

การออกแบบฝายทดน้ำ

รศ.สันติ ทองพำนัก

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2556



ความหมายของฝาย

อาคารชลศาสตร์สร้างปิดกั้นลำน้ำธรรมชาติ ทำหน้าที่ทดน้ำให้ระดับสูงขึ้นจนสามารถไหลเข้าคลองส่งน้ำชลประทานได้

ฝายจะต้องมีความยาวมากพอที่จะให้น้ำไหลมาในช่วงหน้าฝนไหลข้ามฝายไปได้ โดยไม่ทำให้เกิดน้ำท่วมตลิ่งสองฝั่งมากเกินไป

การแบ่งประเภทของฝาย

ตามอายุการใช้งาน

ฝายเฉพาะฤดู

ฝายชั่วคราว

ฝายกึ่งถาวร

ฝายถาวร

ฝายเฉพาะฤดู

เป็นฝายที่สร้างขึ้นในลำน้ำขนาดเล็กโดยใช้วัสดุที่มีราคา
ถูกและหาได้ง่ายในท้องถิ่นเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ กิ่งไม้,
ใบไม้, ไม้ไผ่, เส้าไม้, ทรายและกรวด เป็นต้น เมื่อถึง
เวลาน้ำใหญ่หลากมา ฝายจะแตกทลายไปหมด
ทำให้ต้องสร้างขึ้นใหม่ทุกปี

ฝายชั่วคราว

เป็นฝายขนาดเล็กและมีลักษณะคล้ายกับฝายเฉพาะฤดู แต่มีความมั่นคงแข็งแรงและมีอายุการใช้งานนานกว่า เพราะสร้างให้แข็งแรงขึ้น และวัสดุที่ใช้ก็คงทนถาวรกว่า ถ้ามันคอยดูแลซ่อมแซมวัสดุที่ชำรุดเสียหาย และที่หลุดลอยตามน้ำไปให้อยู่ในสภาพดีเหมือนเดิม ฝายประเภทนี้ ก็จะมีอายุการใช้งานได้นานหลายปี

ฝายกึ่งถาวร

ฝายประเภทนี้จะมีอายุการใช้งานนานกว่าฝายชั่วคราว ถ้าค่อย
ดูแลและบำรุงรักษาอยู่เสมออาจมีอายุการใช้งาน ได้ถึง 20 ปี
เพราะใช้วัสดุที่มีขนาดใหญ่หรือแข็งแรงมากกว่า เช่น เสาไม้ที่มี
ขนาดใหญ่ตั้งแต่ 0.20 เมตรขึ้นไป และทำการก่อสร้างให้มี
ความมั่นคงมากขึ้น



การพังทลายของฝาย

ฝายเฉาะฤดู ฝายชั่วคราว และฝายกึ่งถาวร

1. น้ำไหลซึมลอดใต้ตัวฝายและพื้นฝาย และเกิดโพรงใต้ฝาย ฝายจะทรุดและพังทลายไป
2. น้ำกัดเซาะพื้นที่รอบน้ำด้านท้ายฝาย แล้วลูกลามาย้อนเข้ามาใต้พื้นฝาย ทำให้ฝายทรุดตัวและพังทลายลง
3. น้ำไหลทะลุผ่านตัวฝายและพาเอาวัสดุทำตัวฝายติดไปด้วย
4. น้ำไหลซึมอ้อมปีกฝายหรือตลิ่ง และพาเอาดินหรือวัสดุติดไปด้วย ตลิ่งปีกฝายขาด

ฝายถาวร

เป็นฝายที่สร้างด้วยวัสดุต่าง ๆ ที่มีความแข็งแรง เช่น คอนกรีตล้วน หิน ก่อ คอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น มีการคำนวณออกแบบถูกต้องตามหลักวิชาการ จึงมั่นคงต่อแรงดันของน้ำ และทนทานต่อการกัดเซาะของน้ำได้ และการก่อสร้างก็จะทำถูกต้องตามหลักวิศวกรรม ฝายถาวรจึงมีอายุการใช้งานยืนยาว ถ้าได้รับการบูรณะซ่อมแซมอยู่เสมอจะใช้งานได้ตลอดไป

อาคารประกอบของฝาย

อาคารประกอบที่สำคัญมีดังนี้

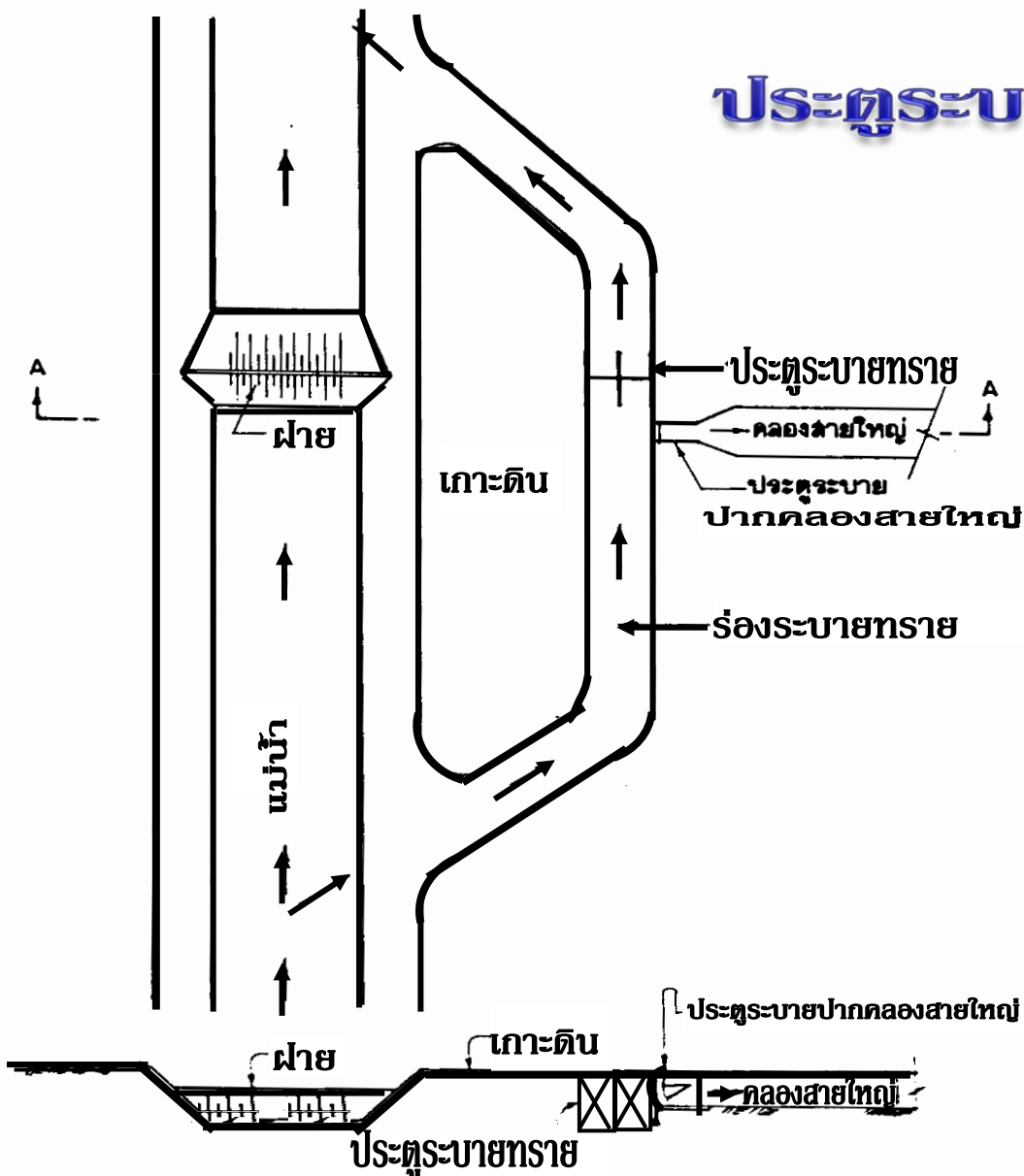
ประตูหรือท่อปากคลองส่งน้ำ

ประตูระบายทราย

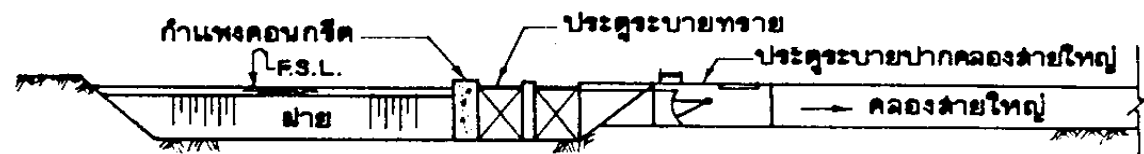
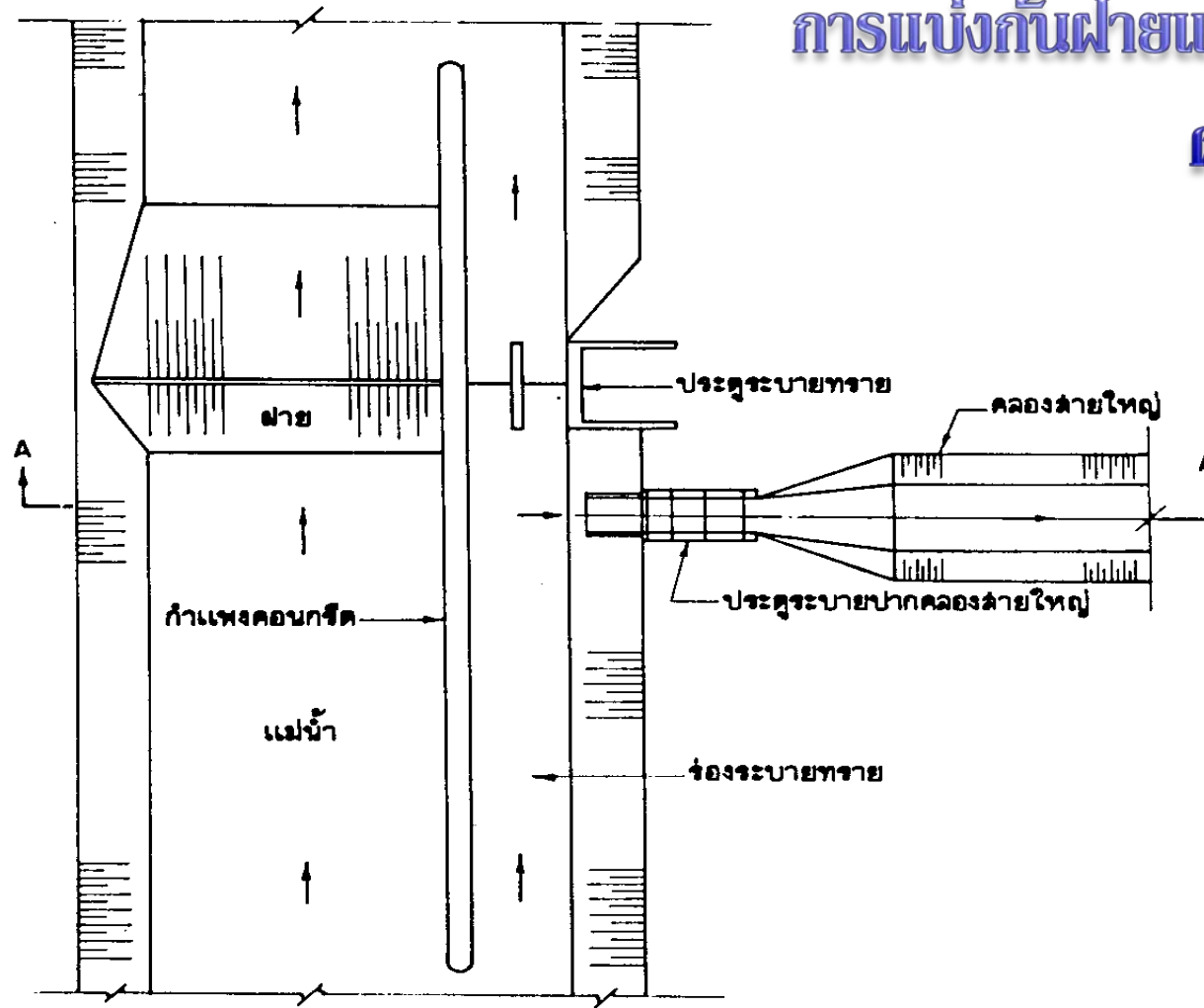
บันไดปลา

ประตูเรือแพสัญจร

การแบ่งกันฝ่ายและ ทายาทด้วยเกาะดิน



การแบ่งกั้นฝายและประตูระบายทราย ด้วยกำแพงคอนกรีต



Section A-A



การเลือกตำแหน่งที่ตั้งฝ่าย

- ✧ ลำน้ำควรมีแนวตรง
- ✧ ตลิ่งควรมีความมั่นคงดี
- ✧ ควรก่อสร้างบริเวณที่เป็นดินขุดเพื่อลดปัญหาการทรุดตัวไม่เท่ากัน



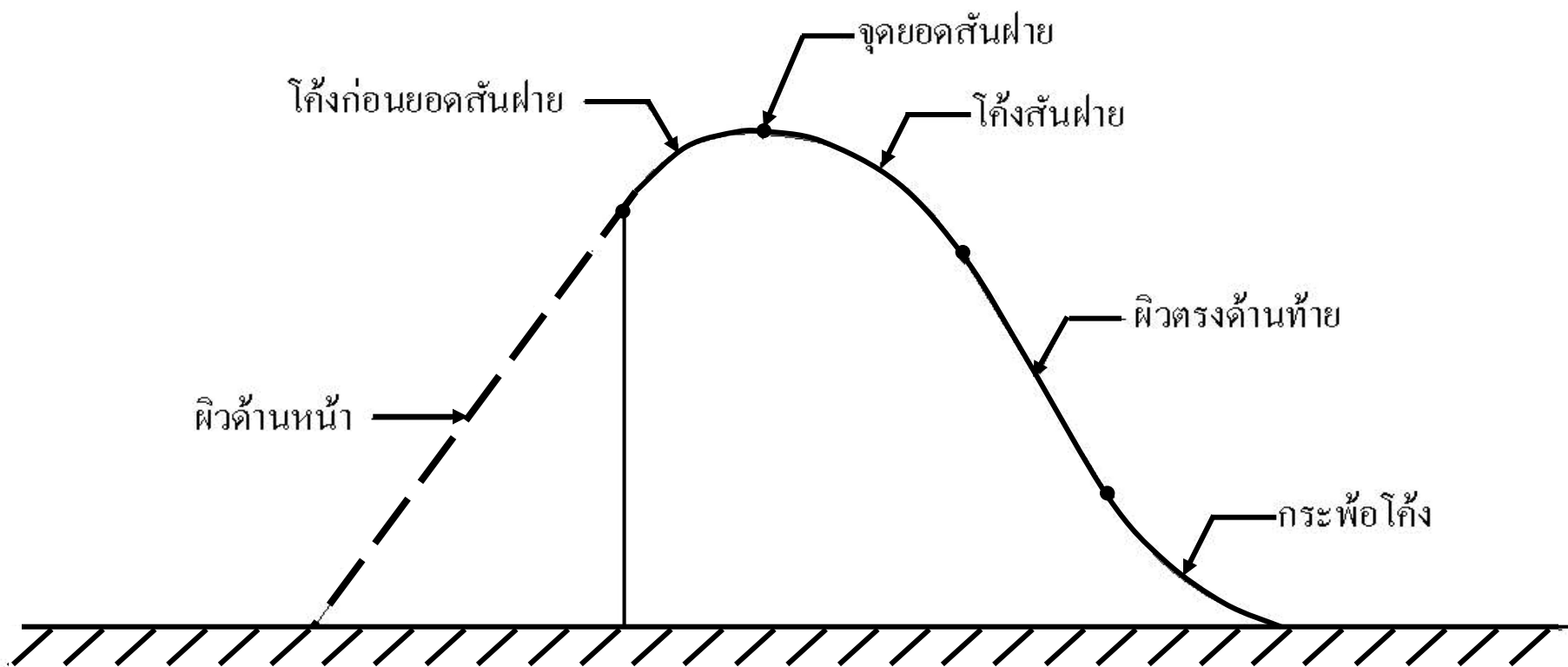
การกำหนดระดับของสันฝาย

- ⇒ สามารถทนน้ำให้ไหลเข้าคลองส่งน้ำได้ในฤดูน้ำน้อย
- ⇒ ไม่สูงเสมอระดับตลิ่ง
- ⇒ ในฤดูน้ำมาก ไม่ทำให้น้ำท่วมตลิ่งมากเกินไป
- ⇒ โดยปกติอยู่สูงกว่าธรณีประตูปากคลองส่งน้ำไม่น้อยกว่า 1.00 เมตร
- ⇒ โดยปกติระดับน้ำหน้าฝายจะสูงกว่า FSL ในคลองไม่น้อยกว่า 0.50 ม.



