห์	22
ตารางที่ 3.3 สรุปข้อมูลขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา	26
ตารางที่ 4.1 สรุปอัตราส่วนความปลอดภัย	54



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 เชื้อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก.....	3
รูปที่ 2.2 เชื้อนคอนกรีตโค้ง.....	4
รูปที่ 2.3 เชื้อนคอนกรีตครีดยัน.....	4
รูปที่ 2.4 เชื้อนดินเนื้อเดียว.....	5
รูปที่ 2.5 เชื้อนถมแบ่งส่วน.....	6
รูปที่ 2.6 เชื้อนหินลาดหน้า.....	7
รูปที่ 2.7 เชื้อนถมด้วยระบบสูบ.....	8
รูปที่ 2.8 เชื้อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต.....	8
รูปที่ 2.9 Mohr-Coulomb yield surface in principal stress.....	12
รูปที่ 2.10 พฤติกรรมของโมเดลมอร์-คูลอมบ์ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	13
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างPeak Ground AccelerationกับRelative settlement ratio (Sun B. et al,2022).....	14
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนตัวของแกนเชื้อนแอสฟัลต์คอนกรีต (Cao W. et al,2024).....	17
รูปที่ 2.14 การเคลื่อนตัวของแกนเชื้อนแอสฟัลต์คอนกรีต (Tschermutter P. et al,2017).....	18
รูปที่ 2.15 การเคลื่อนตัวของแกนเชื้อนแอสฟัลต์คอนกรีต (Fang C. et al,2011).....	18
รูปที่ 2.16 การเคลื่อนตัวของแกนเชื้อนคอนกรีต (Yu X. et al,2015).....	19
รูปที่ 3.1 ลักษณะและขนาดของเชื้อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต.....	21
รูปที่ 3.2 ช่วงค่าElastic Modulusของแอสฟัลต์คอนกรีตจากงานวิจัย.....	22
รูปที่ 3.3 การกำหนดขนาดความกว้างดินชั้นฐานราก.....	29
รูปที่ 3.4 การกำหนดความลึกดินชั้นฐานราก.....	30
รูปที่ 3.5การกำหนดคุณสมบัติชั้นดินฐานราก.....	30
รูปที่ 3.6 ดินฐานรากเมื่อถูกจำลองในโปรแกรม Plaxis.....	31

รูปที่ 3.7 การสร้างแกนเขื่อน.....	31
รูปที่ 3.8 การสร้างชั้นกรอง.....	32
รูปที่ 3.9 การสร้างชั้นดินถม.....	33
รูปที่ 3.10 คำสั่งการวิเคราะห์gravity loading.....	34
รูปที่ 3.11 คำสั่งการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำ.....	35
รูปที่ 3.12 คำสั่งการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย.....	36
รูปที่ 4.1 PWP Contour ระดับน้ำกักเก็บปกติของเขื่อนไม่มีแกน.....	37
รูปที่ 4.2 PWP Contour ระดับน้ำกักเก็บปกติของเขื่อนมีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร.....	37
รูปที่ 4.3 PWP Contour ระดับน้ำกักเก็บปกติของเขื่อนมีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตร.....	38
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับตำแหน่งเขื่อนในแนวราบที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ.....	38
รูปที่ 4.5 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนไม่มีแกน.....	39
รูปที่ 4.6 PWP Contour ระดับลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนมีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร.....	39
รูปที่ 4.7 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต 1.0 เมตร.....	39
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับตำแหน่งเขื่อนในแนวราบที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ.....	40
รูปที่ 4.9 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆของเขื่อนไม่มีแกน.....	41
รูปที่ 4.10 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร.....	41
รูปที่ 4.11 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตร.....	41
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับตำแหน่งเขื่อนในแนวราบที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ.....	42
รูปที่ 4.13 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนที่ไม่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต.....	43
รูปที่ 4.14 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต0.5 เมตร.....	43
รูปที่ 4.15 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต1.0 เมตร.....	43
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวสันเขื่อนกับความหนาแกนที่ระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว.....	44

รูปที่ 4.17 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-1	45
รูปที่ 4.18 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-2	45
รูปที่ 4.19 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-3	45
รูปที่ 4.20 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-4	46
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวสันเขื่อนกับความแข็งแรงที่ระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว.....	46
รูปที่ 4.22 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความหนาแกนที่ระดับกักเก็บปกติ	47
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความหนาแกนที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	48
รูปที่ 4.24 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความแข็งแรงแกนที่ระดับกักเก็บปกติ.....	49
รูปที่ 4.25 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความแข็งแรงแกนที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว.....	50
รูปที่ 4.26 ระบายพิบัติของเขื่อนความลาดชัน 1:1.5ที่ไม่มีแกน ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	51
รูปที่ 4.27 ระบายพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต 0.5 เมตร ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	51
รูปที่ 4.28 ระบายพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต 1.0 เมตร ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	51
รูปที่ 4.29 ระบายพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตAC-1 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว.....	52
รูปที่ 4.30 ระบายพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตAC-2 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว.....	52
รูปที่ 4.31 ระบายพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตAC-3 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว.....	53
รูปที่ 4.32 ระบายพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตAC-4 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว.....	53
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับความหนาของแกนเขื่อนที่ระดับน้ำการใช้งานต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับความแข็งแรงของแกนเขื่อนที่ระดับน้ำการใช้งานต่างๆ.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในอดีตเชื่อมถมเป็นเชื่อมประเภทหนึ่งที่ได้ความนิยมในการก่อสร้างอย่างมากเนื่องจากสามารถนำวัสดุในพื้นที่ใกล้เคียงบริเวณก่อสร้างมาใช้เป็นวัสดุหลักในการถมเพื่อก่อสร้างเชื่อม ทำให้สามารถเพิ่มความสะดวกในการก่อสร้างได้ ในส่วนของแกนเชื่อม (Core zone) มักใช้ดินเหนียวที่มีความทึบน้ำสูงเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำ ซึ่งมีโอกาสในการถูกกัดเซาะจากน้ำมากและเสี่ยงต่อการพังทลายสูง ในขณะที่ส่วนเปลือกจะใช้วัสดุที่เป็นกรวดหรือหินที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำให้เกิดความมั่นคงแก่ตัวเชื่อม และต่อมาได้มีการพัฒนาวัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุทึบน้ำคือการใช้แอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเป็นวัสดุทึบน้ำในการเป็นแกนเชื่อมซึ่งช่วยลดปัญหาการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเชื่อมและลดการถูกกัดเซาะได้ โดยเชื่อมแกนแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1960 ที่ประเทศเยอรมนี หลังจากนั้นการใช้เชื่อมแกนแอสฟัลต์คอนกรีตมีจำนวนมากขึ้นถึง 150 เชื่อมซึ่งกระจายอยู่ทุกภูมิภาคทั่วโลก เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของการลดปัญหาการขาดแคลนดินเหนียวในการทำแกนเชื่อม การลดงบประมาณในการก่อสร้าง เมื่อพิจารณางบประมาณเชื่อมแกนแอสฟัลต์คอนกรีตเทียบกับเชื่อมคอนกรีตบดอัดแน่น พบว่าเชื่อมแกนแอสฟัลต์คอนกรีตมีงบประมาณถูกกว่าประมาณ 10% รวมถึงสามารถก่อสร้างได้ในทุกสภาพอากาศเมื่อเทียบกับดินเหนียว รวมถึงลดปัญหาการกัดกร่อนของแกนที่สามารถเกิดขึ้นได้ และที่สำคัญสามารถลดปัญหาการไหลซึมของน้ำในเชื่อม โดยคุณสมบัติเชิงกลของแกนแอสฟัลต์คอนกรีตคือความยืดหยุ่นและความเหนียวสูงสามารถลดการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการเคลื่อนตัวในสภาวะต่างๆในระหว่างการใช้งาน รวมถึงปัญหาการเคลื่อนตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว ทำให้ในปัจจุบันประเทศไทยมีแนวคิดที่จะสร้างเชื่อมแกนแอสฟัลต์คอนกรีตแห่งแรกขึ้น แต่การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมเชื่อมแกนแอสฟัลต์คอนกรีตยังมีไม่เพียงพอโดยเฉพาะการเพิ่ม-ลดความหนาและความแข็งแกนเชื่อมต่อพฤติกรรมเชื่อมซึ่งจะส่งผลกระทบต่องบประมาณในการก่อสร้างอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของความหนาแกน (Core thickness) ต่อ Hydraulic Response(แรงดันน้ำ)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความหนาแกน (Core thickness) และความแข็งแกน (Core thickness)

ต่อ Serviceability Properties (การทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของแกนเชื่อม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของความหนาแกน (Core thickness) และความแข็งแกน (Core thickness) ต่อ Safety Properties (ระนาบพิบัติและอัตราส่วนความปลอดภัย)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความลาดชันของเขื่อนที่ความลาดชัน 1:1.5 โดยการเพิ่มความหนาและความแข็งแกนเพื่อศึกษาสถานการณ์เมื่อการก่อสร้างแล้วเสร็จ ระดับน้ำกักเก็บต่ำสุด ระดับน้ำกักเก็บปกติ ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด และระดับน้ำผันผวนอย่างรุนแรง ซึ่งรวมถึงสภาวะระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วและลดลงอย่างช้า ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรมPlaxis 2D โดยใช้แบบจำลองมอร์-คูลอมบี

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตจะสามารถลดปัญหาการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนได้ดี
- 1.4.2 การเพิ่มความหนาและความแข็งแกนช่วยลดการทรุดตัวของเขื่อนและลดการเคลื่อนตัวของแกนได้ดี
- 1.4.3 การเพิ่มความหนาและความแข็งแกนช่วยเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ประเภทของเขื่อน

การจำแนกเขื่อนตามวัสดุก่อสร้าง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เขื่อนคอนกรีต และ เขื่อนถม (Embankment Dam)

2.1.1 เขื่อนคอนกรีต

2.1.1.1 เขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก (concrete gravity dam)



รูปที่ 2.1 เขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก

เขื่อนชนิดนี้ได้รับการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีหินฐานรากที่มีคุณภาพดีและความแข็งแรงสูง โครงสร้างของเขื่อนถูกออกแบบให้เป็นคอนกรีตมวลหนัก ซึ่งมีความหนาและมีน้ำหนักมากเพียงพอที่จะต้านทานแรงดันของน้ำและแรงภายนอกอื่น ๆ ได้โดยอาศัยน้ำหนักของตัวเอง รูปตัดของเขื่อนโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมและมีแนวแกนตรงตลอดความยาวของเขื่อนเพื่อให้สามารถรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.1.2 เขื่อนคอนกรีตโค้ง (concrete arch dam)



รูปที่ 2.2 เขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก (เขื่อนคอนกรีตโค้ง)

เขื่อนคอนกรีตแบบโค้งได้รับการออกแบบให้สามารถรับแรงดันน้ำและแรงภายนอกอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยโครงสร้างที่มีความโค้ง ซึ่งเหมาะสมกับพื้นที่ที่เป็นหุบเขารูปตัว U และมีฐานรากที่มั่นคง เมื่อเทียบกับเขื่อนแบบกราวิตี เขื่อนประเภทนี้จะมีโครงสร้างที่บางกว่า ส่งผลให้ใช้วัสดุน้อยลงและช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม การออกแบบและการก่อสร้างเขื่อนแบบโค้งมีความซับซ้อนสูง อีกทั้งอาจต้องมีการเสริมความแข็งแรงของฐานรากเพื่อรองรับโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย ตัวอย่างหนึ่งของเขื่อนที่มีการผสมผสานระหว่างโครงสร้างแบบกราวิตีและแบบโค้งคือ เขื่อนภูมิพล ซึ่งเป็นเขื่อนขนาดใหญ่แห่งแรกของประเทศไทย ที่ออกแบบมาเพื่อให้มีทั้งความแข็งแรงและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

2.1.1.3 เขื่อนคอนกรีตครีบยัน (concrete buttress dam)



รูปที่ 2.3 เขื่อนคอนกรีตครีบยัน

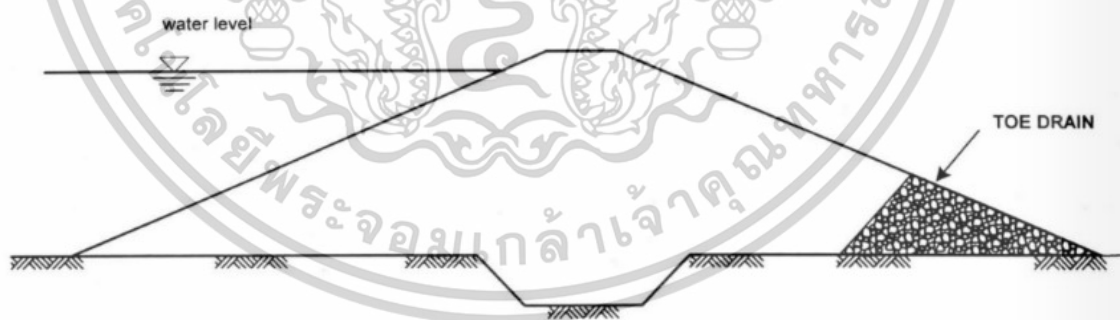
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขื่อนกลางถูกออกแบบให้สามารถรับแรงภายนอก เช่น แรงดันน้ำ โดยใช้ผนังกันน้ำที่เป็นแผ่นเรียบหรือครีป (Buttress) ซึ่งช่วยรองรับแรงดันและถ่ายน้ำหนักลงสู่ฐานราก โดยทั่วไป เขื่อนประเภทนี้มักทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กและใช้วัสดุก่อสร้างในปริมาณที่น้อย ทำให้มีต้นทุนการก่อสร้างที่ค่อนข้างประหยัด อย่างไรก็ตาม เขื่อนกลางมีความแข็งแรงน้อยกว่าเขื่อนแบบกราวตีตี ส่งผลให้ระดับความปลอดภัยต่ำกว่า ด้วยเหตุนี้จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมในการก่อสร้างมากนัก

2.1.2 เขื่อนถม

เขื่อนถมคือเขื่อนที่ก่อสร้างขึ้นจากวัสดุประเภทดินและหินเป็นหลัก โดยทั่วไปมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ฐานด้านล่างจะมีความกว้างมากกว่าส่วนยอดของเขื่อน ซึ่งส่วนสันเขื่อน (Crest) มักมีความกว้างประมาณ 5 - 15 เมตร วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนถมมักเป็นวัสดุธรรมชาติที่หาได้จากพื้นที่ใกล้เคียงกับบริเวณก่อสร้าง ทั้งนี้เพื่อความประหยัดและลดต้นทุนการขนส่ง เนื่องจากเขื่อนประเภทนี้ต้องใช้วัสดุในปริมาณมากโดยทั่วไปเขื่อนถมเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีช่องเขากว้างและไหล่เขาไม่ชันมากนัก นอกจากนี้คุณสมบัติของหินฐานรากไม่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมากเท่ากับกรณีของเขื่อนคอนกรีต จึงทำให้เขื่อนถมเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับ สภาพภูมิประเทศและธรณีวิทยาของประเทศไทย ส่งผลให้เขื่อนส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นเขื่อนประเภทนี้ ทั้งนี้ เขื่อนถม ยังสามารถจำแนกออกเป็นหลายประเภท

2.1.2.1 เขื่อนดินเนื้อเดียว



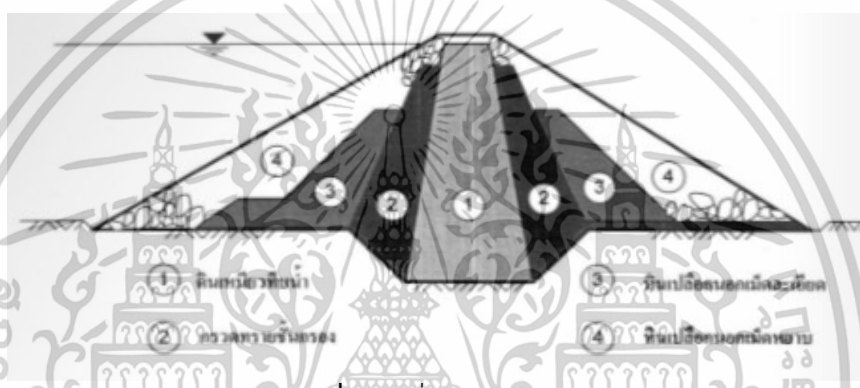
รูปที่ 2.4 เขื่อนดินเนื้อเดียว

เขื่อนดินเนื้อเดียวเป็นเขื่อนที่ก่อสร้างขึ้นจากดินประเภทเดียวกันเกือบทั้งหมด โดยวัสดุหลักที่ใช้มักเป็นดินในกลุ่ม GC, SC, MI และ CL ตามระบบการจำแนกดินแบบ Unified Soil Classification ซึ่งดินประเภทนี้มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและค่าความตึบน้ำอยู่ในระดับที่เหมาะสม เขื่อนดินเนื้อเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องมีองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ ชั้นกรองน้ำ (Filter) หรือ ระบบระบายน้ำ (Drainage System) ซึ่งมักติดตั้งทางด้านท้ายน้ำของเขื่อนหรือภายในตัวเขื่อน เพื่อช่วยระบายน้ำและลดความดันน้ำภายในดิน ป้องกันปัญหาการกัดเซาะที่อาจเกิดจากน้ำซึมผ่านตัวเขื่อนหรือฐานราก เนื่องจากวัสดุที่ใช้ก่อสร้างเขื่อนดินเนื้อเดียวไม่มีความแข็งแรงสูงมากนัก จึงไม่เหมาะสำหรับการก่อสร้างเขื่อนขนาดใหญ่ โดยทั่วไป เขื่อนประเภทนี้ไม่ควรมีความสูงเกิน 40 เมตร เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงปลอดภัยและไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2.1.2.2 เขื่อนถมแบ่งส่วน

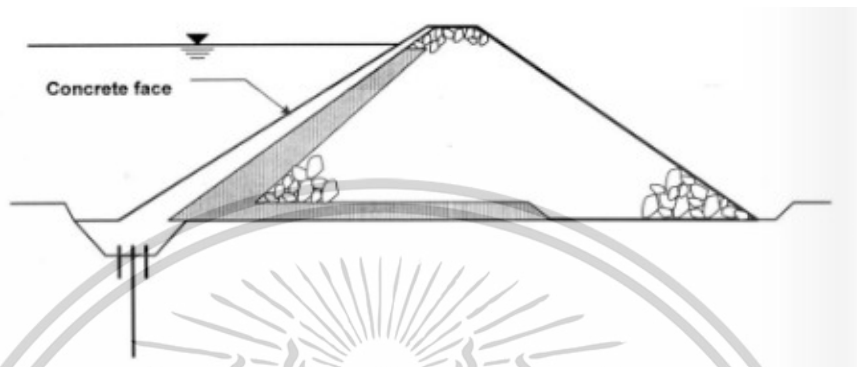


รูปที่ 2.5 เขื่อนถมแบ่งส่วน

เขื่อนถมแบ่งส่วนเป็นเขื่อนที่ประกอบขึ้นจากวัสดุหลายประเภท เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการรับน้ำหนักและการทับน้ำ โดยเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับตำแหน่งต่างๆ ภายในตัวเขื่อน ในการก่อสร้างเขื่อนประเภทนี้ วัสดุจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ตามคุณสมบัติ ได้แก่ แกนเขื่อน (Core Zone): เป็นส่วนที่มีหน้าที่ป้องกันการซึมผ่านของน้ำ โดยมักใช้วัสดุที่มีความสามารถในการกั้นน้ำสูง เช่น ดินเหนียว และส่วนเปลือก (Shell) เป็นชั้นที่อยู่ด้านนอกของเขื่อน ทำหน้าที่ให้ความมั่นคงแข็งแรง มักใช้วัสดุที่มีความสามารถในการรับแรงสูง เช่น กรวดหรือหิน ในบางกรณี หากมีวัสดุหลายประเภท อาจแบ่งออกเป็นชั้นย่อยเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักและป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 เขื่อนหินตาหน้า

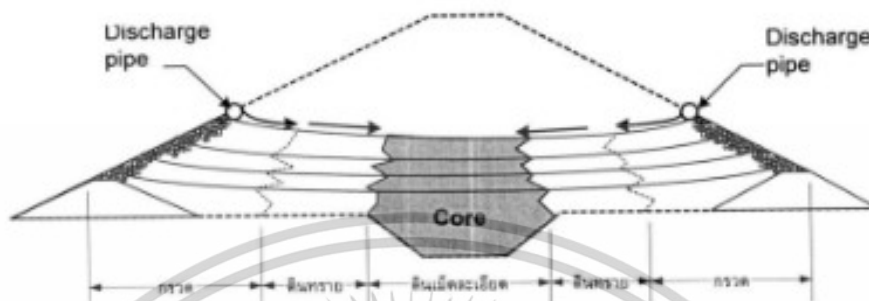


รูปที่ 2.6 เขื่อนหินตาหน้า

เขื่อนหินตาหน้า เป็นเขื่อนที่ใช้หินซึ่งหาได้ในบริเวณโครงการหรือพื้นที่ใกล้เคียงมาเป็นวัสดุก่อสร้างหลัก โดยหินเหล่านี้จะถูกบดอัดเพื่อสร้างตัวเขื่อนให้มีความลาดชันมากขึ้น ซึ่งช่วยลดปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุหลักของเขื่อนชนิดนี้เป็นหิน ซึ่งมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงแต่ไม่สามารถกั้นน้ำได้เอง จึงจำเป็นต้องมีชั้นป้องกันการซึมผ่านของน้ำ (Impermeable Facing) ติดตั้งบริเวณ ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ โดยวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นปิดกั้นน้ำ เช่น แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Slab) ชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete Lining) วัสดุกั้นน้ำประเภทอื่น ๆ แผ่นปิดกั้นน้ำนี้จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับแนวอัดฉีดน้ำปูน (Grouting Curtain) ในชั้นฐานราก เพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำและเพิ่มเสถียรภาพของเขื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

