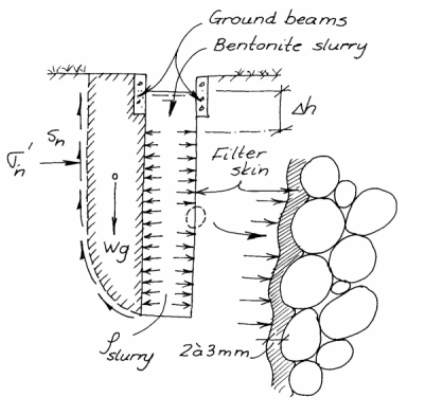
กำแพงใต้ดิน
SLURRY WALL

รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กำแพงใต้ดิน (SLURRY WALL)

หมายถึง เทคนิคการก่อสร้าง ผนัง กำแพง หรือฐานรากใต้ดิน ซึ่งมีการขุดลงในชั้นดินเป็นร่องลึก โดยมีน้ำโคลนวิทยาศาสตร์ (Bentonite Slurry) หล่ออยู่ในร่องขุดตลอดเวลา เพื่อพยุงมิให้ร่องขุดพังทลาย ป้องกันการไหลของน้ำใต้ดินเข้ามาในร่องขุด และเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อดินโดยรอบร่องขุดด้วยการที่น้ำโคลนแทรกเข้าไปเชื่อมยึดเม็ดดิน เมื่อทำการขุดถึงระดับที่ต้องการแล้ว ทำความสะอาดก้นหลุมโดยการดูดตะกอนออก แล้วจึงเทวัสดุถมกลับที่ต้องการ เช่น คอนกรีต พลาสติกคอนกรีต ดิน-เบนโทไนท์ หรืออื่นๆ ที่มีคุณสมบัติตามวัตถุประสงค์การใช้งานลงไปในร่องขุดจนเต็ม โดยการไล่ที่น้ำโคลนขึ้นมา

Bentonite Slurry for Trench Stabilization



ในบางครั้งจะใช้ชื่ออื่นๆ เรียกกัน ซึ่งมีความหมายเฉพาะเจาะจงขึ้น เช่น

- "Diaphragm Wall" หมายถึง ผนังคอนกรีตทำหน้าที่รับแรงด้านข้าง และแรงในแนวดิ่งเป็นหลัก

- "Cutoff Wall" หมายถึง กำแพงทึบน้ำที่ปิดกันการไหลซึมผ่านของน้ำใต้เขื่อน

- "Barrette Wall" หมายถึง กำแพงกันดินในส่วนที่หยั่งลึกลงถึงชั้นดินดานเพื่อถ่ายน้ำหนักจากสิ่งก่อสร้าง ทำหน้าที่คล้ายเสาเข็มด้วย

ความเป็นมาของ SLURRY WALL

ค.ศ. 1914 - เริ่มมีการก่อสร้าง Slurry Wall ซึ่งพัฒนามาจากการเจาะสำรวจน้ำมัน โดยการนำเอาน้ำโคลนมาใช้ในการรักษาเสถียรภาพของร่องขุด แต่มักมีปัญหาเรื่องตะกอนก้นหลุมมาก เป็นผลเสียต่อการทำงาน

ค.ศ. 1929 - นำเอา Bentonite มาใช้แทนดินเหนียวธรรมดา และได้มีการพัฒนาการใช้งานของ Bentonite Slurry อย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1940 เป็นต้นมา (Xanthakos, 1979)

ค.ศ. 1948 - มีการประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างกำแพงทึบน้ำควบคุมน้ำเสีย Terminal Island ในแคลิฟอร์เนีย สร้างกำแพงทึบน้ำควบคุมการทรุดตัวและไหลออกของน้ำใต้ดินเมืองเวนิส การก่อสร้างรถไฟใต้ดินในกรุงลอนดอน และประเทศเบลเยี่ยม

ค.ศ. 1959 - ในประเทศญี่ปุ่นมีการนำมาใช้งานครั้งแรก และมีการใช้กันอย่างต่อเนื่องมาปีละประมาณ 200,000 ตารางเมตร ในงานอาคารและชั้นใต้ดิน (Ikuta, 1974)

SLURRY WALL ในประเทศไทย

มีการนำวิธีการของ Slurry Wall มาใช้ครั้งแรกในการก่อสร้างผนังกันดินในการก่อสร้างชั้นใต้ดินของอาคารธนาคารกรุงเทพฯ จำกัด สำนักงานใหญ่ ที่ถนนสีลม เมื่อปี พ.ศ. 2520 โดยมีลักษณะเป็นแผง (Panel) ยาวท่อนละ 3-8 เมตร ลึก 14 เมตร ทำหน้าที่เป็นกำแพงกันดินชั่วคราวแทน Sheet pile และขณะเดียวกันส่วนบนของกำแพงได้ใช้เป็นผนังถาวรชั้นใต้ดินด้วย (ประสงค์,2524) ในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน วิธีการนี้ก็นำมาใช้ก่อสร้างปล่องอุโมงค์ (Shaft) สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำประปาในกรุงเทพฯ และหลังจากนั้น สำหรับงานอาคาร โดยเฉพาะการขุดฐานรากและชั้นใต้ดินได้มีการนำเทคนิคของ Slurry Wall มาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น โครงการอาคาร Intertrade ที่ย่านเยาวราช ซึ่งใช้ระบบ Slurry Wall เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดินลึกถึง 6 ชั้น (18 เมตร) ซึ่งนับว่าลึกที่สุดในกรุงเทพฯ จนถึงปัจจุบันนี้

SLURRY WALL ในประเทศไทย

สำหรับในงานเขื่อน Slurry Wall ถูกนำมาใช้ในลักษณะเป็น Cutoff Wall เพื่อปิดกั้นการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินฐานราก โดยมีหน่วยงาน 2 หน่วยงานที่ใช้เทคนิคนี้ คือ

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้ใช้วิธีของ Secant pile หรือเข็มเจาะต่อเนื่องมาใช้ในการก่อสร้าง Upstream cutoff wall ใต้ Faced slab ของเขื่อนเขาแหลม ปิดกั้นลึกลงไปในชั้นหินปูนฐานราก และเขื่อนกักน้ำใต้เขื่อนภูมิพล (After bay dam) เพื่อการสูบกลับน้ำเข้าไปใช้ใหม่โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 5

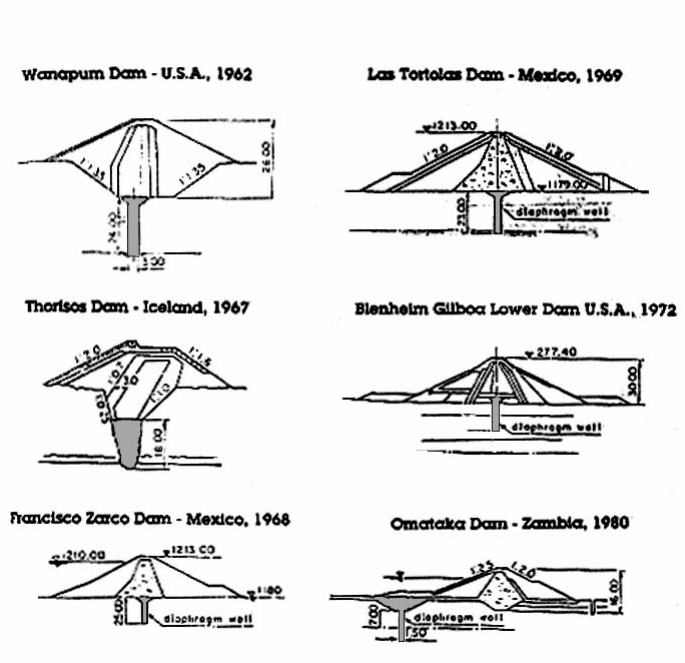
- กรมชลประทานได้มีการนำกำแพงทึบน้ำมาใช้ในงานเขื่อนครั้งแรกในปี พ.ศ. 2520 จนถึงปัจจุบัน 7 โครงการ และกำลังดำเนินการในอนาคตอีก 1 เขื่อน คือ ที่คลองดินแดง จ.นครศรีธรรมราช

การประยุกต์ใช้ Slurry Wall ในงานก่อสร้าง

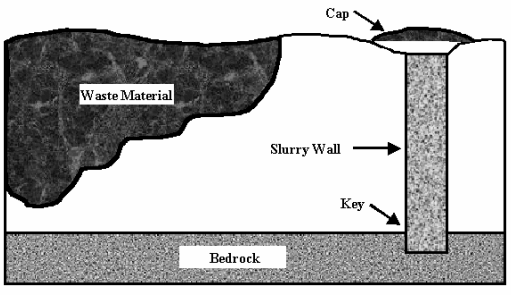
ลักษณะงาน	วัตถุประสงค์หลัก	วัตถุประสงค์รอง
1. งานอาคารและชั้นใต้ดิน	- กำแพงกันดินรับแรงด้านข้าง - ฐานรากระดับลึกรับแรงแนวดิ่ง	- ป้องกันน้ำใต้ดิน
2. งานขุดแล้วกลบของอุโมงค์รถไฟใต้ดิน และสถานี	- กำแพงกันดินรับแรงด้านข้าง - ฐานรากรับโครงสร้าง	- ป้องกันน้ำใต้ดิน - ป้องกันการเคลื่อนตัว
3. งานท่าเรือและอู่แห้ง	- กำแพงกันดินรับแรงด้านข้าง	- ป้องกันน้ำใต้ดิน
4. งานเขื่อน	- กำแพงทึบน้ำปิดกั้นน้ำลอดใต้ฐานเขื่อน	- ป้องกันน้ำใต้ดินในระหว่างก่อสร้าง
5. งานป้องกันการเคลื่อนตัวของมลพิษจากน้ำใต้ดิน	- กำแพงทึบน้ำปิดกั้นการไหล	

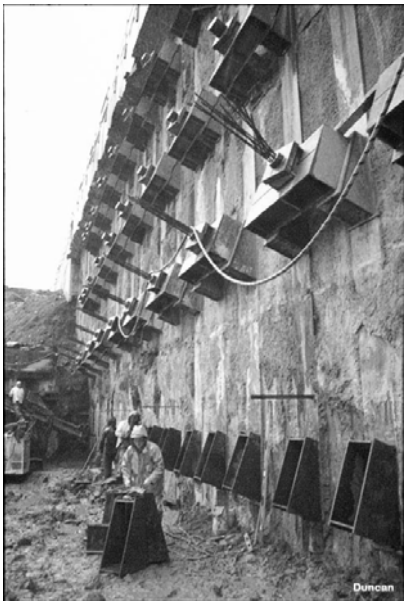
Slurry Wall ที่นำมาใช้ในงานเขื่อนของกรมชลประทาน

ลำดับ	ชื่อโครงการ	ที่ตั้ง	ปี พ.ศ. ที่ก่อสร้างเสร็จ	ลักษณะฐานราก	ประเภทการใช้งาน
1	เขื่อนยางชุม	อ.กุยบุรี จ.ประจวบฯ	2520	กรวดทราย	โครงสร้างถาวร
2	เขื่อนห้วยศาลา	อ.ขุขันธ์ จ.ศรีสะเกษ	2530	ดินตะกอนทราย	โครงสร้างถาวร
3	เขื่อนทับเสลา	อ.ลานสัก จ.อุทัย	2531	ดินตะกอนทราย	โครงสร้างถาวร
4	เขื่อนคลองบึง	อ.เมือง จ.ประจวบฯ	2531	ดินตะกอนกรวดทราย	โครงสร้างถาวร
5	เขื่อนแม่กวง	อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	2535	กรวดทราย	โครงสร้างชั่วคราว
6	เขื่อนมูลบน	อ.ครบุรี จ.นครราชสีมา	2537	ดินตะกอนทราย	โครงสร้างถาวร
7	เขื่อนลำแชะ	อ.ครบุรี จ.นครราชสีมา	2538	ดินตะกอนทราย	โครงสร้างถาวร



TREVI


Cap
Waste Material
Slurry Wall
Key
Bedrock


Duncan

ข้อดี / ข้อด้อย ของการใช้ Slurry Wall

ข้อดี

1. ลดระยะเวลาการก่อสร้าง

ในงานก่อสร้างอาคารที่มีชั้นใต้ดิน สามารถทำการก่อสร้างสองทิศทางพร้อมๆกัน คือ จากบนลงล่าง (TOP - DOWN) สำหรับชั้นใต้ดิน และพร้อมกันนั้น ก็สามารถก่อสร้างจากล่างขึ้นบน (BOTTOM - UP) สำหรับตัวอาคารเหนือดินได้ในเวลาเดียวกัน สำหรับในงานเขื่อน สามารถถมบดอัดตัวเขื่อนไปส่วนหนึ่งได้โดยไม่ต้องรอการขุดและถมร่องแกนก่อน เมื่อมีพื้นที่การก่อสร้างกว้างขึ้น ก็สามารถ Slurry Wall พร้อมกับการบดอัดตัวเขื่อนไปพร้อมๆกันได้

ข้อดี / ข้อด้อย ของการใช้ Slurry Wall

ข้อดี

2. สามารถก่อสร้างใต้ระดับน้ำใต้ดิน

เนื่องจาก Slurry Wall ขณะขุดมีน้ำโคลนวิทยาศาสตร์คอยประคองผนัง และขณะเดียวกันมีความทึบน้ำมากพอที่จะปิดกั้นมิให้น้ำใต้ดินเข้ามาในร่องขุด จึงไม่มีปัญหาที่จะก่อสร้างใต้ระดับน้ำ

3. สามารถก่อสร้างลงไปในระดับลึกมาก

ความมั่นคงของร่องขุด จะไม่มีผลจากความลึก เพราะความหนาแน่นของน้ำโคลนสูงกว่าน้ำใต้ดินอยู่แล้ว เช่น การซ่อมเขื่อน Navajo Dam ในสหรัฐอเมริกา มีการการก่อสร้าง Slurry Wall ลึกถึง 140 เมตร (Soletanche, 1993)