รูปร่างของสันฝาย (Ogee)

- ⇒ ผิวเรียบตรงด้านหน้า ความลาดเอียงที่นิยมใช้ (ราบ : ตั้ง)
1:3 หรือ 2:3 หรือ 3:3
- ⇒ โค้งก่อนยอดสันฝาย เกิดจากเส้นโค้ง 2 โค้ง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นรอบวงกลม รัศมี R_1 และ R_2
- ⇒ โค้งสันฝายเป็นไปตามสมการ
- ⇒ ผิวเรียบตรงด้านท้ายฝาย ความลาดเอียง (ตั้ง:ราบ) จะอยู่ระหว่าง 1:0.6 ถึง 1:0.8 อาจจะใช้ค่า 1:1 ได้
- ⇒ กระพ้อโค้งต้นฝาย ช่วยลดการปั่นป่วนของน้ำด้านท้าย



รูปร่างของฟายโอเกี (Ogee)



รัศมีกระพ้อโค้งตีนฝาย

$$R = 0.305 \times 10^K$$

$$K = \frac{V + 6.4H_o + 4.88}{3.6H_o + 19.5}$$

โดย V = ความเร็วที่ตีนฝาย(Toe) , ม./วินาที

H_o = ความลึกของน้ำเหนือสันฝายเมื่อ Q
ออกแบบไหลผ่านสันฝาย



รัศมีกระพ้อโค้งตื้นฝาย (ต่อ)

ตามเกณฑ์ ของ USBR

$$R = \frac{2qv}{p} \quad \text{ฟุต}$$

และ $R = \frac{2dv^2}{p} \quad \text{ฟุต}$

โดย $q =$ ปริมาณการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง, (ลบ.ฟุต/วินาที)/ฟุต

$v =$ ความเร็วการไหล, ฟุต/วินาที

$d =$ ความลึกการไหล

$p =$ ความดันที่เกิดขึ้นที่พื้นท้ายฝาย
ปกติไม่ควรเกิน 1,000 /ตร.ฟุต

R ไม่น้อยกว่า $5d$

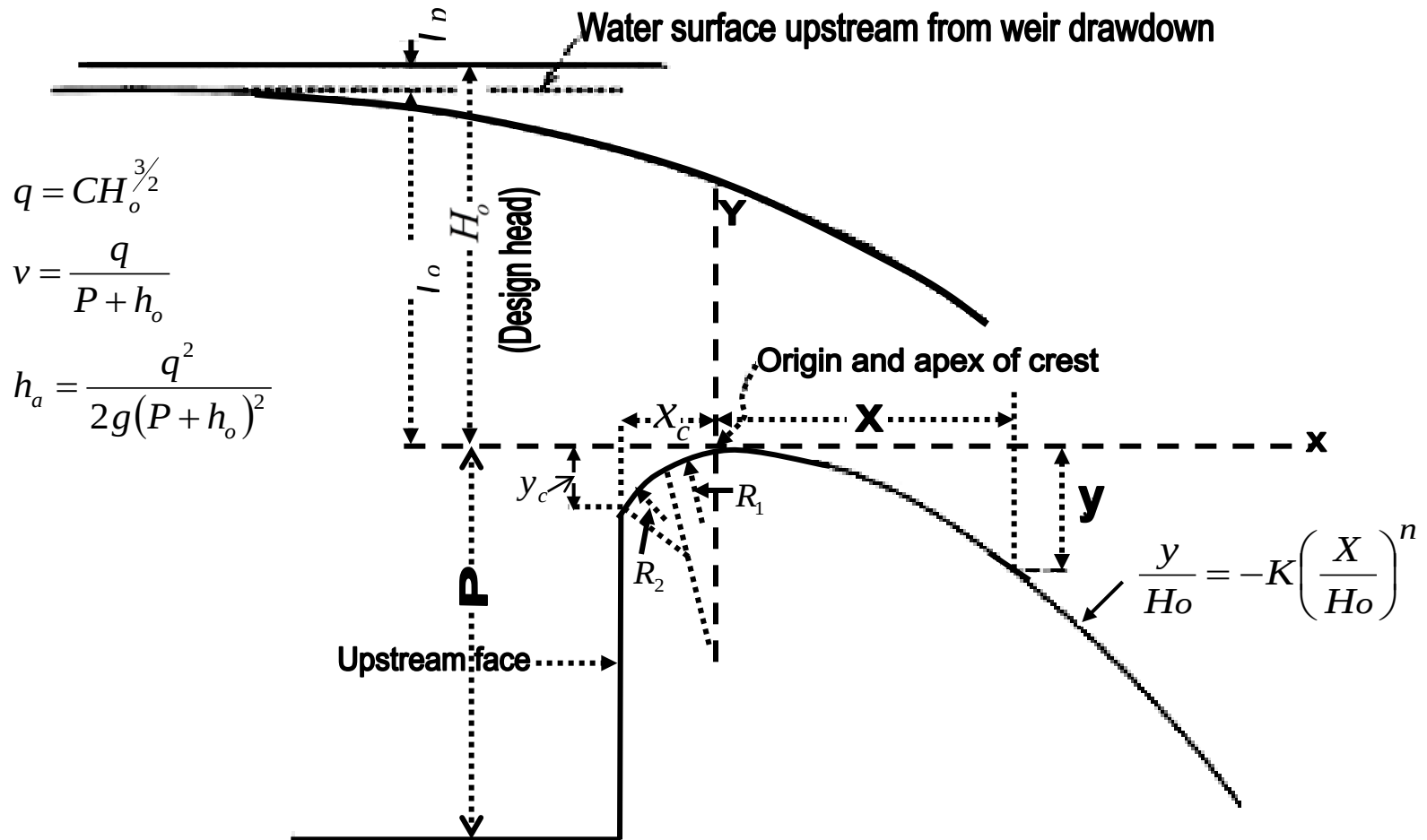


โค้งสันฝายโอกิกของ USBR

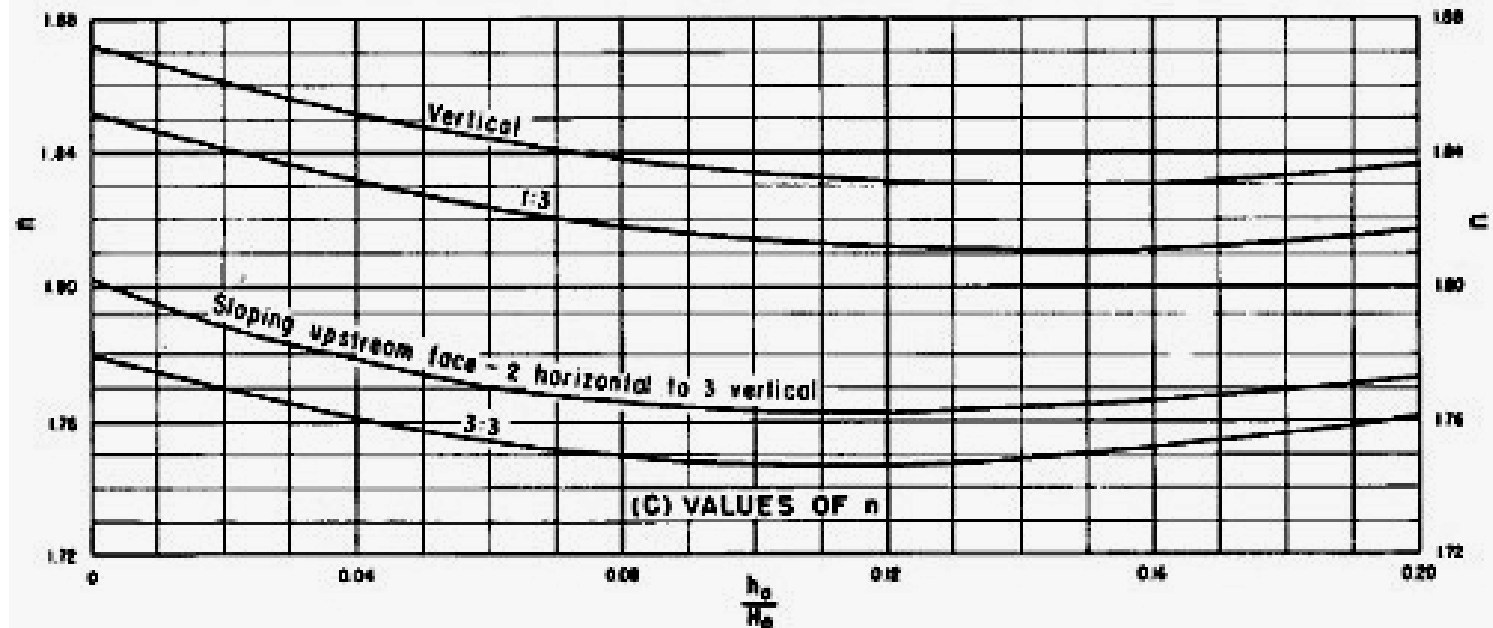
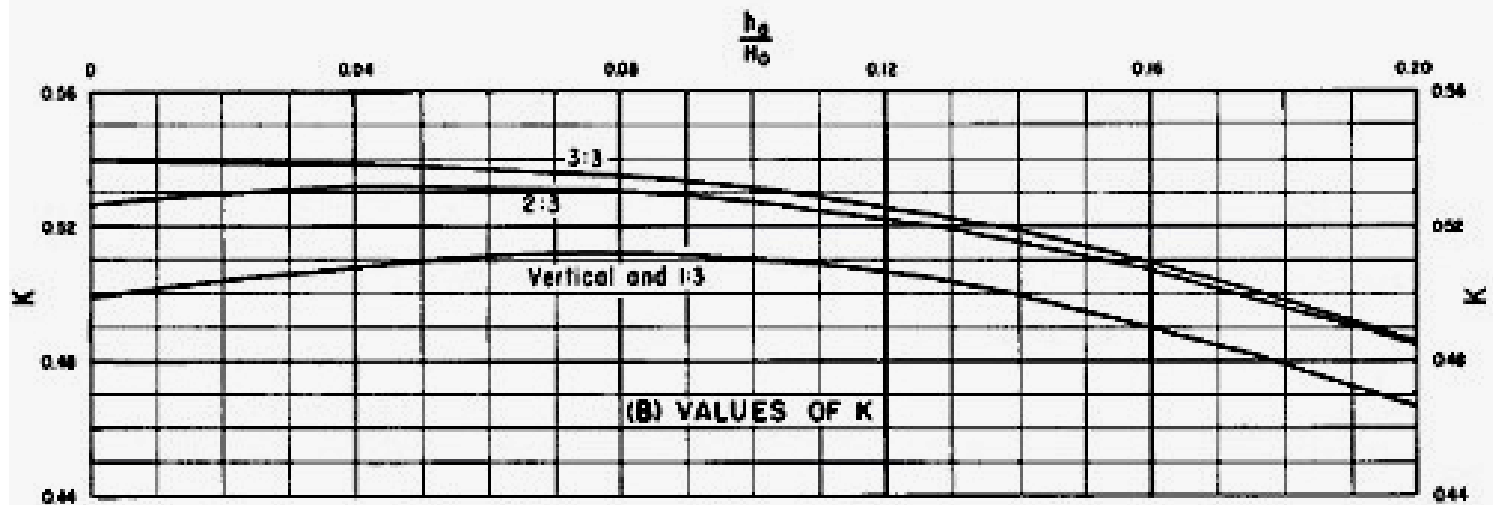
$$\frac{y}{H_o} = -K \left[\frac{X}{H_o} \right]^n$$

โดย $H_o =$ ความลึกของน้ำเหนือสันฝายรวม
เฮดความเร็ว หรือ $\frac{V_a^2}{2g}$ หรือ h_a

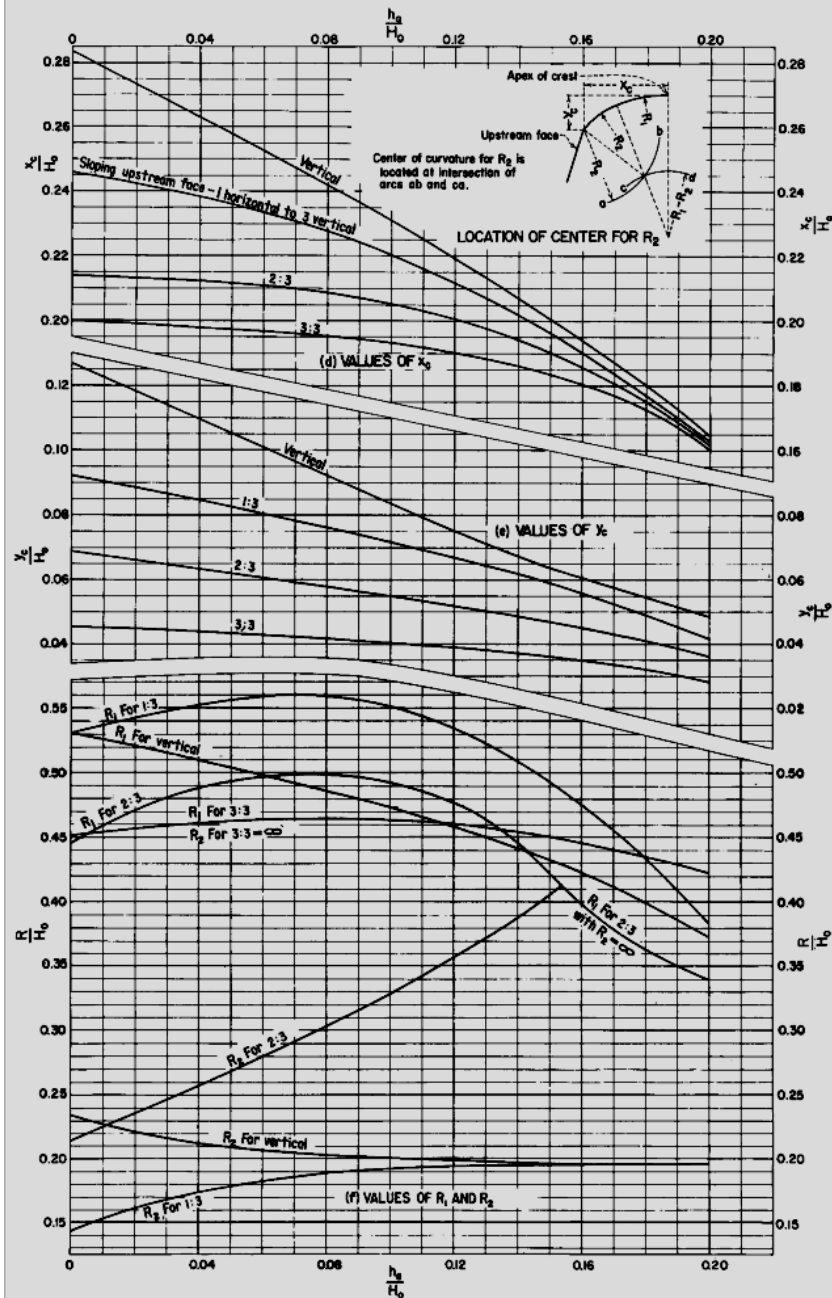
K และ $n =$ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความลาดเอียง
ของผิวเรียบตรงด้านหน้าฝายและ h_a



ELEMENTS OF NAPPE-SHAPED GREST PROFILES

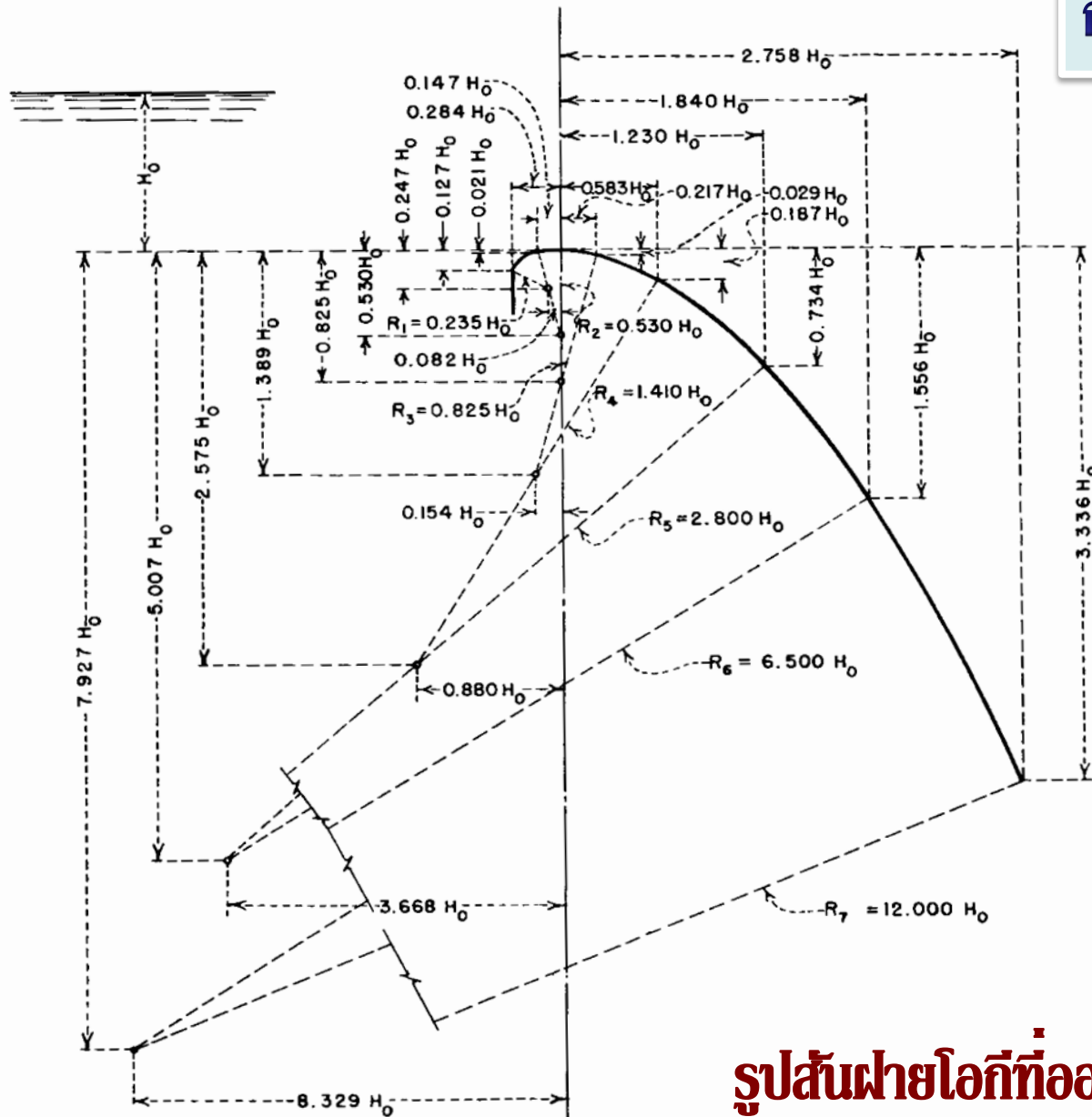


ค่า K และค่า n สำหรับออกแบบโค้งสันฝายโอที ของ USBR



ค่าแฟกเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ออกแบบโค้ง
 ก่อนจุดยอดสันฝายโอทีของ USBR