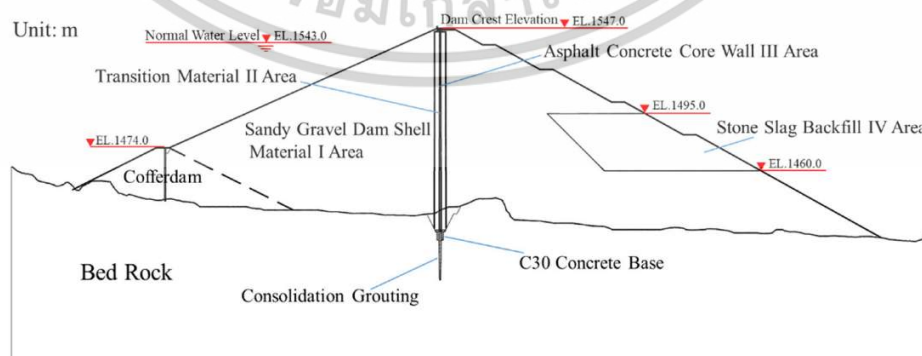
2.1.2.4 เขื่อนถมด้วยระบบสูบ



รูปที่ 2.7 เขื่อนถมด้วยระบบสูบ

เขื่อนถมด้วยระบบสูบ เป็นเขื่อนที่ก่อสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุประเภท ดินตะกอน กรวด หรือทราย ซึ่งถูกสูบขึ้นมาจากแหล่งสะสมตะกอน เช่น แหล่งน้ำธรรมชาติ แหล่งขุดลอก หรือกองวัสดุเหลือทิ้งจากเหมืองแร่ วัสดุเหล่านี้จะถูกลำเลียงผ่านระบบท่อและปล่อยลงในบริเวณที่กำหนดให้เป็นโครงสร้างของเขื่อน กระบวนการก่อสร้างอาศัยหลักการ การตกตะกอนตามธรรมชาติ กล่าวคือ วัสดุที่มีขนาดเม็ดใหญ่ เช่น กรวดและทรายหยาบ จะตกตะกอนก่อนบริเวณลาดเขื่อนด้านนอก ขณะที่วัสดุที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า เช่น ดินเหนียวหรือทรายแป้ง จะถูกพัดพาเข้ามายังบริเวณ แกนเขื่อน (Core) ทำให้เกิดชั้นวัสดุที่มีการเรียงตัวตามขนาดเม็ดดินโดยอัตโนมัติ ลักษณะเฉพาะของเขื่อนประเภทนี้คือ ไม่มีการבודอัดวัสดุ ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ ลาดเขื่อน (Slope) มีความลาดชันต่ำหรือแบนราบมากกว่าปกติ เพื่อให้เกิดความมั่นคงและป้องกันการพังทลายของโครงสร้าง

2.2 เขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 2.8 เขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอดีตเชื่อมถนนเป็นเชื่อมประเภทหนึ่งที่ได้ความนิยมในการก่อสร้างอย่างมากเนื่องจากสามารถนำวัสดุในพื้นที่ใกล้เคียงบริเวณก่อสร้างมาใช้เป็นวัสดุหลักในการถมเพื่อก่อสร้างเชื่อม ทำให้สามารถเพิ่มความสะดวกในการก่อสร้างได้ ในส่วนของแกนเชื่อม (Core zone) มักใช้ดินเหนียวที่มีความตึบแน่นสูงเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำ ในขณะที่ส่วนเปลือกจะใช้วัสดุที่เป็นกรวดหรือหินที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำให้เกิดความมั่นคงแก่ตัวเชื่อม และต่อมาได้มีการพัฒนาวัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุตึบแน่นคือการใช้ออสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเป็นวัสดุตึบแน่นในการฉาบหน้าเชื่อมฝั่งเหนือน้ำเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1920 (Zhang Y. et al,2021) แต่การใช้ออสฟัลต์คอนกรีตเป็นแกนเชื่อมเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1960 ที่ประเทศเยอรมนี (Akhtarpour, A. et al,2013) หลังจากนั้นการใช้เชื่อมแกนออสฟัลต์คอนกรีตมีจำนวนมากขึ้นถึง 150 เชื่อมซึ่งกระจายอยู่ทุกภูมิภาคทั่วโลก และตั้งแต่ปี 1970 เป็นต้นมา มีการใช้แกนเชื่อมประเภทนี้เป็นจำนวนมากในเชื่อมขนาดใหญ่ โดยอัดให้แน่นในชั้นบางๆ กระบวนการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แบบหล่อ ซึ่งวิธีการนี้จะใช้ยางมะตอยในปริมาณประมาณ 6% โดยน้ำหนัก (Kaaree Hoeg,1993)

2.2.1 ออสฟัลต์

เป็นวัสดุที่เกิดในธรรมชาติและได้จากการกลั่นน้ำมัน มีแหล่งกำเนิดจาก 3 แหล่งใหญ่ๆ คือ ได้จากธรรมชาติเป็นหินออสฟัลต์ที่นำมาเผาเอาออสฟัลต์ออกมา ได้จากแหล่งใต้ดินที่เป็นบ่อออสฟัลต์ที่อยู่ลึกลงไปใต้ดิน และได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ หลังจากกลั่นเอาเบนซินและดีเซลออกไปที่เหลืออยู่เป็นยางออสฟัลต์แข็ง (Asphalt Cement, AC.) ที่มีความเข้มข้นและความแข็ง ซึ่งต่างกันไปตามสภาพของแหล่งกำเนิด และยางออสฟัลต์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท

1. ออสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement, AC.)

เป็นยางที่ได้จากหินออสฟัลต์ธรรมชาติ หรือได้จากการกลั่นน้ำมัน มีลักษณะแข็งและเหนียว ยางชนิดนี้แบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามความแข็งซึ่งวัดเป็นค่า penetration grade, pen. การวัดค่า pen. นี้ทำโดยเอาตัวอย่างยางใส่ลงในกระป๋องเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 ซม. สูง 3-5 ซม. แช่น้ำที่มีอุณหภูมิคงที่ 25 °C แล้วใช้เข็มที่ติดตั้งบนแท่นกดลงบนผิวยาง ในเวลาหนึ่งเข็มจมลงไปเท่าไรก็เป็นค่า pen ของยางนั้น โดยจะมีค่าตั้งแต่ 10 ถึง 120 pen. โดยตัวเลขน้อยแสดงว่ายางยิ่งแข็งมาก

2. ยางคัตแบ็กออสฟัลต์ (cut back)

เป็นยางเหลวที่อุณหภูมิปกติที่ได้จากการใช้ยาง AC. ผสมกับสารทำละลาย เพื่อให้ยางแข็ง AC. นั้นเหลวอ่อนลง เพื่อให้สะดวกในการใช้งานโดยไม่ต้องให้ความร้อนสูงมาก แบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ

2.1 rapid curing, RC. เป็นยางเหลวที่เกิดจากการผสมยาง AC. กับสารตัวทำละลายที่เป็นน้ำมันเบนซิน เมื่อนำไปใช้งาน น้ำมันเบนซินจะระเหยออกไปได้เร็วเหลือแต่ยางแข็ง AC. จับอยู่บนหินผิวทาง ยางชนิดนี้ยังแบ่งออกเป็นเกรดต่างๆ ตามความหนืดเหนียว เช่น RC0 , RC1 ถึง RC5 ตัวเลขยิ่งมากความเหนียวหนืดก็จะมีมากจะระเหยได้ช้า

2.2 medium curing, MC. เป็นยางเหลวที่เกิดจากการผสมยาง AC. กับสารตัวทำละลายพวกน้ำมันก๊าด ซึ่งการระเหยตัวของสารทำละลายนี้จะช้ากว่าเบนซิน เหมาะกับงานผิวทางบางชนิดที่ไม่ต้องการให้มันระเหยตัวเร็วเกินไป เช่น งานโพร้มโค๊ดที่ต้องการทิ้งระยะเวลาให้น้ำยางซึมลงไปตามร่องช่องว่างของชั้นหินพื้นทางเพื่อยึดเกาะผิวทางกับชั้นพื้นทาง

2.3 slow curing, SC. เป็นยางเหลวที่เกิดจากการผสมยาง AC. กับสารตัวทำละลายพวกน้ำมันดีเซล ซึ่งการระเหยตัวยิ่งช้ามากกว่าสองตัวแรก

3 . ยางอิมัลชัน หรือ อิมัลซีฟายแอสฟัลต์ (emulsified asphalt)

เป็นยางน้ำที่ได้จากการใช้ยาง AC. ทำให้ร้อนและทำให้แตกตัวออกเป็นอนุเล็กๆ ด้วยอิมัลซีฟายเออร์ เพื่อให้จับผสมกับอนุของน้ำเป็นยางน้ำ โดยมีเนื้อยางอยู่ประมาณ 50-60% เหมาะใช้งานทำผิวทางในพื้นที่ ๆ มีฝนตกชุก หินแม่จะเปียกน้ำก็สามารถใช้กับยางนี้ได้ จะสามารถจับเกาะผิวของหินแม้ว่าผิวจะเปียก และเมื่อน้ำระเหยไปหมดก็เหลือแต่เนื้อยางจับแน่นอยู่ที่ผิวของหินทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานให้หินติดกัน สะดวกกว่าการใช้ยางคัทแบกหรือยางแข็งAC. ที่หินต้องมีผิวที่แห้งและปราศจากความชื้น แต่ก็ต้องมีข้อดีกว่าตรงที่ต้องคอยกลิ้งถึงเก็บยางหรือกวาดในถึงเก็บอย่างสม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้อนุภาคของยาง AC. ตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำ

2.2.2 คอนกรีต

เป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ น้ำ ปูนซีเมนต์ และ วัสดุผสม (เช่น หิน ทราย หรือ กรวด) โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้า ๆ โดยน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่าการไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่าคอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากที่ผสม โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่

2.2.3 แอสฟัลต์คอนกรีต

แอสฟัลต์คอนกรีต คือ วัสดุผสมที่ได้จากการผสมร้อนระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement, AC.) โดยควบคุมอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิตามที่กำหนดสำหรับงานนั้นๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง งานซ่อมแซม และงานบำรุงโดยเป็นตามข้อกำหนดการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับงานก่อสร้างนั้นๆ โดยคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์มวลรวม สัดส่วนที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม และกระบวนการในการผลิต (กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง,1989) โดยวัสดุที่ใช้ในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยทั่วไปมีดังนี้ แอสฟัลต์ซีเมนต์หรือบิทูเมนมวลรวมละเอียด(ขนาด 0.075 – 2.36 มม.) มวลรวมหยาบ(ขนาด 2.36 – 19 มม.) วัสดุผสมแทรก(ขนาดน้อยกว่า 0.075 มม.) และช่องว่างอากาศ โดยที่มวลรวมทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคแต่ละอนุภาคของมวลรวมให้เกาะติดกัน โดยมีแอสฟัลต์บางส่วนถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวม และช่องว่างอากาศที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่ (วัชรินทร์ วิทยกุล,2001) (Vlad A. et al,2010) โดยมวลรวมหยาบ คือ ส่วนที่ค้ำตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) เป็นหินย่อยหรือวัสดุอื่นใดที่อนุมติให้ใช้ได้ ต้องเป็นวัสดุที่แข็งและคงทน สะอาด ปราศจากวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ใดๆที่อาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพด้อยลง มวลรวมละเอียด คือ ส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) เป็นหินฝุ่นหรือทรายที่สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรกหรือวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ใดๆปะปนอยู่ ซึ่งอาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพด้อยลง วัสดุผสมแทรก ใช้ผสมเพิ่มในกรณีเมื่อผสมมวลรวมหยาบกับมวลรวมละเอียดเป็นมวลรวมแล้วส่วนละเอียดในมวลรวมยังมีไม่พอ หรือใช้ผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต วัสดุผสมแทรกอาจเป็น Stone Dust, Portland Cement, Silica Cement, Hydrated Lime หรือวัสดุอื่นใดที่อนุมติให้ใช้และแอสฟัลต์ ในกรณีที่มิได้ระบุชนิดของแอสฟัลต์ไว้เป็นอย่างอื่น ให้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

2.2.4 ข้อดีของแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานถนนเชื่อม

ข้อดีที่เชื่อมถนนแอสฟัลต์คอนกรีตคือลดปัญหาการขาดแคลนดินเหนียวในการทำถนนเชื่อม การลดงบประมาณในการก่อสร้าง (Seo J. W. et al,2017) เมื่อพิจารณางบประมาณเชื่อมถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเทียบกับเชื่อมคอนกรีตบดอัดแน่น พบว่าเชื่อมถนนแอสฟัลต์คอนกรีตมีงบประมาณถูกกว่าประมาณ10% และสามารถก่อสร้างได้ในทุกสภาพอากาศเมื่อเทียบกับถนนดินเหนียว ลดปัญหาการกัดกร่อน และที่สำคัญลดปัญหาการไหลซึมของน้ำในเชื่อม (Saxegaard H. et al,2003) และโดยคุณสมบัติเชิงกลของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตคือความยืดหยุ่นและความเหนียวสูงสามารถลดการเกิดรอยแตกกร้าวเนื่องจากความเค้นและการเคลื่อนตัวในสภาวะต่างๆ (Feizi-Khankandi, S. et al,2009)

2.2.5 ข้อเสียของแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานถนนเชื่อม

ข้อเสียคือวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตต้องนำเข้ามา ทำให้ราคาของวัสดุจึงเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราแลกเปลี่ยน นอกจากนี้ การเทแอสฟัลต์คอนกรีตในช่วงฤดูร้อนยังใช้เวลานานและทำได้ยาก เนื่องจากชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตจะเย็นลงช้าในอากาศร้อน จึงสามารถทำงานได้เพียงจำนวนจำกัดในแต่ละวัน

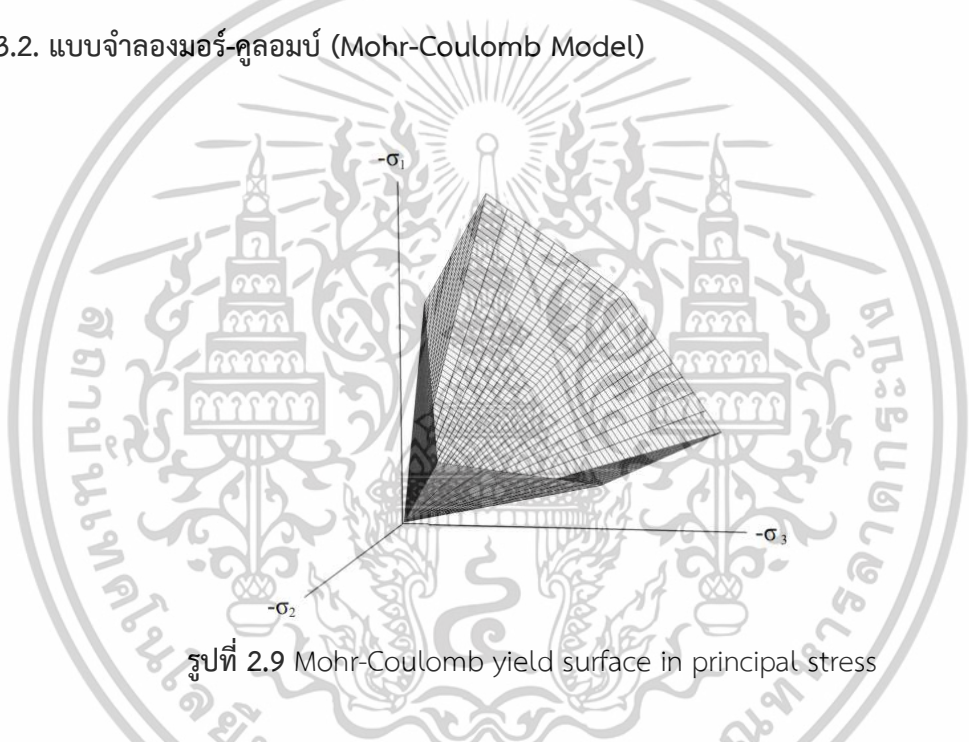
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)

2.3.1 โปรแกรมPlaxis 2D

เป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูป (deformation analysis) การวิเคราะห์เสถียรภาพ (stability analysis) และการวิเคราะห์การไหลของน้ำใต้ดิน (flow analysis) สำหรับงานวิศวกรรมปฐพี โดยสามารถจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างทางธรณีเทคนิคได้ทั้งในรูปแบบ plane strain ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เขื่อน งานขุดที่มีความยาวตลอดแนว และ axisymmetric model เหมาะสำหรับงานดินที่สมมาตรกันทั้งสองด้าน

2.3.2. แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model)

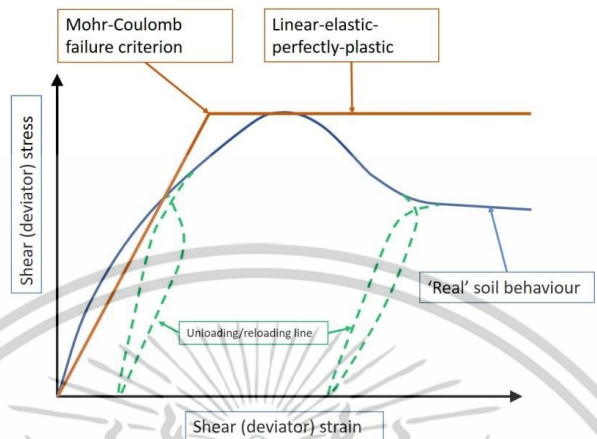


รูปที่ 2.9 Mohr-Coulomb yield surface in principal stress

Plasticity เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ไม่สามารถย้อนกลับคืนได้และจำกัดความเค้นที่ยอมรับได้ ในการวิเคราะห์การเกิดPlasticityในการคำนวณ ฟังก์ชันyieldถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันของความเค้นและความเครียด การเกิดPlasticityสามารถแสดงเป็นพื้นผิวในprincipal stress แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์เป็นแบบจำลองเชิงโครงสร้างที่มีyield surfaceคงที่ กล่าวคือ yield surfaceถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ของแบบจำลอง และไม่ขึ้นอยู่กับการเสียรูปแบบพลาสติก สำหรับสถานะความเค้นที่แสดงโดยจุดภายในyield surfaceพฤติกรรมจะเป็นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ และความเครียดทั้งหมดสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ โดยแบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ใช้พารามิเตอร์จำนวน 5 ตัวแปร ประกอบด้วย Young’s Modulus (E) , Poisson’s ratio (ν) , Friction angle (φ) , Cohesion (c) และ Dilation angle (ψ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 Young's Modulus (E)



รูปที่ 2.10 พฤติกรรมของโมเดลมอร์-คูลอมบ์ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

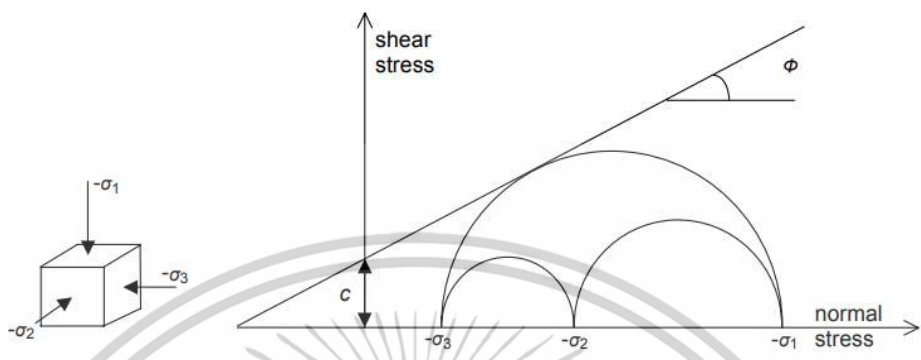
โปรแกรมPlaxis 2D ใช้ Young's Modulus เป็นพารามิเตอร์stiffnessพื้นฐานในแบบจำลอง Mohr-Coulomb โมดูลัสความแข็งมีมิติของความเค้น ค่าของพารามิเตอร์ความแข็งที่นำมาใช้ในการคำนวณต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษให้เหมาะสมกับงานวิเคราะห์ที่ต้องการ เนื่องจากวัสดุทางธรณีเทคนิคจำนวนมากแสดงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นตั้งแต่เริ่มต้นของการรับน้ำหนัก

2.3.2.2 Poisson's ratio (ν)

ช่วงเริ่มต้นของการรับแรงในแนวแกนอาจเกิดการลดลงของปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ค่าเริ่มต้นของอัตราส่วนของปัวซอง (ν) อยู่ในระดับต่ำ สำหรับบางกรณี เช่น การunloading เหมาะสมที่จะใช้ค่าเริ่มต้นที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปเมื่อใช้แบบจำลองของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb model) แนะนำให้ใช้ค่าที่สูงกว่าการเลือกค่าอัตราส่วนของปัวซองค่อนข้างง่ายเมื่อใช้แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์โดยการวิเคราะห์น้ำหนักดิน (gravity loading) ซึ่งดำเนินการโดยการเพิ่มค่าน้ำหนักตัวเองจาก 0 เป็น 1 ในการคำนวณแบบพลาสติก สำหรับประเภทของการไหลดังกล่าว โปรแกรม PLAXIS ควรให้ค่าอัตราส่วน k_0 ที่สมเหตุสมผลกับแบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ โดยทั่วไป ค่าอัตราส่วนของปัวซองที่อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.4 สามารถนำมาใช้ได้ ในสภาวะloadingที่ไม่ใช่การอัดตัวทางเดียว และสำหรับสภาวะunloading มักนิยมใช้ค่าในช่วง 0.15 ถึง 0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 Friction angle (ϕ)



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Normal stress

มุมเสียดทานภายใน ถูกกำหนดในหน่วยองศา โดยทั่วไปค่ามุมเสียดทานภายในที่สูง ซึ่งอาจพบในกรณีของทรายที่มีความหนาแน่นสูง จะส่งผลให้ภาระการคำนวณเชิงพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ระยะเวลาในการคำนวณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามค่าของมุมเสียดทานภายใน ดังนั้นการใช้ค่ามุมเสียดทานภายในที่สูงควรหลีกเลี่ยงเมื่อทำการคำนวณเบื้องต้นสำหรับโครงการขนาดใหญ่ มุมเสียดทานภายในมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแข็งแรงเฉือนของดิน ซึ่งสามารถแสดงได้โดยวงกลมความเค้นของมอร์ (Mohr's stress circles) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.11

2.3.2.4 Cohesion (c)

ค่า cohesion มีหน่วยเป็นหน่วยของความเค้น (stress) ในโปรแกรม PLAXIS สามารถกำหนดค่า $c=0$ ได้ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ค่านี้อาจทำให้การวิเคราะห์ผลได้ออกมาไม่ตีมากนัก เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อน จึงแนะนำค่า cohesion มากกว่า 0.2 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร

2.3.2.5 Dilation angle (ψ)

Dilation angle ถูกกำหนดในหน่วยองศา โดยทั่วไป ดินเหนียวมักแสดงพฤติกรรม Dilatancy เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย ยกเว้นในชั้นดินที่มีการบดอัดเกินอย่างมาก (heavily over-consolidated layers) พฤติกรรม Dilatancy ของดินขึ้นอยู่กับทั้งความหนาแน่นและมุมเสียดทานภายใน หากค่าความพรุนสัมพัทธ์ ต่ำกว่า 30% มุม Dilatancy มักมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับดินที่มีโครงสร้างหลวมมาก อาจพบค่ามุม Dilatancy ที่เป็นลบเล็กน้อย ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในและมุม Dilatancy การมีค่ามุม Dilatancy เป็นบวกหมายความว่า ในสภาวะระบายน้ำ ดินจะขยายตัวอย่างต่อเนื่องราบใดที่ยังเกิดการเสียรูปเฉือน ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ไม่สมจริง เนื่องจากดินส่วนใหญ่จะเข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะวิกฤติ (critical state) ในที่สุด และหลังจากนั้นการเสีรูปร่างเพิ่มเติมจะเกิดขึ้นโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ในสภาวะไม่ระบายน้ำ (undrained conditions) ค่ามุมDilatancyที่เป็นบวก ร่วมกับข้อจำกัดด้านการเปลี่ยนแปลงปริมาตร จะทำให้เกิด tensile pore pressure ซึ่งในการวิเคราะห์ ความเค้นที่มีผลกระทบอย่างมีประสิทธิภาพ (undrained effective stress analysis) อาจนำไปสู่การ ประมาณค่าความแข็งแรงของดินสูงเกินจริง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