ข้อดี / ข้อด้อย ของการใช้ Slurry Wall

ข้อดี

4. ใช้พื้นที่ก่อสร้างน้อย

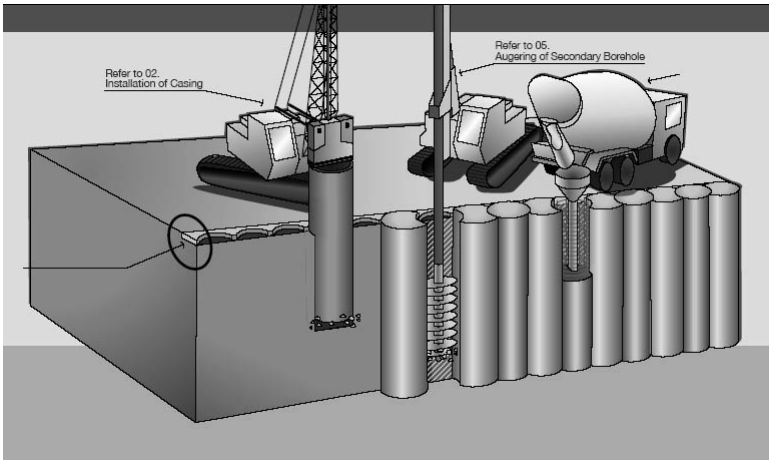
ในขณะก่อสร้าง Slurry Wall จะใช้พื้นที่ทำงานของเครื่องจักรประมาณ 20 เมตรจากแนวร่องขุด และเมื่อการก่อสร้างขุดเปิดฐานรากของอาคารที่กำลังดำเนินอยู่

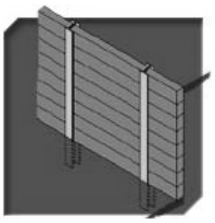
ข้อดี / ข้อด้อย ของการใช้ Slurry Wall

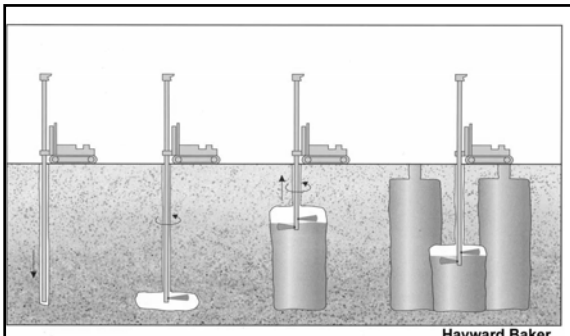
ข้อด้อย

1. ราคาค่อนข้างแพง เมื่อเทียบกับการค้ำยันหลุมขุดประเภทอื่นๆ
2. ผิวผนังของ Slurry Wall ไม่เรียบเนื่องจากต้องใช้ผิวดินเป็นแบบ
3. มีอุปสรรคจากหินลอยก้อนใหญ่ๆขวางแนวร่องขุด
4. เป็นเทคนิคที่ต้องการผู้มีความรู้และประสบการณ์สูงในการควบคุมคุณภาพงาน

Secant Pile Wall



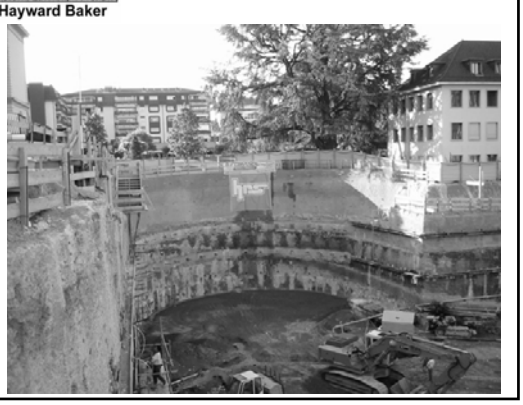




Hayward Baker

JET GROUTING

WALL



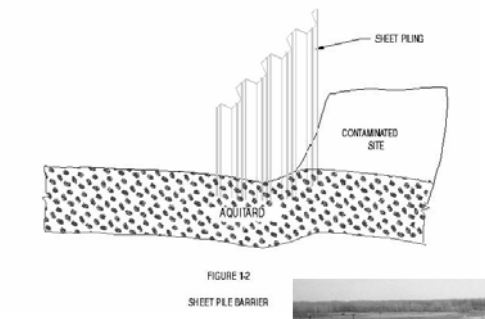
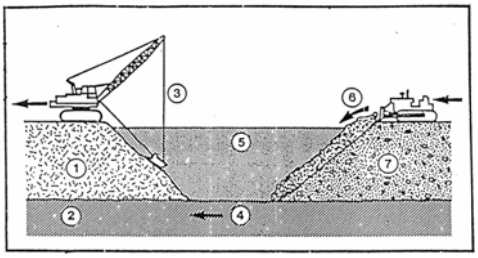


FIGURE 12

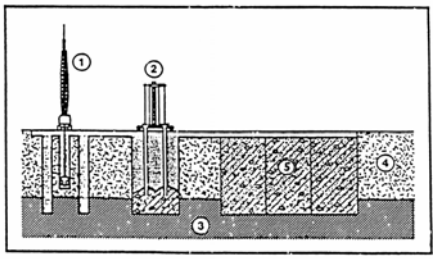
SHEET PILE BARRIER

หลักการออกแบบและ การวิเคราะห์ความมั่นคงของร่องขุด

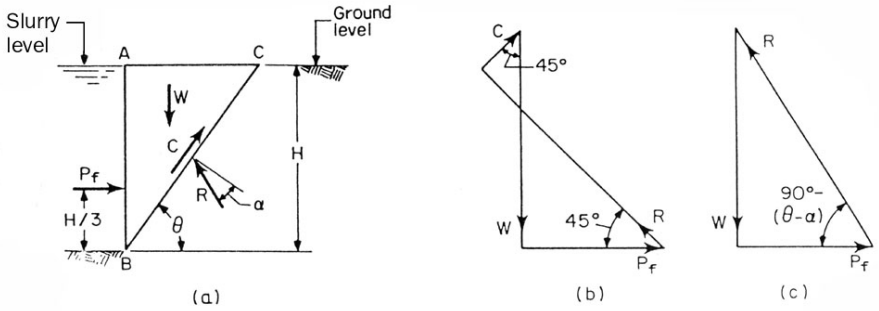
1. การขุดแบบเป็นร่องต่อเนื่อง



2. การขุดแบบเป็นแผงสลับ



ความมั่นคงของร่องขุด Slurry Wall ในดินแห้ง



ความมั่นคงของร่องขุด Slurry Wall ในดินแห้ง ก) แรงที่เกี่ยวข้อง ข) สมดุลย์ของแรงกรณีที่เป็นดินเหนียว ค) สมดุลย์ของแรงกรณีดินทราย

1. การวิเคราะห์ความมั่นคงของร่องขุดแบบเป็นร่องต่อเนื่อง (Open Trenching)

<u>กรณีที่ 1</u> ดินเหนียว ($\phi = 0$) ไม่มีน้ำใต้ดินและระดับโคลนอยู่ที่ผิวดิน

$$F.S. = \frac{4c}{H(\gamma - \gamma_f)}$$

<u>กรณีที่ 2</u> ดินทราย ($c = 0$) ไม่มีน้ำใต้ดิน และระดับน้ำโคลนอยู่ที่ผิวดิน

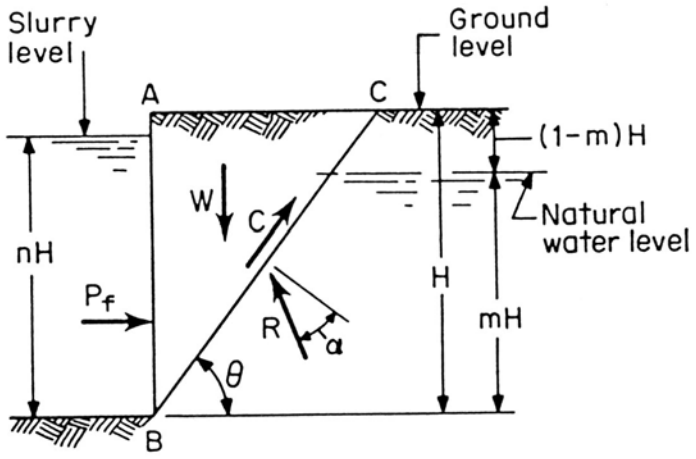
$$F.S. = \frac{2.\sqrt{\gamma.\gamma_f \tan\phi}}{\gamma - \gamma_f}$$

ความหนาแน่นของน้ำโคลนที่ต้องการทำให้เกิดความมั่นคงของหลุมขุด จะต้องมีค่ามากกว่าค่าในสมการ

$$\gamma_f = \geq k_a \gamma_b + \gamma_w$$

k_a = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของดิน = $\tan^2(45 - \frac{\bar{\phi}}{2})$

ความมั่นคงของร่องขุด เมื่อระดับน้ำใต้ดินและระดับน้ำโคลนในร่องขุดเปลี่ยนแปลง



<u>กรณีที่ 3</u> ดินทรายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน และระดับน้ำโคลนในร่องขุด

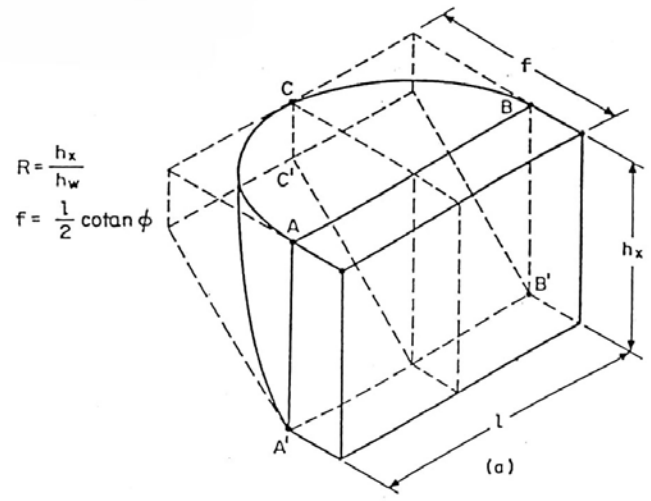
$$\gamma_f = \frac{\gamma(1-m^2)K_a + \gamma_b m^2 K_a + \gamma_w m^2}{n^2}$$

เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ mH จากก้นร่องขุด และระดับน้ำโคลนอยู่ที่ระดับ nH จากก้นร่องขุด

2. การวิเคราะห์ความมั่นคงของร่องขุดแบบขุดเป็นแผงสลับ (Alternate Panels)

Kowalewski (1964) แนะนำว่าร่องขุดที่มีความยาวจำกัด จะเกิดพฤติกรรมแบบโครงสร้างโค้ง (Arching Effect) คล้ายคลึงกับการคำนวณหาหน่วยแรงในแนวดิ่งที่กระทำต่อหลังอุโมงค์เนื่องจากดิน บริเวณด้านข้างจะเกิดการคลาก (yield) และดินบริเวณขอบร่องขุดจะค้ำยันเอาไว้ ซึ่งร่องขุดมีความยาว l ลึก โดยมีระนาบ ABB'A' แทนผนังของร่องขุด และ A'B'C' เป็นระนาบที่เกิดการเคลื่อนพัง

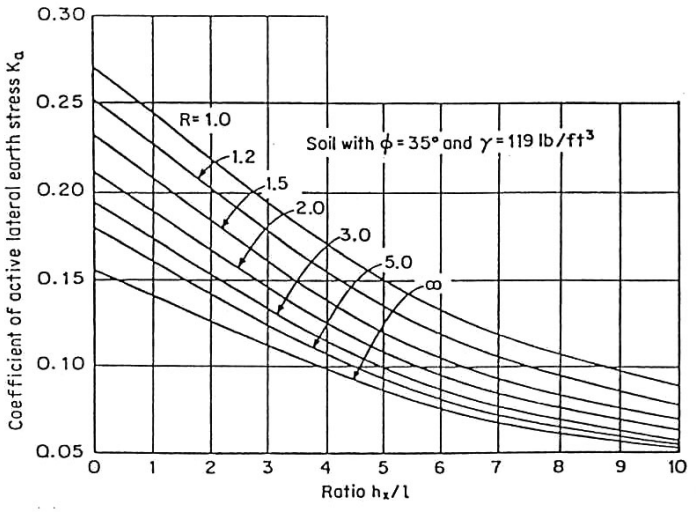
พฤติกรรมแบบโครงสร้างโค้ง (Arching Effect) ของร่องขุดที่มีความยาวจำกัด



2. การวิเคราะห์ความมั่นคงของร่องขุดแบบขุดเป็นแผงสลับ (Alternate Panels)

Piaskowski และ Kowalewski (1965) เสนอโนโมกราฟ สำหรับกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุก (K_a) ซึ่งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความลึกต่อความยาวของร่องขุด เพิ่มขึ้น ดังนั้น แรงดันดินด้านข้างต่อหน่วยความยาวของร่องขุดสั้นจะน้อยกว่าของร่องขุดยาวที่ระดับความลึกเท่ากัน ในขณะเดียวกันวิธีนี้ได้พิจารณาความสูงของระดับน้ำใต้ดิน hw มาร่วมด้วย

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างกับขนาดของร่องขุด



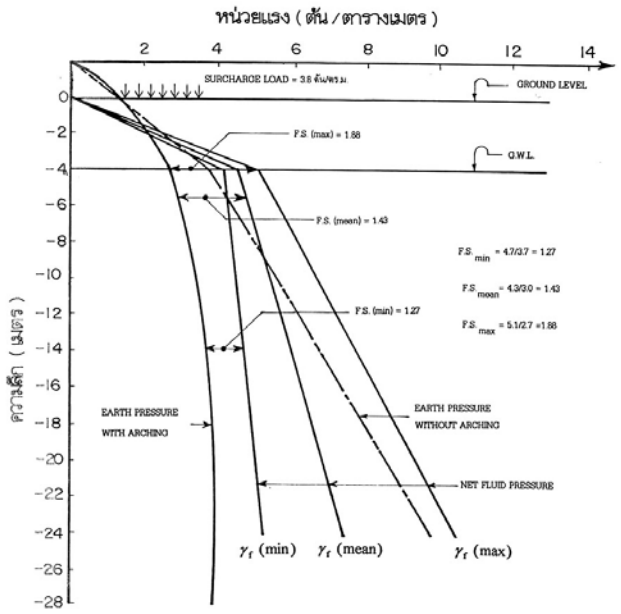
Schneebeli (1964) ได้เสนอวิธีวิเคราะห์ความมั่นคงของร่องขุดในชั้นดินทราย โดยมีผลจากแรงค้ำยันที่ปลายทั้งสองของร่องขุด การคำนวณหาแรงดันดินในแนวราบ ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่ระยะ z คือ

$$\sigma_z = \frac{\gamma.l}{N_\phi \sin 2\phi}\left[1 - e^{-n\sin 2\phi}\right]$$

$$N = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}$$

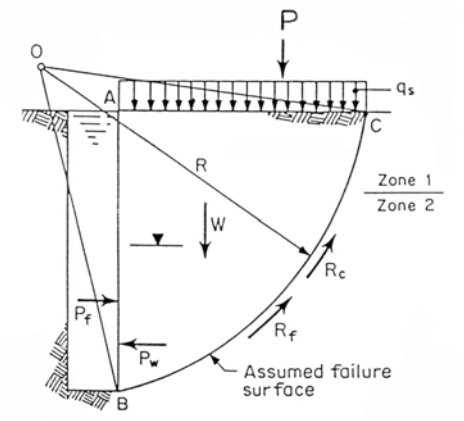
ตัวอย่างการคำนวณของการก่อสร้าง Slurry Wall ของโครงการเขื่อนมูลบนเมื่อกำแพงทึบน้ำแต่ละแผงมีขนาดยาว 7.00 เมตร และกว้าง 1.00 เมตร

ดินฐานรากมี $c = 0$, $\phi = 30^0$, $\gamma' = 0.9$ ตัน/ลบ.ม. ระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าร่องขุด = 4.0 เมตร และมี Surcharge = 3.8 ตัน/ตร.ม.