กรณี $P \geq 0.5H_0$



รูปส่นฝ่ายโอที่ที่ออกแบบโดยใช้โค้งผสม



การคำนวณปริมาณน้ำไหลข้ามฝาย

$$Q = 0.5522CL_e H_e^{3/2} \text{ ม.}^3/\text{วินาที}$$

C = สัมประสิทธิ์ของปริมาณการไหลผ่านฝาย

L_e = ความยาวประสิทธิผลของสันฝาย (Effective Length), เมตร

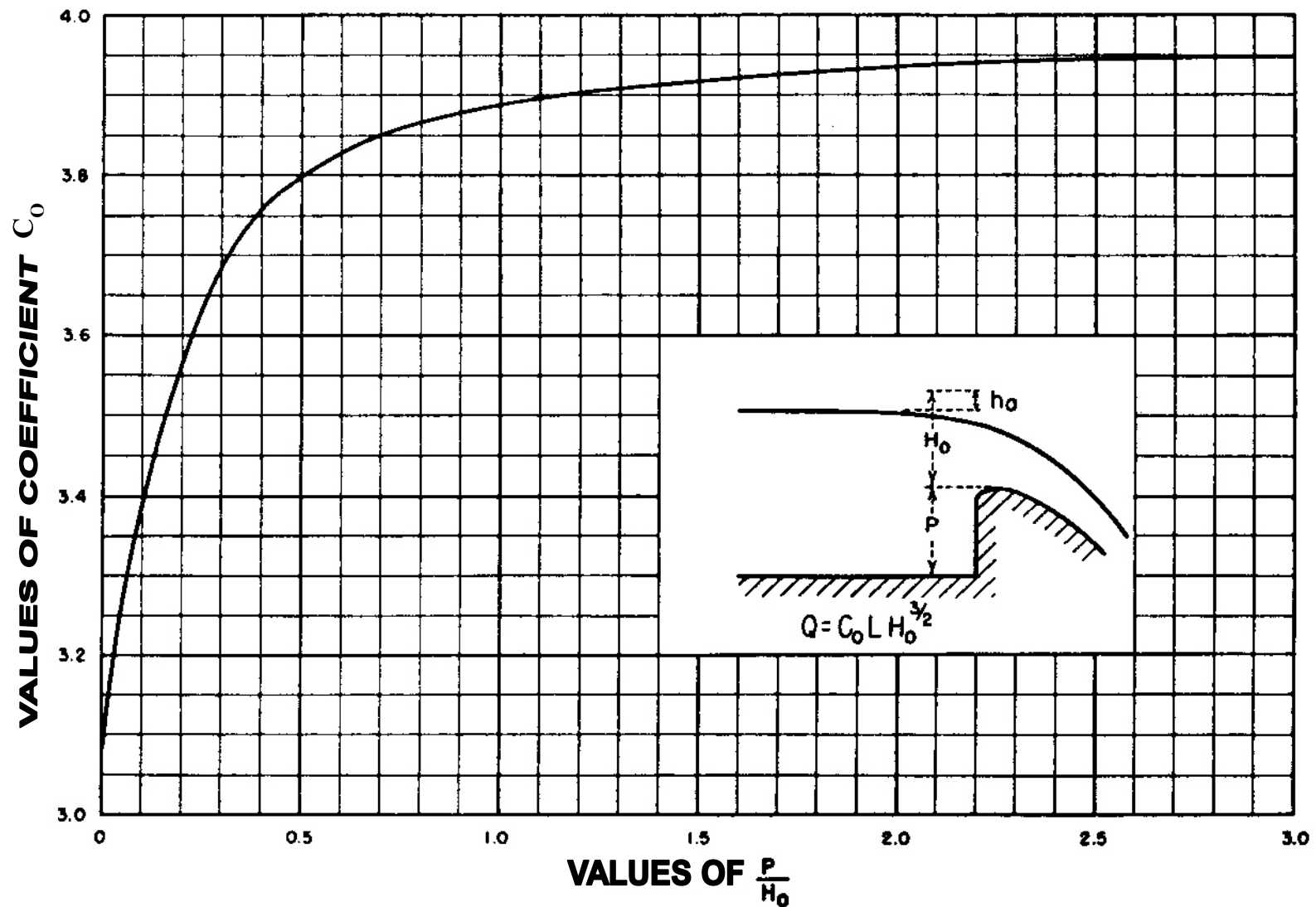
H_e = เหนือสันฝายซึ่งรวม $\frac{V^2}{2g}$ ด้วย, เมตร



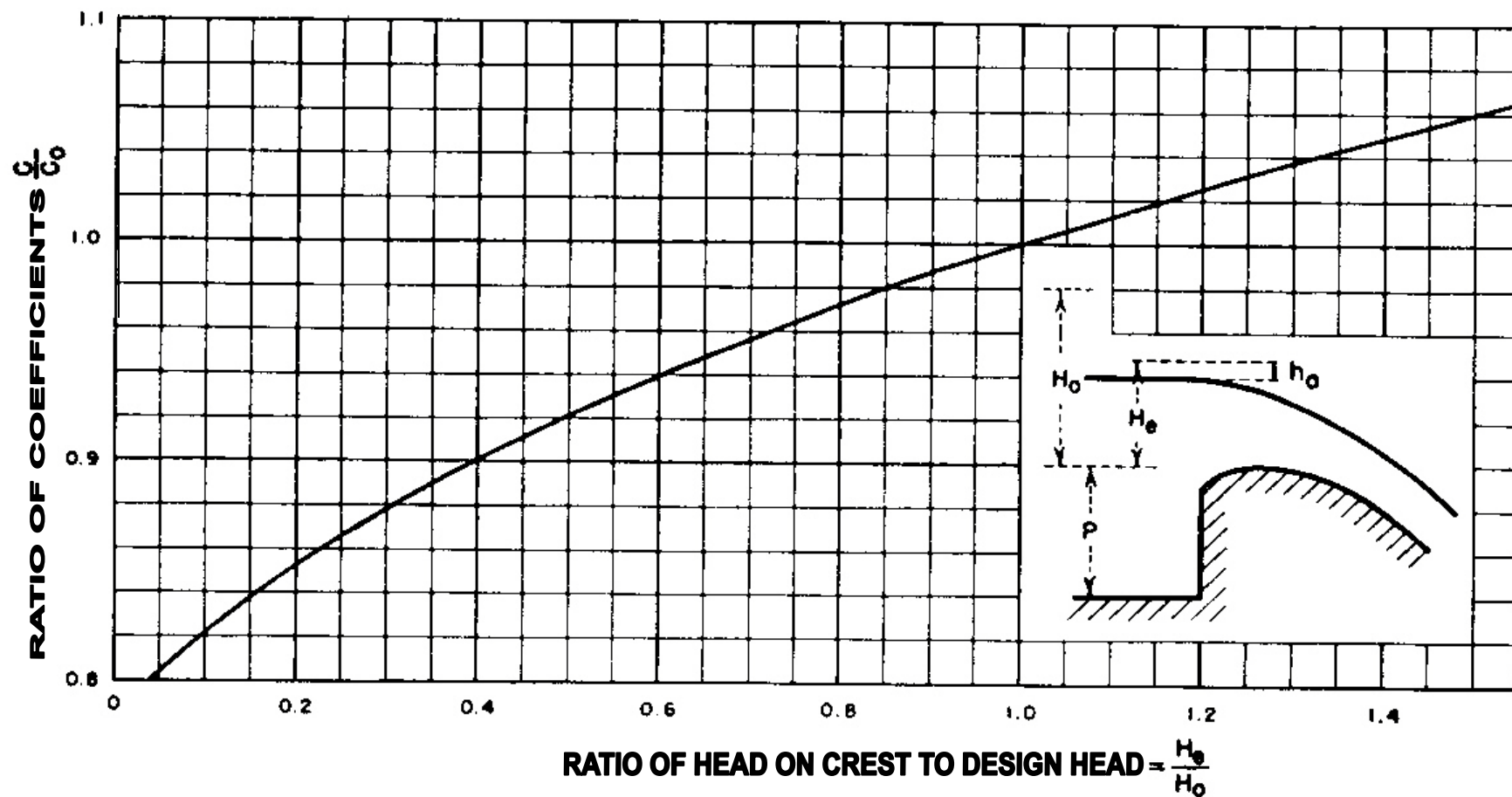
ค่าสัมประสิทธิ์การไหล

ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

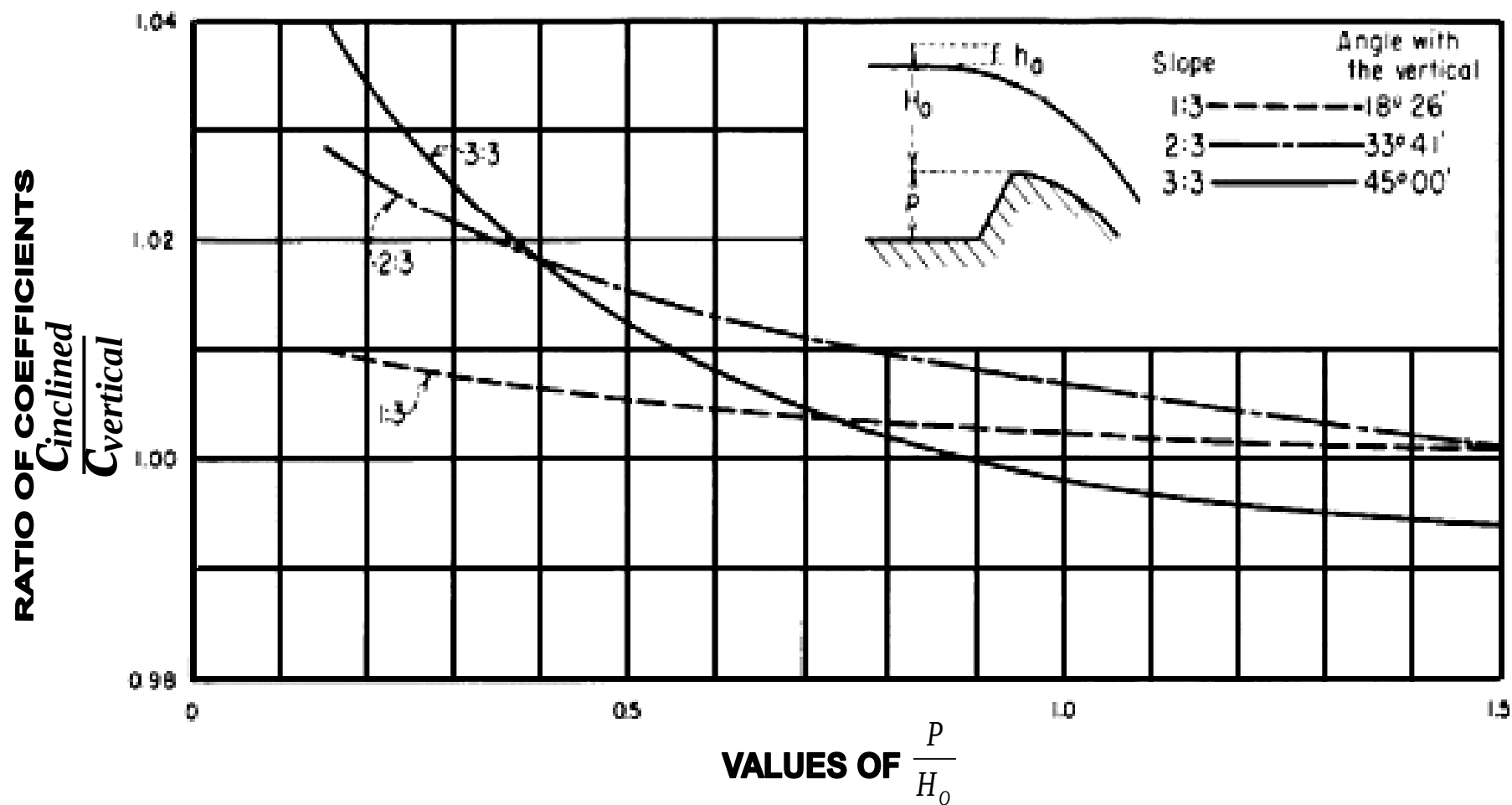
- ⇒ เหนือหน้าสันฝาย H_o และ H_e (กรณี Q ไม่เท่ากับ Q ออกแบบ)
- ⇒ ความลาดเอียงของผิวเรียบตรงด้านหน้าฝาย
- ⇒ ระดับพื้น BASIN ด้านท้ายฝาย
- ⇒ ระดับน้ำด้านท้ายฝาย



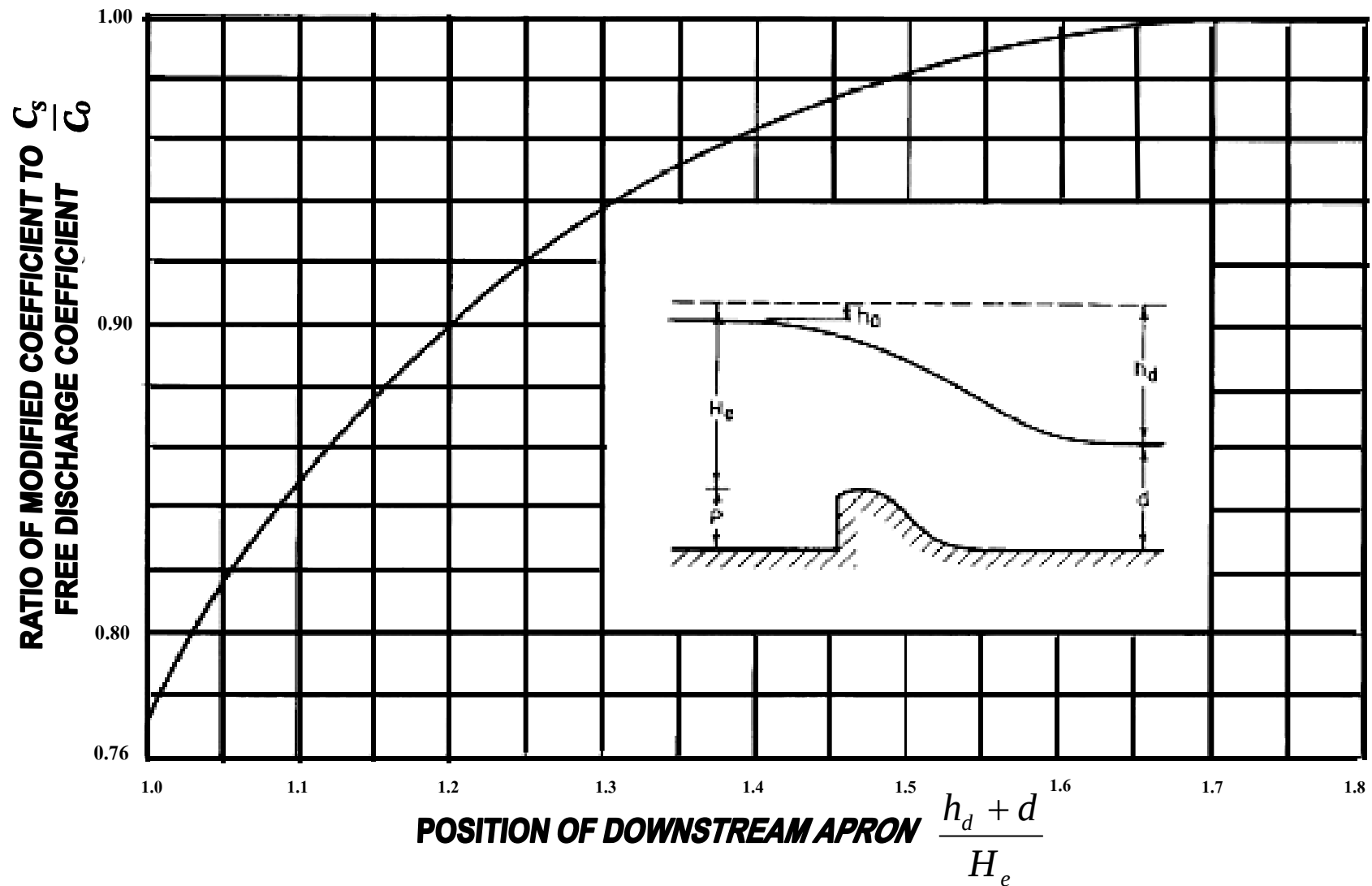
สัมประสิทธิ์ของปริมาณการไหลข้ามสันฝายโอเก้
ที่มีผิวด้านหน้าอยู่ในแนวตั้ง