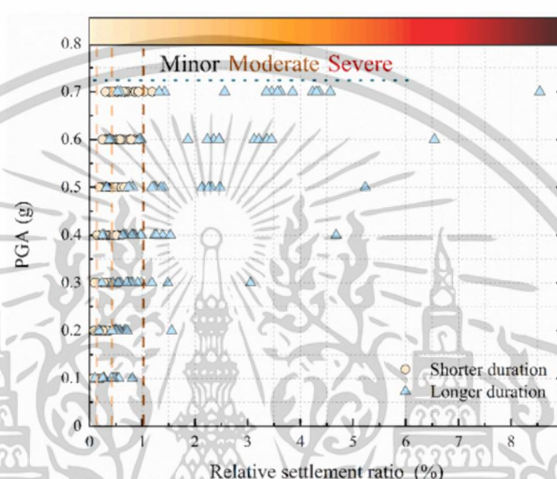
2.4.1 การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตในสภาวะปกติ

Neway A. A. et al. (2021) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อนแกน แอสฟัลต์คอนกรีตและเขื่อนแกนดินเหนียวในสภาวะใช้งานปกติคือที่ระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำ ลดลงอย่างรวดเร็วโดยใช้ SLOPE/W โปรแกรม Geo-studio 2012 พบว่าที่ระดับน้ำกักเก็บปกติเขื่อน แกนแอสฟัลต์คอนกรีตและเขื่อนแกนดินเหนียวให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.797 และ 1.503 ตามลำดับ ขณะที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.644 และ 1.337 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตว่าเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงกว่าเขื่อนแกนดิน เหนียว ขณะที่งานวิจัยของ Bayisa N. M. (2019) มีแนวโน้มของผลการศึกษาเช่นเดียวกันโดยได้ ทำการศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตและเขื่อนแกนดิน เหนียวเช่นเดียวกันแต่ทำการศึกษาที่ระดับน้ำกักเก็บปกติเท่านั้น โดยใช้โปรแกรม Plaxis 8.5 โดยผล การศึกษาพบว่าเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.661 ซึ่งมากกว่า เขื่อนแกนดินเหนียวซึ่งเท่ากับ 1.466 โดยอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไป เปรียบเทียบกับหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานเขื่อนที่ได้กำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดไว้ โดยหน่วยงานUSCEกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำกักเก็บปกติไว้ที่ 1.5 ที่ด้านฝั่งเหนือ น้ำ ซึ่งเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตของทั้ง 2 งานวิจัยที่กล่าวข้างต้นมากกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ของUSCE ขณะที่เขื่อนดินเหนียวงานวิจัยของ Neway A. A. et al. (2021) มากกว่าแต่งงานวิจัยของ Bayisa N. M. (2019) ต่ำกว่าค่าต่ำสุดซึ่งเสี่ยงต่อการพังทลายได้ ในส่วนของที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ของUSCE กำหนดไว้ที่ 1.25 ซึ่งงานวิจัยของ Neway A. A. et al. (2021) มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย มากกว่าค่าของUSCEกำหนดไว้ทั้ง 2 กรณี ขณะที่หน่วยงานที่สำคัญของเขื่อนอีกแห่งหนึ่งคือ ICOLD ได้ กำหนดที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วไว้ที่ 1.2 ฝั่งเหนือ น้ำ ซึ่งงานวิจัยของ Neway A. A. et al. (2021) มี ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่าค่าของICOLDกำหนด ขณะที่ระดับน้ำกักเก็บปกติไม่ได้มีการกำหนด ไว้มีเพียงแต่ที่ระดับน้ำสูงสุดกำหนดไว้ที่ 1.5 ฝั่งด้านท้ายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตในสภาวะแผ่นดินไหว

การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตในสภาวะแผ่นดินไหวมีความสำคัญอย่างมากต่อพื้นที่ที่เกิดแผ่นดินไหวบ่อยครั้ง ซึ่งที่ผ่านมาหลายพื้นที่ในประเทศไทยได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อ 28 มีนาคม 2568 ซึ่งการวิจัยเกี่ยวกับแผ่นดินไหวต่อเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ



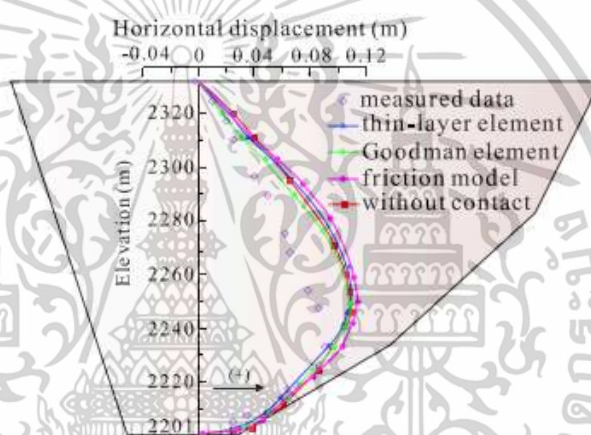
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Peak Ground Acceleration กับ Relative settlement ratio (Sun B. et al, 2022)

โดยมีงานวิจัยของ Sun B. et al (2022) ได้ทำการศึกษารูปร่างการทรุดตัวของเขื่อนเมื่อเกิดแผ่นดินไหวในคาบสั้นและคาบยาว โดยนำเสนอเสนอการทรุดตัวของเขื่อนในรูปแบบของ Relative settlement ratio (%) และสามารถกำหนดระดับความเสียหายได้คือถ้ามากกว่า 1% ถือว่ามีระดับความรุนแรงสูงสุด 0.1-1.0% ระดับความรุนแรงปานกลาง 0.012-0.5% ระดับความรุนแรงน้อย และน้อยกว่า 0.1% ระดับความรุนแรงน้อยมากหรือต่ำมาก ซึ่งผลการศึกษาพบว่า จากรูปที่ 2.12 เมื่อเกิดแผ่นดินไหวรุนแรงและมีคาบที่ยาว Relative settlement ratio (%) ขึ้นไปถึงประมาณ 4% ซึ่งถือว่าความรุนแรงมากที่สุดซึ่งเสี่ยงต่อเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของเขื่อน ขณะที่คาบยาวแต่แผ่นดินไหวไม่รุนแรงค่า Relative settlement ratio (%) จะอยู่ในช่วงความรุนแรงน้อย ขณะที่งานวิจัยของ O. Khalaj et al. (2022) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมแกนเขื่อนขณะเกิดแผ่นดินไหว โดยทำการเปรียบเทียบมุมเอียงของแกนที่แตกต่างกันคือ 90, 60 และ 45 องศา โดยใช้โปรแกรม FLAC 2D ในการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า เขื่อนที่ทำมุม 90 องศาให้ค่า maximum shear strain เท่ากับ 0.14 ขณะที่เขื่อนที่แกนทำมุม 60 และ

45 องศาให้ค่าเท่ากับ 0.10 และ 0.01 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนมุมของแกนให้มีความเอียงมากขึ้น สามารถลดการเคลื่อนตัวของแกนได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ในสถานการณ์แผ่นดินไหว

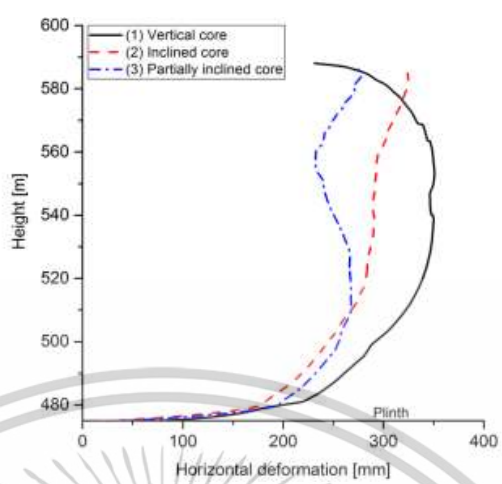
2.4.2 การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของแกนเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต

เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของแกนแอสฟัลต์คอนกรีตมีความสำคัญเพราะอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเขื่อนส่วนอื่นๆขณะมีการใช้งาน โดยงานวิจัยของ Cao W. et al. (2024) ศึกษาการเคลื่อนตัวของแกนแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อมีความต่างของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างแกนและชั้นกรองผลการศึกษาพบว่าไม่ว่าจะกรณีใดให้การเคลื่อนตัวของแกนที่ใกล้เคียงกันและเกิดการเคลื่อนตัวของแกนที่ความสูงประมาณ 1 ใน 3 ของความสูงแกน ดังรูปที่ 2.13



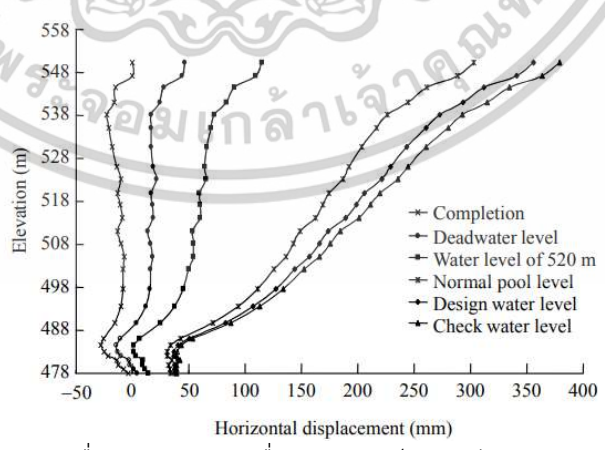
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนตัวของแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต (Cao W. et al,2024)

งานวิจัยของ Tschermutter P. et al. (2017) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของแกนแอสฟัลต์คอนกรีตเช่นเดียวแต่ทำการเปรียบเทียบลักษณะแกนที่แตกต่างกันคือแกนตั้ง แกนเอียง และแกนเอียงบางส่วน ผลการศึกษาพบว่าเขื่อนแกนตั้งมีการเคลื่อนตัวสูงสุดประมาณ 350 มิลลิเมตรและเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณกลางความสูงแกนดังรูปที่ 2.14



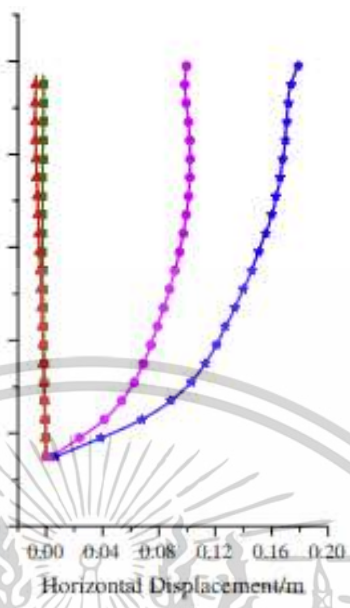
รูปที่ 2.14 การเคลื่อนตัวของแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต (Tschermutter P. et al,2017)

Fang C. et al. (2011) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของแกนแอสฟัลต์คอนกรีตในแนวราบขณะที่มีการใช้งานโดยจำลองจากเขื่อนหินถมแกนแอสฟัลต์คอนกรีต (Aikou rockfill dam) โดยใช้แบบจำลอง Duncan ผลการศึกษาพบว่าแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณการเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดต่างจากงานวิจัยอื่นๆซึ่งในงานวิจัยนี้มีการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณส่วนบนของแกนที่ check water level ค่าการเคลื่อนตัวเท่ากับ 379.4 มิลลิเมตร ขณะที่ระดับน้ำกักเก็บปกติเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณส่วนบนของแกนเช่นเดียวกัน 302.8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณส่วนบนของแกนไปสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu X. et al. (2015) ที่ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของแกนคอนกรีตในเขื่อนพบว่าที่การก่อสร้างแล้วเสร็จ C.E.L. ทั้ง 2 กรณีมีค่าการเคลื่อนตัวน้อยและไม่ต่างกันขณะที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ I.E.L. พบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ระดับน้ำสูง 2130 เมตร โดยเคลื่อนตัวประมาณ 0.20 เมตร ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 การเคลื่อนตัวของแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต (Fang C. et al,2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนตัวของแกนเขื่อนคอนกรีต (Yu X. et al,2015)

ซึ่งจากงานวิจัยที่กล่าวมานั้นพบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของแกนมีความต่างกันไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณส่วนบนหรือส่วนกลางอาจเกิดจากความแข็งของแกนที่แตกต่างกัน ซึ่งวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถมีค่าความแข็ง (Elastic Modulus) ได้หลากหลายมากตั้งแต่อ่อนมาก $5.00E+4$ กิโลปาสคาลจนถึงแข็งมาก $5.00E+6$ กิโลปาสคาลที่มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต ซึ่งค่าที่แตกต่างนี้เกิดจากส่วนผสมที่แตกต่างกัน อุณหภูมิที่แตกต่างกัน หรือสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยค่าความแข็งที่แตกต่างกันดังกล่าวอาจส่งผลต่อพฤติกรรมของเขื่อนหรือพฤติกรรมของแกนที่แตกต่างกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขนาดเขื่อนและพารามิเตอร์

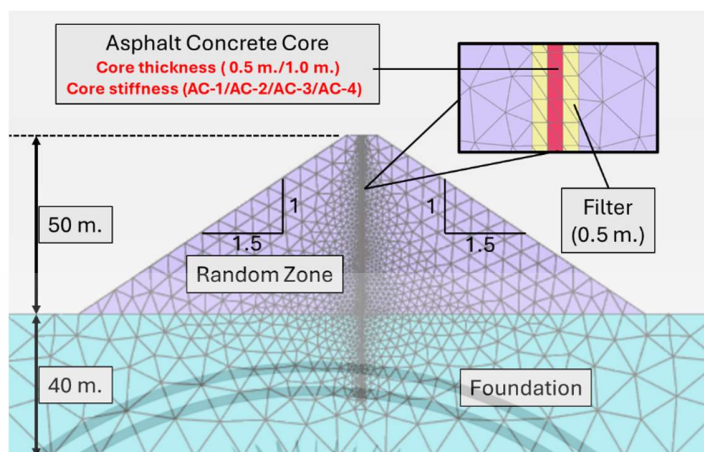
3.1.1 ขนาดแบบจำลองเขื่อน

การจำลองขนาดเขื่อนจะจำลองตามขนาดความต้องการในการออกแบบโดยทั่วไป โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเขื่อนที่มีลักษณะที่แตกต่างกันโดยใช้ความลาดชัน 1 : 1.5 เท่ากันทุกกรณีทั้งฝั่งเหนือน้ำและท้ายน้ำ ความต่างจะอยู่ที่ความหนาของแกนเขื่อน(Core Thickness)ตั้งแต่เขื่อนถมแบบไม่มีแกนเขื่อนที่มีความหนาแกน 0.50 เมตร และ 1.00 เมตร และความแข็งของแกน(Core Stiffness)ที่แตกต่างกันได้แก่ AC-1,AC-2,AC-3 และ AC-4 โดยทุกกรณีศึกษาความสูงเขื่อนเท่ากับ 50 เมตรและสันเขื่อนกว้าง 8.5 เมตร

ตารางที่ 3.1 ลักษณะและขนาดเขื่อนที่ใช้ในการศึกษา

กรณี	ความลาดชัน	ความหนาแกน (m.)	ความแข็งแกน		ความสูงเขื่อน (m.)	ความกว้างสันเขื่อน (m.)
			ชนิด	E (kPa)		
1	1 : 1.5	0.00	-	-	50.00	8.50
2		0.50	AC-1	5.00E+04		
3		0.50	AC-2	1.00E+05		
4		0.50	AC-3	1.00E+06		
5		0.50	AC-4	5.00E+06		
6		1.00	AC-1	5.00E+04		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ลักษณะและขนาดของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต

ส่วนประกอบหลักของเขื่อนสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของแกนเขื่อนได้เป็นสองประเภท ได้แก่ เขื่อนที่ไม่มีแกนและเขื่อนที่มีแกน สำหรับเขื่อนที่ไม่มีแกน ประกอบด้วยชั้นฐานราก (Foundation) ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคเหมาะสมในการรองรับน้ำหนักของเขื่อน และวัสดุถม (Random Zone) ซึ่งเป็นหิน ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเขื่อน ในขณะที่เขื่อนที่มีแกน ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญเพิ่มเติม ได้แก่ แกนเขื่อน (Core) ซึ่งทำจากวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตหรือวัสดุพลาสติก คอนกรีตหรือวัสดุคอนกรีต ทำหน้าที่เป็นวัสดุกันน้ำเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนโดยตรง นอกจากนี้ยังมีชั้นกรอง (Filter) ที่ประกอบด้วยทราย ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกรองและป้องกันการพังทลายของวัสดุภายในเขื่อน รวมถึงวัสดุถม (Random Zone) ที่เป็นหิน ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยรวมของเขื่อน ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

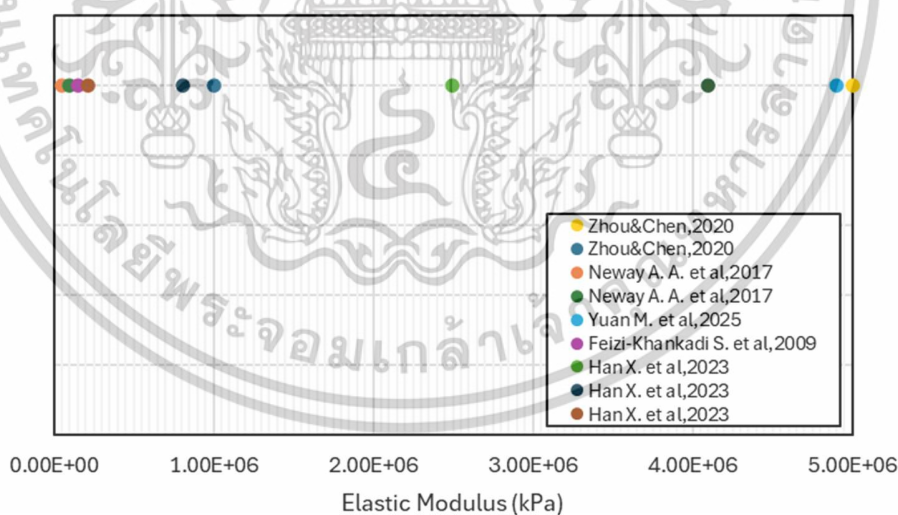
3.1.2 พารามิเตอร์ดิน

การกำหนดพารามิเตอร์วัสดุของเขื่อน ซึ่งสามารถสรุปได้ตารางที่ 3.2 และการกำหนดช่วงค่าความแข็งของแอสฟัลต์คอนกรีตหรือElastic Modulus กำหนดได้ดังรูปที่ 3.2 ได้จากการกำหนดช่วง AC-1 ถึง AC-4 จากงานวิจัยของ Zhou&Chen,2020 และ Seo J. W. et al,2017

ตารางที่ 3.2 สรุปพารามิเตอร์เขื่อนที่ใช้ในการวิเคราะห์

Prototype	γ_{sat}	γ_{unsat}	E	ϕ	ψ	c	ν	k
	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kPa)			(kPa)		(m/s)
Asphalt Concrete (AC-1)	24 ^(i,v)	24 ^(i,v)	50000 ^(vi)	24 ^(v)	0 ^(v)	281 ^(v)	0.4 ^(iv)	1.00E-11 ^(v)
Asphalt Concrete (AC-2)			100000 ^(vi)					
Asphalt Concrete (AC-3)			1000000 ⁽ⁱⁱ⁾					
Asphalt Concrete (AC-4)			5000000 ⁽ⁱⁱ⁾					
Random zone	22 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	22 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	110,000 ^(v)	46 ^(v)	5 ^(v)	1 ^(v)	0.3 ^(v)	1.00E-04 ^(vii)
Soil foundation	19 ^(v)	17 ^(v)	90,000 ^(viii)	32 ^(v)	0 ^(v)	50 ^(v)	0.3 ^(v)	1.00E-05 ^(v)
Filter	18 ^(iii,v)	16 ^(iii,v)	100,000 ^(v)	38 ^(v)	5 ^(v)	1 ^(v)	0.3 ^(v)	1.00E-04 ^(vii)

จากตารางที่ 3.2 สามารถอ้างอิงแหล่งที่มาได้ดังนี้ (i) Brandl, 2009 (ii) Zhou & Chen,2020 (iii) Fell et al., 2017 (iv) PLAXIS BV, 2021 (v) O. Khalaj et al.,2022 (vi) Seo J. W. et al,2017 (vii) Neway A. A. et al,2017 (viii) Bayisa N. M. 2019 และสำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน



รูปที่ 3.2 ช่วงค่าElastic Modulusของแอสฟัลต์คอนกรีตจากงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1 แกนเขื่อน (Core)

สำหรับพารามิเตอร์หลักสำหรับแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ หน่วยน้ำหนัก (Bulk Unit Weight, γ) เป็นค่าที่แสดงน้ำหนักของวัสดุต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตในเขื่อนมักอยู่ในช่วง 22 - 24 kN/m³ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของวัสดุมวลรวม (Aggregate), ปริมาณยางมะตอย (Bitumen Content) และระดับความหนาแน่นของการบดอัด ค่านี้ส่งผลต่อแรงดันดินและแรงดันน้ำภายในโครงสร้างเขื่อน (Brandl, 2009) โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) เป็นค่าที่แสดงความแข็งของวัสดุเมื่อรับแรงดึงหรือแรงอัด โดยทั่วไปค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีตในเขื่อนจะอยู่ที่ 50,000 ถึง 5,000,000 kPa (Zhou & Chen, 2020 และ Seo J. W. et al, 2017) ค่าที่สูงหมายถึงวัสดุมีความแข็งมากและเกิดการเสีรูปน้อย ค่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อายุของวัสดุและส่วนผสมในการออกแบบ เนื่องจากแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมหนืด อาจต้องพิจารณาการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสีรูประยะยาว สัมประสิทธิ์พัชของ (Poisson's Ratio, ν) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนแปลงรูปในแนวราบเมื่อถูกบีบอัดในแนวดิ่ง สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต ค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.30 - 0.35 (PLAXIS BV, 2021) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าวัสดุมีการเสีรูปด้านข้างเมื่อถูกบีบอัดในระดับปานกลาง มุมเสียดทานภายใน (Friction Angle, ϕ) เป็นค่าที่ใช้แสดงความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงเฉือน ค่านี้สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตในเขื่อนอยู่ประมาณ 24 องศา ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของหินและทรายในส่วนผสม (O. Khalaj et al., 2022) แรงเชื่อมแน่น (Cohesion, c) เป็นค่าที่แสดงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของวัสดุ โดยสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต ค่านี้มักอยู่ในช่วง 50 - 300 kN/m² (Zhou & Chen, 2020) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณยางมะตอยและกระบวนการบดอัด ค่าแรงเชื่อมแน่นที่สูงช่วยให้วัสดุทนต่อแรงเฉือนได้ดีและลดโอกาสที่แกนเขื่อนจะแตกหรือเสีรูปโดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าเท่ากับ 281 kN/m² มุมการขยายตัวของดิน (Dilatancy Angle, ψ) เป็นค่าที่ใช้กำหนดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรวัสดุเมื่อถูกเฉือน โดยทั่วไปค่าสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตจะอยู่ในช่วง 0 - 5 องศา เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมหนืดและไม่เกิดการขยายตัวมากเมื่อถูกเฉือน (PLAXIS BV, 2021) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะต่ำมากเนื่องจากแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความทึบน้ำสูงค่าจะอยู่ที่ประมาณ 1.00E-11 เมตรต่อวินาที (O. Khalaj et al., 2022)