3. การเคลื่อนพังในลักษณะผิวโค้ง

การวิเคราะห์ความมั่นคง เพื่อหาอัตราส่วนปลอดภัยในกรณีนี้สามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน มาตรฐานที่มีอยู่โดยทั่วไป



วัสดุถมกลับใน Slurry Wall

1. Soil - bentonite หรือ Earth cutoff

2 Cement-bentonite

3 Plastic-Concrete

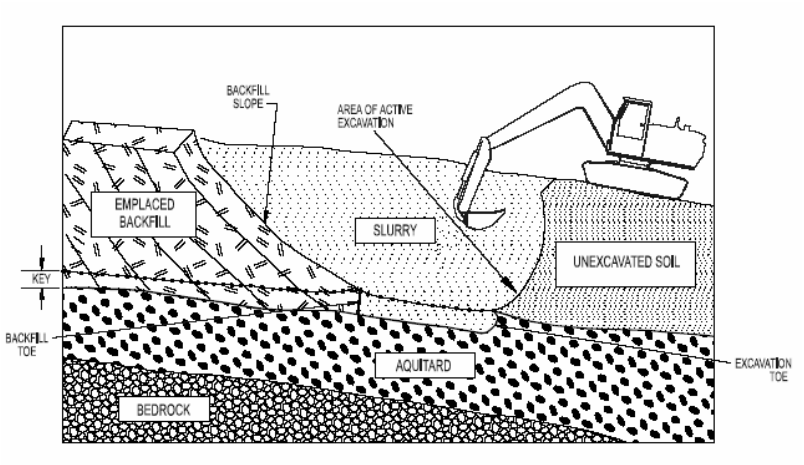
4 Reinforced Concrete

1. Soil - bentonite หรือ Earth cutoff

คือ วัสดุที่เป็นส่วนผสมของดินธรรมชาติที่คัดเลือกแล้วผสมกับเบนโทไนท์ให้มีคุณสมบัติทึบน้ำและยืดหยุ่นได้ดี อาจมีการเพิ่มเติมหรือปรับขนาดคละของวัสดุด้วยกรวดหรือทรายตามสัดส่วนที่เหมาะสม วัสดุที่ดีจะต้องมีส่วนผสมที่มีความข้นเหลว ที่จะเทลงในร่องแล้วไล่ที่น้ำโคลนในร่องขึ้นมาได้ ดังนั้นจึงต้องมี Slump ประมาณ 10-20 ซม. และมีความหนาแน่นอยู่ในระหว่าง 1.70-1.95 ตัน/ลบ.ม.

ข้อดีในการใช้ Soil-bentonite คือ วัสดุที่ใช้ผสมมีราคาถูก และอาจพิจารณาใช้วัสดุที่ขุดขึ้นมาเป็นส่วนผสมได้ด้วย เนื่องจากการขุดมักเป็นร่องต่อเนื่อง การเทวัสดุถมกลับลงในร่องจึงไม่ทำให้เกิดรอยต่อ และมีความยืดหยุ่นสูงโดยที่มีข้อเสียในการควบคุมคุณภาพให้สม่ำเสมอทำได้ยาก

SOIL-BENTONITE SLURRY WALL



2. Cement-bentonite

คือ วัสดุที่เกิดจากการผสมผงซีเมนต์ลงในร่องขุดที่มีน้ำโคลนวิทยาศาสตร์หล่อเลี้ยงอยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่มีส่วนผสมของกรวดทรายผสมอยู่ มักจะต้องก่อสร้างเป็นแผงๆ อาจเรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า *"Solidified bentonite slurry wall"* โดยปกติจะเป็นวัสดุที่ให้ความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 10 ถึง 30 ksc. และต้องมีความยืดหยุ่นมาก เพื่อป้องกันมิให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน

3. Plastic-Concrete

คือ วัสดุที่เกิดจากส่วนผสมของ กรวด ทราย ซีเมนต์ เบนโทไนท์ และน้ำ โดยส่วนผสมต้องออกแบบให้มีคุณสมบัติที่ทึบน้ำ มีความแข็งแรง และยืดหยุ่นได้ตามต้องการ มักจะใช้ในกรณีที่เป็นกำแพงทึบน้ำใต้ดินฐานรากของตัวเขื่อน โดยการขุดและถมกลับเป็นแผงๆ สลับกัน

การควบคุมคุณภาพทำได้ดีกว่า Soil - bentonite เนื่องจากการผสมต้องทำในโรงผสม (Mixing Plant) เทลงในร่องคล้ายคอนกรีต โดยใช้ Trimie pipe จึงวัดปริมาตรได้ละเอียดถูกต้อง

สัดส่วนของการผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร จะประกอบด้วย

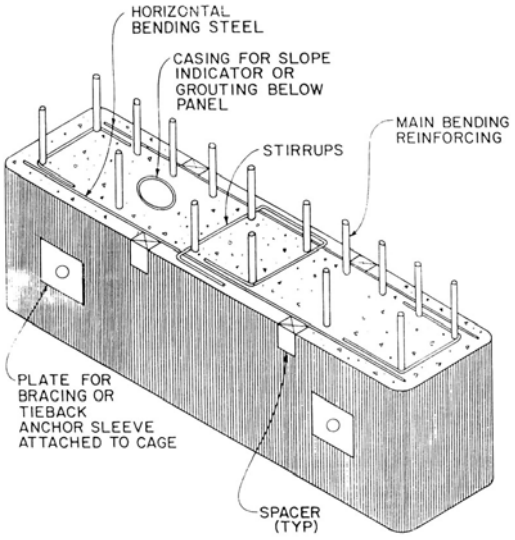
Bentonite Slurry	400 - 500	ลิตร
Cement	100 - 200	กก.
หิน ทราย ที่คัดขนาด	1,500	กก.
C/W Ratio	0.2 - 0.3	

เมื่อผสมแล้วจะให้ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.8 - 2.1 ตัน/ลบ.ม.

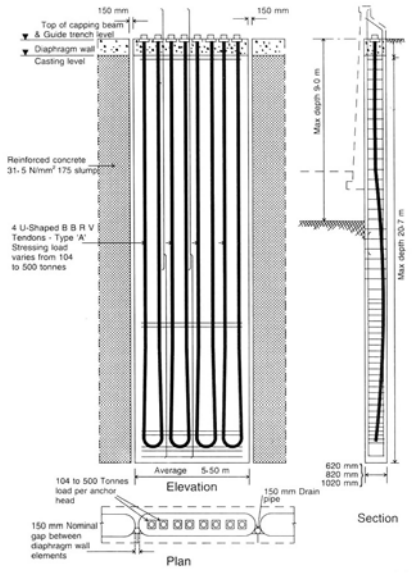
4. Reinforced Concrete

คือ คอนกรีตเสริมเหล็กตามปกติที่ใช้ในงานอาคารหรือเข็มเจาะ ซึ่งใช้ในกรณีที่กำแพงที่ก่อสร้างต้องการทั้ง ความแข็งแรงในการรับแรงดันดิน ความแข็งแรงในการส่งผ่านแรงจากโครงสร้างสู่ดินฐานราก และความทึบน้ำในระหว่างการขุดและใช้งานตามปกติ การเสริมอาจทำได้โดยการผูกเหล็กเป็นกรงแล้วหย่อนลงในร่องขุดเป็นท่อนๆ ตามความยาวของเหล็กเสริม โดยมีระยะทาบที่เพียงพอในบริเวณที่ต้องการเชื่อมต่อกับโครงสร้างภายในอาคาร หรือจุดยึดสมอดิน (Earth Anchor) ก็สามารถจะจัดเตรียมไว้ก่อน สำหรับกำแพงที่ต้องรับโมเมนต์ดัดมากๆ ยังสามารถเพิ่มกำลังได้โดยใช้เสริมเหล็กอัดแรง (Prestressing Tendons)

รายละเอียดการเสริมเหล็กใน Diaphragm Wall



การเสริมเหล็กอัดแรงใน Diaphragm Wall

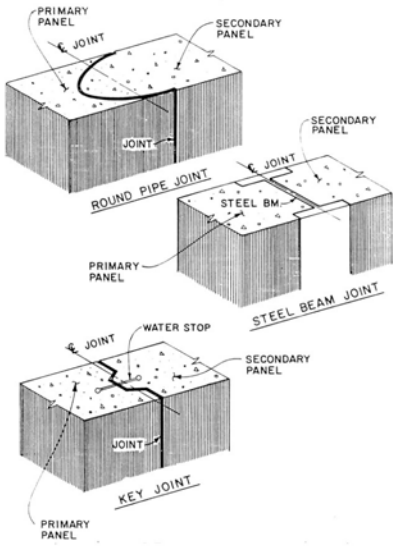


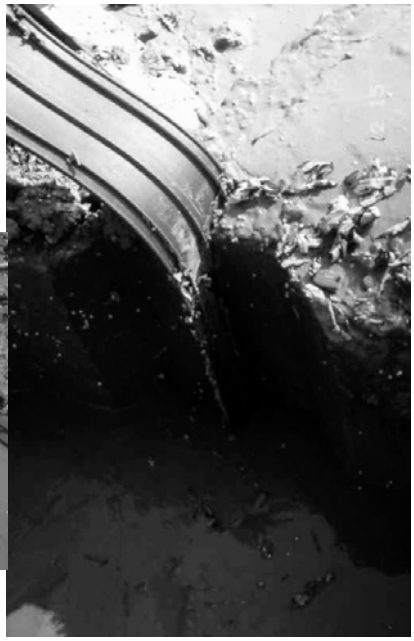
กรณี Diaphragm Wall คอนกรีตที่การปิดกั้นน้ำ มีความจำเป็นจะต้องมีรายละเอียดการเชื่อมต่อระหว่าง Panel เพื่อป้องกันน้ำ ซึ่งนิยมทำด้วยกัน 3 ลักษณะคือ

ก) Round Pipe Joint

ข) Steel Beam Joint

ค) Key Joint



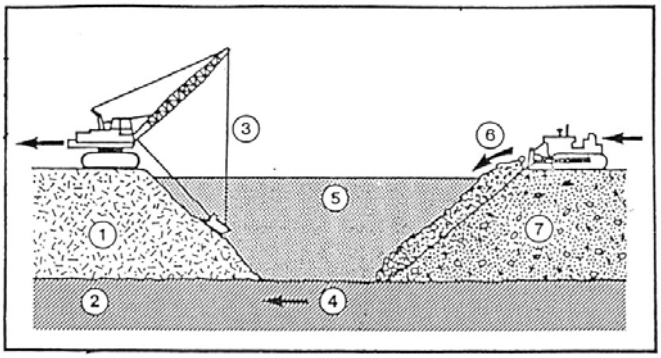


ขั้นตอนการก่อสร้าง Slurry Wall

1. การก่อสร้างแบบขุดเป็นร่องต่อเนื่อง
   (Open trenching)
2. การก่อสร้างแบบขุดเป็นแผงสลับแผง
   (Alternate panels)

1. การก่อสร้างแบบขุดเป็นร่องต่อเนื่อง

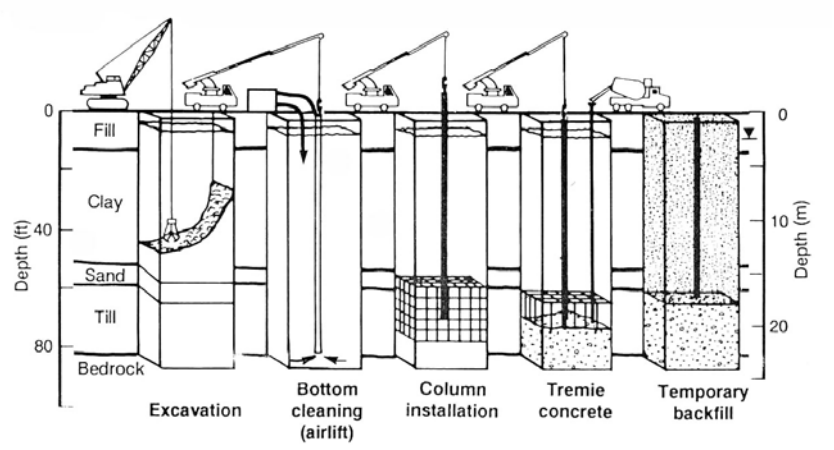
มักใช้กับงานทำกำแพงทึบน้ำดิน-เบนโทไนท์ ในฐานรากเขื่อน



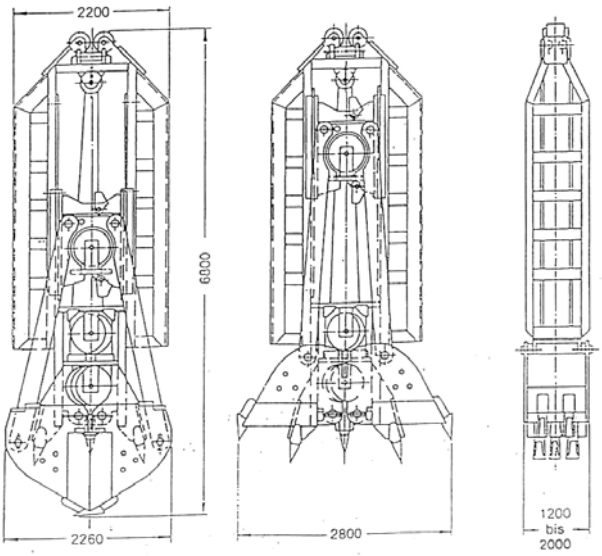
① ดินฐานรากที่จะทำการขุด ② ชั้นฐานรากทึบน้ำ ③ ขุดร่องกำแพงโดยใช้ Drag Line
④ ทิศทางการขุดร่องกำแพง ⑤ น้ำโคลนเบนโทไนท์ ⑥ ถมวัสดุเนื้อกำแพง
⑦ วัสดุเนื้อกำแพงที่ถมเสร็จแล้ว