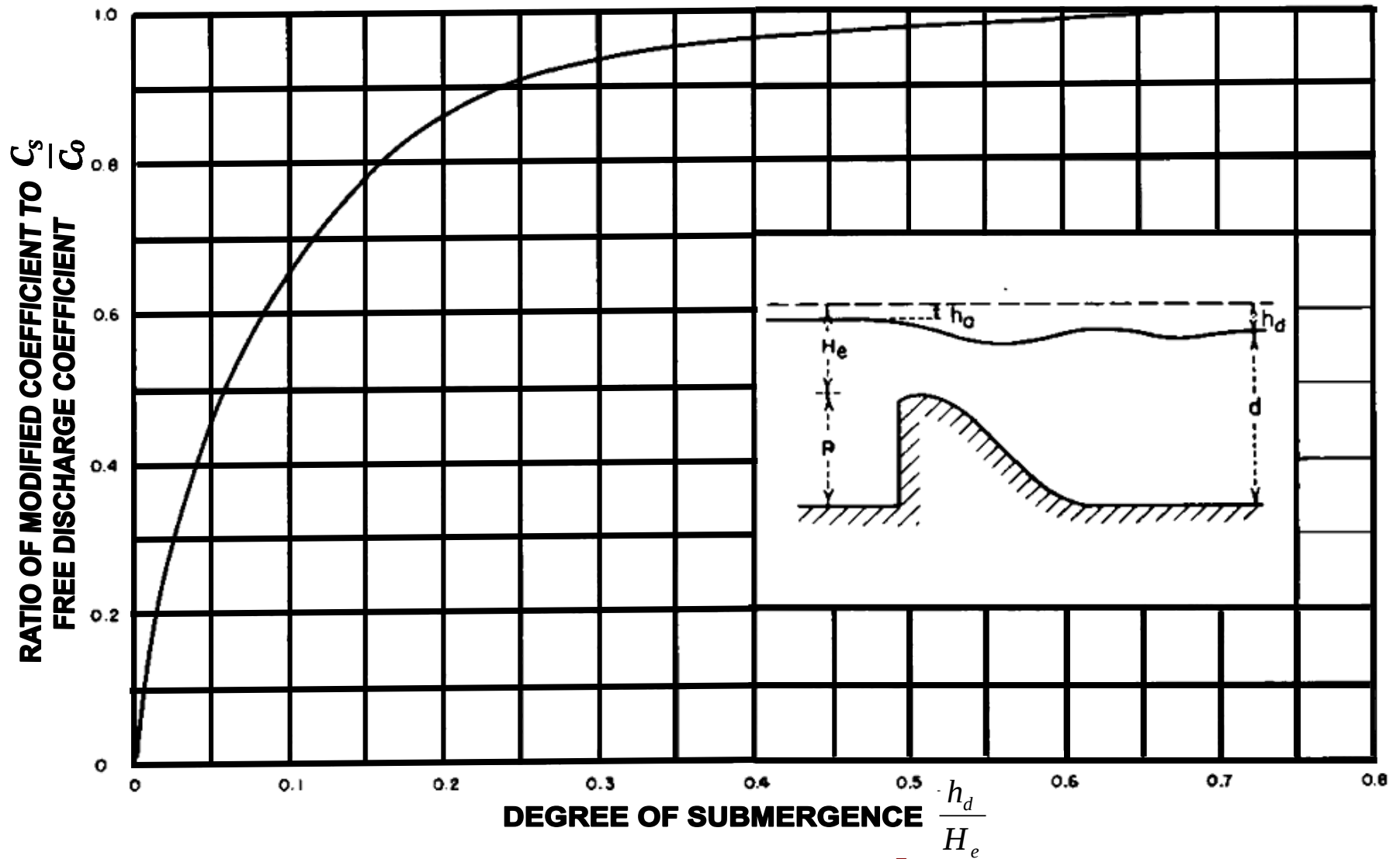
สัมประสิทธิ์ของปริมาณการไหลเมื่อ-head ต่างไปจาก H_0



สัมประสิทธิ์ของปริมาณการไหลข้ามสันฝาย
ในกรณีผิวด้านหน้ามีความลาดเอียง



ผลกระทบของระดับพื้นด้านท้ายฝายที่มีต่อค่าของ C



ผลกระทบของระดับน้ำด้านท้ายฝายที่มีต่อค่าของ C



ความยาวประสิทธิผลของสันฝาย

$$L_e = L' - 2(N \cdot K_p + K_a)H_e$$

โดย L' = ความยาวสุทธิของสันฝายหรือเฉพาะส่วนที่น้ำไหลกลับ

N = จำนวนตอม่อกลาง

K_p = **Contraction coefficient** ของตอม่อกลาง

K_a = **Contraction coefficient** ของตอม่อรับ



ตารางที่ 1 ค่า K_p ของตอม่อกลาง

ลักษณะของตอม่อกลาง

K_p

ตอม่อมีหัวเหลี่ยมมุมมนด้วยรัศมีเท่ากับ 0.1 เท่าของความหนาตอม่อ

0.02

ตอม่อมีหัวมนกลม

0.01

ตอม่อมีหัวแหลม

0.00



ตารางที่ 2 ค่า K_a ของกำแพงริมตลิ่ง

ลักษณะของกำแพงริมตลิ่ง	K_a
กำแพงริมตลิ่งเป็นเหลี่ยมโดยมี Head wall ทำมุม 90° กับทิศทางการไหลของน้ำ	0.2
กำแพงริมตลิ่งเป็นเหลี่ยมมุมมนโดยมี Head wall ทำมุม 90° กับทิศทางการไหลและมุมมนด้วยรัศมีระหว่าง $0.15 H_0$ และ $0.5 H_0$	0.1
กำแพงตลิ่งเป็นเหลี่ยมมุมมนด้วยรัศมีมากกว่า $0.5 H_0$ และ Head wall ทำมุมไม่เกิน 45° กับทิศทางการไหล	0.0

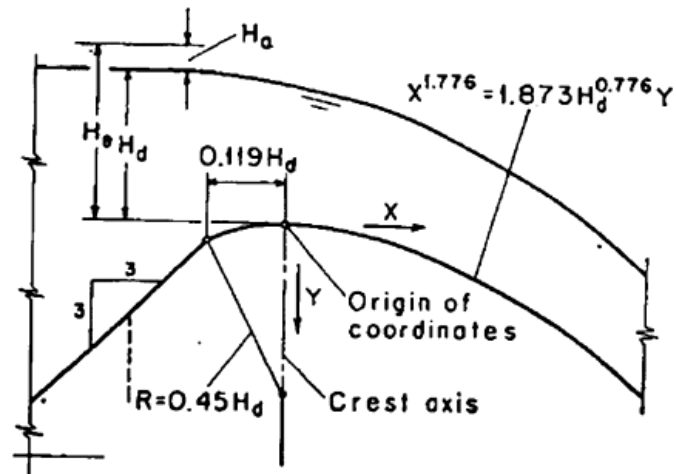
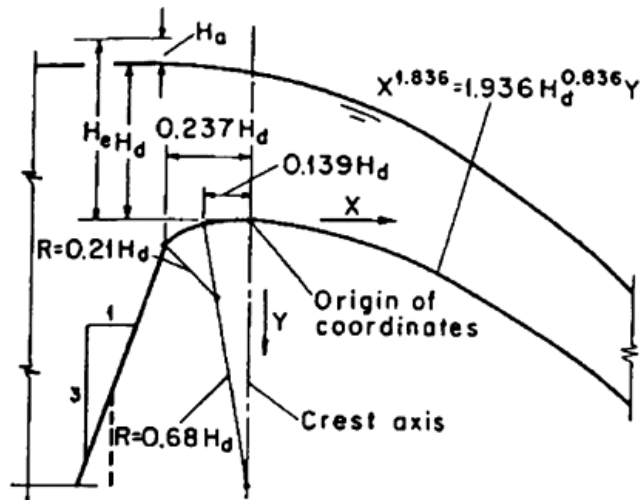
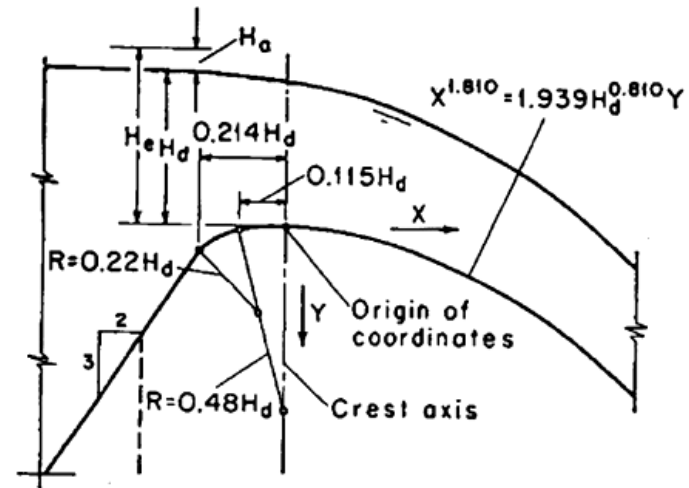
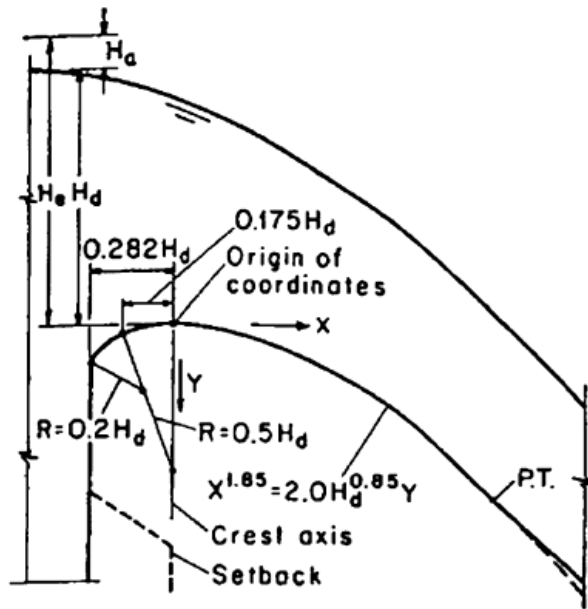


โค้งสันฝายโอเกียของ WES

$$X^n = K H_d^{n-1} y$$

โดย $H_d =$ ความลึกของน้ำเหนือสันฝายไม่รวม $\frac{V^2}{2g}$

K และ $n =$ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความลาดเอียงของ
ผิวเรียบตรงด้านหน้าฝาย



รูปร่างสันฟายโล่กี ตามมาตรฐาน WES



ตารางที่ 3 ค่า K และ n โคง้านฝ่ายโอกิจของ WES

ความลาดของผิวด้านหน้าฝาย	K	n
แนวดิ่ง	2.00	1.850
3:1 (ระยะตั้ง : ระยะราบ)	1.936	1.836
3:2	1.939	1.810
3:3	1.873	1.776



การคำนวณปริมาณน้ำไหลล้นฝาย

$$Q = 0.5522C(L' - K_p NH_e)H_e^{3/2} \text{ ม}^3/\text{วินาที}$$

โดย $L' =$ ความยาวสุทธิของสันฝายหรือเฉพาะส่วนที่น้ำไหลล้น, เมตร

$N = 2$ เท่าของจำนวนตอม่อ

$K_p =$ Contraction coefficient ของตอม่อกลาง
ในทางปฏิบัติใช้เท่ากับ 0.05

$H_e =$ เหนือสันฝายรวม $\frac{V^2}{2g}$



การหาค่าสัมประสิทธิ์การไหล

กรณีแรก

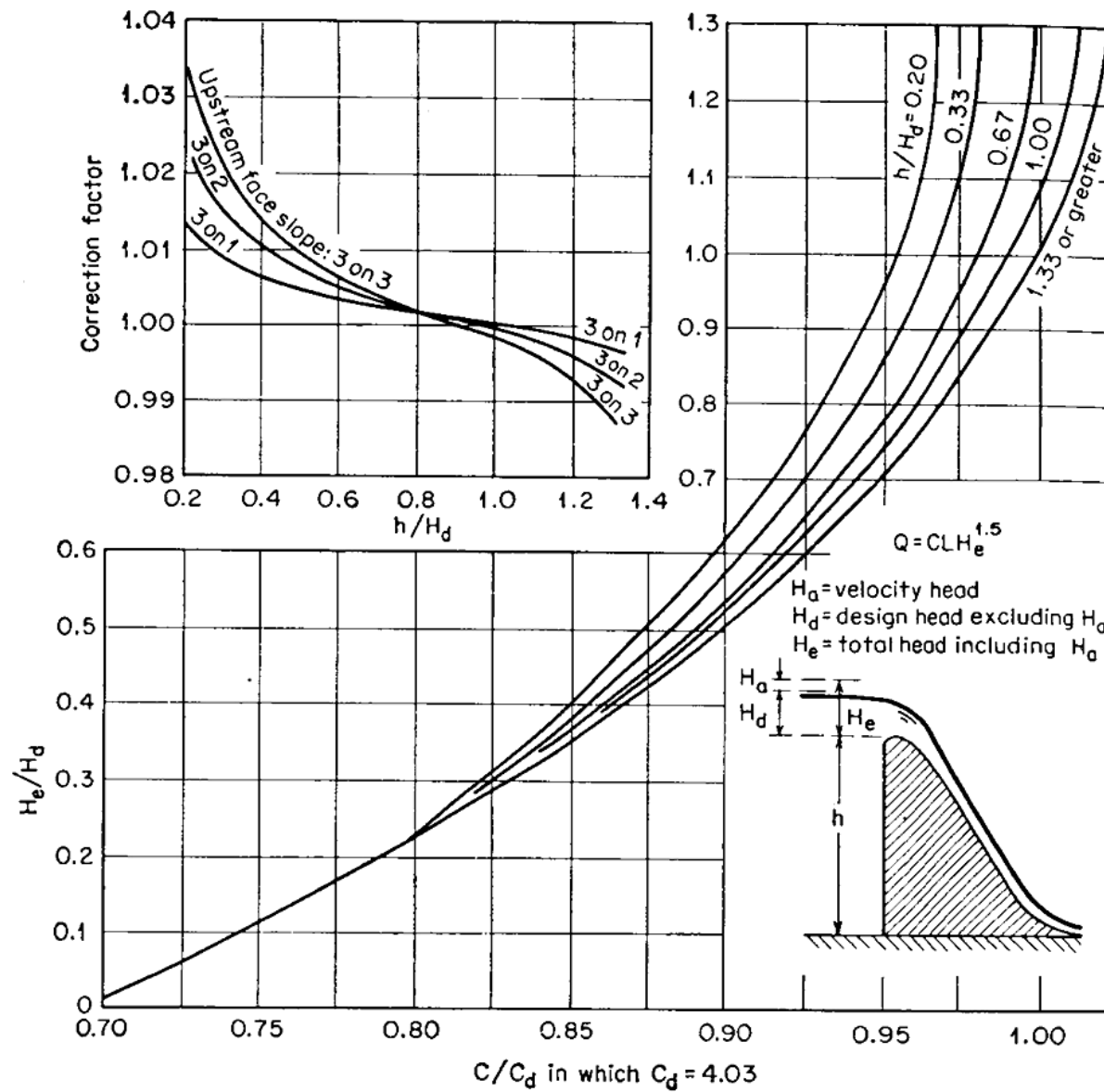
$$\frac{h}{H_d} \geq 1.33$$

- ไม่ต้องพิจารณา $\frac{V^2}{2g}$ จะได้ $\frac{H_e}{H_d} = 1$ และ $C = C_d = 4.03$

กรณีสอง

$$\frac{h}{H_d} \leq 1.33$$

- พิจารณา $\frac{V^2}{2g}$ ด้วยจะได้ $\frac{H_e}{H_d} \neq 1$



ความสัมพันธ์ระหว่างเฮดและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของสันผายโลกของ WES



การวิเคราะห์การไหลซึมและแรงดันใต้พื้นอาคาร

- ➡ ระยะทางน้ำซึมต้องมีความยาวพอเพียงเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด **Piping**
- ➡ หาแรงดัน **Uplift** ซึ่งมีผลต่อความมั่นคง



วิธีการของ Bligh

$$L_{\min} = C \Delta H \text{ ----- (8)}$$

เมื่อ $L_{\min}$ = ระยะทางน้อยที่สุดของการไหลซึมใต้ฐานโดยไม่เกิด piping

C = สัมประสิทธิ์การไหลซึมของ Bligh

ΔH = ผลต่างของระดับน้ำด้านหน้าและด้านท้ายของฝาย

โดย L เป็นระยะทางจริงที่น้ำไหลซึมผ่าน ไม่ว่าจะเป็นระยะทางในแนวราบ
หรือระยะทางในแนวดิ่ง



ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การไหลซึมของ Bligh

ชนิดดินฐานราก	C
 ทรายละเอียดมากหรือดินตะกอน	18
 ทรายละเอียด	15
 ทรายหยาบ	12
 กรวดและทราย	9
 หิน กรวด และทราย	4 ถึง 6