3.1.2.2 ชั้นดินฐานราก (Foundation)

สำหรับพารามิเตอร์หลักของชั้นดินฐานราก ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) เป็นค่าที่แสดงความแข็งของดิน ค่านี้มีความสำคัญต่อการพิจารณาการทรุดตัวของเขื่อน โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเท่ากับ 90,000 kPa (Bayisa N. M. 2019) มุมเสียดทานภายใน (Friction Angle, ϕ) เป็นค่าที่กำหนดความสามารถของดินในการต้านทานแรงเฉือนโดยค่าอยู่ที่ 32 องศา แรงเชื่อมแน่น (Cohesion,

c) เป็นค่าที่ชี้ให้เห็นถึงความแข็งแรงของดินเหนียวในการต้านทานแรงเฉือนโดยดินเหนียวสำหรับงานฐานรากของเขื่อนมีค่าประมาณ 50 kN/m^2 มุมการขยายตัวของดิน (Dilatancy Angle, ψ) เป็นค่าที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเมื่อถูกเฉือน โดยทั่วไปดินเหนียวจะมีค่า 0 องศาเนื่องจากดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะลดปริมาตรเมื่อถูกเฉือน และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ $1.00\text{E-}05$ เมตร/วินาที (O. Khalaj et al.,2022)

3.1.2.3 ชั้นกรอง (filter)

ชั้นกรองหรือชั้น filter ทำหน้าที่ป้องกันการพังทลายของดินในแกนเขื่อนโดยการป้องกันไม่ให้อนุภาคดินในตัวเชื่อมไหลผ่านออกไปรวมถึงช่วยระบายน้ำใต้ดินออกจากตัวเขื่อนเพื่อลดแรงดันน้ำในดิน (pore water pressure) วัสดุที่ใช้ทำชั้นกรองมักเป็นวัสดุเม็ดหยาบ เช่น ทรายหยาบหรือกรวด ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง $16 - 18 \text{ kN/m}^3$ โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) เท่ากับ $100,000 \text{ kPa}$ และมีมุมเสียดทานภายในสูงประมาณ 38 องศา เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุมีมาก ขณะที่แรงเชื่อมแน่น (cohesion) จะต่ำมากหรือแทบไม่มีเลยประมาณ $0 - 10 \text{ kN/m}^2$ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดที่ 1 kN/m^2 เนื่องจากวัสดุเม็ดหยาบไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคที่ชัดเจน และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ $1.00\text{E-}04$ เมตร/วินาที (Fell et al., 2017, O. Khalaj et al.,2022 และ Neway A. A. et al.,2017)

3.1.2.4 ชั้นดินถม (Random Zone)

ตัวเชื่อมหลักหรือชั้นดินถมทำหน้าที่รองรับโครงสร้างทั้งหมดและช่วยกระจายแรง โดยวัสดุที่ใช้มักเป็นหินใหญ่หรือกรวดที่มีค่ามุมเสียดทานภายในสูง โดยทั่วไปค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 22 kN/m^3 มุมเสียดทานภายในประมาณ 46 องศา และโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ที่ $110,000 \text{ kPa}$ เพื่อให้โครงสร้างแข็งแรงและมั่นคง ขณะที่แรงเชื่อมแน่น (cohesion) มีค่าเท่ากับ 5 kN/m^2 มุมการขยายตัวของดิน (Dilatancy Angle, ψ) เท่ากับ 5 องศาและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ $1.00\text{E-}04$ เมตร/วินาที (Fell et al., 2017, O. Khalaj et al.,2022 และ Neway A. A. et al.,2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1 ความหนาแกนเขื่อน

ความหนาของแกนแอสฟัลต์คอนกรีต (asphalt concrete core) ในเขื่อนถมมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมของน้ำและการรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างโดยรวม โดยทั่วไปความหนาของแกนนี้มีค่าตั้งแต่ 0.3 เมตร ไปจนถึงมากกว่า 1.0 เมตร ขึ้นอยู่กับความสูงของเขื่อน แรงดันน้ำ และสภาพแวดล้อมของพื้นที่ก่อสร้าง (ICOLD, 2011) ในกรณีของเขื่อนขนาดเล็กหรือเขื่อนที่มีระดับเก็บกักต่ำ ความหนาของแกนเพียง 0.3–0.5 เมตร อาจเพียงพอสำหรับการต้านทานแรงดันน้ำ โดยยังสามารถควบคุมค่าการซึมผ่านของน้ำให้อยู่ในระดับต่ำ ($<10^{-9}$ m/s) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhou et al., 2010) อย่างไรก็ตาม เขื่อนที่มีความสูงมากกว่า 100 เมตร มักต้องเพิ่มความหนาของแกนให้มากกว่า 0.8 เมตร เพื่อรองรับแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นและลดความเสี่ยงต่อการแตกร้าวหรือการเสียรูปจากแรงดันภายในตัวเขื่อน (Lombardi, 2003) แต่เมื่อใช้แกนที่หนากว่าที่เพิ่มต้นทุนวัสดุ การขนส่ง และเวลาในการก่อสร้างอย่างมาก ซึ่งไม่เหมาะสมกับโครงการขนาดเล็กหรือพื้นที่ห่างไกลที่ต้นทุนเป็นปัจจัยจำกัด โดยในงานวิจัยได้ทำการศึกษาความหนาเขื่อนตั้งแต่เขื่อนไม่มีแกนคือเขื่อนถมเนื้อเดียว และเพิ่มความหนาเป็น 0.5 เมตร และแกนหนามากที่สุดคือ 1.0 เมตร

3.3.2 ความแข็งแรงของแกนเขื่อน

ในการออกแบบเขื่อนหินถม ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นแกนกลาง (core) ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการกันน้ำและเสถียรภาพของโครงสร้างเขื่อน โดยวัสดุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ แอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งมีความต่างของช่วงความแข็งแรงที่มากหมายถึงการมีสัดส่วนวัสดุผสมที่แตกต่างกัน โดยแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่าการซึมผ่านต่ำมาก และมีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถรองรับแรงดันน้ำและการเคลื่อนตัวของฐานรากได้ดี เหมาะสำหรับเขื่อนในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการทรุดตัวหรือแผ่นดินไหว (Ali et al., 2024; Zhou et al., 2010) การเลือกใช้วัสดุผสมแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีตจึงต้องอิงกับสภาพแวดล้อมทางธรณีวิทยา ความเสี่ยงของโครงการ และข้อจำกัดด้านงบประมาณ เพื่อให้ได้โครงสร้างเขื่อนที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างกันของวัสดุของแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากค่าความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีช่วงความต่างที่มากระหว่าง 50,000 ถึง 5,000,000 กิโลปาสคาลเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ได้จากการรวบรวมงานวิจัย (Zhou & Chen, 2020 และ Seo J. W. et al, 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 3.3 สรุปข้อมูลขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา

เงื่อนไข	ความสูงระดับน้ำ (เมตร)		เวลา (วัน)	อัตรา (เมตร/วัน)
	จาก	ถึง		
หลังการก่อสร้างเสร็จ	-	-	-	-
ระดับน้ำกักเก็บต่ำสุด	0.00	10.00	100	0.10
ระดับน้ำกักเก็บปกติ	10	45	100	0.45
ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด	45	48	3	1.00
ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	48	10	45	2.53
ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ	48	10	100	0.38

3.3.1 หลังการก่อสร้างเสร็จ (End of Construction)

การวิเคราะห์หลังการก่อสร้างเสร็จเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญในการประเมินเสถียรภาพและประสิทธิภาพของเขื่อนในระยะยาวหลังจากที่โครงสร้างเขื่อนถูกสร้างเสร็จสมบูรณ์ ช่วยให้สามารถจำลองพฤติกรรมทางกลของเขื่อนและดินรอบๆ โครงสร้างในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเขื่อน การทรุดตัว การกระจายแรงดันน้ำ และการป้องกันการซึมผ่านของน้ำภายในเขื่อนได้ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาในระยะหลังการก่อสร้างเพราะการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นหลังจากการใช้งานจริง เช่น การทรุดตัวของฐานราก การเคลื่อนตัวของดิน หรือการเกิดรอยแตกที่อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของเขื่อน (Xu et al., 2022) นอกจากนี้ยังช่วยวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนต่อแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากน้ำท่วม แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลง หรือแม้แต่แรงจากแผ่นดินไหว ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถใช้ในการวางแผนการบำรุงรักษาและการปรับปรุงโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhao et al., 2023) และที่สำคัญยังสามารถทำการวิเคราะห์สภาวะการทำงานของเขื่อนในระยะยาวได้ โดยการคำนวณการกระจายแรงดันน้ำและความเค้นในชั้นดินรอบๆ เขื่อน ซึ่งช่วยให้สามารถระบุจุดที่อาจมีความเสี่ยงและต้องการการตรวจสอบหรือปรับปรุงในอนาคต (Li et al., 2022) โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์หลังการก่อสร้างเสร็จ โดยทำการ activate ส่วนประกอบต่างๆ ของเขื่อนทั้งหมดและกำหนดระดับน้ำอยู่ระดับ Ground water level เพื่อดูการทรุดตัว การเคลื่อนตัวของแกนและเสถียรภาพของเขื่อนในเงื่อนไขหลังการก่อสร้างเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ระดับน้ำกักเก็บต่ำสุด (Minimum Water Level)

ระดับน้ำกักเก็บต่ำสุด คือ ระดับน้ำต่ำสุดที่เขื่อนสามารถระบายออกไปใช้งานได้ เป็นเงื่อนไขที่สำคัญในการวิเคราะห์เขื่อน เนื่องจากมีผลต่อความมั่นคงของโครงสร้างและประสิทธิภาพในการทำงานของเขื่อนในระยะยาว การรักษาระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดช่วยให้เขื่อนสามารถป้องกันการทรุดตัวของดินฐานรากและความเสียหายที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำที่สูงหรือต่ำเกินไป (Li et al., 2022). นอกจากนี้ การควบคุมระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดยังช่วยในการจัดการการไหลของน้ำที่ออกจากเขื่อน ลดความเสี่ยงจากการเกิดน้ำล้นในช่วงที่มีฝนตกหนักหรือน้ำท่วม (Zhao et al., 2023). การตั้งระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดยังช่วยให้สามารถบริหารจัดการน้ำในเขื่อนสำหรับการผลิตไฟฟ้าหรือการชลประทานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงที่มีน้ำไม่เพียงพอ (Xu et al., 2022). นอกจากนี้ การรักษาระดับน้ำต่ำสุดยังเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างของเขื่อน เนื่องจากช่วยลดความเสี่ยงจากการเกิดปัญหาการรั่วซึมหรือความเสียหายที่อาจเกิดจากแรงดันน้ำที่สูงเกินไป (Wang et al., 2023). ดังนั้นการควบคุมและรักษาระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้เขื่อนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยในระยะยาว โดยในงานวิจัยนี้จำลองอยู่ที่ระดับ +10.00 เมตร โดยการเพิ่มระดับน้ำจาก Ground water level ไปยังระดับน้ำกักเก็บต่ำสุด โดยใช้เวลา 100 วัน คิดเป็นอัตราการเพิ่มเท่ากับ 0.1 เมตร/วัน

3.3.3 ระดับน้ำกักเก็บปกติ (Normal Water Level)

ระดับน้ำกักเก็บปกติ คือ ระดับเก็บกักสูงสุดของอ่างในการปฏิบัติงาน ตามปกติ (Normal Operation) โดยมีความสำคัญในเรื่องของความมั่นคงและประสิทธิภาพการทำงานของเขื่อน โดยทั่วไปแล้ว การควบคุมและรักษาระดับน้ำกักเก็บให้อยู่ในระดับปกติจะช่วยให้เขื่อนสามารถทนทานต่อแรงดันน้ำได้อย่างเหมาะสม และลดความเสี่ยงจากการเกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง เช่น การทรุดตัวของฐานรากหรือการแตกร้าวของเขื่อนจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ (Li et al., 2022) ระดับน้ำกักเก็บปกติยังเป็นตัวกำหนดปริมาณน้ำที่สามารถนำมาใช้งานในระบบต่างๆ ได้ เช่น การผลิตพลังงานจากเขื่อนน้ำ หรือการใช้ในกิจกรรมการชลประทาน หากระดับน้ำสูงเกินไปหรือต่ำเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเขื่อน (Zhao et al., 2023) นอกจากนี้ ระดับน้ำกักเก็บปกติยังช่วยในการออกแบบและคำนวณปริมาณแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเขื่อน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเลือกวัสดุและการออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างต่างๆ เช่น เขื่อนดินหรือเขื่อนคอนกรีต (Xu et al., 2022) ในงานวิจัยนี้จำลองอยู่ที่ระดับ +45.00 เมตร โดยการเพิ่มระดับน้ำจากระดับกักเก็บต่ำสุดไปยังระดับน้ำกักเก็บปกติ โดยใช้เวลา 100 วัน คิดเป็นอัตราการเพิ่มเท่ากับ 0.45 เมตร/วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด (Maximum Water Surface)

ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด คือระดับน้ำสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นในอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลาที่มีน้ำท่วมขนาดใหญ่เคลื่อนตัวเข้าสู่อ่างเก็บน้ำ ปริมาตรอ่างที่อยู่ระหว่างระดับน้ำสูงสุด และระดับเก็บกักปกติ โดยมีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์เขื่อน เนื่องจากเป็นระดับน้ำที่สูงที่สุดที่เขื่อนสามารถรองรับได้โดยไม่เกิดการล้นหรือความเสียหายต่อโครงสร้างของเขื่อน การรักษาระดับน้ำในจุดนี้ช่วยให้เขื่อนสามารถรองรับปริมาณน้ำฝนที่อาจตกหนักในช่วงฤดูมรสุมหรือภาวะน้ำท่วมได้อย่างปลอดภัย (Sharma et al., 2021). หากระดับน้ำเกินค่าที่กำหนดไว้จะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำล้นจากเขื่อน ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อบริเวณพื้นที่รอบๆ และเสี่ยงต่อความปลอดภัยของชุมชนที่อยู่ใกล้เขื่อน (Lee et al., 2020) ในงานวิจัยนี้จำลองอยู่ที่ระดับ +48.00 เมตร โดยการเพิ่มระดับน้ำจากระดับกักเก็บปกติไปยังระดับน้ำกักเก็บสูงสุด โดยใช้เวลา 3 วัน คิดเป็นอัตราการเพิ่มเท่ากับ 1 เมตร/วัน

3.3.5 ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown)

ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว คือ การที่ระดับน้ำลดลงจากระดับกักเก็บปกติหรือหรือระดับกักเก็บสูงสุดอย่างรวดเร็ว ถือว่าเป็นหนึ่งในสถานการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ไม่บ่อยนักแต่ก็เกิดอยู่เสมอ อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงสร้างเขื่อนและความปลอดภัยของบริเวณรอบๆ เขื่อนอย่างมาก การลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วจนอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแรงดันน้ำที่มีต่อเขื่อน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินหรือการทรุดตัวของโครงสร้างฐานราก (Zhou et al., 2021). นอกจากนี้ การลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วอาจทำให้เกิดการเกิดความเสียหายที่อาจมีผลต่อความเสถียรของเขื่อน เช่น การแตกร้าวของเขื่อน หรือการเกิดรอยร้าวที่สามารถขยายตัวได้ ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสี่ยงในการรั่วไหลของน้ำและเพิ่มความเสี่ยงต่อการพังทลายของเขื่อน (Liang et al., 2020). ในมุมมองทางวิศวกรรม การลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วยังมีผลต่อการคำนวณการกระจายแรงภายในโครงสร้างเขื่อน ซึ่งจะต้องได้รับการพิจารณาในการวิเคราะห์เพื่อรักษาความปลอดภัยในระยะยาว (Tao et al., 2022) ในงานวิจัยนี้จำลองโดยการลดระดับน้ำจากระดับกักเก็บสูงสุดไปยังระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดโดยใช้เวลา 15 วัน คิดเป็นอัตราการเพิ่มเท่ากับ 2.53 เมตร/วัน

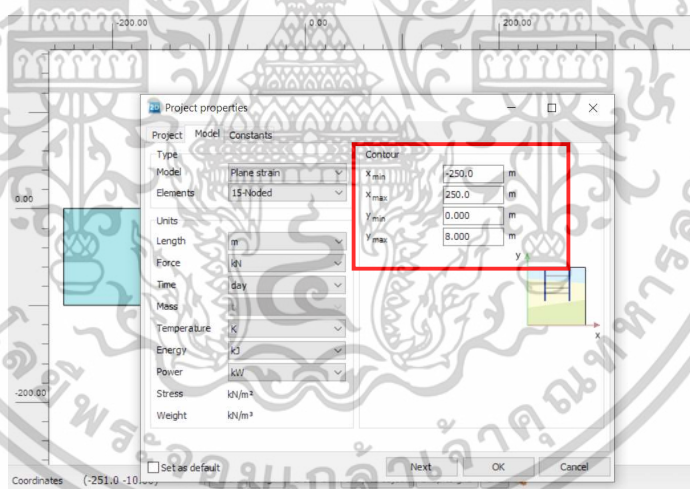
3.3.6 ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ (Slow Drawdown)

ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ คือ การที่ระดับน้ำลดลงจากระดับกักเก็บปกติหรือหรือระดับกักเก็บสูงสุดอย่างช้าๆ ถือว่าเป็นหนึ่งในสถานการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นอยู่เสมอเมื่อฤดูกาลเปลี่ยนแปลงหรือเมื่อเขื่อนระบายน้ำเพื่อการชลประทาน โดยมีความสำคัญในการรักษาความเสถียรภาพของโครงสร้างและการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วของระดับน้ำ การลดระดับน้ำอย่างค่อยเป็นค่อยไปช่วยให้โครงสร้างเขื่อนสามารถปรับตัวได้อย่างค่อยเป็นค่อยไป ลดความเสี่ยงในการเกิดการ

เคลื่อนตัวของดินหรือการทรุดตัวของฐานรากที่อาจเกิดขึ้นจากแรงดันน้ำที่ลดลงอย่างรวดเร็ว (Wang et al., 2020). นอกจากนี้ การลดระดับน้ำช้าๆ ยังช่วยให้การกระจายแรงภายในโครงสร้างเขื่อนเกิดความสมดุลและคงที่ ช่วยป้องกันการแตกร้าวหรือการเสียหายที่อาจเกิดจากการลดระดับน้ำที่ไม่เหมาะสม (Chen et al., 2021). การลดระดับน้ำอย่างช้าๆ ยังเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมการไหลของน้ำที่ออกจากเขื่อน ซึ่งช่วยให้การระบายน้ำสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ทำให้เกิดการเสียหายต่อโครงสร้างทางน้ำที่อยู่ในพื้นที่ด้านล่างของเขื่อน (Zhou et al., 2022). ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้ให้คำจำกัดความให้ชัดเจนว่าควรมีค่าอัตราการลดลงเท่าไร งานวิจัยนี้มีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ที่ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ เพื่อดูพฤติกรรมเขื่อนในอัตราการลดน้ำที่ต้องการ โดยงานวิจัยนี้จำลองโดยการลดระดับน้ำจากระดับกักเก็บสูงสุดไปยังระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดโดยใช้เวลา 100 วัน คิดเป็นอัตราการเพิ่มเท่ากับ 0.38 เมตร/วัน

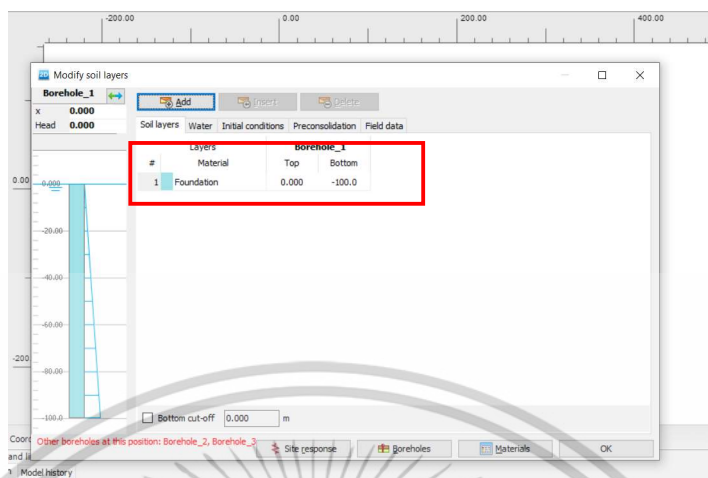
3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

3.4.1 การสร้างดินฐานราก

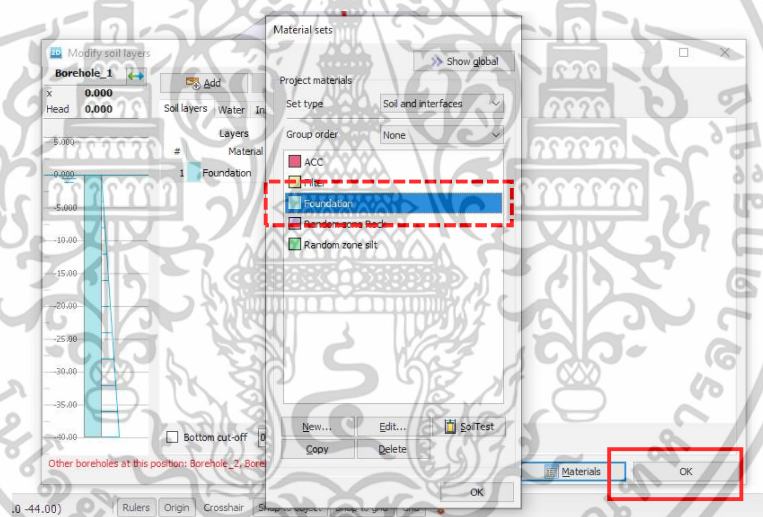


รูปที่ 3.3 การกำหนดขนาดความกว้างดินชั้นฐานราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