2. การก่อสร้างแบบขุดเป็นแผงสลับแผง

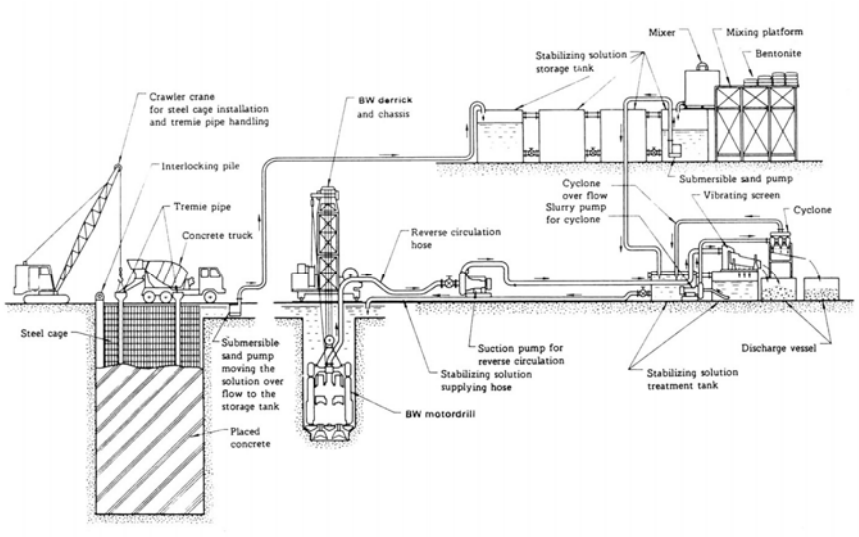
ใช้กับวัสดุถมได้เกือบทุกลักษณะคือ Soil-bentonite, Plastic concrete, Concrete และ Cement-bentonite



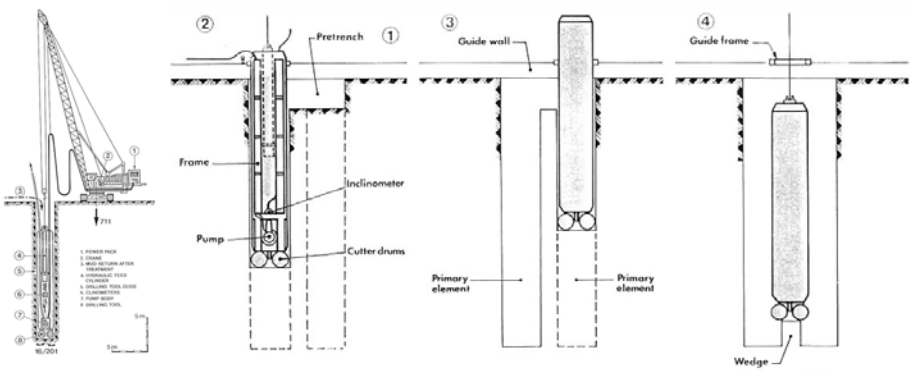
Clamshell สำหรับการขุดร่องกำแพง



ขั้นตอนการกรองทรายและน้ำโคลนมาใช้ใหม่



ปัจจุบันมีการออกแบบเครื่องจักรพิเศษสำหรับขุดที่มีประสิทธิภาพสูงเรียกว่า **"Hydrofraise"** ซึ่งสามารถรักษาแนวดิ่งได้อัตโนมัติโดย Inclinometer และมีหัวกัดดินแข็งหรือหินได้โดยไม่ต้องใช้สิ่วช่วย



การควบคุมคุณภาพระหว่างการก่อสร้าง

การควบคุมคุณภาพของงาน Slurry Wall ควรเริ่มตั้งแต่การออกแบบ โดย

- เลือกข้อกำหนดในการออกแบบที่เหมาะสม
- เลือกวิธีการขุดและวัสดุถมกลับที่สอดคล้องกับความต้องการ
- กำหนดคุณสมบัติหลักของวัสดุ และคุณสมบัติที่จำเป็นเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้ว (End Product Specification)

1. คุณสมบัติหลักของงาน Slurry Wall

<u>คุณสมบัติของน้ำโคลนสำหรับค้ำยันร่องขุด</u>

น้ำโคลนที่ใช้ค้ำยันร่องขุดต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม กล่าวคือ ในระหว่างที่ขุดร่องขุดจะต้องไม่เกิดการเคลื่อนพัง และในขณะที่ถมกลับวัสดุเนื้อกำแพง จะต้องสามารถแทนที่และไล่น้ำโคลนขึ้นมาได้ ในกรณีของเขื่อนมูลบน ได้กำหนดคุณสมบัติของน้ำโคลนในระหว่างที่ทำการขุดและในระหว่างถมกลับ

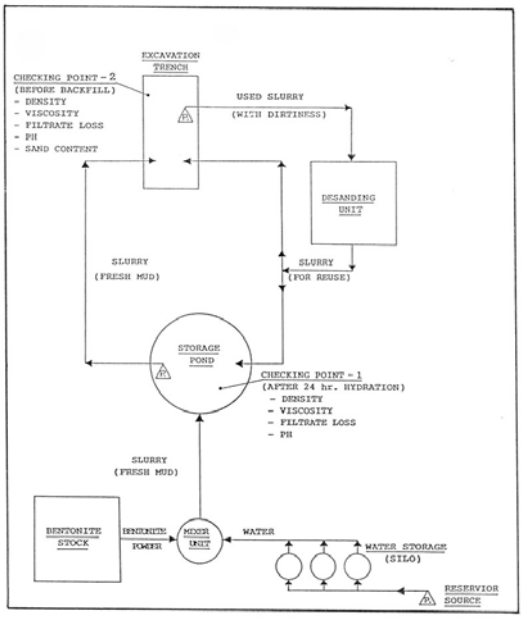
<u>คุณสมบัติของวัสดุเนื้อกำแพง</u>

เนื่องจาก กำแพงทึบน้ำทำหน้าที่ควบคุมการรั่วซึมของน้ำผ่านฐานรากเขื่อนและมีตำแหน่งอยู่ใต้ตัวเขื่อน ดังนั้นจึงต้องมีคุณสมบัติทางด้านความทึบน้ำและกำลังที่เหมาะสม เพื่อให้มีการทรุดตัวใกล้เคียงกับดินฐานราก

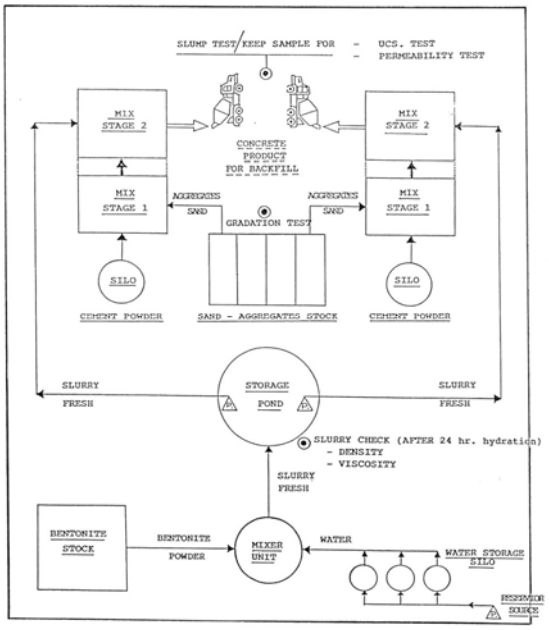
2. เกณฑ์กำหนดและความถี่ในการตรวจสอบคุณภาพ

	Marsh Vis (sec)	Density (gm/cc)	Filtrate loss (cc)	pH	Sand Contant (%)
1. Excavation Slurry					
Fresh Slurry	≥ 30 2 test/day	1.02 - 1.10 2test/day	≤ 30 1 test/day	8.5 - 12 2 test/day	
Before back filling	≤ 60 1test/panel	≤ 1.36 1test/panel	≤ 50 1test/panel	8.5 - 12 1test/panel	≤ 5% 1test/panel
2. Back fill mix					
Bentonite Slurry	≥ 45 1test/panel	1.04 - 1.10 1test/panel	-	-	
	Slump (inch)	Permeability (cm/sec)	Gradation	Mix Proportion	
Aggreagates			1test/500cu.m.	≤ 1,500kg/cu.m.	
Cement				80-120kg/cu.m.	
				(Continous Record at Plant)	
Final Mix	6"-9"	$\leq 1 \times 10^{-6}$			
Week 1	1test/panel	6Sample/week			
Week 2 to 4	1test/panel	2Sample/week			
Week 5 to end	1test/panel	2Sample/2weeks			

กระบวนการผสมและใช้งานน้ำโคลน



กระบวนการผสมและใช้งานวัสดุเนื้อกำแพง

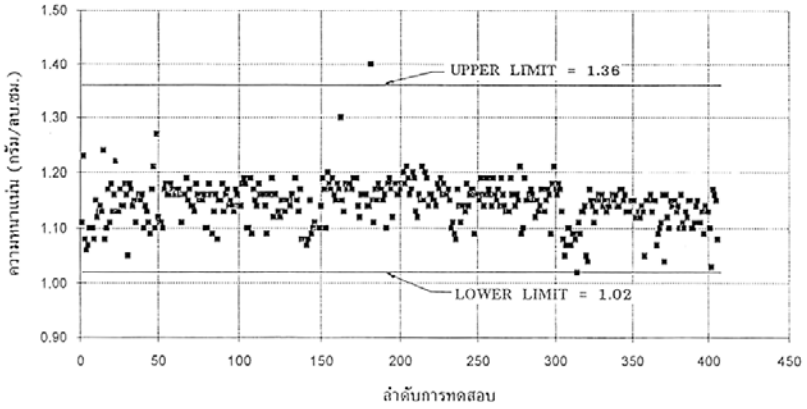


3. การวิเคราะห์ผลการตรวจสอบคุณภาพ

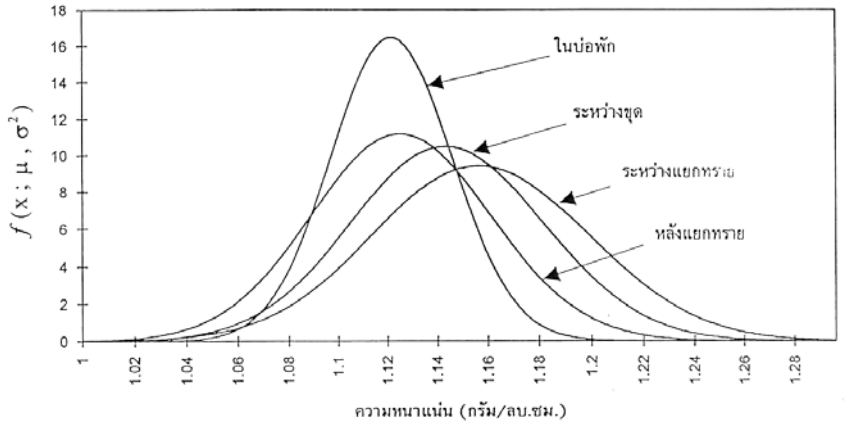
ในขณะก่อสร้าง เมื่อทราบข้อมูลจากการตรวจสอบคุณภาพไปตามลำดับชั้น ควรมีการวิเคราะห์ผลควบคู่กันไปตลอดเวลา โดยเฉพาะทางสถิติ เพื่อให้ทราบแนวโน้มของคุณภาพงานและพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น Factor of Safety ของร่องขุด การพังของผนังร่องขุด เป็นต้น

เมื่องานก่อสร้างเสร็จสิ้น ควรจะสรุปคุณสมบัติที่เกิดขึ้นตลอดการก่อสร้างไว้ในรายงานปิดงาน เพื่อเป็นเอกสารหลักฐานยืนยันความถูกต้องของการตรวจสอบคุณภาพ

กราฟการกระจายความหนาแน่นน้ำโคลนที่ใช้เทคนิคการทำงานแบบขุดเป็นแผงสลับ



กราฟการกระจายแบบปกติ ของความหนาแน่นของน้ำโคลนที่นำไปใช้กับดินฐานรากที่ชั้นทรายมีอิทธิพลต่อการรั่วซึม



ผลการตรวจสอบคุณภาพผนังกันดินทึบน้ำ

ค่าที่ทำการทดสอบ	Marsh Vis. (sec)	Density (gm/cc)	Filtrate loss(cc)	pH	Sand Contant (%)
1. Excavation Slurry					
1.1 Fresh Slurry	34.50±3.42	1.12±0.04	24.89±3.19	10.13±1.16	-
1.2 Before backfilling	34.72±6.91	1.12±0.06	25.38±5.65	10.04±1.35	2.36±1.89
2. Backfill Mix					
2.1 Bentonite Slurry	63.99±15.76	1.05±0.01	-	-	-
2.2 Cement Content		average = 115 kg/m^3 of backfill			
2.3 Bentonite Content		average = 27 kg/m^3 of backfill			
2.4 Density of backfill		average = 2,000 kg/m^3			
2.5Cement/water ratio		average = 0.23, range = 0.20-0.26			
2.6 Slump		average = 8 in, range = 7-9 in			

หมายเหตุ ค่าคุณสมบัติน้ำโคลน คือ $\bar{x} \pm 1.65\hat{\sigma}$ (90% Confidential limit)

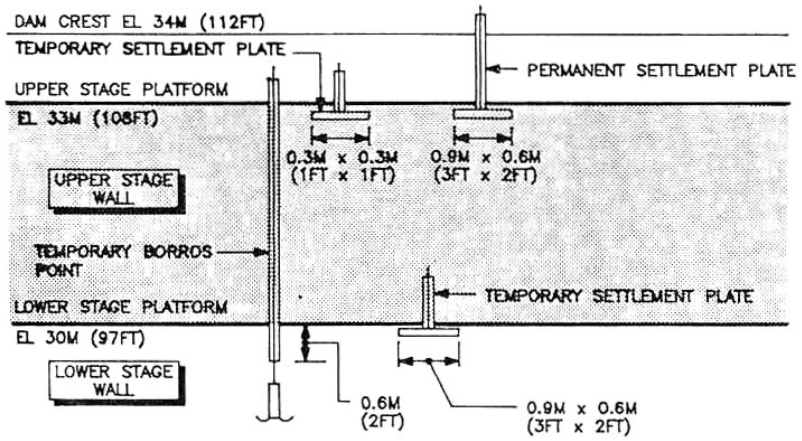
4. การติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรม ของ Slurry Wall

ตัวอย่างเครื่องมือวัดพฤติกรรมของดิน (Geotechnical Instrumentation) เช่น

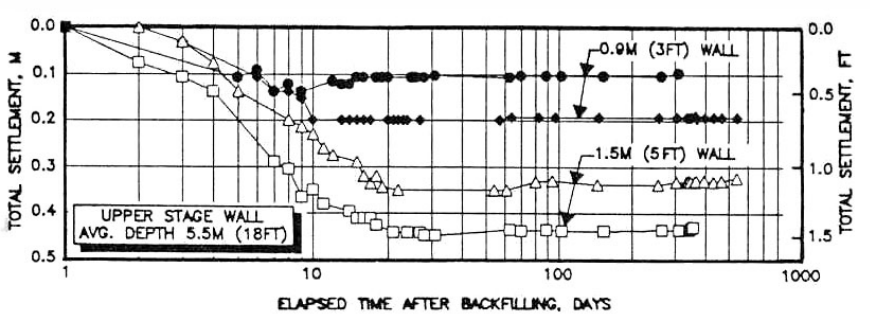
- Piezometer
- Inclinometer
- Settlement Points