วิธีการของ Lane

$$L_{\min} = C_w \Delta H \text{ ----- (9)}$$

เมื่อ $C_w = \text{Weighted creep ratio} = \frac{L}{\Delta H}$

$\Delta H = \text{ผลต่างของระดับน้ำด้านหน้าและด้านท้ายของฝาย}$



การวิเคราะห์การไหลซึมและแรงดันใต้พื้นอาคาร

- 1) ระยะตามแนวดิ่งหรือแนวเอียงกับพื้นราบ**มากกว่า 45 องศา** ให้ใช้ความยาวจริง
- 2) ระยะแนวราบที่เลาะใต้พื้นอาคาร หรือ แนวเอียงทำมุมกับพื้นราบ**น้อยกว่า 45 องศา** ให้คิด $\frac{1}{3}$ ของความยาวจริง



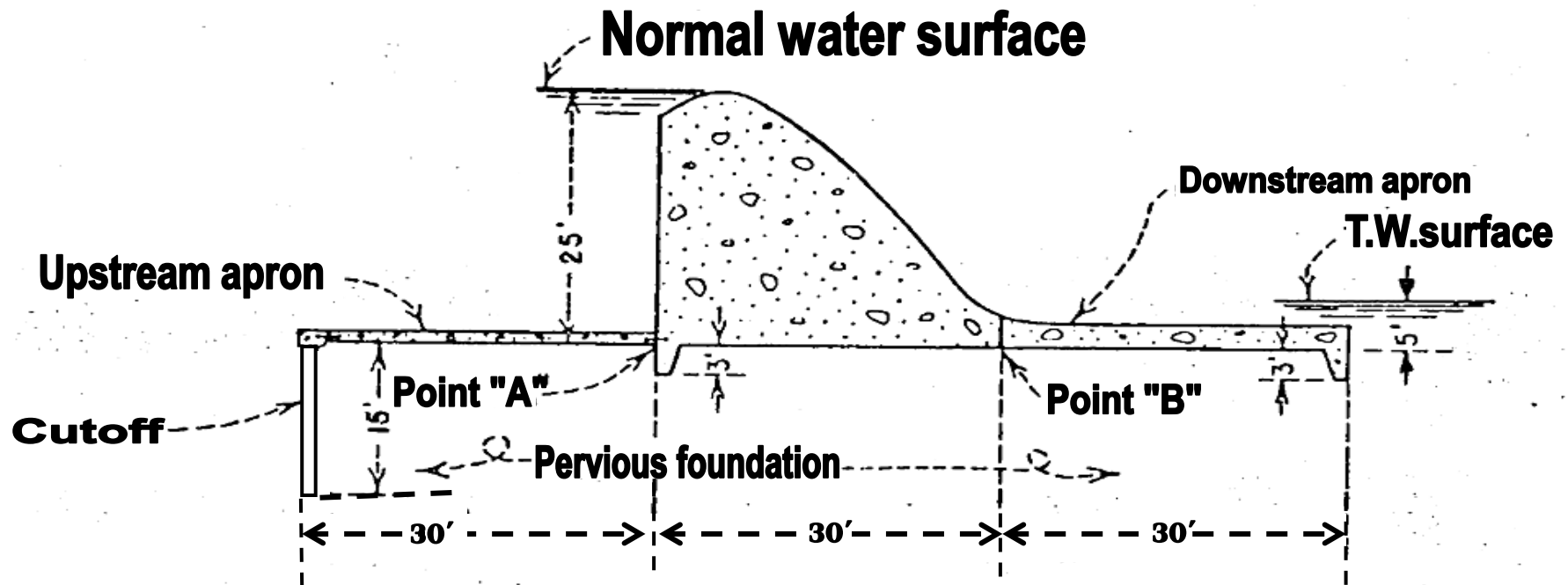
การวิเคราะห์การไหลซึมและแรงดันใต้พื้นอาคาร

3) Where the short path between two points on a creep line is less than one-half of the weighted-creep distance, percolation through the foundation material is assumed and the short path given a weight of 2.0



ตารางที่ 5 Weighted Creep Ratio ของ Lane

ชนิดดินฐานราก	Weighted Creep Ratio
- ทรายละเอียดมากหรือดินตะกอน	8.5
- ทรายละเอียด	7.0
- ทรายหยาบปานกลาง	6.0
- ทรายหยาบ	5.0
- กรวดละเอียด	4.0
- กรวดหยาบปานกลาง	3.5
- กรวดหยาบ	3.0
- หินใหญ่มีกรวดแทรก	2.5
- ดินเหนียวอ่อน	3.0
- ดินเหนียวแข็งปานกลาง	2.0
- ดินเหนียวแข็ง	1.8
- ดินเหนียวแข็งมากหรือดินดาน	1.6



Typical section of a concrete dam on a pervious foundation



ตามหลักการของ Lane

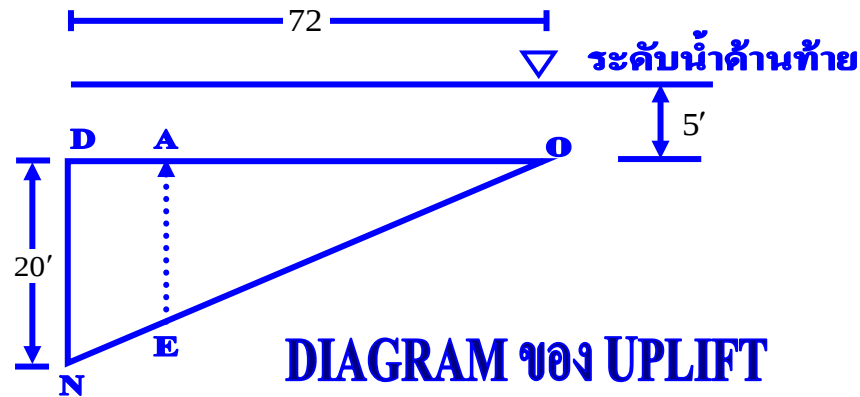
$$\begin{aligned}\text{ระยะทางน้ำไหลซึมแนวราบ} &= \frac{1}{3}(30 + 30 + 30) \\ &= 30 \quad \text{ฟุต}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ระยะทางน้ำไหลซึมแนวตั้ง} &= 15 + 15 + (4 \times 3) \\ &= 42 \quad \text{ฟุต}\end{aligned}$$

$$\text{ระยะทางน้ำซึมทั้งหมด} = 30 + 42 = 72 \quad \text{ฟุต}$$

$$\text{Head on Structure} = 25 - 5 = 20 \quad \text{ฟุต}$$

$$\text{Weighted Creep Ratio} = \frac{72}{20} = 3.6 \quad \text{ฟุต}$$



DA = WEIGHTED CREEP DISTANCE

$$= 15 + 15 + \frac{30}{3} = 40$$

สามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{AE}{DN} = \frac{AO}{DO} = \frac{DO - DA}{DO} = 1 - \frac{DA}{DO}$$

$$\frac{AE}{20} = 1 - \frac{40}{72}$$

$$AE = 20 - \frac{40}{72} \times 20 = 8.9$$

$$\text{Uplift Pressure ใต้จุด A} = 5 + 8.9 = 13.9 \text{ ฟุต}$$



แรงดันยกตัว Uplift Pressure

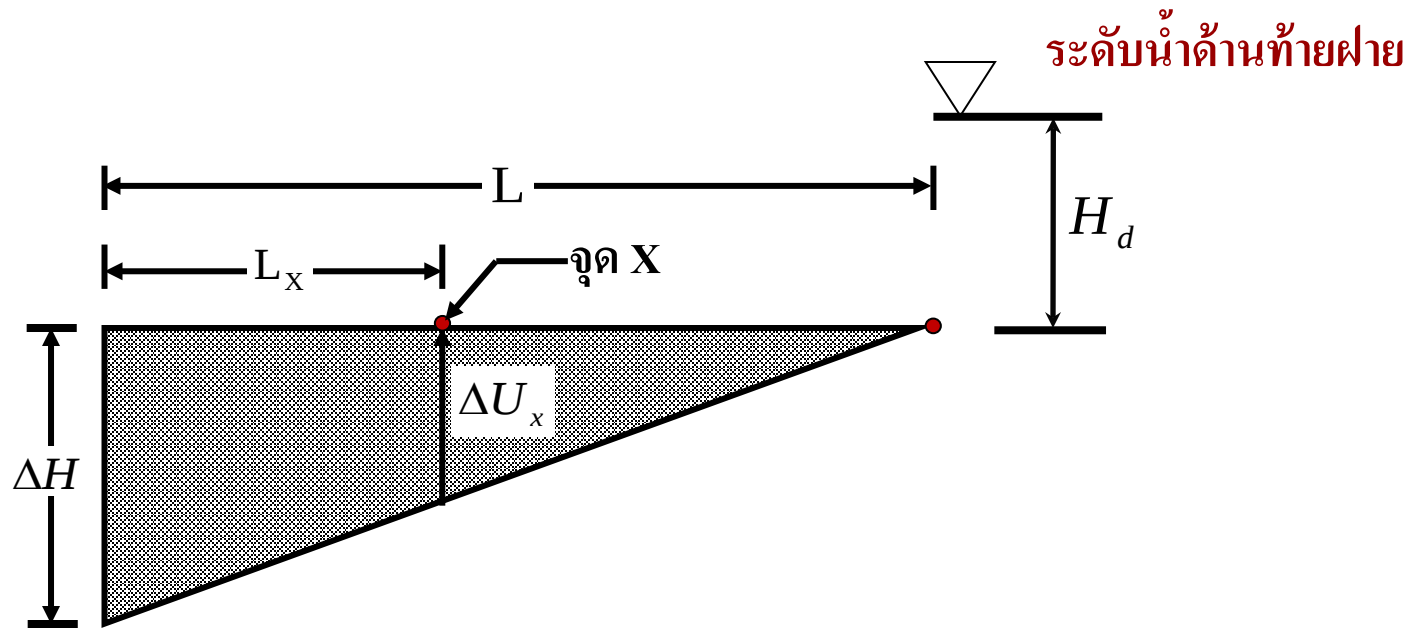
$$U_x = \left[1 - \frac{Lx}{L} \right] \Delta H + H_d \quad \text{เมตร}$$

ΔH = ผลต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำ
และด้านท้ายน้ำของฝาย , เมตร

H_d = ความลึกของน้ำด้านท้ายฝาย วัดจากใต้พื้นฝาย , เมตร



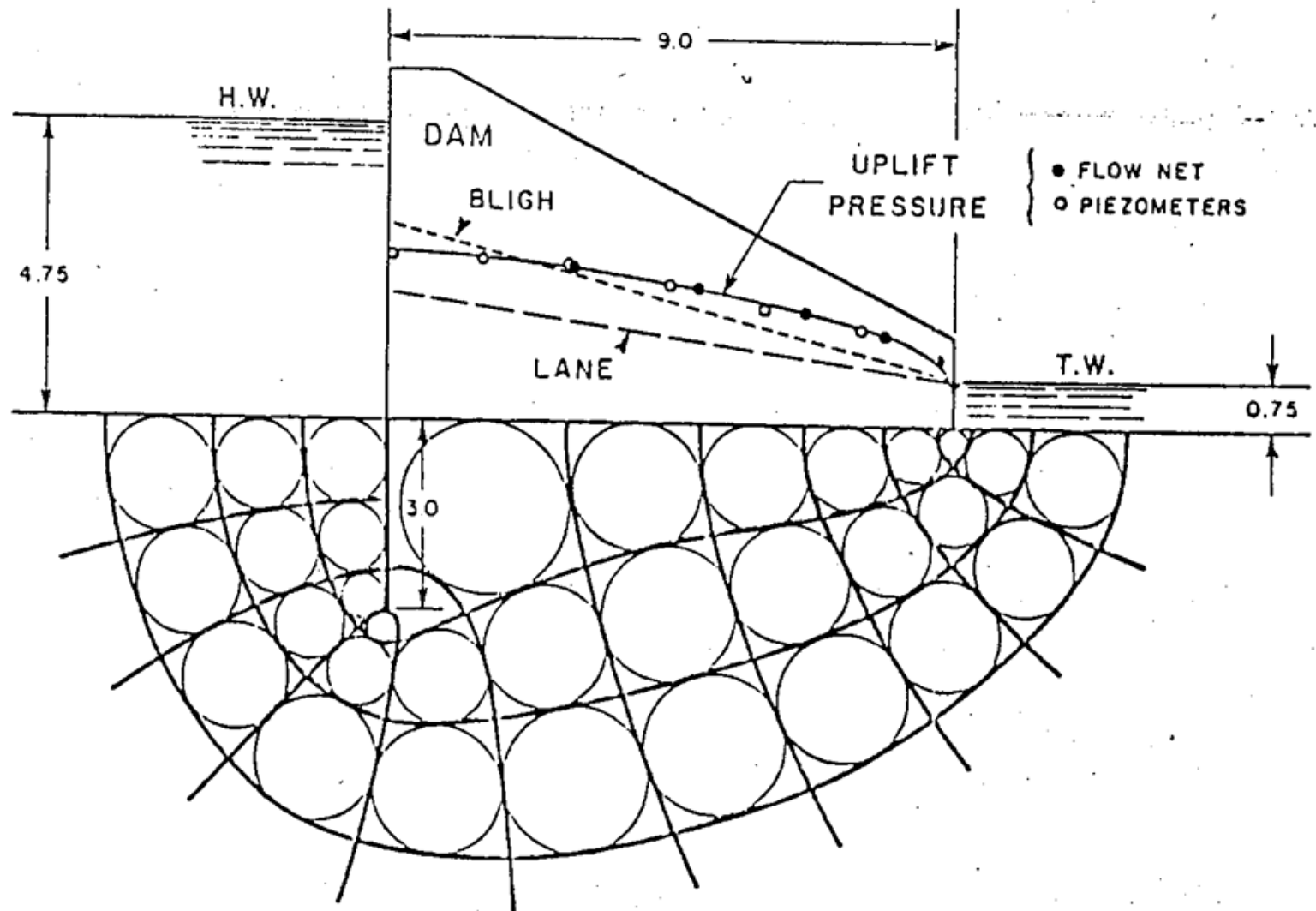
ไดอะแกรมของการวิเคราะห์ Uplift Pressure



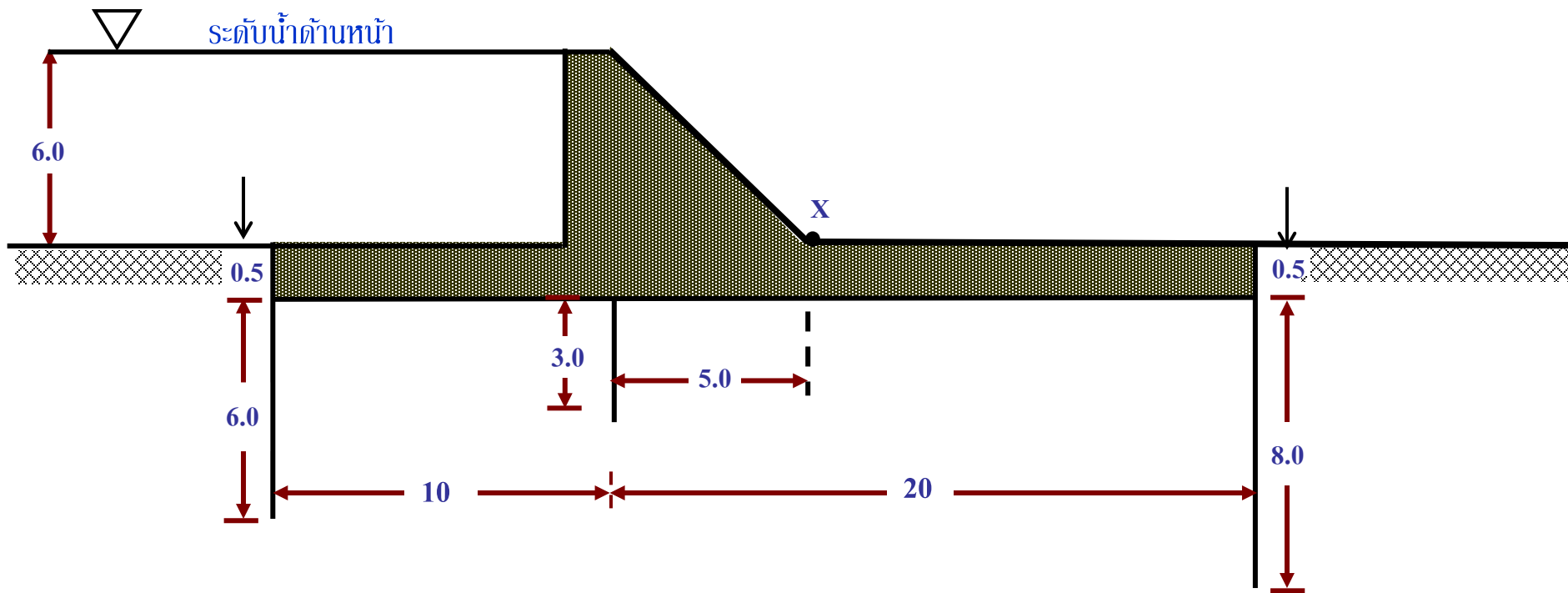
$$\Delta U_x = \frac{L - L_x}{L} \times \Delta H$$

$$U_x = H_d + \Delta U_x$$

$$= \left[1 - \frac{L_x}{L} \right] \Delta H + H_d$$



**ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์
UPLIFT PRESSURE**



การเปรียบเทียบผลของการหา Uplift และ Exit gradient

	Bligh	Lane	Flow net	Khosla
h_x (เมตร)	2.93	2.88	2.61	3.33
i_e	1/10.8	1/7.5	1/6.9	1/6.8