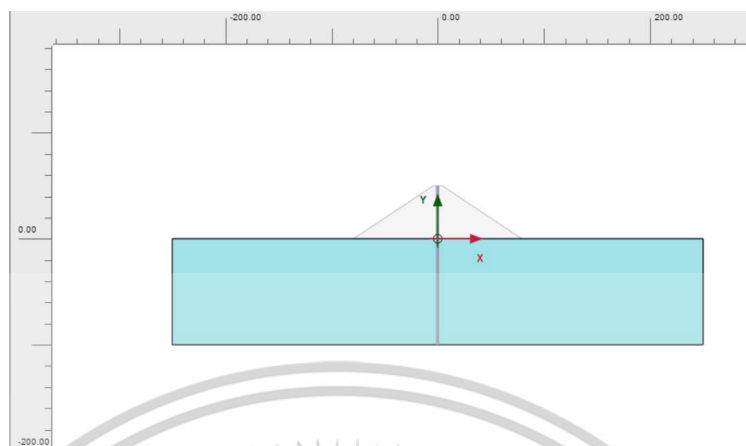


รูปที่ 3.4 การกำหนดความลึกของดินชั้นฐานราก



รูปที่ 3.5 การกำหนดคุณสมบัติชั้นดินฐานราก

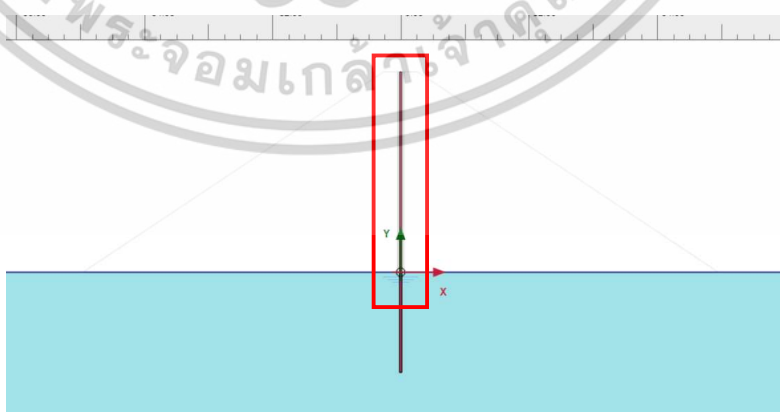
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ดินฐานรากเมื่อถูกจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D

ในการสร้างดินชั้นฐานในขั้นตอนแรกต้องทำการกำหนดขนาดความกว้างและความลึก ดังรูปที่ 3.3 ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดความกว้างประมาณ 500 เมตรเป็นไปตามเกณฑ์ขั้นต่ำจากสมการ $\text{base width} = \text{Height} + (\text{Slopeup} + \text{Slopedown})$ ของ ICOLD ในขณะที่กำหนดโดยการสร้างหลุมดินที่เมนู boreholes ดังรูปที่ 3.4 โดยการกำหนด Top เท่ากับ 0.00 เมตร และ Bottom เท่ากับ -100.00 เมตร นั้นหมายความว่าดินชั้นฐานรากมีความลึกเท่ากับ 100 เมตรเป็นไปตามเกณฑ์ขั้นต่ำของ ICOLD ที่ว่าความลึกฐานรากเล็กอย่างน้อยเท่ากับความสูงเขื่อน จากนั้นทำการกำหนดคุณสมบัติชั้นดินฐานรากโดยการเลือกที่ Materials กรอบสีแดงเส้นทึบในรูปที่ 3.5 เลือกกำหนดตั้งวัสดุขึ้นมาใหม่ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กำหนดตามหัวข้อ 3.1.2.2 ชั้นดินฐานราก (Foundation) หลังจากนั้นทำการกำหนดวัสดุ (Activate) ให้กับดินชั้นฐานรากและเมื่อเสร็จสิ้นจะได้แบบจำลองชั้นดินฐานรากดังรูปที่ 3.6

3.4.2 การสร้างแกนเขื่อน



รูปที่ 3.7 การสร้างแกนเขื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างแกนเขื่อนต้องทำการสร้างโดยใช้หัวข้อ structure โดยใช้คำสั่ง polygon ในการสร้างซึ่งสามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ ใช้การลากมือให้ได้ขนาดและความสูงที่ต้องการ หรือใช้การลงพิกัดจุดซึ่งในงานวิจัยได้ทำการลงพิกัดได้แก่ (0,-0.25) (50,-0.25) (50,0.25) (0,0.25) ซึ่งขนาดแกนที่ได้จะเป็นแกนที่มีความสูง 50 เมตร และหนา 0.5 เมตร ถ้าต้องการเขื่อนที่มีความหนาจะใช้พิกัด(0,-0.5) (50,-0.5) (50,0.5) (0,0.5) และถ้าต้องการเขื่อนดินถมที่ไม่มีแกนในชั้นตอนนี้ไม่จำเป็นต้องมีการสร้าง นอกจากแกนเขื่อนในส่วนบนยังมีส่วนแกนด้านล่างด้วยโดยที่กรณีที่เป็นกรณีมีแกนจะมีแกนลึกลงไปในชั้นดินฐานราก 25 เมตร จากนั้นทำการกำหนดคุณสมบัติแกนเขื่อนโดยการเลือกที่ Materials เช่นเดียวกับการสร้างชั้นดินฐานราก โดยเลือกกำหนดตั้งวัสดุขึ้นมาใหม่ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆกำหนดตามหัวข้อ 3.1.2.1 แกนเขื่อน (Core) หลังจากนั้นทำการกำหนดวัสดุ(Activate)ให้กับแกนเขื่อนและเมื่อเสร็จสิ้นจะได้แบบจำลองแกนเขื่อนดังรูปที่ 3.7

3.4.3 การสร้างชั้นกรอง

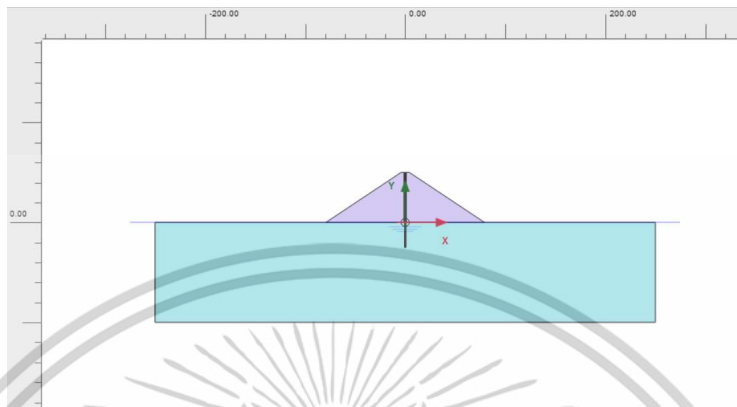


รูปที่ 3.8 การสร้างชั้นกรอง

ในการสร้างชั้นกรองต้องทำการสร้างโดยใช้หัวข้อ structure โดยใช้คำสั่ง polygon ในการสร้างซึ่งสามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ ใช้การลากมือให้ได้ขนาดและความสูงที่ต้องการ หรือใช้การลงพิกัดจุดซึ่งในงานวิจัยได้ทำการลงพิกัดได้แก่ (-0.25,0) (-0.75,0) (-0.75,50) (-0.25,50) และ(0.25,0) (0.75,0) (0.75,50) (0.25,50) ซึ่งจะได้ชั้นกรองอยู่ทั้ง 2 ด้านของแกนเป็นชั้นกรองมีความหนาข้างละ 0.5 เมตร และสูง 50 เมตร จากนั้นทำการกำหนดคุณสมบัติชั้นกรองโดยการเลือกที่ Materials เช่นเดียวกับการสร้างชั้นดินฐานราก โดยเลือกกำหนดตั้งวัสดุขึ้นมาใหม่ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆกำหนดตามหัวข้อ 3.1.2.3 ชั้นกรอง (filter) หลังจากนั้นทำการกำหนดวัสดุ(Activate)ให้กับชั้นกรองและเมื่อเสร็จสิ้นจะได้แบบจำลองชั้นกรองดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

3.1.2.4 ชั้นดินถม

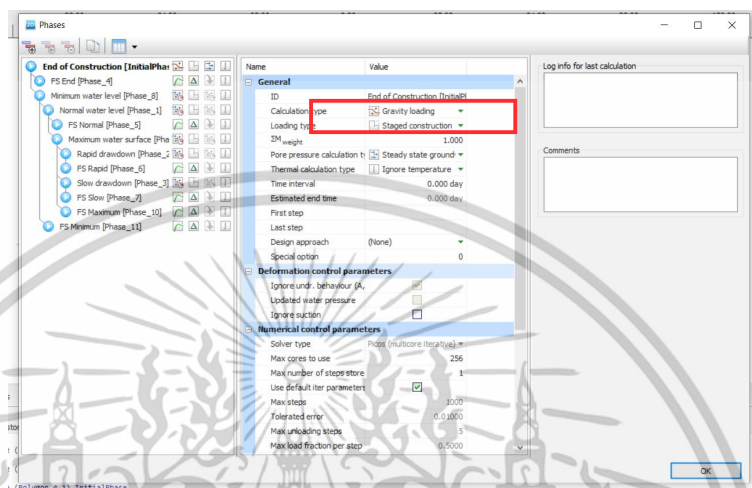


รูปที่ 3.9 การสร้างชั้นดินถม

ในการสร้างชั้นดินถมต้องทำการสร้างโดยใช้หัวข้อ structure โดยใช้คำสั่ง polygon ในการสร้าง ซึ่งสามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ ใช้การลากมือให้ได้ขนาดและความสูงที่ต้องการ หรือใช้การลงพิกัดจุดซึ่งในงานวิจัยได้ทำการลงพิกัดได้แก่ (-0.75,0) (-80,0) (-4.25,50) (4.25,50) (80,0) (0.75,0) ซึ่งจะได้ชั้นดินถมที่มีความลาดชัน 1 : 1.5 ความสูง 50 เมตร สันเขื่อนกว้าง 8.5 เมตร จากนั้นทำการกำหนดคุณสมบัติชั้นดินถมโดยการเลือกที่ Materials เช่นเดียวกับการสร้างชั้นดินฐานราก โดยเลือกกำหนดตั้งวัสดุขึ้นมาใหม่ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆกำหนดตามหัวข้อ 3.1.2.4 ชั้นดินถม (random zone) หลังจากนั้นทำการกำหนดวัสดุ(Activate)ให้กับชั้นดินถมและเมื่อเสร็จสิ้นจะได้แบบจำลองชั้นกรวดดังรูปที่ 3.9

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.5.1 การวิเคราะห์ gravity loading

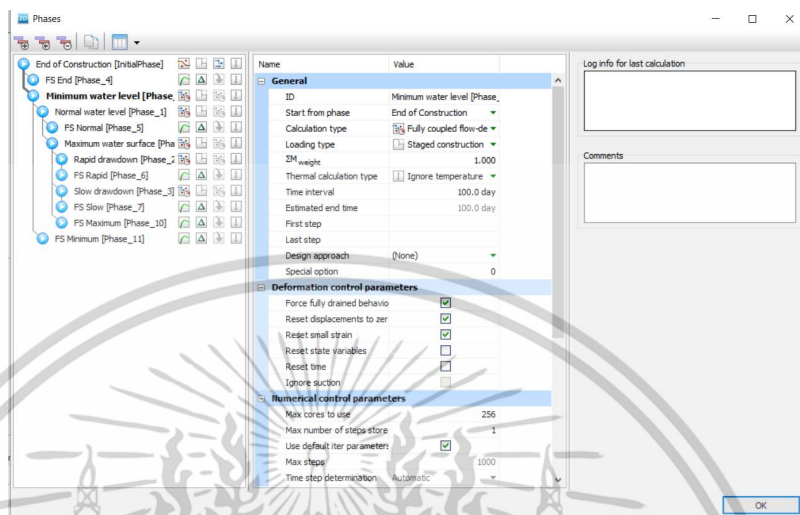


รูปที่ 3.10 คำสั่งการวิเคราะห์ gravity loading

การวิเคราะห์ Gravity Loading มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานออกแบบและวิเคราะห์เขื่อน เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการจำลองน้ำหนักของดินและโครงสร้างที่เกิดจากตัววัสดุเอง (self-weight) เพื่อให้โครงสร้างเริ่มต้นอยู่ในสภาวะสมดุลภายใต้น้ำหนักของตัวเองก่อนที่จะมีการกระทำของแรงภายนอกอื่นๆ เช่น แรงดันน้ำ แรงกระทำจากแผ่นดินไหว หรือแรงจากการใช้งานจริง การทำ gravity Loading เป็นการสร้างสภาวะเริ่มต้น (initial stress state) ที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงในธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยให้ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมมีความแม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของเขื่อนที่มีมวลมากและความสูงมาก การคำนวณน้ำหนักตัวเองอย่างถูกต้องจะส่งผลต่อเสถียรภาพโดยรวมของโครงสร้าง และยังช่วยให้สามารถตรวจสอบพฤติกรรมของดิน เช่น การทรุดตัวหรือการพัฒนาแรงดันน้ำส่วนเกินได้อย่างถูกต้องก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์อื่นๆ ในกระบวนการออกแบบ ในstageการวิเคราะห์ขั้นที่หนึ่งหรือที่เรียกว่าstateหลังการก่อสร้างเสร็จหรือEnd of construction และใช้คำสั่งในส่วนของการ calculation type ใช้คำสั่งว่าgravity loading

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การวิเคราะห์การไหลซึม

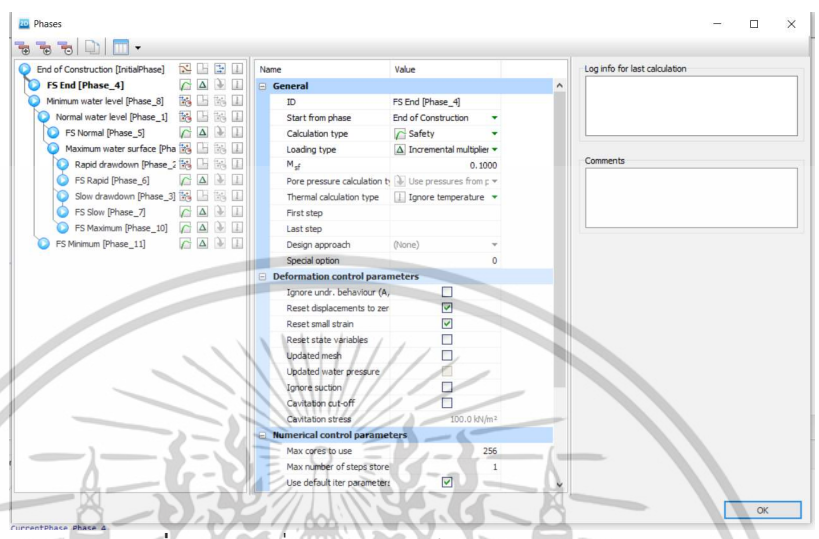


รูปที่ 3.11 คำสั่งการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำ

การวิเคราะห์การไหลซึมในตัวเชื่อมด้วยโปรแกรมplaxis 2d เป็นกระบวนการสำคัญในการประเมินความปลอดภัยของเขื่อน โดยเฉพาะการไหลของน้ำผ่านดินหรือวัสดุก่อสร้างของเขื่อน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงสร้างเขื่อนได้ โดยขั้นตอนการวิเคราะห์หลังจากการสร้างgeometryของเขื่อนและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับวัสดุเขื่อนแล้วจะเริ่มการกำหนด Water Table หรือใช้ Steady-State Groundwater Flow ในstateเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์เส้นน้ำใต้ดิน (phreatic surface) โดยในงานนี้กำหนดเส้นระดับน้ำหรือwater tableไว้ที่ระดับ 0.00 เมตร หลังจากนั้นทำการเพิ่มstateการวิเคราะห์จากขั้นตอนหลังการก่อสร้างเสร็จ โดยใช้ขั้นตอนระดับน้ำกักเก็บต่ำสุด เพิ่มน้ำไปที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ และเพิ่มน้ำไปที่ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด หลังจากนั้นทำการลดระดับน้ำอย่างช้าๆ และรวดเร็ว โดยการใช้คำสั่งในส่วนcalculation type เป็น fully coupled flow-deformation ทุกstateการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องในการวิเคราะห์ เช่น ในขั้นตอนการเพิ่มน้ำไปยังระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดจากขั้นตอนหลังการก่อสร้างเสร็จต้องมีการตั้งค่าการทรุดตัวให้เท่ากับ0ก่อน เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ต้องการศึกษาการเคลื่อนตัวของเขื่อนระหว่างการเพิ่มลดระดับน้ำ ดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย



รูปที่ 3.12 คำสั่งการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย

ในส่วนของการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมplaxis 2d จะใช้วิธี c-phi reduction method หรือ stress reduction method โดยตัวโปรแกรมจะคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ดินที่ใส่ไว้ในโปรแกรมและโปรแกรมจะคำนวณลดค่าพารามิเตอร์เรื่อยๆจนเกิดการพังและจะคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยออกมา โดยเพิ่มstateการวิเคราะห์หลังจากstateต่างๆในการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำ โดยใช้คำสั่งcalculation type เป็น safety

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

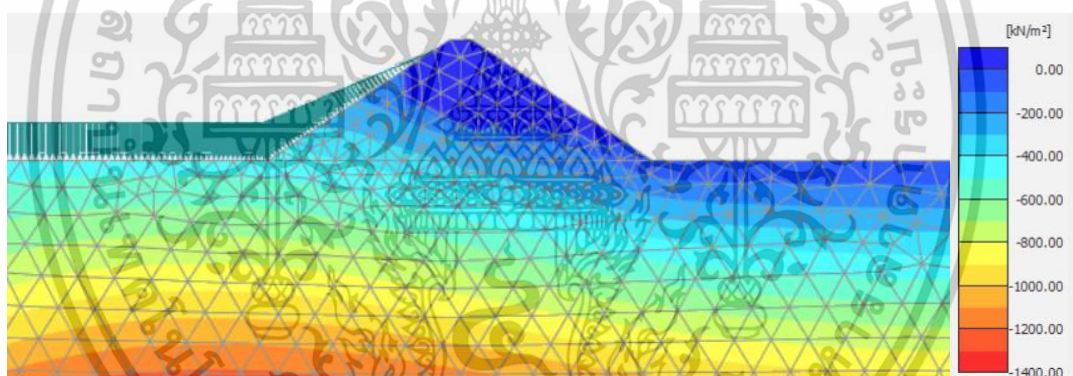
บทที่ 4

ผลการศึกษา

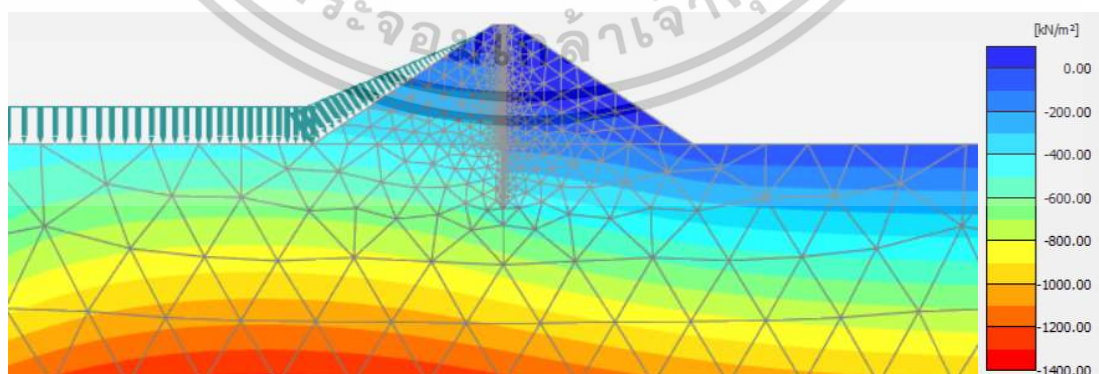
จากการศึกษาความหนาแกน(Core Thickness)และความแข็งแกน(Core Stiffness)ที่แตกต่างกัน ของเขื่อนความลาดชัน 1:1.5 ภายใต้สถานการณ์เมื่อการก่อสร้างแล้วเสร็จ ภายใต้ระดับน้ำกักเก็บปกติ ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด ระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดและระดับน้ำผันผวนอย่างรุนแรง ซึ่งรวมถึงสภาวะระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วและช้า เพื่อศึกษาผลของแรงดันน้ำ การทรุดตัวของสันเขื่อน การเคลื่อนตัวของแกน ระบายพิบัติ และอัตราส่วนความปลอดภัย ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 แรงดันน้ำ (Pore Water Pressure: PWP)

4.1.1 แรงดันน้ำที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ

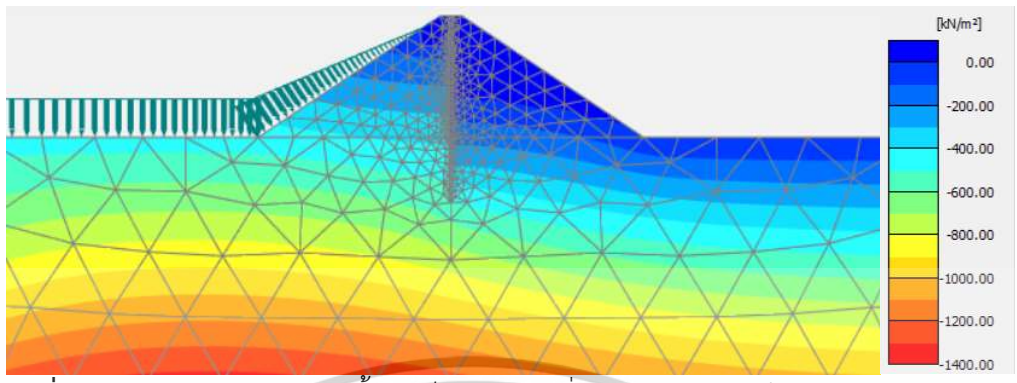


รูปที่ 4.1 PWP Contour ระดับน้ำกักเก็บปกติของเขื่อนไม่มีแกน

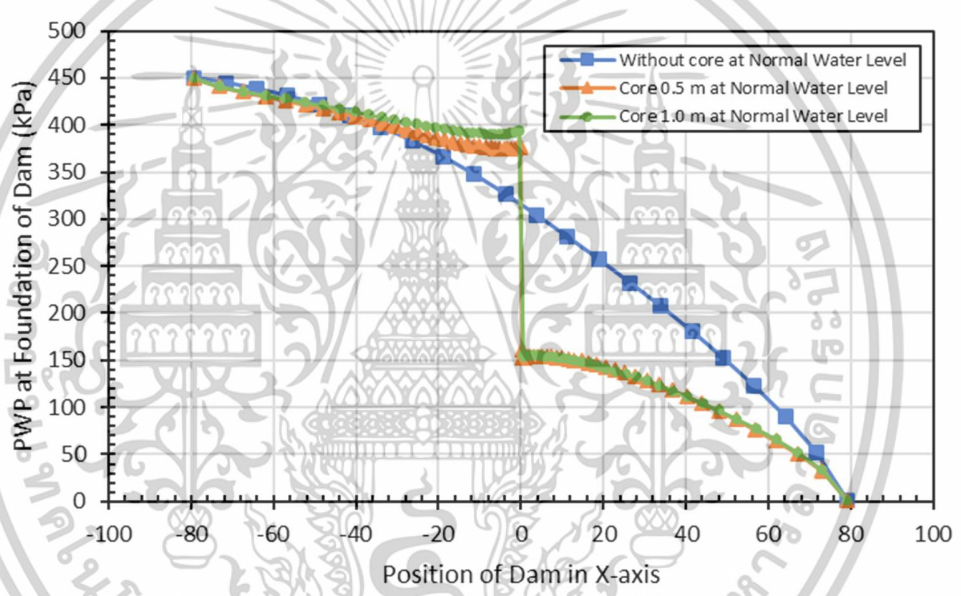


รูปที่ 4.2 PWP Contour ระดับน้ำกักเก็บปกติของเขื่อนมีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 PWP Contour ระดับน้ำกักเก็บปกติของเขื่อนมีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตร



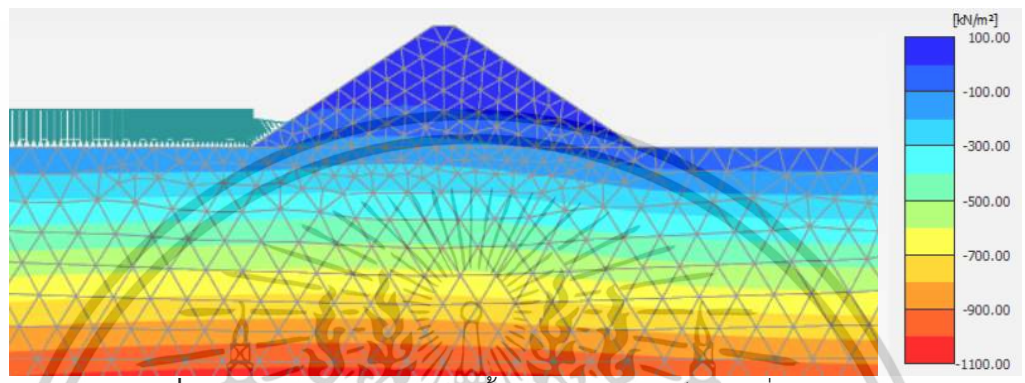
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับตำแหน่งของเขื่อนในแนวราบที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ

จากรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 แสดงผลเส้นชั้นแรงดันน้ำของเขื่อนความลาดชัน 1:1.5 ทั้งเขื่อนที่ไม่มีแกนแอสฟัลต์ เขื่อนที่แกนแอสฟัลต์ความหนา 0.5 เมตร และเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตความหนา 1.0 เมตร ตามลำดับ ที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ พบว่าการมีแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่นั้นจะช่วยให้น้ำไม่ไหลผ่านตัวเขื่อนได้ โดยสังเกตจากเส้น contour ของน้ำฝั่งท้ายน้ำของกรณีที่มีแกนจะน้อยกว่าเขื่อนที่ไม่มีแกนอย่างชัดเจน และเมื่อดูแรงดันของน้ำในดินที่บริเวณฐานเขื่อน ในรูปที่ 4.4 จะพบว่าแรงดันน้ำในดินในส่วนหน้าเขื่อนนั้นมีค่าประมาณ 330 kPa และมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 15.15% เมื่อมีแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อพิจารณาในส่วนท้ายเขื่อนนั้นแรงดันน้ำในดินจะมีค่าลดหลั่นลงมาจากหน้าเขื่อน อยู่ที่ประมาณ 300 kPa หากแต่ถ้าเมื่อมีแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันน้ำในดินมีค่าลดลงอย่างมากกว่า 50% และสำหรับผลแรงดันน้ำในเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตรมีแนวโน้มและค่าที่ใกล้เคียงกับเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร

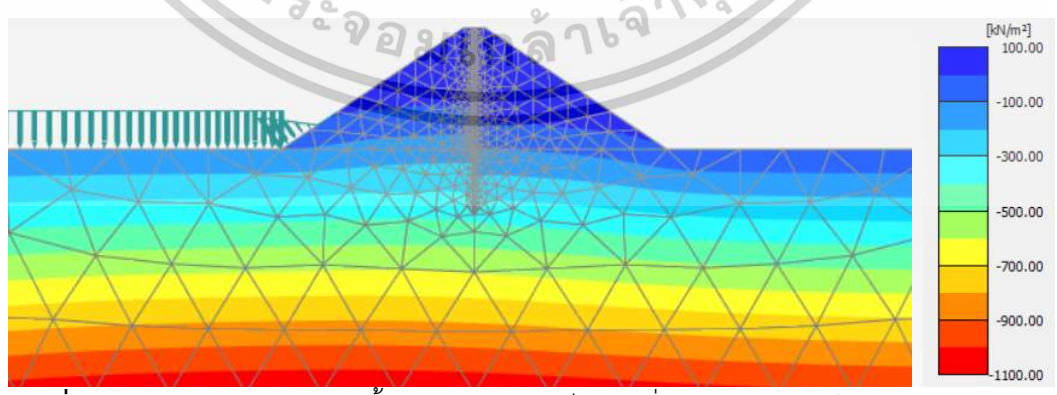
4.1.1 แรงดันน้ำที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.5 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนไม่มีแกน

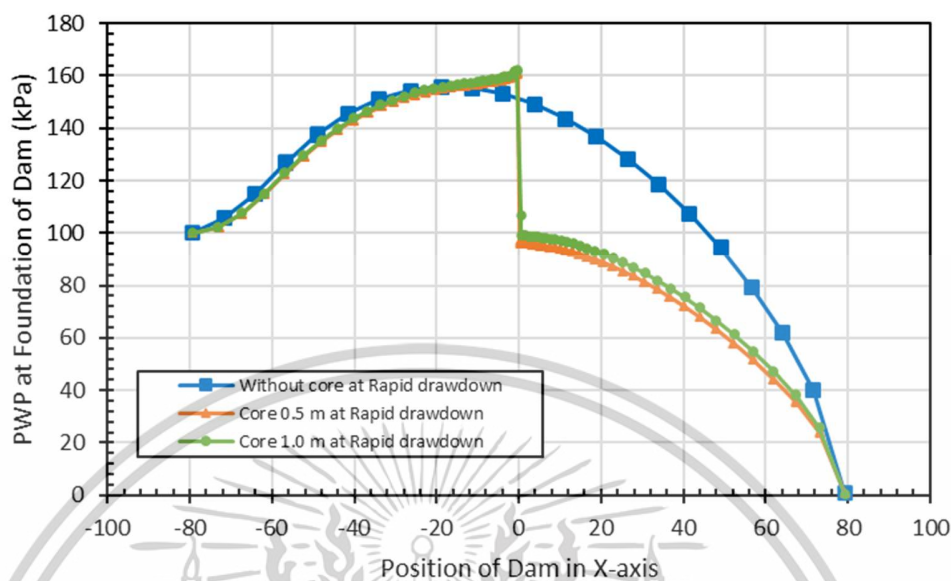


รูปที่ 4.6 PWP Contour ระดับลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนมีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร



รูปที่ 4.7 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต 1.0 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

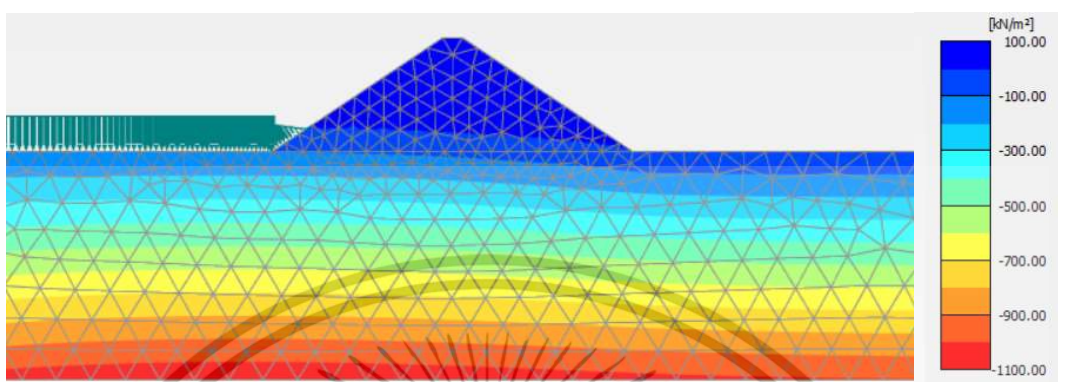


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับตำแหน่งของเขื่อนในแนวราบที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

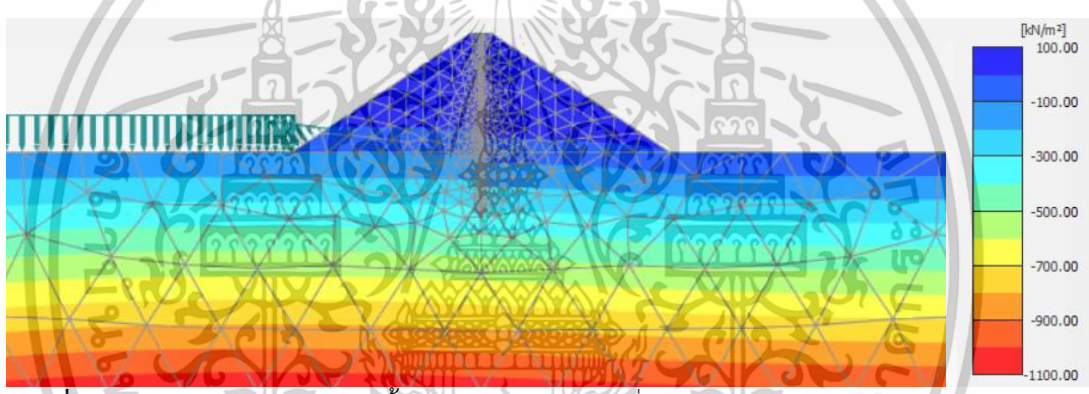
จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 แสดงผลเส้นชั้นแรงดันน้ำของเขื่อนความลาดชัน 1:1.5 ทั้งเขื่อนที่ไม่มีแกนแอสฟัลต์ เขื่อนที่แกนแอสฟัลต์ความหนา 0.5 เมตรและเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตรตามลำดับ ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว พบว่าการลดลงอย่างรวดเร็วของน้ำของทั้ง 3 กรณีไม่แตกต่างกันมากเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการเป็นวัสดุถมมีความการซึมน้ำที่ค่อนข้างมาก เมื่อลดน้ำลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดน้ำค้างค้างในตัวเขื่อนค่อนข้างน้อยและไม่แตกต่างกันในทั้งสองกรณี และเทียบกับกับเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 กรณีก็จะเห็นว่าฝั่งท้ายน้ำก็มีปริมาณน้ำที่น้อยกว่าเหนือน้ำ เนื่องจากการมีแกนช่วยกันน้ำทำให้น้ำในช่วงก่อนการลดลงนั้นมีค่าน้อยกว่า แต่ผลก็คือว่าไม่แตกต่างกันมากในกรณีนี้ และเมื่อดูแรงดันของน้ำในดินที่บริเวณฐานเขื่อน ในรูปที่ 4.8 จะพบว่าแรงดันน้ำในดินในส่วนหน้าเขื่อนนั้นมีค่าประมาณ 160 kPa และมีค่าสูงขึ้นไปเล็กน้อยประมาณ 6.25% เมื่อมีแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อพิจารณาในส่วนท้ายเขื่อนนั้นแรงดันน้ำในดินจะมีค่าลดลงมาจากหน้าเขื่อน อยู่ที่ประมาณ 145 kPa หากแต่ถ้าเมื่อมีแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต ทำให้แรงดันน้ำในดินมีค่าลดลงมากกว่าถึง 31.03% และสำหรับผลแรงดันน้ำในเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตรมีแนวโน้มและค่าที่ใกล้เคียงกับเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร และแนวโน้มการลดลงเช่นนี้เป็นผลมาจากเงื่อนไขในขั้นตอนก่อนหน้าด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

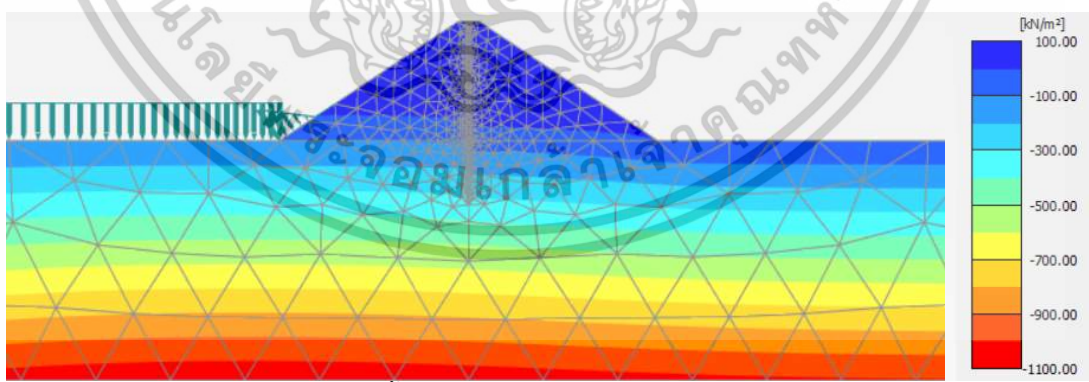
4.1.3 แรงดันน้ำที่ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ



รูปที่ 4.9 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆของเขื่อนไม่มีแกน

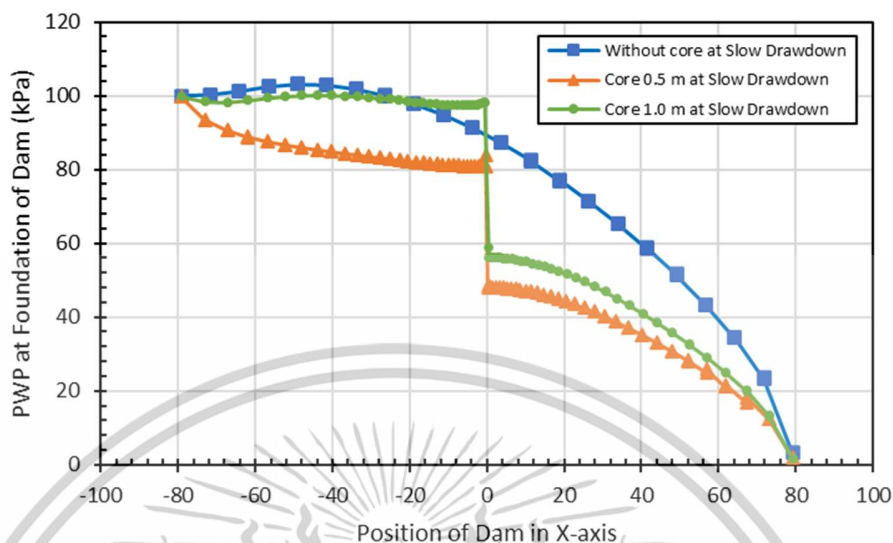


รูปที่ 4.10 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร



รูปที่ 4.11 PWP Contour ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



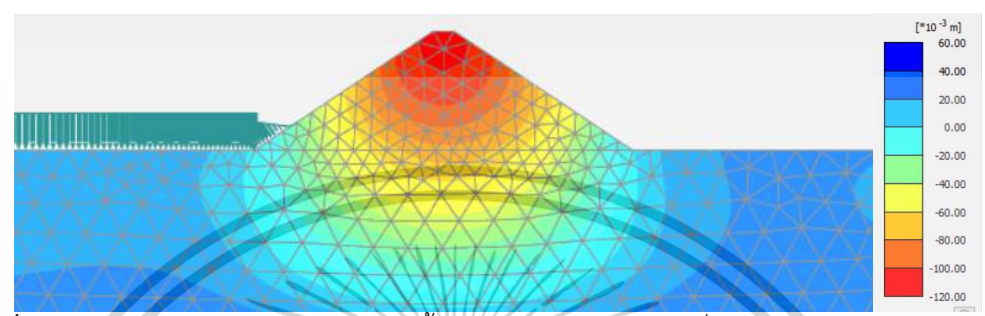
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับตำแหน่งของเขื่อนในแนวราบที่ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ

จากรูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11 แสดงผลเส้นชั้นแรงดันน้ำของเขื่อนความลาดชัน 1:1.5 ทั้งเขื่อนที่ไม่มีแกนแอสฟัลต์ เขื่อนที่แกนแอสฟัลต์ความหนา 0.5 เมตรและเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตร ตามลำดับ ที่ระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ พบว่าการลดลงอย่างรวดเร็วของน้ำของทั้ง 3 กรณีไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการเป็นวัสดุถมมีความการซึมที่ค่อนข้างมาก เมื่อลดน้ำลงทำให้เกิดน้ำค้างคั่งในตัวเขื่อนค่อนข้างน้อยและไม่แตกต่างกันในทั้งสองกรณี และเทียบกับกับเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 กรณีก็จะเห็นว่าฝั่งท้ายน้ำก็มีปริมาณน้ำที่น้อยกว่าเหนือน้ำ เนื่องจากการมีแกนช่วยกันน้ำทำให้น้ำในช่วงก่อนการลดลงนั้นมีค่าน้อยกว่า แต่ผลก็คือว่าไม่แตกต่างกันมากในกรณีนี้ และเมื่อดูแรงดันของน้ำในดินที่บริเวณฐานเขื่อน ในรูปที่ 4.12 จะพบว่าแรงดันน้ำในดินในส่วนหน้าเขื่อนทั้ง 3 กรณีนั้นมีค่าประมาณ 80-100 kPa เมื่อพิจารณาในส่วนท้ายเขื่อนนั้นแรงดันน้ำในดินจะมีค่าลดลงมาจากหน้าเขื่อน อยู่ที่ประมาณ 50 kPa หากแต่ถ้าเมื่อมีแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต ทำให้แรงดันน้ำในดินมีค่าลดลงมากกว่าถึง 40% และสำหรับผลแรงดันน้ำในเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตรมีแนวโน้มและค่าที่ใกล้เคียงกับเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทรุดตัวของเขื่อน (Settlement of Dam)

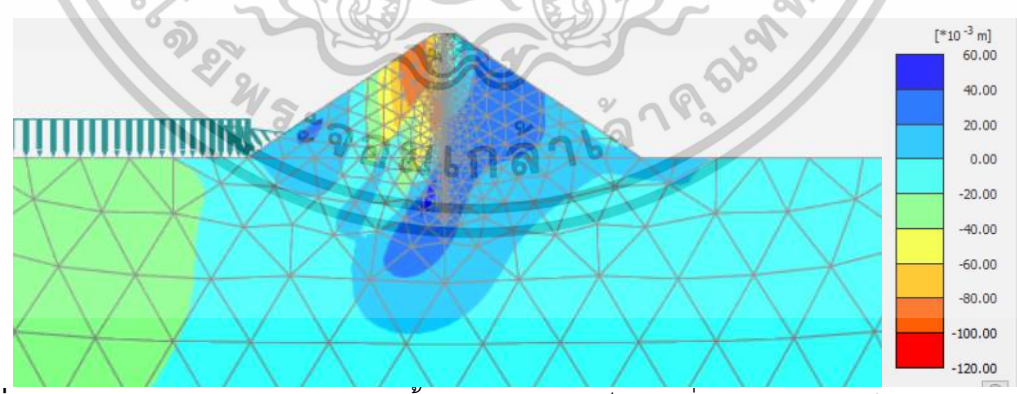
4.2.1 การทรุดตัวเมื่อเพิ่มความหนาแกน ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.13 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนไม่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต

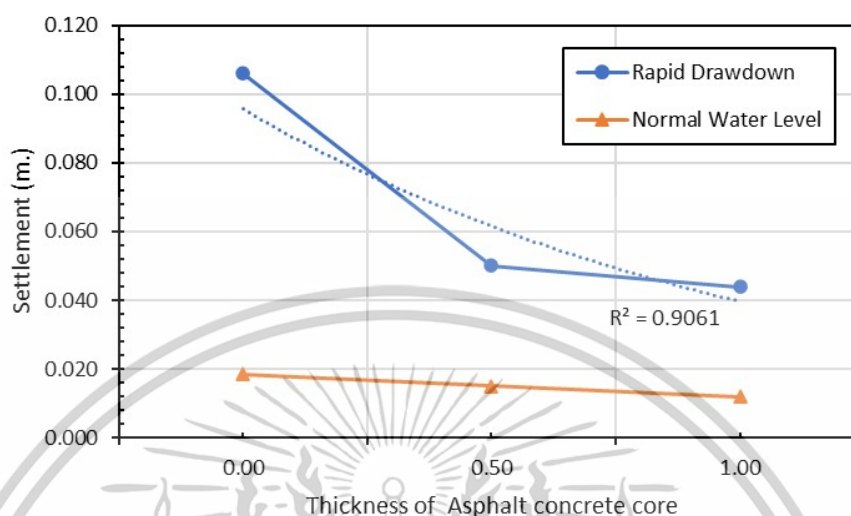


รูปที่ 4.14 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต0.5 เมตร



รูปที่ 4.15 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต1.0 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

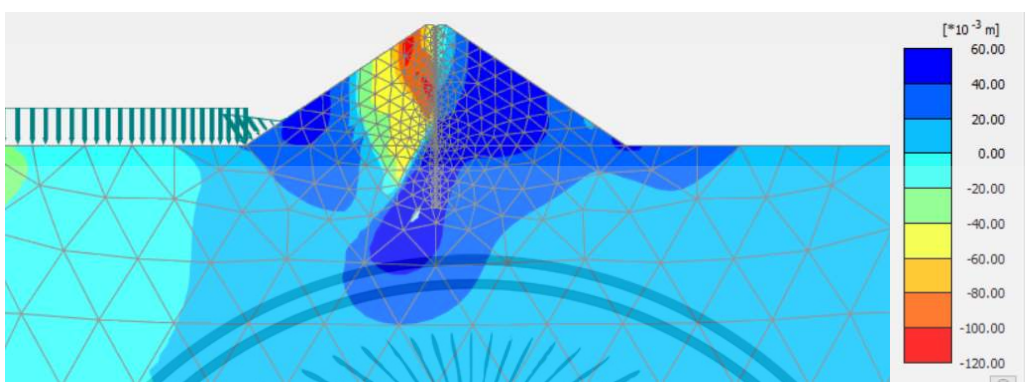


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของสันเขื่อนกับความหนาของแกนที่ระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

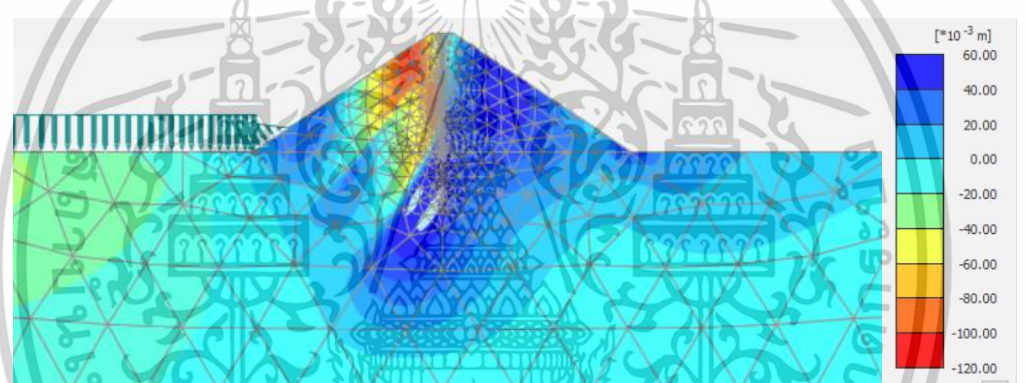
จากรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15 แสดงผลเส้นชั้นการทรุดตัวของเขื่อนความลาดชัน 1:1.5 ทั้งเขื่อนที่ไม่มีแกนแอสฟัลต์ เขื่อนที่แกนแอสฟัลต์ความหนา 0.5 เมตรและเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตร ตามลำดับที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว พบว่าเขื่อนทั้ง 3 กรณีทรุดตัวบริเวณสันเขื่อน และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 ที่มีการพิจารณาผลที่ระดับน้ำกักเก็บปกติร่วมด้วยพบว่า ที่ระดับน้ำกักเก็บปกติเขื่อนทั้งเขื่อนที่ไม่มีแกนแอสฟัลต์ เขื่อนที่แกนแอสฟัลต์ความหนา 0.5 เมตรและเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตรเกิดการทรุดตัวบริเวณสันเขื่อนไม่ต่างกันมากอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 เซนติเมตร ในขณะที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วนั้นเขื่อนกรณีที่ไม่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตทรุดตัวถึงประมาณ 10.6 เซนติเมตร เขื่อนที่แกนแอสฟัลต์ความหนา 0.5 เมตรทรุดตัว 5 เซนติเมตรลดลงจากรณีที่ไม่มีแกน 52.83% และเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 1.0 เมตรทรุดตัว 4 เซนติเมตรลดลงจากรณีมีแกน 0.5 เมตร 20% สังเกตได้ว่าการที่เขื่อนไม่มีแกนทรุดตัวมากกว่าเขื่อนที่มีแกนอย่างชัดเจนและเขื่อนที่มีแกนหนา 0.5 เมตรทรุดตัวมากกว่าเขื่อนที่มีแกนหนา 1.0 เมตรเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อความหนาของแกนแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ในการช่วยรับการกระจายของแรงมากขึ้น แกนจะสามารถรับแรงดันจากน้ำและแรงจากดินได้มากขึ้นด้วย ซึ่งการกระจายแรงจะช่วยลด stress ช่วยให้การทรุดตัวในเขื่อนลดลงได้ ซึ่งระหว่างเขื่อนที่แกนหนา 0.5 เมตรถึง 1.0 เมตรการลดของการทรุดตัวของเขื่อนเล็กน้อยเนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตทำหน้าที่กั้นน้ำผ่านมากกว่าการทำหน้าที่อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