เป็นต้น

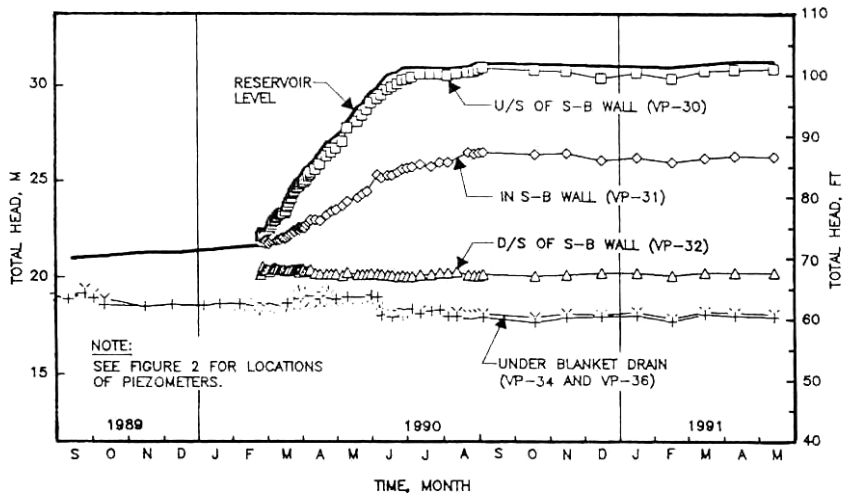
การติดตั้ง Settlement Point วัดการทรุดตัวใน Slurry Wall



การทรุดตัวของ Slurry Wall



ความดันน้ำบริเวณกำแพงทึบน้ำ Slurry Wall



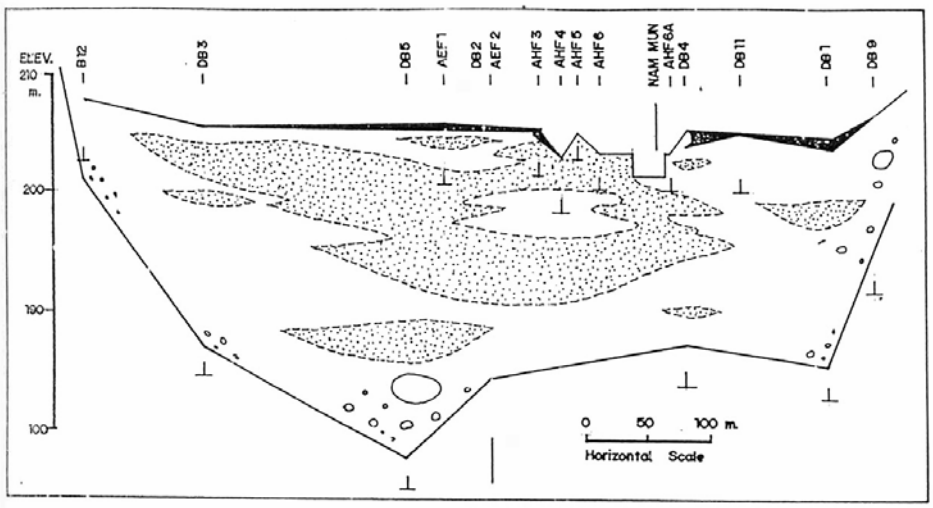
กรณีตัวอย่าง

- เขื่อนมูลบน

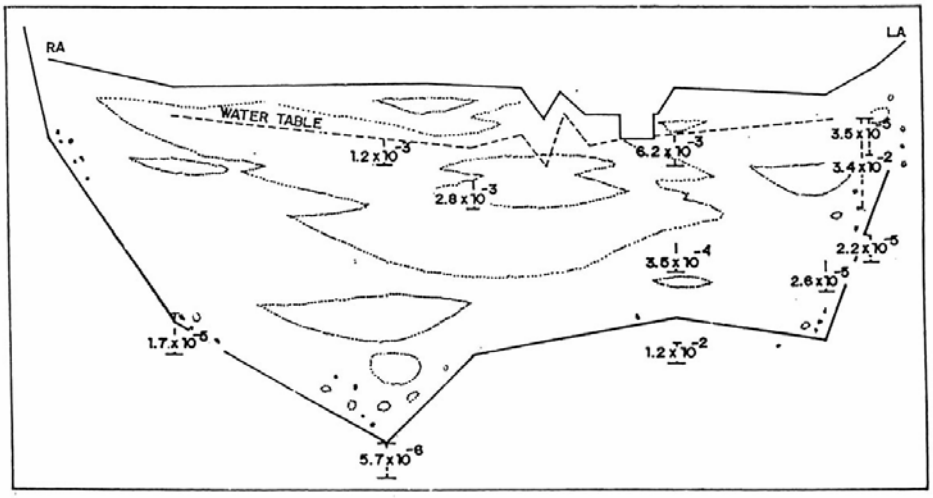
- เขื่อนลำปาว

การออกแบบแก้ไขปรับปรุงเขื่อนมูลบน

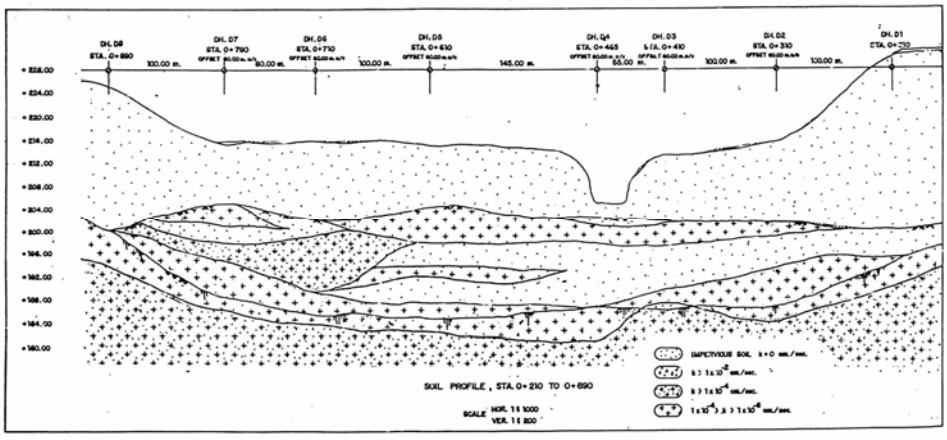
ลักษณะของดินฐากรากเขื่อนที่เสนอโดย Muangnoicharoen N. et.al.(1984)



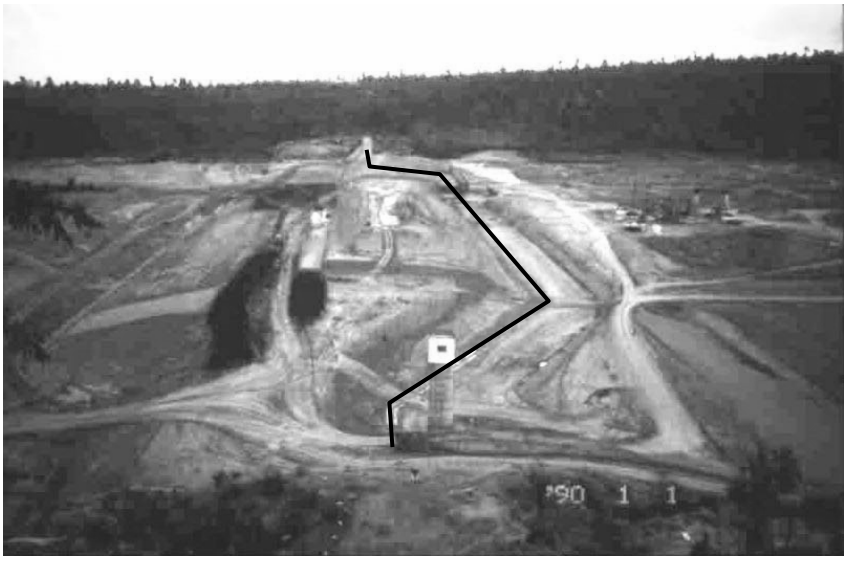
ลักษณะของดินฐากรากเขื่อนที่เสนอโดย Muangnoicharoen N. et.al.(1984) (ต่อ)

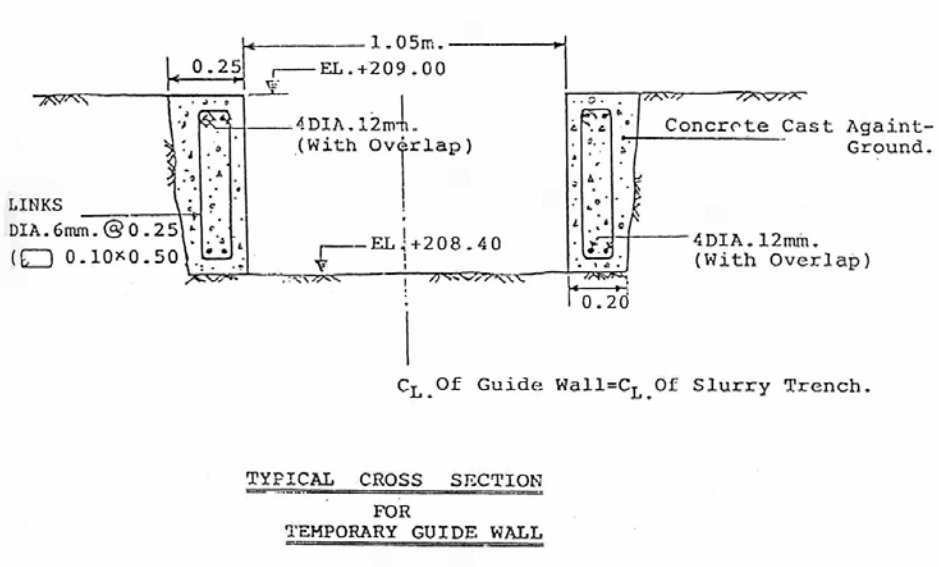


แบบจำลองชั้นดิน(Simplified Seepage Model) ตามแนวกำแพงทึบน้ำเขื่อนมูลบน ที่ได้จากการเจาะสำรวจในระหว่างออกแบบแก้ไข



ก่อสร้าง Working Berm





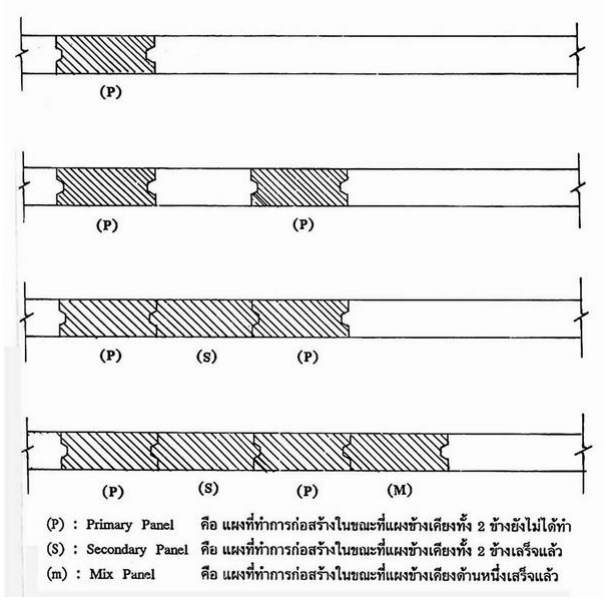
TYPICAL CROSS SECTION
FOR
TEMPORARY GUIDE WALL

รูปตัดของ Temporary Guide Wall และการก่อสร้างในสนาม

เครื่องจักรที่ใช้สำหรับขุดดินที่ละบุ้งกี๋

เครื่องจักรที่ใช้สำหรับขุดหิน
โดยใช้แรงกระแทก

การกำหนดประเภทของแผงตามลำดับของการทำงาน



การขุดดินร่องกำแพง
โดยใช้ Cable Suspended Clamshell

การใช้ Chisel แบบ Star Type
กระแทกหินลอยและหน้าหิน

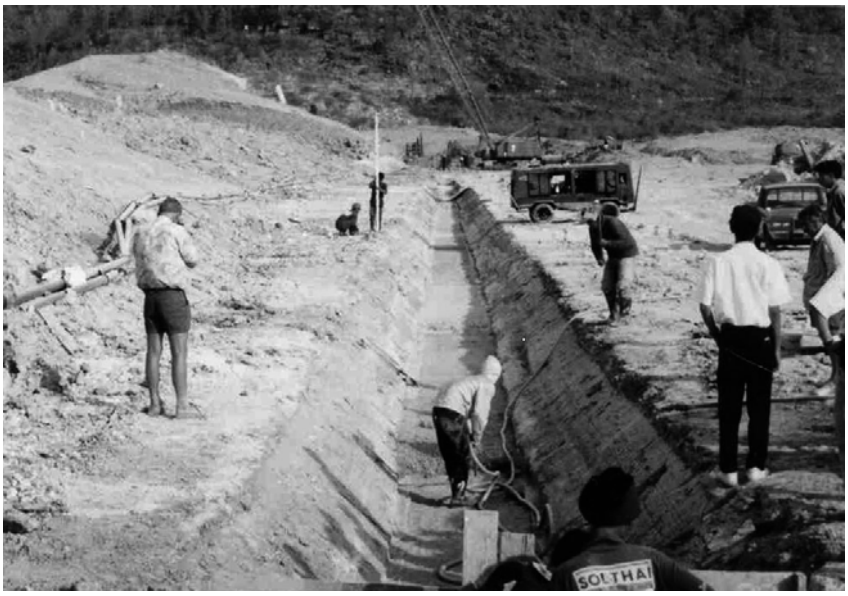
การทำความสะอาดน้ำโคลนโดยใช้เครื่องแยกทราย

อุปกรณ์ Stopend สำหรับทำให้รอยต่อของกำแพงเป็นสลัก(Key)