การวิเคราะห์การไหลซึมและแรงดันใต้พื้นอาคาร

Exit Gradient

$$i_e = \frac{\Delta H}{L} < i_s$$

โดย i_s = ค่าของ Exit Gradient ที่ยอมให้ใช้ได้

L = Weighted Creep Distance



Table 6.1
Recommended safe hydraulic gradient

MATERIAL	Safe exit gradient , i_s	
	Lane's method	Bligh's method
Very fine sand or silt	1/8.5	1/18
Fine sand	1/7.0	1/15
Medium sand	1/6.0	-
Coarse sand	1/5.0	1/12
Fine gravel	1/4.0	-
Medium gravel	1/3.5	-
Gravel and sand	1/3.0	1/9
Coarse gravel including cobbles	1/3.0	-
Boulders with some cobbles and gravel	1/2.5	-
Boulders, gravel and sand	-	1/4-6
Soft clay	1/3.0	-
Medium clay	1/2.0	-
Hard clay	1/1.8	-
Very hard clay or hard pan	1/1.6	-

Safe exit gradient for difference types of soil

(อ้างอิงโดยวิธี Flow net และวิธี Khosla)

Type of material	Safe gradient (i_s)
1. Shingle	1/4 - 1/5
2. Course sand	1/5 - 1/6
3. Fine sand	1/6 - 1/7



การป้องกันการเกิด Piping

- ⇒ เพิ่มระยะทางแนวราบของพื้นด้านหน้าฝาย
- ⇒ เพิ่มระยะทางแนวตั้ง
 - กำแพง CUTOFF
 - เข็มฟัด (SHEET PILE)



กำแพง Cutoff

หน้าที่ของ Cutoff

- ⇒ เพิ่มระยะทางน้ำไหลซึม
- ⇒ ป้องกันการกัดเซาะย้อนเข้าใต้พื้น โดยเฉพาะกำแพง Cutoff ตัวที่อยู่ด้านท้ายน้ำ
- ⇒ ช่วยต้านทานการเลื่อนไถลของฝาย
- ⇒ กรณีมีกำแพง Cutoff ล้อมรอบใต้พื้นอาคารทั้ง 4 ด้าน ช่วยป้องกันดินใต้พื้นอาคารทะลักออกด้านข้าง เมื่อน้ำหนักกดทับ



การออกแบบกำแพง Cutoff

ตำแหน่ง : ควรจะอยู่ต้นทางของพื้นด้านเหนือน้ำและด้านปลาย
ของพื้นด้านท้ายน้ำหรือพื้น BASIN

ความหนาและความลึก

- ❖ เกณฑ์ขั้นต่ำสุด ดูได้จากตาราง
- ❖ ความลึก ไม่ควรมากกว่า 2.0 เมตร
- ❖ แนวกำแพง 2 แห่ง ที่อยู่ใกล้กันต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 2 เท่า
ของความลึกกำแพงตัวที่ลึกกว่า



ตารางที่ 6 ขนาดน้อยสุดของกำแพง Cutoff

ความลึกน้ำ(ม.)	ความลึกกำแพง(ม.)	ความหนา(ม.)
ไม่เกิน 1.0 ม.	0.50	0.20
1.01–2.00	1.00	0.30
2.01–3.00	1.50	0.40
มากกว่า 3.00	2.00	0.50



เข็มปิด

- เข็มปิดทำหน้าที่เหมือนกำแพง Cutoff
- ไม่เหมาะสำหรับดินฐานรากเป็นหินและกรวด



ตำแหน่งของเข็มปิด

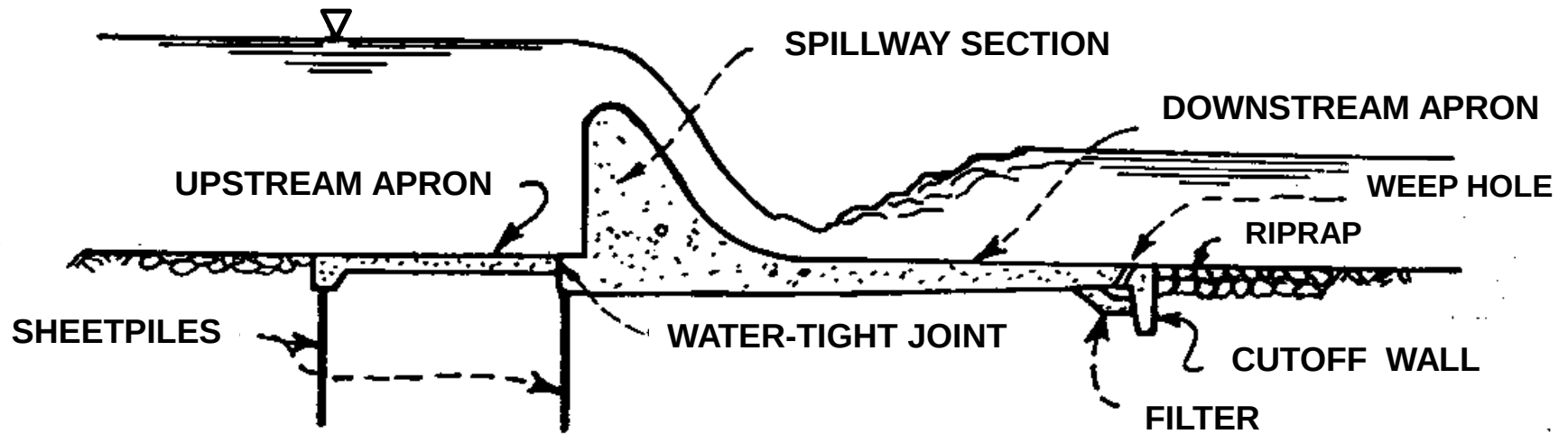
- แถวที่หนึ่งควรอยู่ที่ปลายด้านเหนือน้ำของพื้นด้านหน้าฝาย (Upstream Apron)
- แถวที่สองควรอยู่ใต้ฐานฝายด้านเหนือน้ำ เพื่อป้องกันดินใต้ฐานฝายในกรณีที่เกิดการพังเสียหายของ Joint และช่วยรับน้ำหนักฝายได้บางส่วน
- แถวที่สาม ควรอยู่ที่ปลายท้ายน้ำของพื้นด้านท้ายฝาย (Downstream Apron) และด้านหน้าควรจะต้องมีตัว Weep Hole และ Filter



กำแพง Cutoff หรือ เข็มปิด

เข็มปิดหรือกำแพง Cutoff แลวที่สามช่วยเพิ่ม
ระยะทางให้น้ำไหลซึมด้านท้าย แต่จะทำให้ Uplift
Pressure ใต้พื้น Basin ด้านท้ายเพิ่มมากขึ้นด้วย
จึงควรมี Weep Hole และ Filter ไว้ด้านหน้า
เข็มปิดหรือกำแพง Cutoff แลวที่สาม เพื่อลด
Uplift Pressure

ตำแหน่งของเขื่อนฟัด (Sheet Pile)





การออกแบบพื้นด้านหน้าฝาย

- * ป้องกันการกัดเซาะ
- * ทำให้ Uplift Pressure ใต้ฝายและพื้นด้านท้าย มีขนาดลดลง
- * ต้นทางของพื้น ควรจะต้องมีกำแพง Cutoff เพื่อ
 - ❖ ยึดระยะทางน้ำไหลขึ้น
 - ❖ ป้องกันการกัดเซาะเข้าใต้พื้น
- * ยาวไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความสูงฝาย



การออกแบบพื้นด้านท้ายฝาย

- * ป้องกันการกัดเซาะพื้นด้านท้ายฝายจากความปั่นป่วนของน้ำ ความเร็วสูงที่ไหลลงมาจากฝาย
- * เพิ่มระยะทางน้ำไหลซึมด้านท้าย
- * ทำการลด Uplift Pressure ได้พื้นโดยใช้ Weep Holes และ Filter



การออกแบบพื้นด้านท้ายฝาย

- * ความยาวเป็นไปตามเกณฑ์ของการออกแบบ Stilling Basin
- * พื้นไม่ควรหนาน้อยกว่า 0.30 เมตร
- * ความหนาพื้นต้องสามารถต้านแรงดันยกตัวได้

$$t = 1.3 \frac{\gamma_w \cdot U_x}{\gamma_c}$$

โดย U_x = Uplift Pressure , เมตร

γ_w = น้ำหนักหน่วงหน่วยของน้ำ

γ_c = น้ำหนักหน่วงหน่วยของคอนกรีตเสริมเหล็ก



การออกแบบพื้นด้านท้ายฝาย..อีกหนึ่งทางเลือก

คำนวณความหนาพื้นฝายที่จุด Toe จากสูตร

$$t = \frac{\gamma_w U_x}{(\gamma_m - \gamma_w)}$$

เมื่อ t = ความหนาของพื้นฝาย (ม.)

γ_m = น้ำหนักจำเพาะของวัสดุสร้างฝาย (กก./ลบ.เมตร)

γ_w = ค่าน้ำหนักจำเพาะของน้ำ (1000 กก./ลบ.เมตร)

U_x = ค่า uplift pressure ณ จุด Toe (ม.)



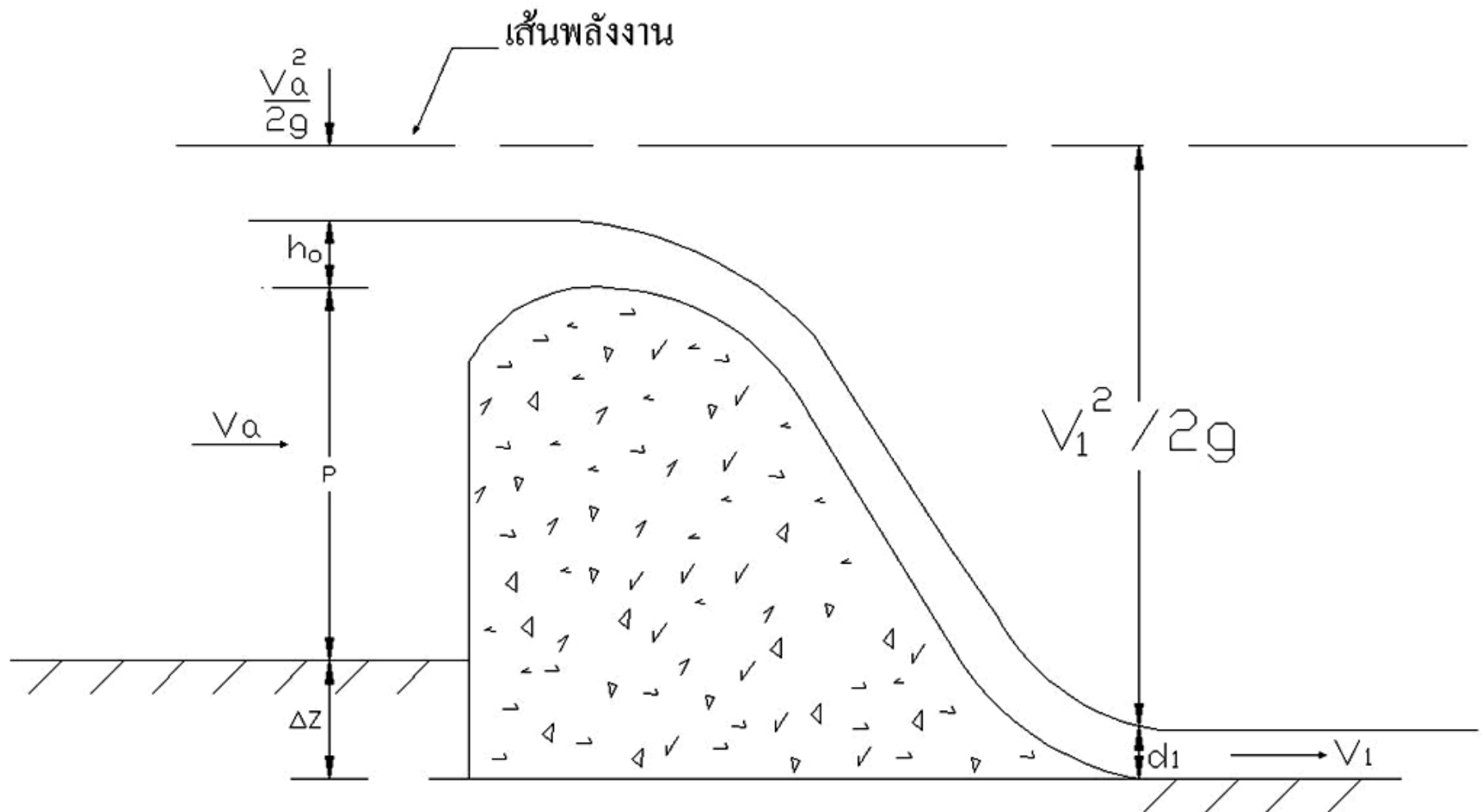
การคำนวณหาความเร็วที่ต้นฝาย

$$\Delta Z + P + h_o + \frac{V_a^2}{2g} = d_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

โดย $V_a = \frac{q}{P + h_o} =$ ความเร็วการไหลด้านหน้าฝาย

$$V_1 = \frac{q}{d_1} = \text{ความเร็วของน้ำที่ต้นฝาย}$$

$q =$ ปริมาณการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของหน้าตัด



การคำนวณหาความเร็วที่ต้นฝาย



การวิเคราะห์รูปตัดตามยาวของพืชน้ำด้านหน้าฝาย

ใช้วิธี Standard Step



การวิเคราะห์ความลึกการไหลด้านท้ายน้ำ

✱ จัดทำ Rating Curve หรือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ ระดับน้ำ

✱ กรณีไม่มีการตรวจวัดข้อมูล ใช้สมการแมนนิง

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2}$$

โดย A = พื้นที่หน้าตัดการไหล, ตร.เมตร

R = รัศมีชลศาสตร์, เมตร A/P

P = Wetted Perimeter , เมตร

S = ความลาดเทของท้องน้ำ , ทศนิยม

n = ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง



ขั้นตอนการสร้าง Rating Curve

ขั้นตอนการสร้าง Rating Curve พอสรุปได้ดังนี้

- * ทำการสำรวจหน้าตัดของลำน้ำตรงตำแหน่งที่จะสร้างฝายทดน้ำ
- * ทำการสำรวจความลาดชันของท้องลำน้ำ
- * เขียนรูปหน้าตัดด้วยมาตราส่วนที่เหมาะสมลงในกระดาษ
- * กำหนดความลึกของน้ำค่าต่าง ๆ เพื่อหาค่า A, P และ R ที่สอดคล้องกับความลึกของน้ำและรูปหน้าตัด
- * ทำการประเมินกำหนดค่า n ตามชนิดของวัสดุหรือดินและลักษณะของลำน้ำ
- * คำนวณหาความเร็วและอัตราการไหลตามสมการของแมนนิง
- * เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหรือระดับน้ำและอัตราการไหล



ขั้นตอนการสร้าง Rating Curve (ต่อ)

ในกรณีที่มีการปรับแต่งลำน้ำด้านท้ายต่อจากอ่างน้ำนิ่ง เป็นช่วงระยะความยาวที่เหมาะสม การวิเคราะห์หา Rating Curve จะใช้ข้อมูลหน้าตัดและลักษณะของลำน้ำจากการปรับแต่งลำน้ำ ดังกล่าว



DOWNSTREAM RETROGRESSION

หลังจากสร้างฝายเสร็จ ฝายจะดักตะกอนที่มีอยู่เดิมตามธรรมชาติไว้ด้านหน้าฝาย ทำให้น้ำที่ไหลผ่านฝายสามารถกัดเซาะและพัดวัสดุท้องน้ำด้านท้ายได้เพิ่มมากขึ้น เพื่อทำให้ปริมาณตะกอนที่ปนมากับน้ำเท่ากับปริมาณของเดิมที่มีอยู่ตามศักยภาพของลำน้ำ



DOWNSTREAM RETROGRESSION

พื้นที่ongน้ำด้านท้ายถูกกักเข้ะและต่ำลง เป็นผลทำให้ระดับน้ำ
ด้านท้ายลดต่ำลง ทำให้มีโอกาเกิดนอก BASIN



การวิเคราะห์ความมั่นคงตัวฝาย

ฝายจะต้องมีความมั่นคงปลอดภัยจากกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- * ความมั่นคงต่อการเกิด piping
- * ความมั่นคงต่อการเลื่อนตัว (Sliding)
- * ความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ (Overturning)
- * ความมั่นคงต่อการรับน้ำหนักกดของดินใต้ฐาน



ความมั่นคงต่อการเกิด Piping

การไหลซึมของน้ำลอดใต้ฐานและไหลอ้อมปีกฝาย
จะต้องไม่นำพาเอาเม็ดดินหลุดติดออกมาด้วย เพื่อไม่ให้
เกิดเป็นโพรง (Piping)



ความมั่นคงต่อการเกิด Piping (ต่อ)