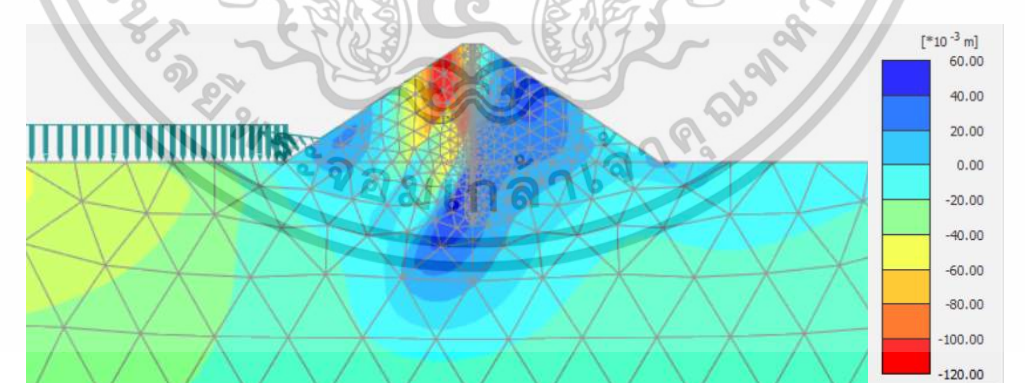
4.2.2 การทรุดตัวเมื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.17 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-1

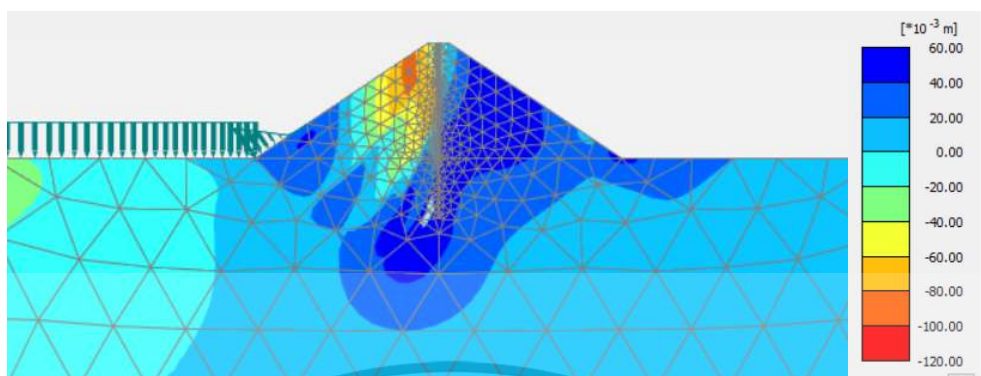


รูปที่ 4.18 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-2

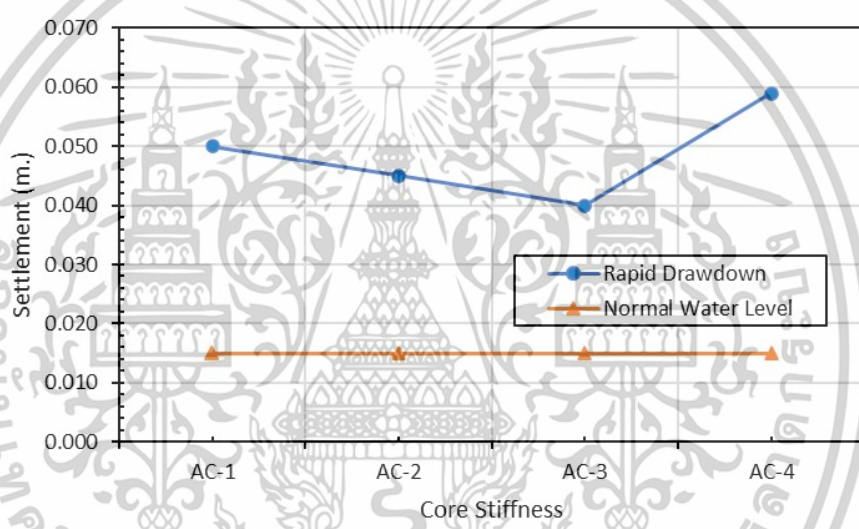


รูปที่ 4.19 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 Settlement Contour ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วของเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-4



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของสันเขื่อนกับความแข็งของแกนที่ระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

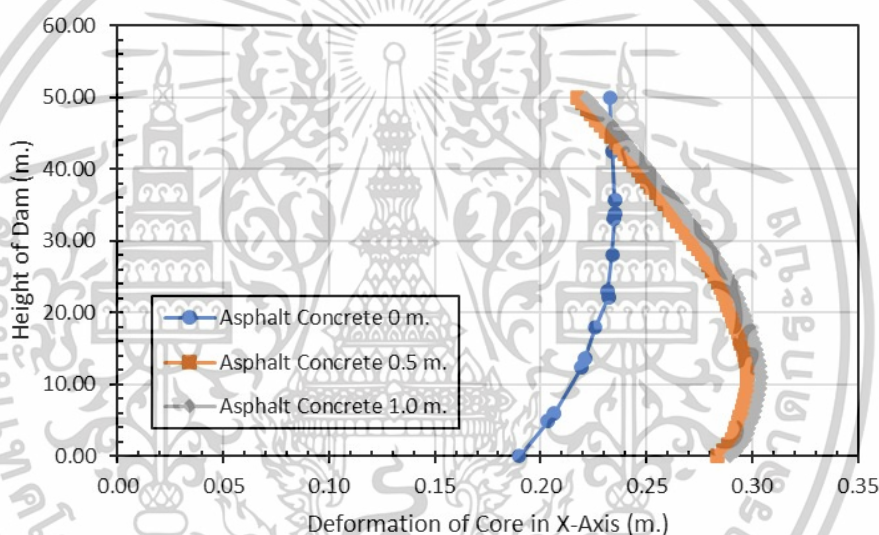
จากรูปที่ 4.17 4.18 4.19 และ 4.20 แสดงผลเส้นชั้นการทรุดตัวของเขื่อนความลาดชัน 1:1.5 ทั้งเขื่อนแกนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-1 AC-2 AC-3 และ AC-4 ตามลำดับ ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว พบว่าเขื่อนทั้ง 4 กรณีทรุดตัวบริเวณสันเขื่อน และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.21 ที่มีการพิจารณาผลที่ระดับน้ำกักเก็บปกติร่วมด้วยพบว่า ที่ระดับน้ำกักเก็บปกติเขื่อนทั้งเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง AC-1 AC-2 AC-3 และ AC-4 เกิดการทรุดตัวบริเวณสันเขื่อนไม่ต่างกันมากอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 เซนติเมตร ในขณะที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วกรณี AC-1 ทรุดตัวประมาณ 5 เซนติเมตร กรณี AC-2 ทรุดตัวประมาณ 4.5 เซนติเมตร กรณี AC-3 ทรุดตัวประมาณ 5 เซนติเมตร และกรณี AC-4 ทรุดตัวประมาณ 5.9 เซนติเมตร และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.21 พบว่าการมีความแข็งแกนที่อ่อนก็ส่งผลให้มีการทรุดตั้งที่สูงขณะที่ความแข็งแกนสูงก็มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรุดตัวที่สูงหมายความว่าความแข็งแรงที่เหมาะสมส่งผลให้การทรุดตัวต่ำสุดเนื่องจากแกนที่มีความแข็งสูงจะมีการรับแรงดันจากน้ำและดินได้มาก แต่จะเกิดแรงเฉือนสูงที่บริเวณรอยต่อระหว่างแกนแอสฟัลต์คอนกรีตกับชั้นดินเนื่องจากความแตกต่างของความแข็งแรง ทำให้เกิดการทรุดตัวที่ต่างกัน และเกิดการทรุดตัวที่มาก ขณะที่แกนที่มีความแข็งต่ำจะมีความต้านทานต่อแรงกระทำต่ำทำให้เมื่อมีแรงดันน้ำมากระทำจึงเกิดการทรุดตัวที่สูงได้เช่นเดียวกัน

4.3 การเคลื่อนตัวของแกนเขื่อน (Core Deformation)

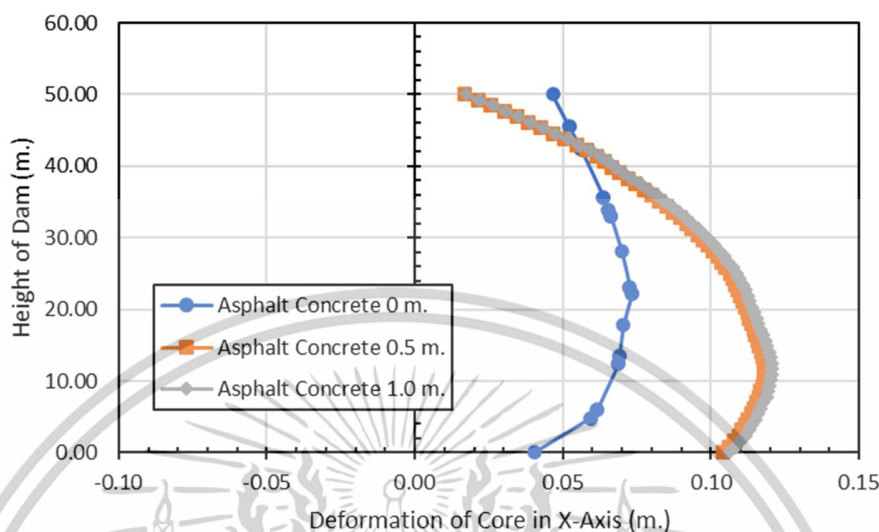
4.3.1 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความหนาแกน



รูปที่ 4.22 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความหนาแกนที่ระดับกักเก็บปกติ

จากรูปที่ 4.22 แสดงการเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความหนาแกนที่ระดับกักเก็บปกติ พบว่าเขื่อนที่ไม่มีแกนมีการเคลื่อนตัวตรงกลางเขื่อนน้อยที่สุด 23 เซนติเมตรเมื่อเทียบกับกรณีที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 กรณีเนื่องจากเขื่อนไม่มีแกนในตรงกลางเขื่อนเป็นวัสดุดินถมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันกับดินข้างเคียง ขณะที่เขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตวัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับดินและมีค่าความแข็งต่างจากดินทำให้เกิดการเคลื่อนตัวมากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบเขื่อนที่มีแกนหนา 0.5 เมตรเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุด 30 เซนติเมตรและเขื่อนที่มีแกนหนา 1.0 เมตรเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุด 30.5 เซนติเมตรซึ่งต่างกันเพียงเล็กน้อย เขื่อนที่มีแกนหนา 1.0 เมตรสามารถลดการเคลื่อนตัวได้เพียง 1.64% เมื่อเทียบกับเขื่อนที่มีแกนหนา 0.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

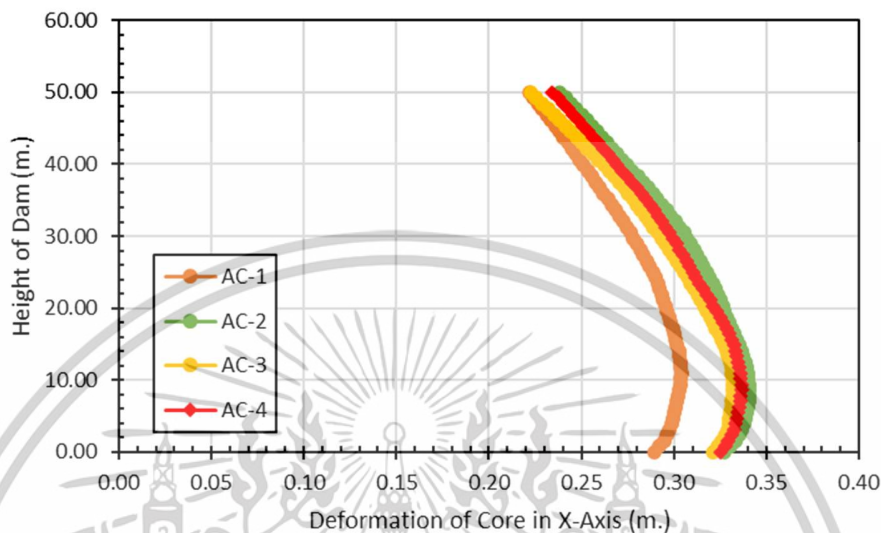


รูปที่ 4.23 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความหนาแกนที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 4.23 แสดงการเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความหนาแกนที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว พบว่าเขื่อนที่ไม่มีแกนมีการเคลื่อนตัวตรงกลางเขื่อนน้อยที่สุด 7.5 เซนติเมตรเมื่อเทียบกับกรณีที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 กรณีเนื่องจากเขื่อนไม่มีแกนในตรงกลางเขื่อนเป็นวัสดุดินถมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันกับดินข้างเคียง ขณะที่เขื่อนที่แกนแอสฟัลต์คอนกรีตวัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับดินและมีค่าความแข็งต่างจากดินทำให้เกิดการเคลื่อนตัวมากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบเขื่อนที่มีแกนหนา 0.5 เมตรเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุด 12 เซนติเมตรและเขื่อนที่มีแกนหนา 1.0 เมตรเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุด 12.5 เซนติเมตร ซึ่งต่างกันเพียงเล็กน้อย เขื่อนที่มีแกนหนา 1.0 เมตรสามารถลดการเคลื่อนตัวได้ 4% เมื่อเทียบกับเขื่อนที่มีแกนหนา 0.5 เมตร เนื่องจากการเพิ่มความหนาแกนส่งผลให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสูงขึ้นซึ่งช่วยให้สามารถลดการเคลื่อนตัวของแกนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

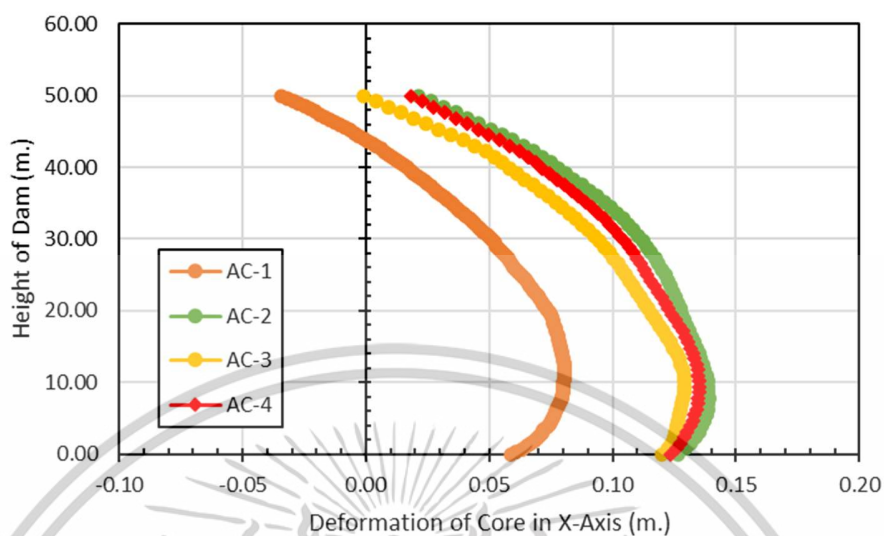
4.3.2 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความแข็งแกน



รูปที่ 4.24 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความแข็งแกนที่ระดับกักเก็บปกติ

จากรูปที่ 4.24 แสดงการเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความแข็งแกนที่ระดับน้ำกักเก็บปกติ พบว่าเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-2 AC-3 AC-4 มีการเคลื่อนตัวสูงสุดประมาณ 34 เซนติเมตรซึ่งถือว่ามากกว่าจากกรณีที่มีความแข็งแกนต่ำสุด AC-1 ประมาณ 11.76% ซึ่งลักษณะการเคลื่อนตัวของแกนทั้ง 4 กรณีจะเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณความสูงประมาณ 1 ใน 3 ของความสูงแกนเนื่องจากบริเวณส่วนล่างของแกนเขื่อนเป็นจุดที่ต้องรับแรงดันน้ำจากด้านเหนือน้ำ (Upstream) ซึ่งแรงดันน้ำนี้จะสูงขึ้นตามความลึก เนื่องจากน้ำมีน้ำหนักและแรงดันที่เพิ่มขึ้นตามระดับความสูงของน้ำ (Hydrostatic Pressure) ในขณะเดียวกัน ด้านท้ายน้ำ (Downstream) ของแกนเขื่อนมีแรงต้านน้อยกว่า ทำให้เกิดความแตกต่างของความเค้นระหว่างด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำเกิดขึ้นเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของความต่างแรง ส่วนล่างของแกนเขื่อนจะต้องมีการเสียรูปในแนวนอนที่มาก (Horizontal Deformation) เพื่อช่วยลดแรงดันและลดความเค้นที่แตกต่างกันระหว่างสองด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



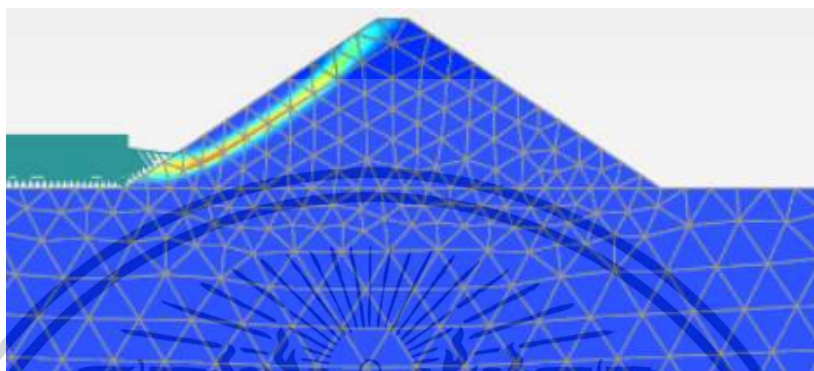
รูปที่ 4.25 การเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความแข็งแกนที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 4.25 แสดงการเคลื่อนตัวของแกนเมื่อเพิ่มความแข็งแกนที่ระดับน้ำก็กเก็บปกติ พบว่า เขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-2 AC-3 AC-4 มีการเคลื่อนตัวสูงสุดประมาณ 14 เซนติเมตรซึ่งถือว่ามากกว่าจากกรณีที่มีความแข็งแกนต่ำสุด AC-1 ประมาณ 42.86% ซึ่งลักษณะการเคลื่อนตัวของแกนทั้ง 4 กรณีเมื่อระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วจะเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณความสูงประมาณ 1 ใน 3 ของความสูงแกนเช่นเดียวกับกรณีระดับน้ำก็กเก็บปกติแต่ค่าการเคลื่อนตัวของแกนจะลดลงเนื่องจากที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วเป็นการลดระดับน้ำจึงถือว่าแรงที่กระทำต่อแกนเขื่อนจึงลดลงไปด้วย

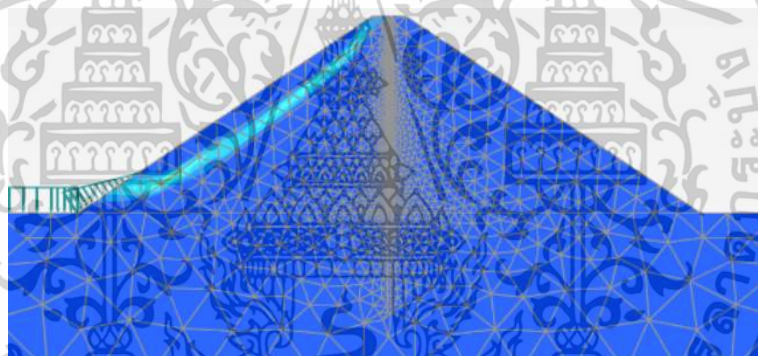
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ระนาบพิบัติ (Failure Plan)

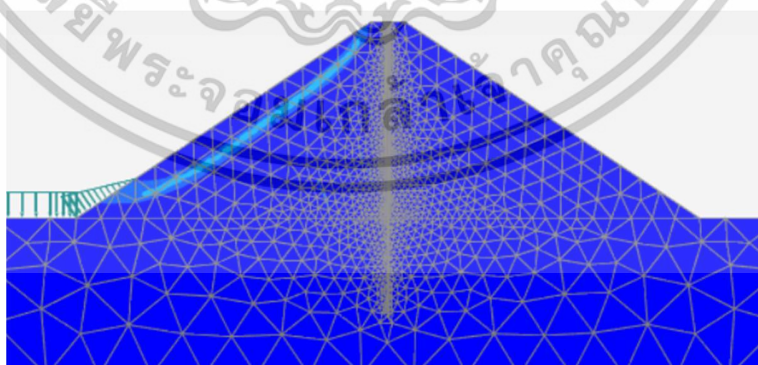
4.4.1 ระนาบพิบัติเมื่อเพิ่มความหนาแกน



รูปที่ 4.26 ระนาบพิบัติของเขื่อนที่ไม่มีแกน ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.27 ระนาบพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต 0.5 เมตร ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.28 ระนาบพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต 1.0 เมตร ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