การติดตั้ง Stopend
ก่อนที่จะเท Backfill Material

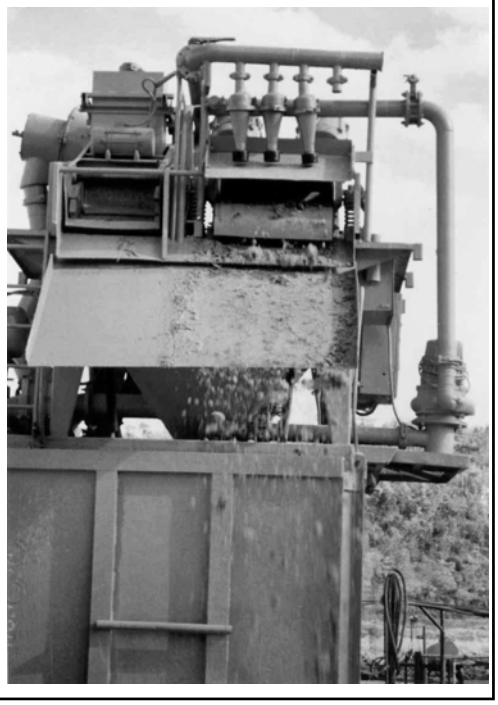
การเทวัสดุเนื้อกำแพง โดยใช้ Tremie Pipe

การขุดส่วนบนของกำแพงเป็นรูปปากระฆัง

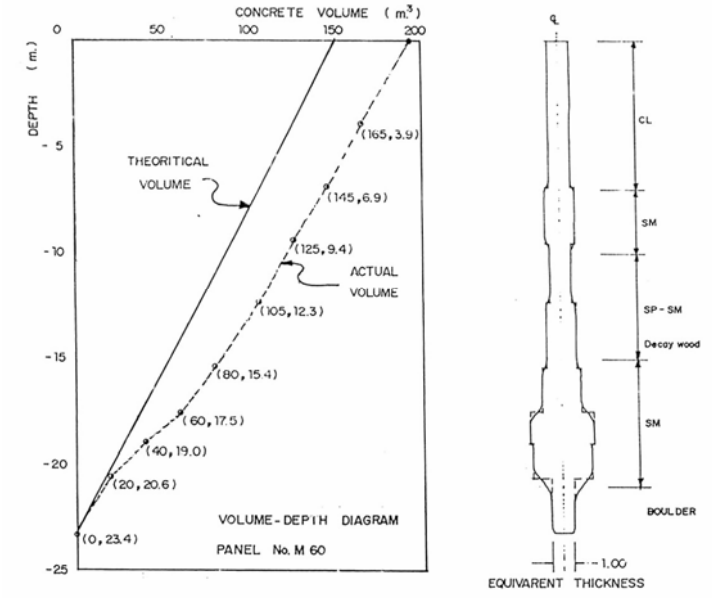


การใช้แผ่นพลาสติกปิดผิวของวัสดุเนื้อกำแพงหลังจากทำปากระฆังแล้ว

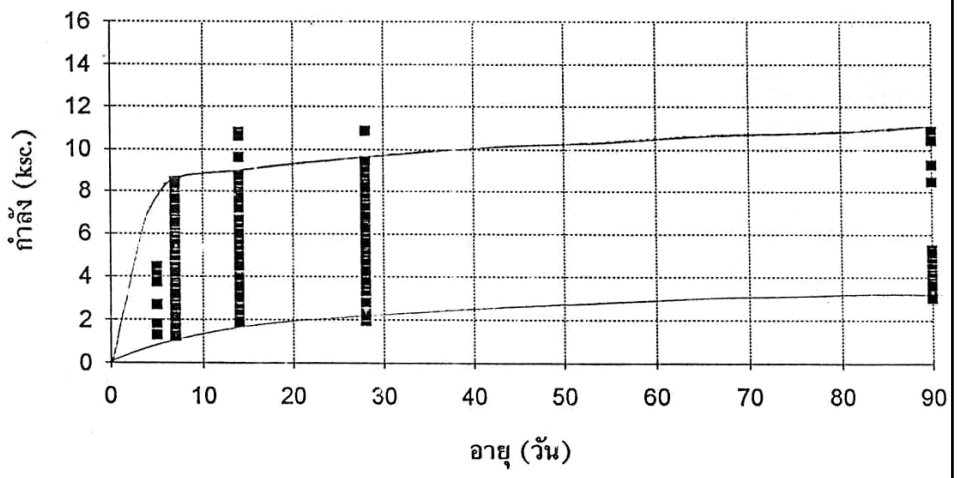
การแยกทรายจากน้ำโคลน(Desanding) โดยใช้เครื่องแยกทราย



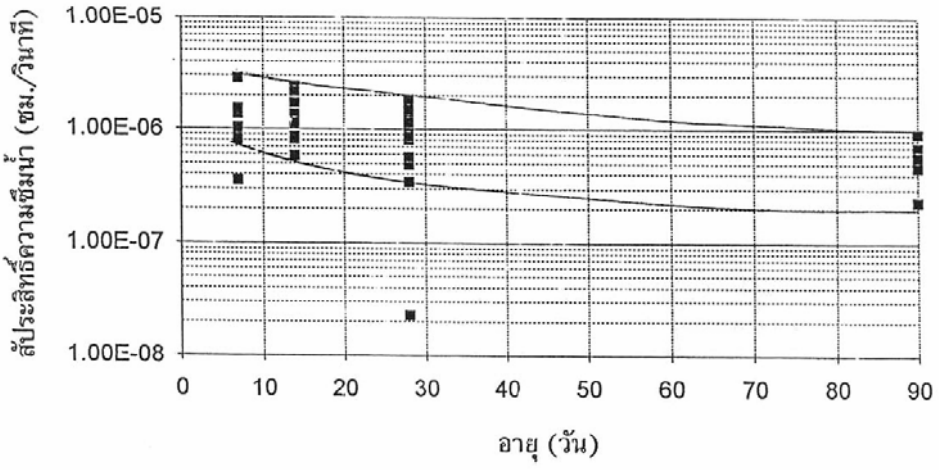
ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุที่ใช้สะสมกับ ระดับของวัสดุในร่องขุดที่เปลี่ยนไป และรูปร่างของร่องขุดที่ประมาณได้



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง และอายุของวัสดุเนื้อกำแพง

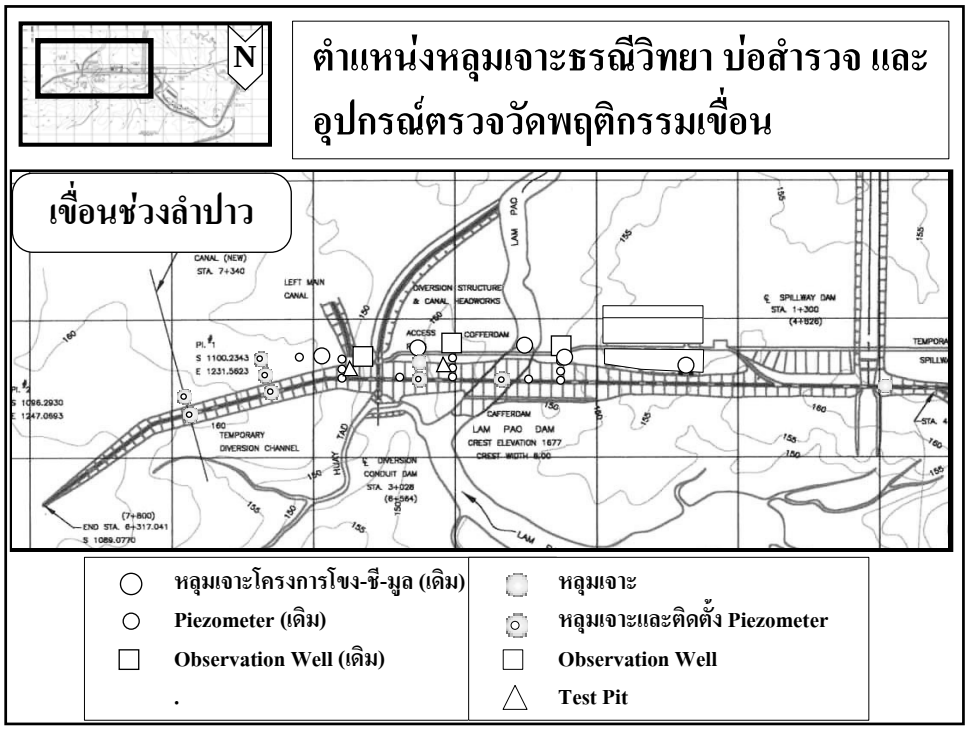


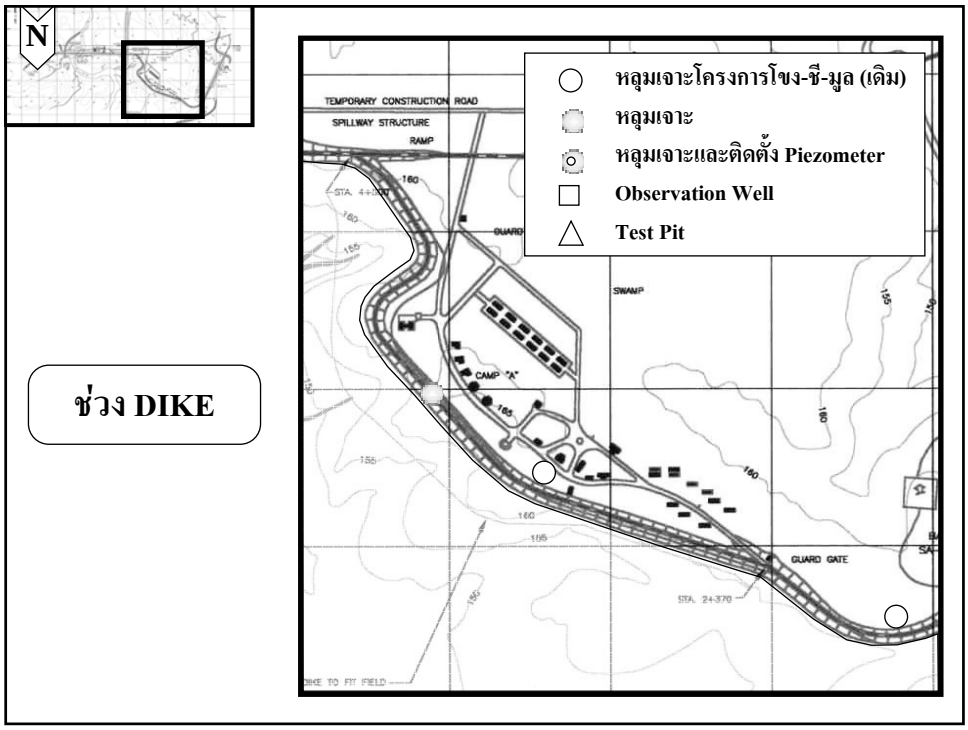
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ และอายุของวัสดุเนื้อกำแพง

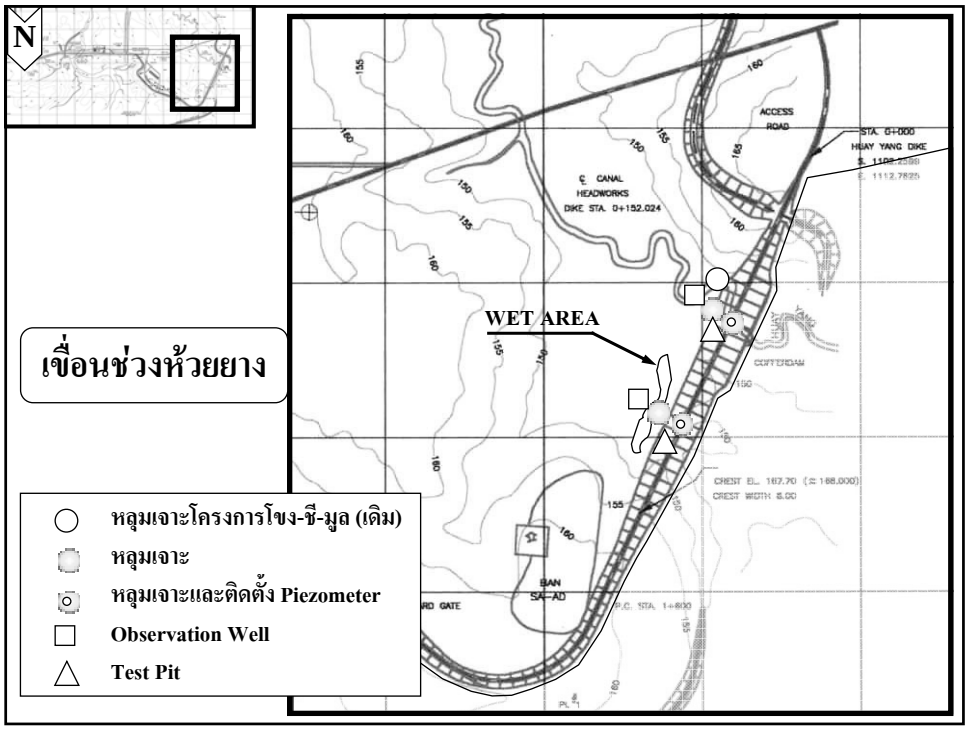


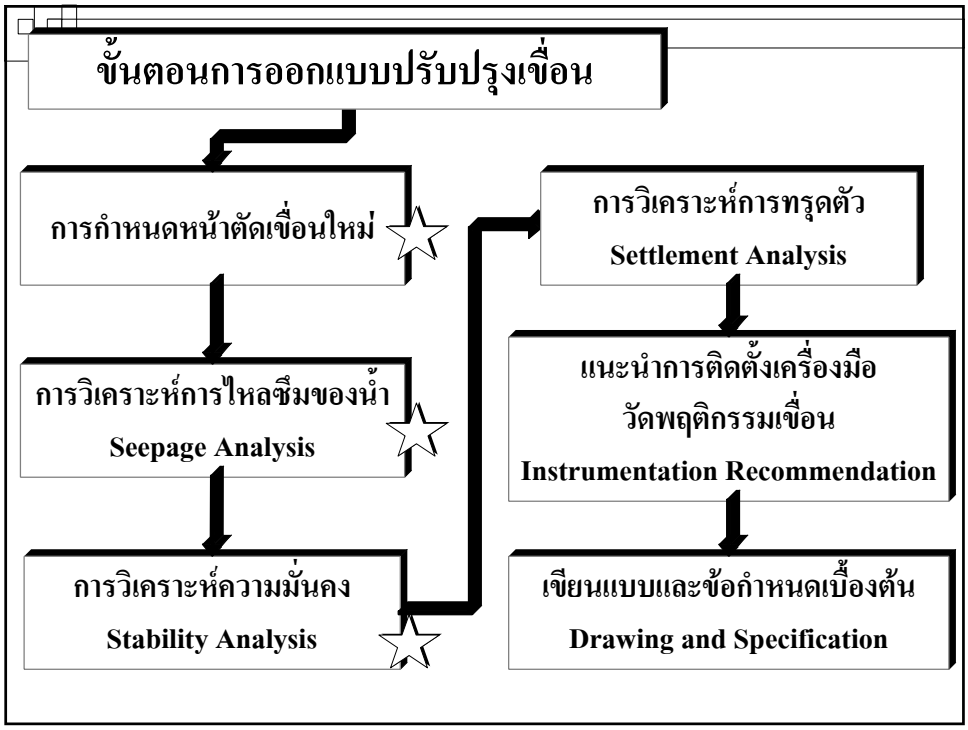
การออกแบบแก้ไขปรับปรุงเขื่อนลำปาว

ข้อมูลทั่วไป
ของโครงการฯ ลำปาว


N
ตำแหน่งหลุมเจาะธรณีวิทยา บ่อสำรวจ และ
อุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อน
เขื่อนช่วงลำปาว
CANAL (NEW)
STA. 7+340
LEFT MAIN CANAL
DIVERSION STRUCTURE & CANAL HEADWORKS
ACCESS
COFFERDAM
LAM PAO
SPILLWAY DAM
STA. 1+300
(4+826)
PI. 1
S 1100.2343
E 1231.5823
PI. 2
S 1096.2930
E 1247.0993
160
TEMPORARY
DIVERSION CHANNEL
HUAY TAO
DIVERSION
CONDUIT DAM
STA. 3+028
(6+984)
CAFFERDAM
LAM PAO DAM
CREST ELEVATION 1677
CREST WIDTH 8.00
(7+800)
END STA. 6+317.041
S 1089.0770
หลุมเจาะโครงการโขง-ชี-มูล (เดิม)
Piezometer (เดิม)
Observation Well (เดิม)
.
หลุมเจาะ
หลุมเจาะและติดตั้ง Piezometer
Observation Well
Test Pit