วิธีวิเคราะห์มีหลายวิธี

- 1 วิธีของ Bligh
- 2 วิธีของ Lane
- 3 วิธีของ Khosla
- 4 วิธีการสร้าง Flow Net



เงื่อนไขในการวิเคราะห์แรง

1. หลังจากสร้างเสร็จ
 - ไม่มีน้ำทั้งด้านหน้าและด้านหลัง
2. กรณีใช้งานปกติ
 - ด้านหน้ามีน้ำเต็มและด้านหลังไม่มีน้ำ
3. กรณีมีน้ำท่วม
 - ด้านหน้ามีน้ำเต็ม ถึง ระดับน้ำท่วมสูงสุด
 - ด้านท้ายฝายใช้ระดับน้ำแค่ 60 % ของระดับน้ำสูงสุด
 - วิเคราะห์ Uplift Pressure ให้ใช้ 100 %
ของระดับน้ำท่วมสูงสุดด้านท้าย



แรงกระทำต่อฝาย

1. แรงดันน้ำด้านหน้าฝาย

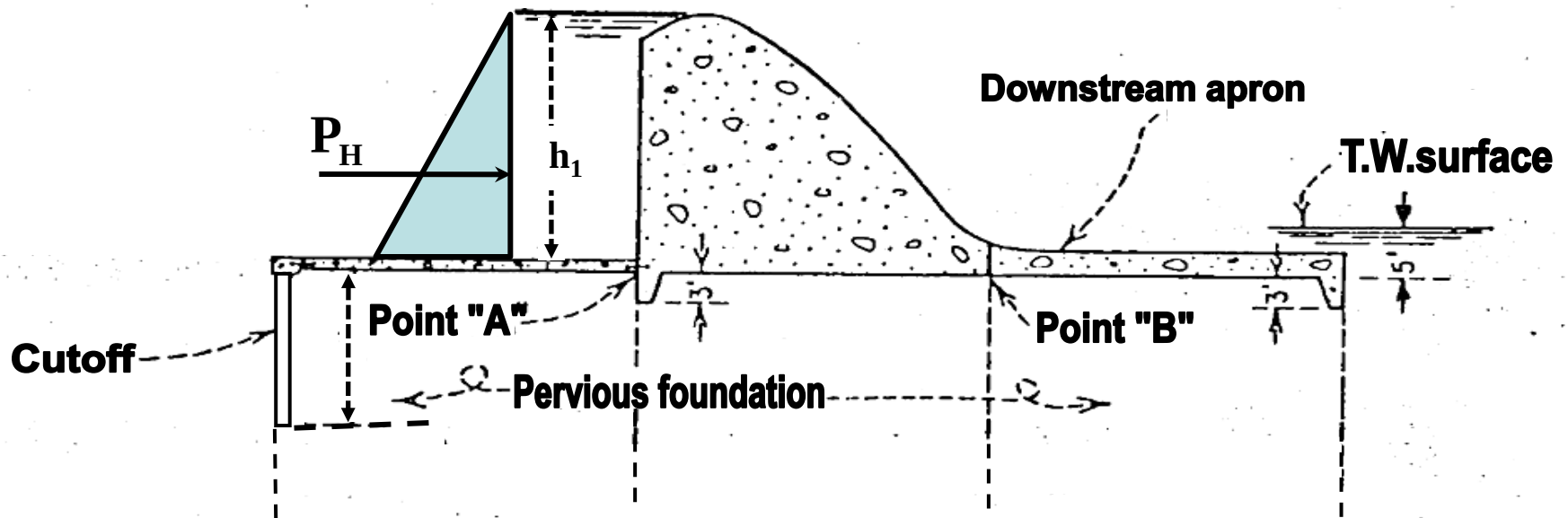
กรณีน้ำไม่ล้นฝาย

$$P_H = \frac{1}{2} \gamma_w h_1^2$$

โดย P_H = แรงในแนวนอนต่อหนึ่งหน่วยความยาว
ของสันฝาย

h_1 = ความลึกของน้ำด้านหน้าฝาย

$$P_H = \frac{1}{2} \gamma_w h_1^2$$



แรงดันน้ำด้านหน้าฝาย



แรงกระทำต่อฝาย

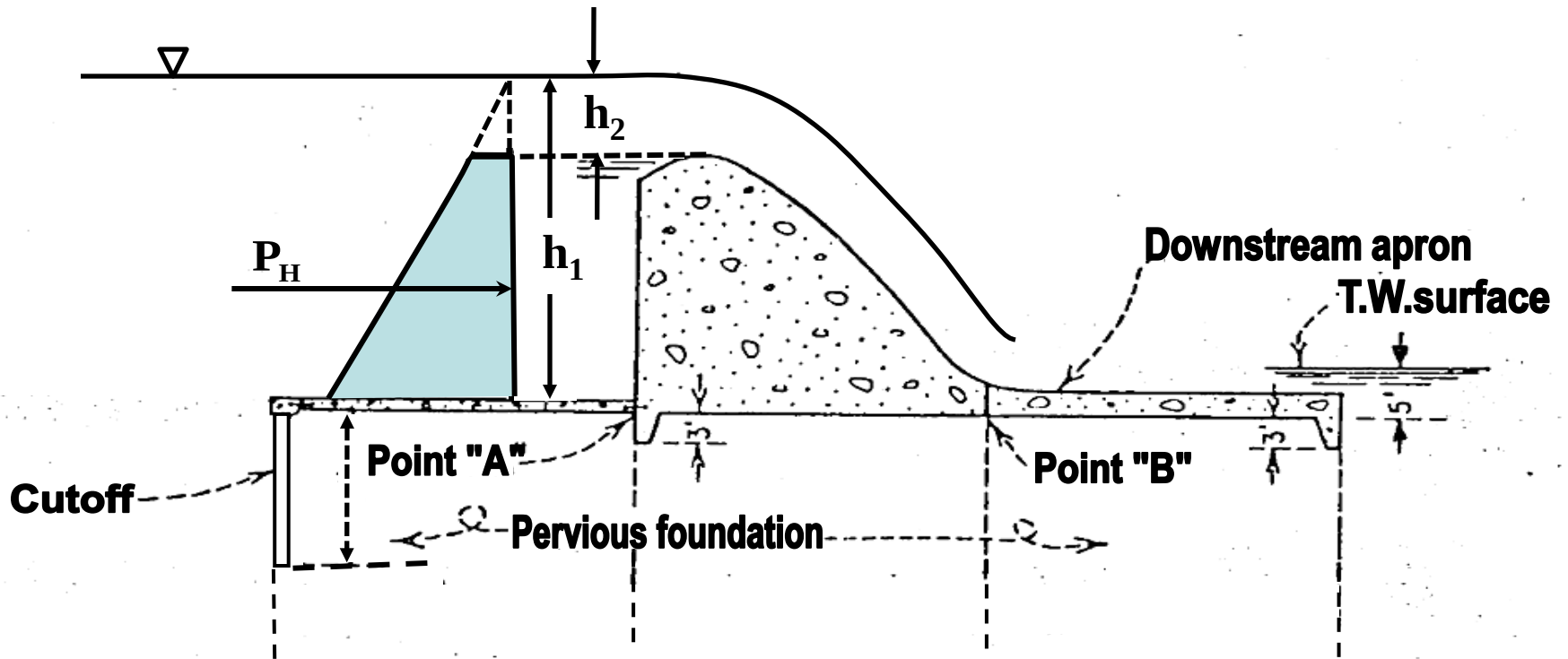
กรณีน้ำไหลล้นสันฝาย

$$P_H = \frac{1}{2} \gamma_w (h_1^2 - h_2^2)$$

โดย h_1 = ความลึกของน้ำด้านหน้าฝาย

P_H = ความลึกของน้ำเหนือสันฝาย

$$P_H = \frac{1}{2} \gamma_w (h_1^2 - h_2^2)$$



แรงดันน้ำด้านหน้าฝาย



แรงกระทำต่อฝาย

2. แรงดันน้ำด้านท้ายฝาย
3. น้ำหนักของน้ำส่วนที่กดทับอยู่หน้าฝาย โดยเฉพาะ
ในกรณีด้านหน้าฝายมีผิวลาดเอียง

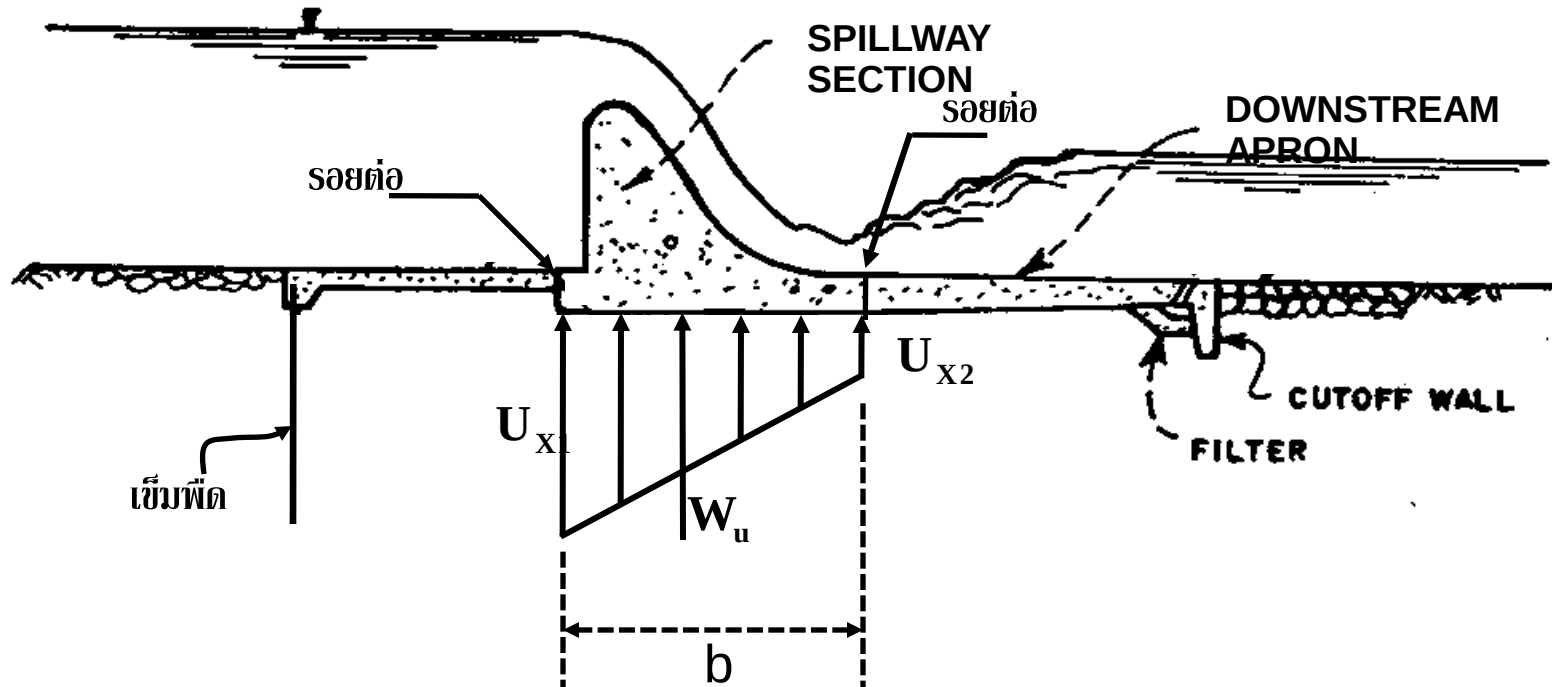
โดยปกติน้ำหนักน้ำบนสันฝายและด้านท้ายฝาย
จะไม่นำมาพิจารณา นอกจากในกรณีที่น้ำมีความลึกมาก
และเป็นฝายขนาดใหญ่



แรงกระทำต่อฝาย

4. น้ำหนักของฝายรวมพื้น ตอม่อกลาง ตอม่อริม สะพาน และอาคารประกอบที่ถูกสร้างเป็นส่วนเดียวกันกับฝาย(ไม่มี Joint)
3. แรงดันยกตัว (Uplift Force) ใช้วิธีของ Lane หรือ Bligh ทำ Uplift Pressure ใต้ฝาย โดยพิจารณาความยาวของอาคารประกอบของฝายด้านหน้าฝาย และด้านหลังฝายด้วย

UPLIFT PRESSURE



$$W_u = \frac{1}{2} (U_{x1} + U_{x2}) \gamma_w b$$



แรงดันยกตัว

$$W_u = \frac{1}{2}(U_{x1} + U_{x2})\gamma_w b$$

โดย U_{x1} และ U_{x2} = Uplift Pressure หน่วยเป็นเมตร

W_u = แรงดันยกตัวทั้งหมดใต้ฝายพิจารณา
ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสันฝาย

สมการข้างต้นใช้กับฐานรากมีเนื้อดินสม่ำเสมอและ
ยอมให้น้ำซึมผ่านได้



แรงกระทำต่อฝาย

6. แรงดันตะกอน

ตะกอนที่ตกจมอยู่หน้าฝาย ทำให้เกิดแรงดันในแนวราบ
เช่นเดียวกับแรงดันของน้ำ

$$F_s = \frac{1}{2} K_a \gamma_s h^2$$

โดย F_s = แรงดันตะกอนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสันฝาย

γ_s = น้ำหนักหนึ่งหน่วยของตะกอนใต้น้ำ
(Submerged Unit Weight)

K_a = Active Pressure Coefficient ของดิน



ความมั่นคงต่อการเลื่อนไหล

สาเหตุโดยตรงของการเลื่อนตัวมาจากว่า แรงสุทธิในแนวนอนมากกว่าผลรวมของแรงต้าน หรือแรงเสียดทานตามแนวนอนได้ฐานฝาย แรงเสียดทานนี้เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของฐานฝาย กับพื้นดินที่รองรับอาคาร โดยทั่วไปนิยมเผื่อความปลอดภัยระหว่าง 1.5 ถึง 2.00

$$F.S \times \sum P \leq C \cdot \sum V$$

หรือ $F.S = \frac{C \cdot \sum V}{\sum P} \geq$ ค่าความปลอดภัยที่กำหนดใช้

เมื่อ

- $F.S$ = แฟคเตอร์ความปลอดภัยต่อการเลื่อนตัว
- $\sum P$ = แรงสุทธิในแนวนอนที่กระทำต่อตัวฝาย
- $\sum V$ = แรงสุทธิในแนวตั้ง (พิจารณาแรงดันยกตัวด้วย)
- C = สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน เลือกใช้ตามเกณฑ์ต่อไปนี้



ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

- ✱ หน้าสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับกรวด $C = 0.5$
- ✱ หน้าสัมผัสของคอนกรีตกับทราย $C = 0.4$
- ✱ หน้าสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับดินเหนียว $C = 0.3$



ความมั่นคงต่อการเลื่อนไหล

ในกรณีที่ฝายตั้งอยู่บนฐานรากที่เป็นหิน และต้องพิจารณาแรงต้านแรงเฉือนที่ฐาน ค่าความปลอดภัยไม่ควรจะน้อยกว่า 4.0 และสามารถตรวจสอบได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$F.S = (S_a A + f \sum V) / \sum P \geq 4.0$$

เมื่อ S_a = ความสามารถในการต้านแรงเฉือน (Shearing stress)
ตามระนาบแนวนอนที่ฐานฝาย , กก./ม³

A = พื้นที่รับแรงเฉือน

f = สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน เท่ากับ 0.6



ความมั่นคงต่อการเลื่อนไหล (ต่อ)

กรณีไม่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย

- * เพิ่มน้ำหนักตัวฝ่าย
- * ออกแบบให้พื้นด้านหน้าและตัวฝ่าย เป็นส่วนต่อกัน โดยไม่มี Joint น้ำหนักของน้ำหนักฝ่ายจะช่วยกดทับ
- * ออกแบบให้ดินหลังกำแพง Cutoff รับแรงส่วนเกิน



ความมั่นคงต่อ Overturning

เป็นไปตามเกณฑ์ 2 ข้อ

$$1) F.S \times \sum M_o \leq \sum M_R$$

หรือ

$$F.S = \frac{\sum M_R}{\sum M_o} \geq$$

ค่าความปลอดภัยที่กำหนดใช้

โดย

$$F.S$$

= แฟกเตอร์ความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำมีค่า
ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0

$$\sum M_R$$

= ผลรวมของโมเมนต์ต้านการพลิกคว่ำที่เกิดจากแรงต่าง ๆ

$$\sum M_o$$

= ผลรวมของโมเมนต์ที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำที่เกิดจาก
แรงต่าง ๆ



ความมั่นคงต่อ Overturning

2) เกณฑ์ของ Middle Third ใช้ได้กับรูปร่างของระนาบแนวนราบใต้ฐานเขื่อน เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และเกิดจากสาเหตุที่ไม่ต้องการให้เกิดแรงเค้นดึง (tension stress) ที่ปลายระนาบแนวนราบใต้ฐานเขื่อน เพราะอาจทำให้ฝายพังทลายลงด้วยการพลิกคว่ำ ในที่สุด การตรวจสอบสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$e \leq l/6$$

เมื่อ e = ระยะระหว่างตำแหน่งของแรงลัพธ์กับจุดศูนย์กลางพื้นที่ของระนาบแนวนราบใต้ฐาน

l = ความยาวของฐานฝาย

กระทำการตรวจสอบค่า e ด้วยเกณฑ์ของ Middle third ในกรณีฝายไม่มีน้ำด้านหน้า และกรณีฝายทدنน้ำเต็มทีและด้านท้ายน้ำแห้ง