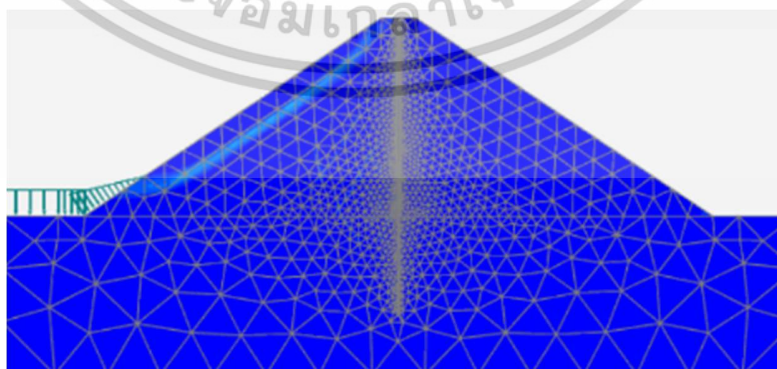
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 4.27 และรูปที่ 4.28 พบว่าระนาบพิบัติของเขื่อนทั้งที่ไม่มีแกนเขื่อนและกรณีมีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.5 เมตร แกนหนา 1.0 เมตร ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วจะเกิดที่ฝั้งเหนือน้ำทั้ง 3 กรณี เนื่องจากการลดลงของน้ำฝั้งเหนือน้ำทำให้แรงดันน้ำจากหน้าเขื่อนลดลง แต่ตัววัสดุถมมีค่าแรงดันน้ำคงเหลือมากกว่าส่วนท้ายเขื่อนเล็กน้อย จึงเกิดระนาบพิบัติฝั้งเหนือน้ำขึ้น และจากทั้ง 3 กรณี พบว่าระนาบพิบัติที่เกิดขึ้นกรณีที่ไม่มีแกนเกิด shear strain สูงสุดบริเวณระนาบพิบัติและ shear strain ค่อยๆลดลงเมื่อเพิ่มความหนาแกน เนื่องจากแกนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนามากขึ้น จะช่วยต้านทานแรงเฉือนได้ดีขึ้น เนื่องจากแกนแอสฟัลต์คอนกรีตที่หนาจะช่วยกระจายแรงดันน้ำและแรงภายในเขื่อนออกไปยังส่วนอื่น ๆ ของเขื่อนทำให้แรงเฉือนที่กระทำบนระนาบพิบัติลดลง เนื่องจากแรงถูกกระจายไปยังพื้นที่กว้างขึ้น ทำให้ช่วยลดแรงเฉือนกระทำบนระนาบพิบัติ และลดการเสียรูป shear strain ลงได้ ซึ่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแกนโดยกรณีที่ไม่แกน แกนหนา 0.5 เมตร และแกนหนา 1.0 เมตร มีอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.356 1.435 และ 1.438 ตามลำดับ

4.4.2 ระนาบพิบัติเมื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง

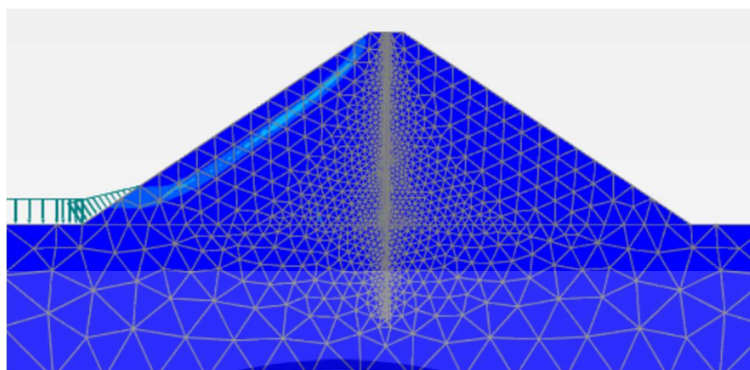


รูปที่ 4.29 ระนาบพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-1 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

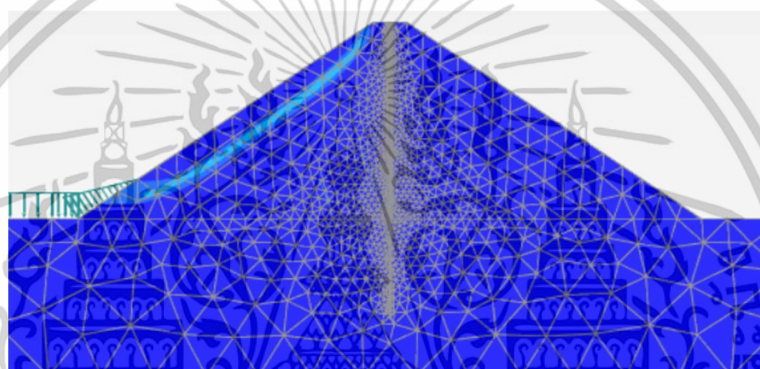


รูปที่ 4.30 ระนาบพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีต AC-2 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ระบายพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตAC-3 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.32 ระบายพิบัติของเขื่อนที่มีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตAC-4 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 4.29 4.30 4.31 และรูปที่ 4.32 พบว่าระบายพิบัติของเขื่อนที่มีความแข็งของแกนเพิ่มขึ้นคือ AC-1 AC-2 AC-3 และ AC-4 ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วจะเกิดที่ฝั่งเหนือน้ำทั้ง 4 กรณี เช่นเดียวกับกรณีเพิ่มความหนาแกน และจากทั้ง 4 กรณีพบว่าระบายพิบัติที่เกิดขึ้นกรณี AC-1 ความแข็งต่ำสุดเกิด shear strain ต่ำสุดบริเวณระบายพิบัติและ shear strain ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความแข็งแกน แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความแข็งเพิ่มขึ้น จะมีความสามารถในการรับแรงอัดมากขึ้น แต่ความยืดหยุ่น (Ductility) จะลดลง ทำให้แรงที่กระทำบนเขื่อนถูกส่งไปยังส่วนที่อ่อนกว่าของเขื่อน เช่น ดินหรือวัสดุรองรับอื่นส่งผลให้แรงเฉือนสูงขึ้นบนระบายพิบัติที่เป็นจุดอ่อน ซึ่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความแข็งแกน เมื่อเพิ่มความแข็งแกนโดยกรณี AC-1 AC-2 AC-3 และ AC-4 มีอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.435 1.426 1.404 และ 1.382 ตามลำดับ

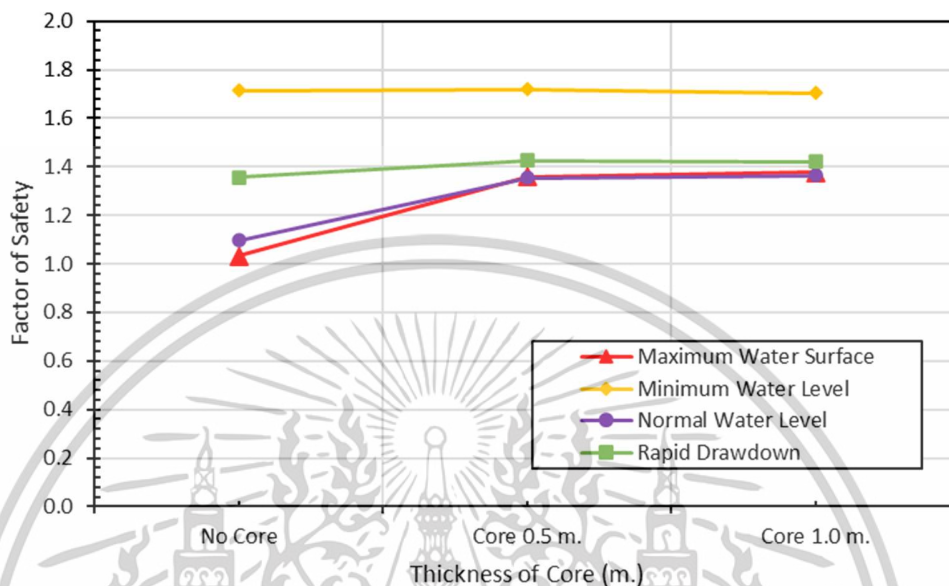
4.5 อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety)

ตารางที่ 4.1 สรุปอัตราส่วนความปลอดภัย

	Factor of Safety					
	Slope					
	1 : 1.5					
	core stiffness					
	No core	AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	AC-1
	core thickness (m.)					
	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
End of Construction	1.786	1.764	1.681	1.667	1.501	1.741
Minimum Water level	1.714	1.719	1.633	1.639	1.665	1.704
Normal water level	1.096	1.355	1.286	1.274	1.280	1.363
Maximum Water surface	1.078	1.229	1.175	1.149	1.190	1.215
Rapid drawdown	1.356	1.435	1.426	1.404	1.382	1.438
Slow drawdown	1.504	1.591	1.577	1.588	1.582	1.576

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

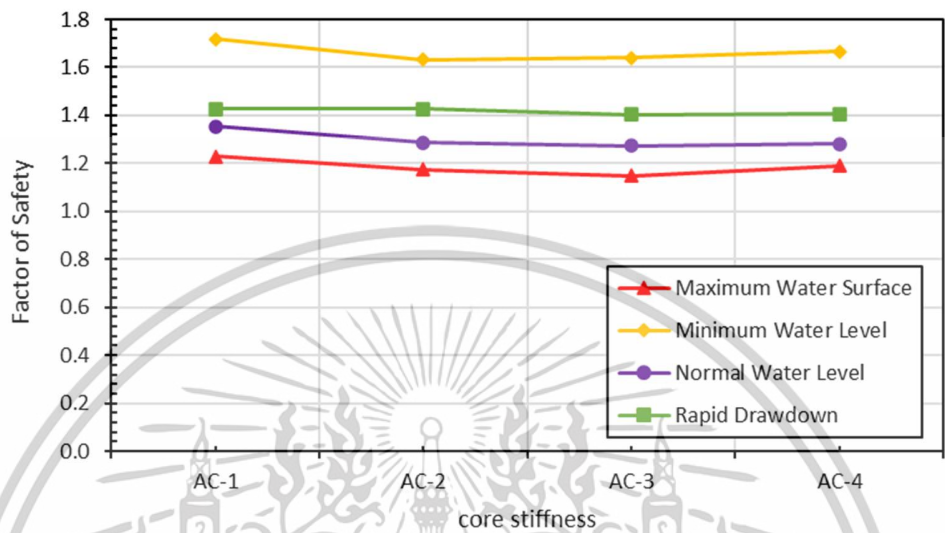
4.5.1 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อเพิ่มความหนาแกนแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับความหนาของแกนเขื่อนที่ระดับน้ำการใช้งานต่างๆ

จากรูปที่ 4.33 เมื่อเปรียบเทียบกรณีเขื่อนไม่มีแกนกับเขื่อนมีแกนหนา 0.5 เมตรที่ระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำกักเก็บสูงสุดพบว่าเขื่อนที่มีแกนหนา 0.5 เมตร ให้อัตราส่วนความปลอดภัยสูงขึ้นถึง 23.63% และ 14.01% ตามลำดับ ขณะที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วและระดับน้ำกักเก็บปกตินั้นการเพิ่มความหนาแกนจากไม่มีแกนไปแกนหนา 0.5 เมตรมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยมากเช่นเดียวกับกรณีเพิ่มความหนาแกนจาก 0.5 เมตรไปเป็น 1.0 เมตรเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยมากในทุกกรณีระดับน้ำการใช้งานหมายความว่า การเพิ่มความหนาแกนจาก 0.5 เมตรไปเป็น 1.0 เมตรไม่มีความจำเป็น

4.5.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อเพิ่มความแข็งของแกนเขื่อน



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับความแข็งของแกนเขื่อนที่ระดับน้ำการใช้งานต่างๆ

จากรูปที่ 4.34 ที่ระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดการเพิ่มความแข็งแกนจาก AC-1 AC-2 AC-3 และ AC-4 ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความปลอดภัยอย่างมีนัยสำคัญโดยอัตราส่วนของทุกกรณีของความแข็งแกนอยู่ประมาณ 1.6 -1.75 ขณะที่ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด ระดับน้ำกักเก็บปกติ และระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือการเพิ่มความแข็งแกนไม่ช่วยให้มีการเพิ่มของอัตราส่วนความปลอดภัยโดยอัตราส่วนความปลอดภัยของ 3 ระดับน้ำและความแข็งแกน 4 กรณีจะอยู่ระหว่างประมาณ 1.200 – 1.400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาความหนาแกน(Core Thickness)และความแข็งแกน(Core Stiffness)ที่แตกต่างกัน ของเชือกความลาดชัน 1:1.5 ภายใต้สถานการณ์เมื่อการก่อสร้างแล้วเสร็จ ภายใต้ระดับน้ำกักเก็บปกติ ระดับน้ำกักเก็บสูงสุด ระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดและระดับน้ำผันผวนอย่างรุนแรง ซึ่งรวมถึงสภาวะระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วและช้า เพื่อศึกษาผลของแรงดันน้ำ การทรุดตัวของสันเขื่อน การเคลื่อนตัวของแกน ระบายพิบัติ และอัตราส่วนความปลอดภัย สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

กรณีการเพิ่มความหนาแกน

1. การมีแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุที่บดน้ำช่วยให้ น้ำไม่ไหลผ่านตัวเขื่อนโดยตรง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของเขื่อนได้และการเพิ่มความหนาแกนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำที่ตำแหน่งเดียวกัน
2. การมีแกนแอสฟัลต์คอนกรีตช่วยให้การทรุดตัวของสันเขื่อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเขื่อนที่ไม่มีแกนแต่การเพิ่มความหนาแกนด้วยตัวเองไม่ช่วยลดการทรุดตัวของสันเขื่อนได้อย่างมีนัยสำคัญ
3. การเพิ่มความหนาแกนไม่ช่วยให้มีการลดลงของการเคลื่อนตัวของแกนอย่างมีนัยสำคัญ
4. เมื่อเพิ่มความหนาแกนช่วยให้เกิดการลดลงในการสะสมของshear strainบริเวณระบายพิบัติลง ซึ่งหมายความว่าเขื่อนมีความปลอดภัยมากขึ้น
5. การเพิ่มความหนาแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีตจาก 0.5 เมตร เป็น 1 เมตรยังไม่ส่งผลต่อการเพิ่มของอัตราส่วนความปลอดภัยอย่างมีนัยสำคัญจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มความหนาแกนเขื่อนจากเหตุผลการประหยัดวัสดุและงบประมาณในการก่อสร้างแกนเขื่อนแอสฟัลต์คอนกรีต

กรณีการเพิ่มความแข็งแกน

1. ความแข็งของแกนเขื่อนที่เหมาะสมช่วยให้เกิดการทรุดตัวที่น้อยที่สุด
2. การเพิ่มความแข็งแกนทำให้มีการเคลื่อนตัวของแกนมากขึ้นแต่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
3. การเพิ่มความแข็งแกนเกิดการเพิ่มขึ้นในการสะสมของshear strainบริเวณระบายพิบัติ ซึ่งมีโอกาสในการพังทลายที่สูงขึ้น
4. การเพิ่มความแข็งซึ่งหมายถึงเปลี่ยนสัดส่วนวัสดุผสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตของแกนเขื่อนไม่ช่วยให้อัตราความปลอดภัยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญดังนั้นการเลือกความแข็งแกนควรเลือกจากความคุ้มค่าและการหาวัสดุผสมได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ทองอินทร์ ภูริพัฒน์. (2555). **ความมั่นคงของเขื่อนดินในประเทศไทย**. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 39(1), 45-52.
- วรารกร ไม้เรียง. 2542. **วิศวกรรมเขื่อนดิน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : (ม.ป.ท.)
- วัชรินทร์ วิทยกุล. 2542. **การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน วิธีมาร์แชลล์**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- A. Vlad, P.T. Jean, V. Pierre. (2010). Design and Construction of Nemiscau-1 Dam, the First Asphalt Core Rockfill Dam in North America. **Canada Dam Association**.
- Akhtarpour, A., and Khodaii, A. (2013). Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams. **Construction and Building Materials**. 41. 319-334.
- Ali, M., Zhao, Y., & Liu, Q. (2024). Seepage performance and deformation behavior of asphalt core in high rockfill dams. **Construction and Building Materials**, 413, 133015.
- ASTM D2487-17: **Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**.
- Bayisa, N. M. (2019). Relative performance evaluation of asphaltic concrete core embankment dam and clay core embankment dam: By Plaxis software application. **American Journal of Science, Engineering and Technology**, 4(1), 18-29.
- Brandl, H. (2009). Performance of Asphalt Concrete Cores in Embankment Dams. **Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Brinkgreve, R. B. J., Swolfs, W. M., & Engin, E. (2018). **Plaxis 2D Reference Manual**. Delft University of Technology.
- Bureau of Reclamation (USBR). (2011). **Design Standards No. 13 – Embankment Dams, Chapter 5: Asphalt Concrete Cores**.
- Cao, W., Wen, L., Li, Y., Liu, Y., Si, Z., & Wu, L. (2024). Influence of difference in deformation modulus between asphalt concrete core and transition layer on core behavior and difference threshold determination. **Computers and Geotechnics**, 169, 106186.
- Cebel, O., & Yildiz, M. (2023). **Evaluation of soil parameters using SPT**. ACA Publishing.
- Chen, L., Li, Y., & Wang, H. (2021). Impact of gradual water level lowering on embankment dam safety. **Journal of Civil Engineering and Management**, 27(8), 590–600.
- Das, B. M. (2010). **Principles of Geotechnical Engineering** (7th ed.). Cengage Learning.
- Fang, C., & Liu, Z. (2011). Stress-strain analysis of Aikou rockfill dam with asphalt-concrete core. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 3(2), 186-192.
- Feizi-Khankandi, S., Ghalandarzadeh, A., Mirghasemi, A. A., and Hoeg, K. (2009). Seismic analysis of the Garmrood embankment dam with asphaltic concrete core. **Soils and Foundations**. 49(2). 153-166.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2017). **Geotechnical Engineering of Dams** (2nd ed.). CRC Press.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. (2014). **Geotechnical Engineering of Dams** (2nd ed.). CRC Press.
- Gilson Company Inc. (2023). **Soil permeability testing methods**. Global Gilson.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2010). **An Introduction to Geotechnical Engineering** (2nd ed.). Pearson.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ICOLD. (2011). Bulletin 132: **Asphalt Concrete Cores for Embankment Dams**. International Commission on Large Dams.
- Jiang, W., Sun, Y., & Chen, D. (2023). Engineering performance of plastic concrete for hydraulic cut-off walls. **Geotextiles and Geomembranes**, 51, 200–211.
- Kaare Hoeg. (1993). **Asphalt Concrete Cores for Embankment Dams**. Billingstad. Norwegian Geotechnical Institute.
- Khalaj, O., Ayati Ahmadi, A., Abedin Nejad, S., Mašek, B., Štadler, C., & Skála, J. (2022). Evaluation of the effect of varying the angle of asphaltic concrete core on the behavior of the Meijaran rockfill dam. **Coatings**, 12(6), 720.
- Khamis, R., Bakhoun, M., & Ali, S. (2023). Soil stiffness behavior under drained and undrained triaxial testing conditions. **E3S Web of Conferences**, 387, 01028.
- Kim, S. J., Lee, M. H., & Park, J. H. (2024). Structural integrity of concrete cores in embankment dams under dynamic loading. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 28(1), 56–67.
- Li, W., Liu, Y., & Zhang, L. (2022). Performance evaluation and monitoring of dam stability after construction. **Journal of Hydraulic Engineering**, 148(4), 04022037.
- Liang, Q., Wang, X., & Chen, Y. (2020). Effects of rapid water level drop on dam structural safety: A case study. **Geotechnical and Geological Engineering**, 38(6), 4335–4347.
- Lombardi, G. (2003). Asphaltic concrete facing and cores for embankment dams. **Hydropower & Dams**, 10(6), 82–90.
- PLAXIS BV. (2021). **PLAXIS 2D Material Models Manual**. Bentley Systems.
- Saxegaard H and Veidekke AS. (2003). Crack self-healing properties of asphalt concrete. Laboratory simulation. **Int J Hydropowers Dams**. 3:106–9.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Seo, J. W., Park, D. W., & Le, T. H. M. (2017). Development of an asphalt concrete mixture for Asphalt Core Rockfill Dam. **Construction and Building Materials**, 140, 301-309.
- Seo, J. W., Park, D. W., and Le, T. H. M. (2017). Development of an asphalt concrete mixture for Asphalt Core Rockfill Dam. **Construction and Building Materials**. 140. 301-309.
- Sun, B., Deng, M., Zhang, S., Wang, C., & Du, M. (2022, May). Seismic performance assessment of high asphalt concrete core rockfill dam considering shorter duration and longer duration. In **Structures** (Vol. 39, pp. 1204-1217). Elsevier.
- Tao, J., Wu, J., & Wang, Q. (2022). Evaluation of rapid reservoir drawdown and its structural consequences for dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, 148(11), 04022089.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). **Soil Mechanics in Engineering Practice** (3rd ed.). Wiley.
- Tschernutter, P., & Kainrath, A. A case study on the deformation behaviour of asphalt concrete core dams (ACRD) with different core inclinations.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2004). **Engineering and Design – Slope Stability** (EM 1110-2-1902).
- U.S. Army Corps of Engineers. (2004). **General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams** (EM 1110-2-2300).
- W. Wang and K. Höeg. (2009). The asphalt core embankment dam: a very competitive alternative. **The 1st International Symposium on Rockfill Dams**.
- Wang, D., Zhang, X., & Liu, Y. (2020). Slow reservoir drawdown and its impact on dam stability. **Environmental Earth Sciences**, 79(6), 178.

- Wang, X., Zhang, X., & Chen, Y. (2023). Seismic performance of dams: Post-construction monitoring and structural evaluation. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 52(3), 1129–1147.
- Xu, H., Liu, F., & Li, Z. (2022). Structural integrity assessment of embankment dams using finite element analysis. **Geotechnical Testing Journal**, 45(5), 1039–1053.
- Zhang, Y., Zhu, Y., Wang, W., Ning, Z., Feng, S., & Höeg, K. 2021. Compressive and tensile stress–strain–strength behavior of asphalt concrete at different temperatures and strain rates. **Construction and Building Materials**. 311. 125362.
- Zhao, Y., Sun, J., & Xie, H. (2023). GPS monitoring for dam settlement and deformation analysis in post-construction phase. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 149(10), 04023085.
- Zhou, C., Zhang, W., & Li, H. (2021). Rapid water level drawdown and its impact on dam stability under emergency conditions. **Engineering Geology**, 287, 106045.
- Zhou, J., Zhang, L., & Li, Z. (2010). Design and analysis of asphalt concrete core in high earth-rockfill dams. **Engineering Geology**, 114(3–4), 217–225.
- Zhou, Y., & Chen, S. (2020). Behavior of Asphalt Concrete Core in High Embankment Dams: A Numerical Study. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE.
- Zhou, Y., Zhang, X., & Liu, Z. (2022). Gradual drawdown strategy for reservoir management and dam safety evaluation. **Water Resources Management**, 36(3), 967–980.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ฉนกร อบเชย
วัน เดือน ปีเกิด	10 เมษายน 2543
ที่อยู่	5/1 หมู่ 2 ต.พรานกระต่าย อ.พรานกระต่าย จ.กำแพงเพชร 62110
ประวัติการศึกษา	
2559-2562	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนกำแพงเพชรพิทยาคม
2562-2566	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (เกียรตินิยมอันดับ 1) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
2567	“ผลกระทบของมุลาดและความหนาแน่นเชื่อมต่อแรงดันน้ำและเสียรภาพ ของเขื่อน แกนแอสฟัลต์คอนกรีต” และนำเสนอผลงานใน “การ ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29” ระหว่างวันที่ 29-31 พฤษภาคม 2567 ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติ ดิเอ็มเพลส จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้