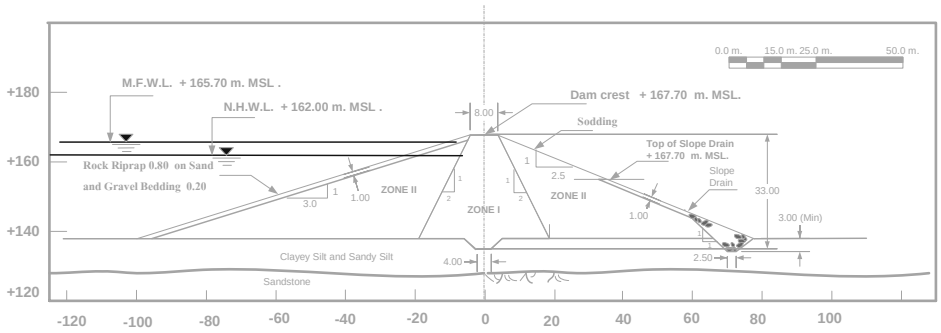

N
ช่วง DIKE
TEMPORARY CONSTRUCTION ROAD
SPILLWAY STRUCTURE
RAMP
160
GUARD
SWAMP
CAMP "A"
165
155
160
GUARD GATE
STA. 24-370
หลุมเจาะโครงการโขง-ชี-มูล (เดิม)
หลุมเจาะ
หลุมเจาะและติดตั้ง Piezometer
Observation Well
Test Pit


N
เขื่อนช่วงห้วยยาง
WET AREA
ACCESS ROAD
STA. 0+000
HUAY YANG DIKE
℄ CANAL HEADWORKS
DIKE STA. 0+152.024
COFFERDAM
CREST EL. 167.70 (± 188.000)
CREST WIDTH 8.00
BAN SA-AD
หลุมเจาะโครงการโขง-ชี-มูล (เดิม)
หลุมเจาะ
หลุมเจาะและติดตั้ง Piezometer
Observation Well
Test Pit


ขั้นตอนการออกแบบปรับปรุงเขื่อน
การกำหนดหน้าตัดเขื่อนใหม่
การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำ
Seepage Analysis
การวิเคราะห์ความมั่นคง
Stability Analysis
การวิเคราะห์การทรุดตัว
Settlement Analysis
แนะนำการติดตั้งเครื่องมือ
วัดพฤติกรรมเขื่อน
Instrumentation Recommendation
เขียนแบบและข้อกำหนดเบื้องต้น
Drawing and Specification

1. สรุปสภาพเขื่อน

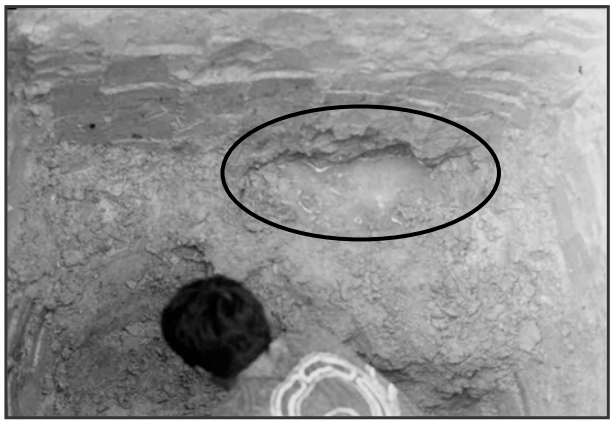
จากการพิจารณาข้อมูลและการวิเคราะห์เบื้องต้น สามารถสรุปสภาพเขื่อนได้ดังนี้



หน้าตัดเขื่อนโดยทั่วไปของแบบเขื่อนลำปาว

- **การไหลซึมและพื้นที่ชุ่มน้ำในบางบริเวณทางลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำของตัวเขื่อนลำปาว**

ชั้นดินตัวเขื่อนที่มีค่าความซึมน้ำค่อนข้างสูง (SM) มีความชุ่มน้ำมากกว่าชั้นอื่นๆ และคาดว่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดพื้นที่ชุ่มน้ำในบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ถ้าหากชั้นดินดังกล่าวมีความต่อเนื่องตามความกว้างของหน้าตัดเขื่อน



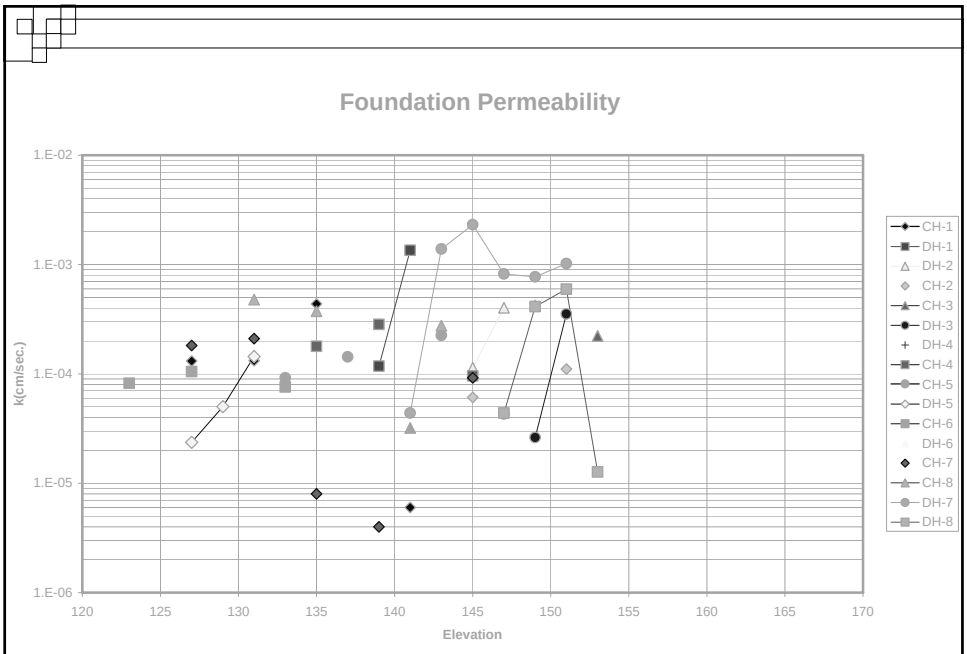
2. การวิเคราะห์คุณสมบัติค่าความซึมน้ำของตัวเขื่อนและฐานราก

1. การรั่วซึมของหินฐานราก

หินฐานรากส่วนใหญ่เป็นหินทรายสลับกับหินดินดาน ในชุดหินโคราชตอนบน บริเวณหัวงานเขื่อนห้วยยางและเขื่อนลำปาวจะเป็นหน่วยหินโคกกรวด และเมื่อประมวลเป็นค่าความซึมน้ำกับระดับเป็น เมตร จาก ร.ท.ก. ปรากฏว่าค่าความซึมน้ำ(k) มีแนวโน้มลดลงตามความลึกแต่จะมีค่าที่แปรปร่วนค่อนข้างมากในช่วงระดับ 135.00 – 155.00 ม. รทก. ทั้งนี้คาดว่ามาจากชั้นหินที่สลับกันระหว่างชั้นดินทรายและหินดินดาน อีกทั้งในชั้นหินแต่ละชนิดจะมีลักษณะเป็นชั้นซึ่งจะมีรอยต่อระหว่างชั้นเป็นชั้นที่จะซึมน้ำได้ดี สำหรับในช่วงของร่องน้ำลำปาวเดิมในช่วงต่ำกว่า ระดับ 130 ม.รทก. ลงไปจะมีค่าความซึมน้ำค่อนข้างคงที่ในช่วง $8x10^{-5}$ ถึง $2x10^{-4}$ cm/sec.

ความลึก	หลุมเจาะ และ STA.															
	CH-1	DH-1	DH-2	CH-2	CH-3	DH-3	DH-4	CH-4	CH-5	DH-5	CH-6	DH-6	CH-7	CH-8	DH-7	DH-8
ม.รทก.	500	644.55	1060	2000	3200	3500	4750	5600	5900	5992	6100	6365	6500	6750	6870	7312
167																
165																
163																
161																
159																
157																
155																
153					2.23E-04											1.27E-05
151				1.11E-04		3.53E-04									1.02E-03	5.96E-04
149					4.22E-04	2.62E-05									7.71E-04	4.13E-04
147			4.03E-04						4.30E-05						8.20E-04	4.39E-05
145			1.14E-04	6.10E-05				9.60E-05					9.20E-05		2.32E-03	
143									2.25E-0					2.76E-04	1.39E-03	
141	6.00E-06	1.35E-03										3.21E-05			4.39E-05	
139		1.18E-04						2.84E-04					4.00E-06			
137									1.43E-04							
135	4.37E-04							1.79E-04					8.00E-06	3.74E-04		
133									9.20E-05		7.60E-05					
131	1.32E-04									1.44E-04			2.10E-04	4.78E-04		
129										5.02E-05						
127	1.31E-04									2.37E-05	1.05E-04		1.82E-04			
125																
123											8.20E-05					
121																
119											7.00E-06					

ค่าการรั่วซึมของหินฐานราก (หินทราย)



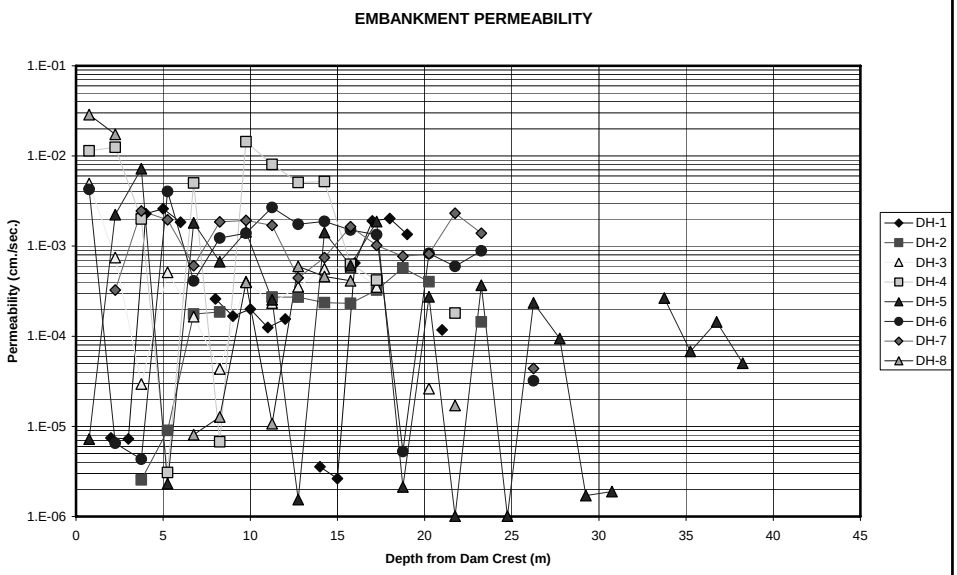
ผลการวิเคราะห์การรั่วซึมของหินฐานราก

2. ค่าการรั่วซึมของดินตัวเขื่อนเดิม

ดินบดอัดตัวเขื่อนเดิมมีลักษณะเป็นชั้นสลับกันอย่างเห็นได้ชัดเจนจากการสำรวจด้วยหลุมขุดสำรวจ(Test pit) และผลจากทดสอบค่าความซึมน้ำก็ยืนยันในลักษณะเดียวกัน คือค่าความความซึมน้ำมีการแกว่งตัวค่อนข้างมาก ประมาณ 3 log-cycles คืออยู่ในช่วง 2x10-5 ถึง 2x10-3 cm/sec. ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 3 ซึ่งการวางตัวของชั้นดินในลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดการซึมน้ำในแนวราบสูงกว่าแนวดิ่งมาก

ตารางค่าการรั่วซึมของตัวเขื่อน

ความลึก	ลึกจากสัน 167.8	หลุมเจาะ และ STA							
		DH-1	DH-2	DH-3	DH-4	DH-5	DH-6	DH-7	DH-8
ม.รทก	(ม.)	644.55	1060	3500	4750	5992	6365	6870	7312
167.05	0.75	0	0	4.94E-03	1.14E-02	7.23E-06	4.26E-03	0	2.87E-02
165.55	2.25	7.44E-06	0	7.45E-04	1.25E-02	2.23E-03	6.51E-06	3.25E-04	1.74E-02
164.05	3.75	7.25E-06	2.55E-06	2.95E-05	2.00E-03	7.21E-03	4.32E-06	2.45E-03	0
162.55	5.25	2.29E-03	9.01E-06	5.13E-04	3.08E-06	2.31E-06	4.03E-03	1.96E-03	0
161.05	6.75	2.60E-03	1.76E-04	1.65E-04	5.02E-03	1.81E-03	4.11E-04	6.07E-04	8.07E-06
159.55	8.25	1.84E-03	1.86E-04	4.33E-05	6.76E-06	6.70E-04	1.23E-03	1.86E-03	1.27E-05
158.05	9.75	0	0	4.02E-04	1.44E-02	1.44E-03	1.39E-03	1.93E-03	3.96E-04
156.55	11.25	2.60E-04	2.72E-04	2.34E-04	8.07E-03	2.54E-04	2.68E-03	1.70E-03	1.07E-05
155.05	12.75	1.67E-04	2.72E-04	3.54E-04	5.07E-03	1.54E-06	1.75E-03	4.44E-04	5.96E-04
153.55	14.25	2.00E-04	2.36E-04	5.61E-04	5.20E-03	1.42E-03	1.88E-03	7.45E-04	4.60E-04
152.05	15.75	1.25E-04	2.32E-04	5.89E-04	6.29E-04	6.12E-04	1.51E-03	1.64E-03	4.13E-04
150.55	17.25	1.55E-04	3.25E-04	3.52E-04	4.19E-04	1.87E-03	1.34E-03	1.02E-03	
149.05	18.75	0	5.73E-04			2.13E-06	5.25E-06	7.71E-04	
147.55	20.25	3.56E-06	4.03E-04	2.62E-05		2.74E-04	8.29E-04	8.20E-04	
146.05	21.75	2.64E-06			1.81E-04	1.01E-06	5.97E-04	2.32E-03	1.71E-05
144.55	23.25	6.50E-04	1.44E-04			3.68E-04	8.87E-04	1.39E-03	
143.05	24.75	1.90E-03				1.01E-06			
141.55	26.25	2.02E-03				2.35E-04	3.21E-05	4.39E-05	
140.05	27.75	1.35E-03				9.44E-05			
138.55	29.25					1.71E-06			
137.05	30.75	1.18E-04				1.89E-06			
135.55	32.25					0.00E+00			
134.05	33.75					2.65E-04			
132.55	35.25					6.81E-05			
131.05	36.75					1.44E-04			
129.55	38.25					5.02E-05			
128.05	39.75								
126.55	41.25								
125.05	42.75								
123.55	44.25								
122.05	45.75								
120.55	47.25								
average		6.44E-04	1.92E-04	8.93E-03	5.39E-03	7.32E-04	1.43E-03	1.25E-03	



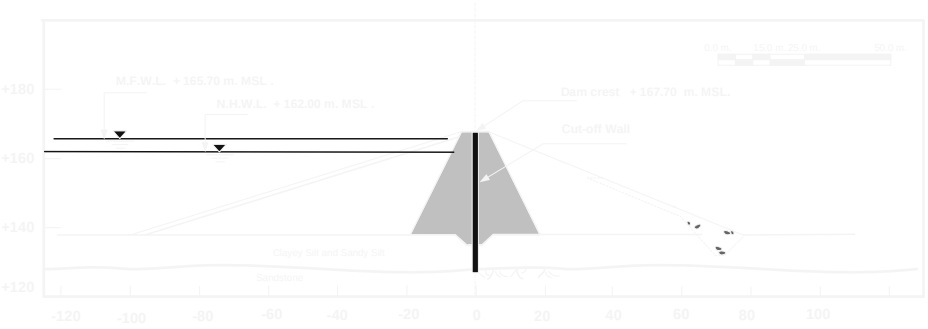
ผลการวิเคราะห์การรั่วซึมของดินตัวเขื่อนเดิม

3. แนวทางออกแบบแก้ไขเขื่อน

จากการพิจารณาสภาพเขื่อนในปัจจุบันและจุดที่ควรจะต้องมีการปรับปรุงของเขื่อนลำปาวและห้วยยางอยู่ในสภาพที่สามารถปรับปรุงแก้ไขได้โดยไม่ต้องมีการย้ายแนวหรือก่อสร้างเขื่อนใหม่ซึ่งสามารถทำได้โดยมีรูปแบบเบื้องต้นซึ่งจะต้องมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบต่อไปดังนี้

รูปแบบที่ 3 Cut-off Wall

ในบางช่วงของเขื่อนหากมีการวิเคราะห์ การไหลซึมของน้ำผ่านฐานรากเขื่อน แล้วพบว่าจะไม่ปลอดภัยหากมีการเก็บน้ำเพิ่มขึ้น ควรจะมีการพิจารณาก่อสร้างกำแพงทึบน้ำจากสันเขื่อนลงจนถึงหน้าหินทึบน้ำใต้ฐานรากเขื่อน



ข้อดี

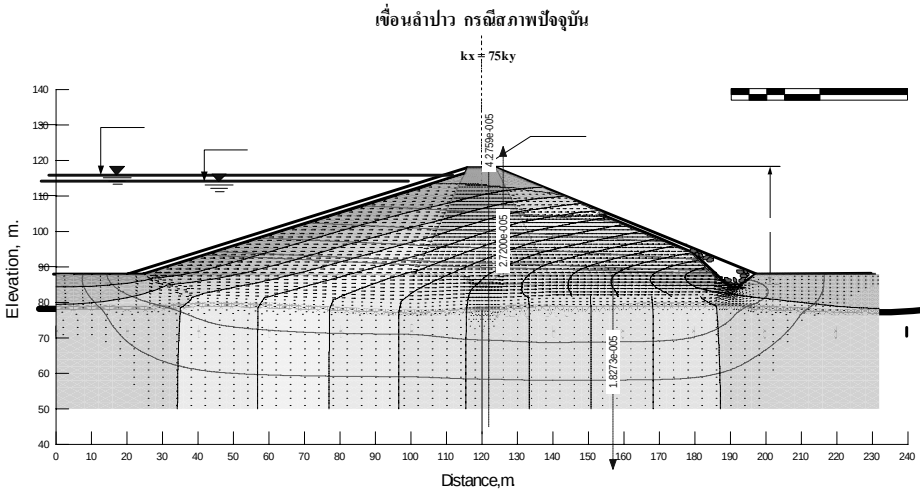
- เปิดงานก่อสร้างได้เป็นพื้นที่กว้างตามแนวแกนเขื่อน
- สามารถแก้ปัญหาการรั่วซึมในฐานรากเขื่อนได้สมบรูณ์

ข้อเสีย

- เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มและต้องมีการคัดเลือกผู้รับจ้างที่มีความชำนาญเฉพาะด้าน
- ต้องมีการเจาะสำรวจจนถึงหินในขั้นออกแบบรายละเอียดเพิ่มขึ้นมากเพื่อระบุบริเวณที่มีความจำเป็นต้องปิดกั้นน้ำโดยวิธีนี้ ได้อย่างชัดเจน

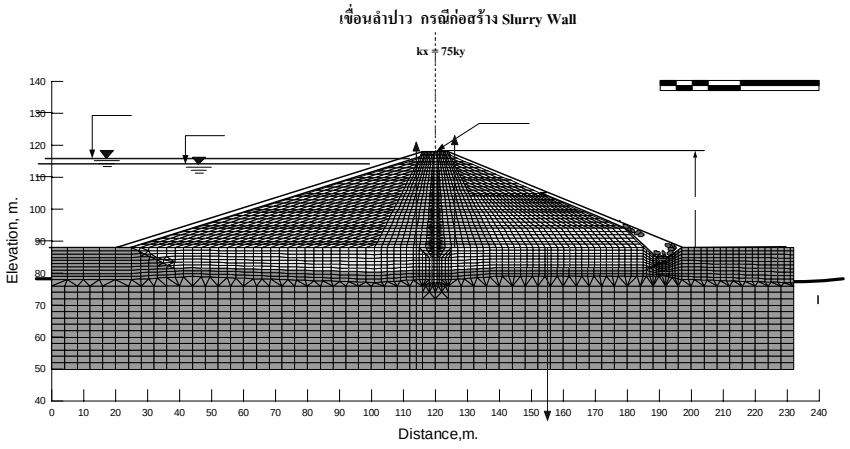
ตารางค่าคุณสมบัติความซึมน้ำของวัสดุต่าง ๆ

ส่วนต่างๆ ของเขื่อน	ค่าความซึมน้ำ kx, (cm/s)	อัตราส่วนความซึมน้ำ (kx:ky)
Rock Foundation	2×10^{-4}	10
Soil Foundation	5×10^{-4}	10
Core Zone(ZoneI)	7×10^{-4}	75
Random Zone(Zone2)	7×10^{-4}	75
Filter	1×10^{-2}	1
Rock Toe Drain	1×10^{-2}	1
Plastic Concrete (Slurry Wall)	1×10^{-6}	1

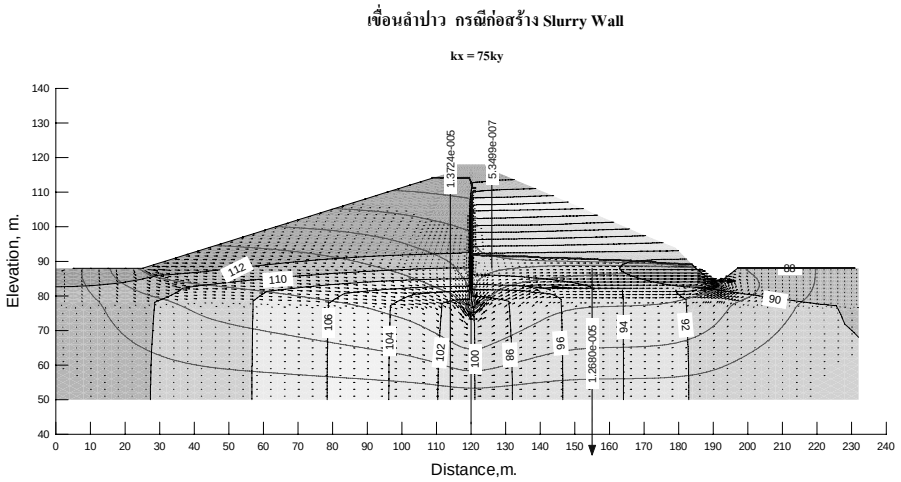


Equipotential Lines และ Vector ของความเร็วการไหลของน้ำ เขื่อนลำปาวสภาพปัจจุบัน

กรณีที่ 3 การก่อสร้าง Slurry Wall :



การสร้างโครงข่ายการไหลซึม เขื่อนลำปาวกรณีก่อสร้าง Slurry Wall

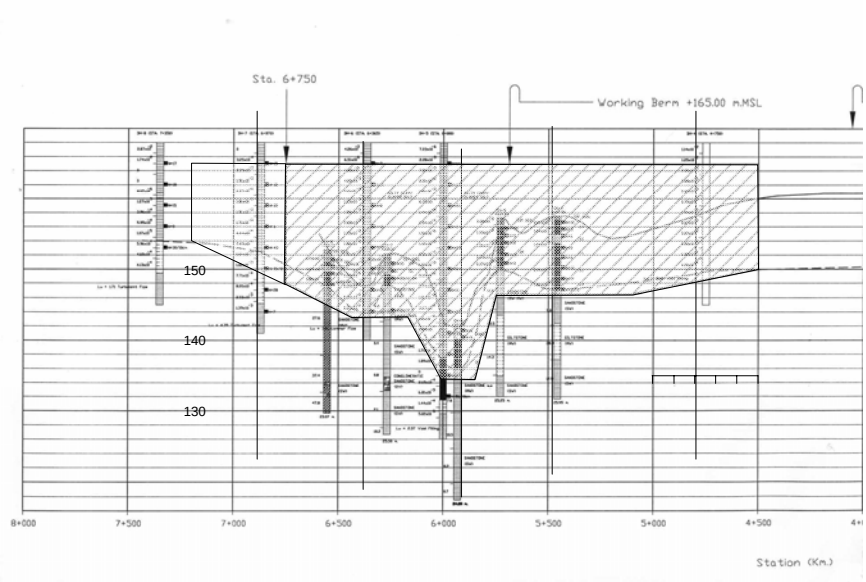


Equipotential Lines และ Vector ของความเร็วการไหลของน้ำ เขื่อนลำปาว กรณีก่อสร้าง D/S Chimney Filter

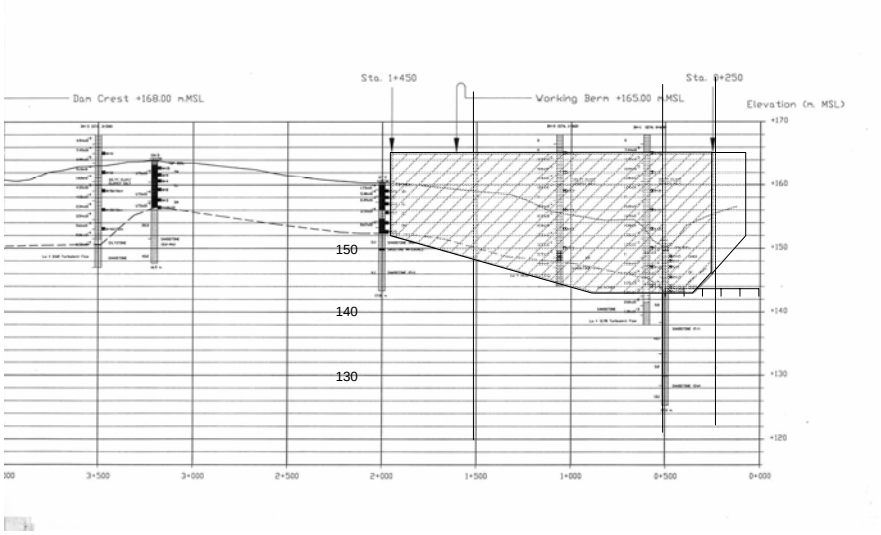
ผลการวิเคราะห์การไหลซึมทั้ง 3 กรณี พบว่ามีปริมาณน้ำไหลผ่านส่วนต่างๆ ของเขื่อนต่อความยาว 1 เมตร ระดับผิวชุ่มน้ำ และความเร็วของการไหลซึมทางด้านท้ายน้ำ

กรณีที่	สภาพตัวเขื่อนและการแก้ไข	ปริมาณน้ำไหลซึม(ลบ.ม./ว./ม.)			ระดับผิวน้ำในตัวเขื่อนด้านท้ายน้ำ	ความเร็วการไหลซึมด้านท้ายน้ำ
		รวมทั้งหน้าตัด	เฉพาะตัวเขื่อน	เฉพาะฐานราก	(ม. จากฐานราก)	(ม. / วินาที)
1	สภาพตัวเขื่อนปัจจุบัน	4.28E-05	2.72E-05	1.56E-05	22	8.67E-07
	เปรียบเทียบกับปัจจุบัน	100.0%	100.0%	100.0%		
2	ปรับปรุงด้วยการก่อสร้าง Internal Drain(D/S Filter)	4.75E-05	3.22E-05	1.53E-05	6	8.71E-07
	เปรียบเทียบกับปัจจุบัน	111.0%	118.4%	98.1%		
3	ปรับปรุงด้วยการก่อสร้าง Cut-off Wall (Slurry Wall)	1.37E-05	5.35E-07	1.32E-05	1	6.36E-07
	เปรียบเทียบกับปัจจุบัน	32.0%	1.7%	86.0%		

ขอบเขตของ Plastic Cut-off Wall ที่เขื่อนลำปาว



ขอบเขตของ Plastic Cut-off Wall ที่เขื่อนห้วยยาง



จบการนำเสนอ