การรับน้ำหนักกดของดินใต้ฐาน

แรงกดสูงสุดที่เกิดขึ้นใต้ฐาน สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้
(พิจารณาสันฝาย ยาว 1 เมตร)

$$q = \frac{\sum V}{l} \left(1 + \frac{6e}{l} \right) \leq q_a$$

เมื่อ q = แรงกดหนึ่งหน่วยสูงสุดที่ฐานฝาย

$\sum V$ = แรงสุทธิในแนวดิ่งรวมแรงดันยกตัว

l = ความยาวฐานฝาย

q_a = แรงกดหนึ่งหน่วยสูงสุดที่ดินฐานราก สามารถจะแบกรับได้



การป้องกันการกัดเซาะด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ

กรณีป้องกันการกัดเซาะพื้นที่ท้องน้ำและลาดตลิ่ง

หินทิ้ง

หินเรียง

หินเรียงยาวแนว

การป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำ



การป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำ



การป้องกันการกัดเซาะด้านเหนือน้ำ



การป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำ





ขนาดของ Rip Rap

มีหลายวิธี

กราฟของ USBR

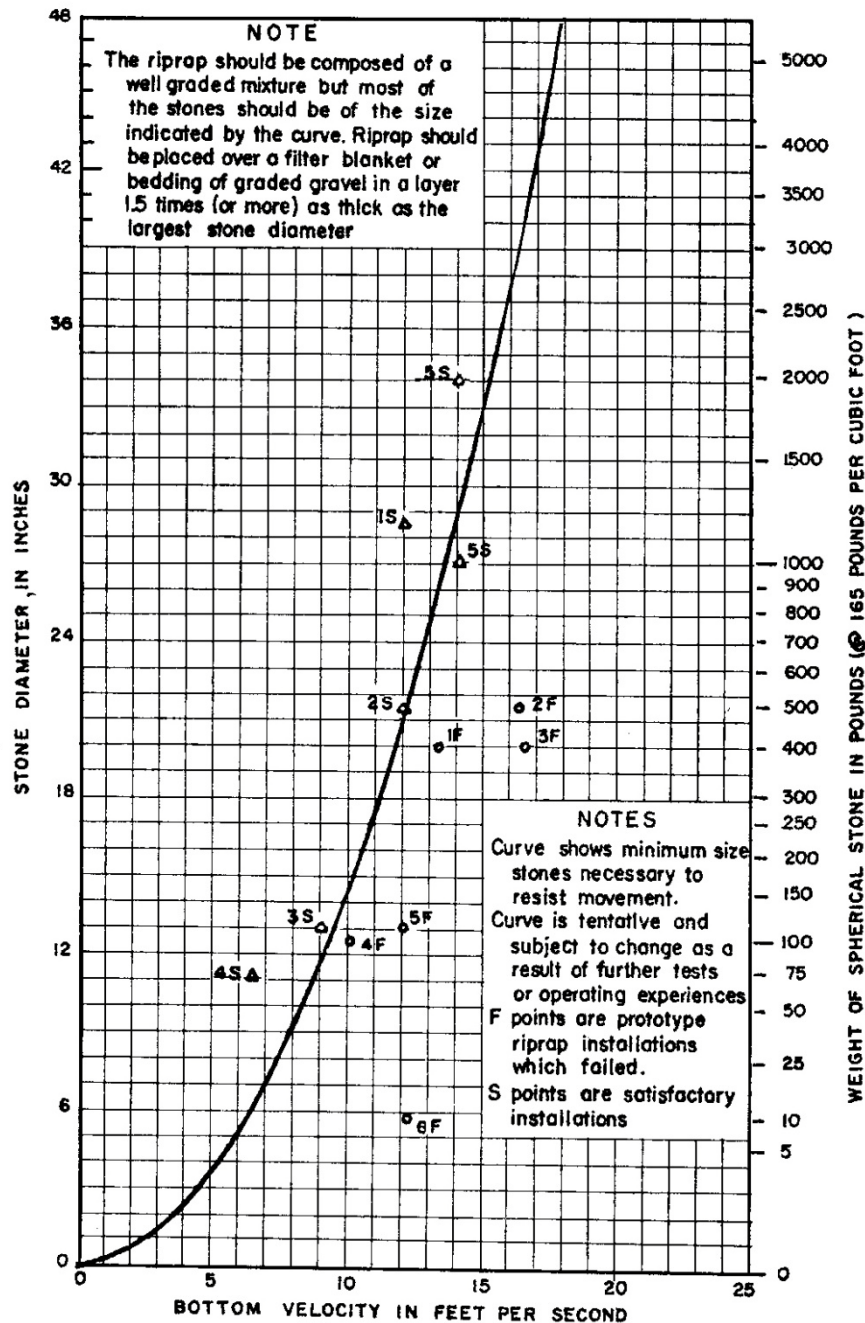
สมการของ Berry

สมการของ Marvis และ Laushy

กราฟของ US Army Corp of Engineer

สมการของ Grout

สมการของ Isbach



ขนาดใหญ่สุดของส่วนเคละของหินเรียง
ด้านท้ายน้ำของอาคารสลายพลังงาน



การหาขนาดของ Riprap

สำหรับอาคารชลศาสตร์ที่ไม่มีอาคารสลายพลังงานให้หา
ความเร็วกระแสน้ำจากสมการต่อไปนี้

$$V_b = \sqrt{2g\Delta z}$$

เมื่อ Δz = ความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ
ในกรณีฝายทดน้ำให้ใช้ความสูงของสันฝายเหนือน้ำ
ด้านท้ายน้ำ



การหาขนาดของ Riprap

วิธีของ Berry

$$V_b = 2.57\sqrt{d}$$

โดย V_b = ความเร็วท้องน้ำ, ฟุต/วินาที

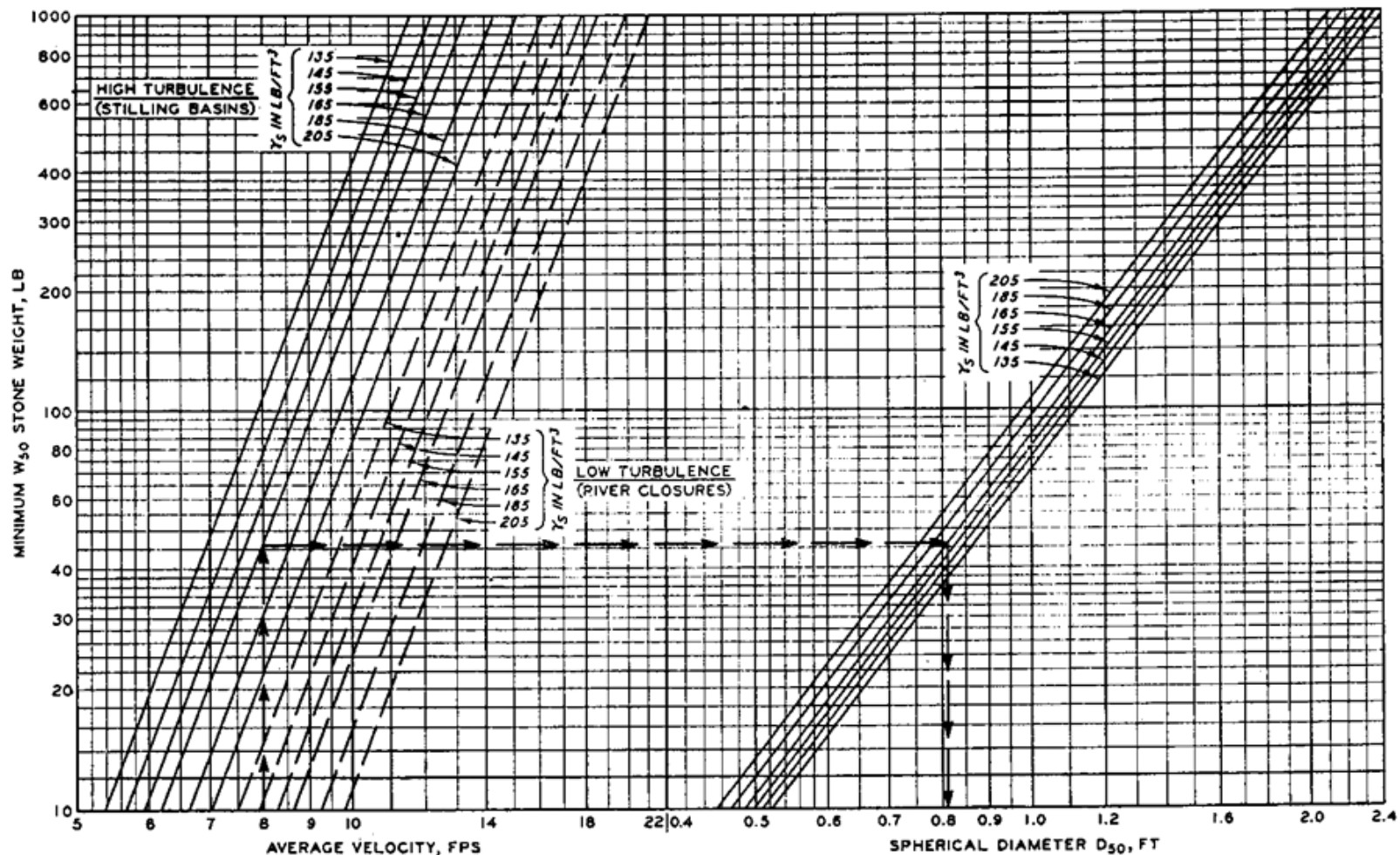
d = ขนาดของหินเป็นนิ้ว ($S = 2.65$)

วิธีของ Mavis และ Lau shy

$$V_b = \frac{1}{2}\sqrt{d_1} \cdot \sqrt{s-1}$$

โดย S = ความถ่วงจำเพาะของหิน

d_1 = ขนาดของหินเป็นมิลลิเมตร



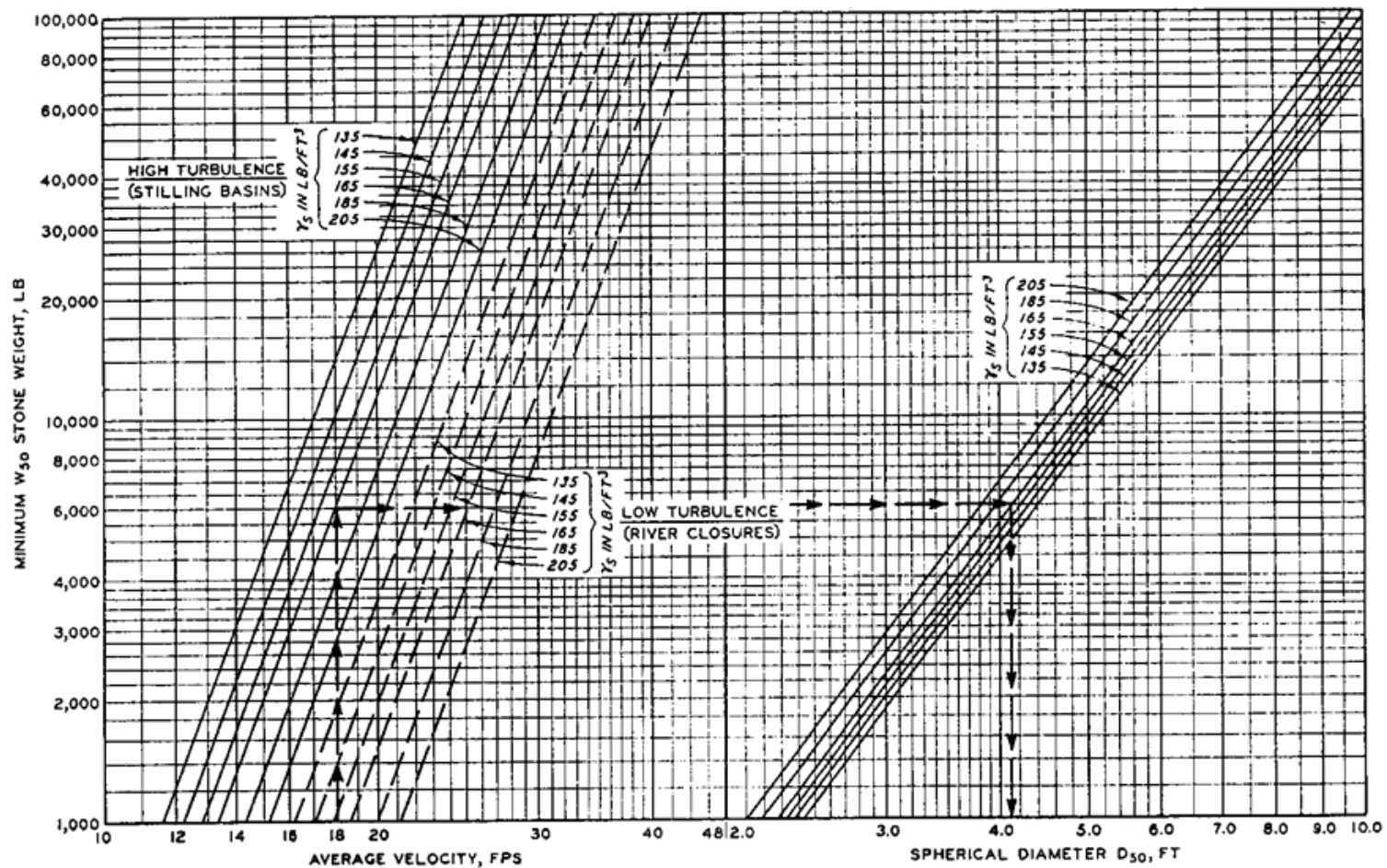
BASIC EQUATIONS

$$V = C \left[2g \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \right]^{1/2} (D_{50})^{1/2}$$

$$D_{50} = \left(\frac{6W_{50}}{\pi \gamma_s} \right)^{1/3}$$

- WHERE:
- V = VELOCITY, FPS
 - γ_s = SPECIFIC STONE WEIGHT, LB/FT³
 - γ_w = SPECIFIC WEIGHT OF WATER, 62.5 LB/FT³
 - W_{50} = WEIGHT OF STONE. SUBSCRIPT DENOTES PERCENT OF TOTAL WEIGHT OF MATERIAL CONTAINING STONE OF LESS WEIGHT.
 - D_{50} = SPHERICAL DIAMETER OF STONE HAVING THE SAME WEIGHT AS W_{50}
 - C = ISBASH CONSTANT (0.86 FOR HIGH TURBULENCE LEVEL FLOW AND 1.20 FOR LOW TURBULENCE LEVEL FLOW)
 - g = ACCELERATION OF GRAVITY, FT/SEC²

STONE STABILITY
VELOCITY VS STONE DIAMETER



BASIC EQUATIONS

$$V = C \left[2g \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \right]^{1/2} (D_{50})^{1/2}$$

$$D_{50} = \left(\frac{6W_{50}}{\pi \gamma_s} \right)^{1/3}$$

WHERE: V = VELOCITY, FPS
 γ_s = SPECIFIC STONE WEIGHT, LB/FT³
 γ_w = SPECIFIC WEIGHT OF WATER, 62.5 LB/FT³
 W_{50} = WEIGHT OF STONE. SUBSCRIPT DENOTES PERCENT OF TOTAL WEIGHT OF MATERIAL CONTAINING STONE OF LESS WEIGHT.
 D_{50} = SPHERICAL DIAMETER OF STONE HAVING THE SAME WEIGHT AS W_{50}
 C = ISBASH CONSTANT (0.86 FOR HIGH TURBULENCE LEVEL FLOW AND 1.20 FOR LOW TURBULENCE LEVEL FLOW)
 g = ACCELERATION OF GRAVITY, FT/SEC²

**STONE STABILITY
VELOCITY VS STONE DIAMETER**



การหาขนาดของ Riprap (ต่อ)

วิธีของ Groat

ใช้หลักการของ Tractive force.

$$\frac{d}{h} = \frac{3}{2} \frac{C}{\mu(S-1)} = C$$

โดย $\mu = \frac{T}{N}$ = สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน

T = Tractive force, ปอนด์

N = น้ำหนักหินในน้ำ, ปอนด์

S = ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของหิน

h = เหนือความเร็ว, ฟุต = $V^2 / 2g$

c = ค่าคงที่

d = ขนาดหินเฉลี่ย, ฟุต

ถ้า $\mu = \frac{1}{5}, c = \frac{3}{4}$ และ S = 2.65 จะได้

$$V = 4.7\sqrt{d}$$



การหาขนาดของ Riprap (ต่อ)

วิธีของ Isbash

$$V_{\max} = E_2 N \sqrt{d}$$
$$N = \left\{ 2g \frac{(s - \gamma)}{\gamma} \right\}^{1/2}$$

โดย $V_{\max}$ = ความเร็วที่ทำให้หินเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง

g = อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก

S = ความถ่วงจำเพาะของหิน

γ = ความถ่วงจำเพาะของน้ำ

d = ขนาดของหินเป็นฟุต

ถ้า $E_2 = 1.2$, $S = 2.65$ และ $\gamma = 1$ จะได้

$$V_{\max} = 12.4 \sqrt{d}$$



ความยาวของการป้องกันกัดเซาะ

ตามหลักการของ **Scouring Depth**

$$Lu = 2.55q^{2/3} - 1.5Du$$

$$Ld = 3.00q^{2/3} - 1.5Dd$$

โดย Lu และ Ld = ความยาวของส่วนป้องกันการกัดเซาะด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ , เมตร

q = อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของทางน้ำ

Du = ความลึกการไหลด้านเหนือน้ำตรงขอบ **Apron**

Dd = ความลึกการไหลด้านท้ายน้ำตรงขอบ **Apron** หรือด้านท้าย
ของอ่างสลายพลังงาน



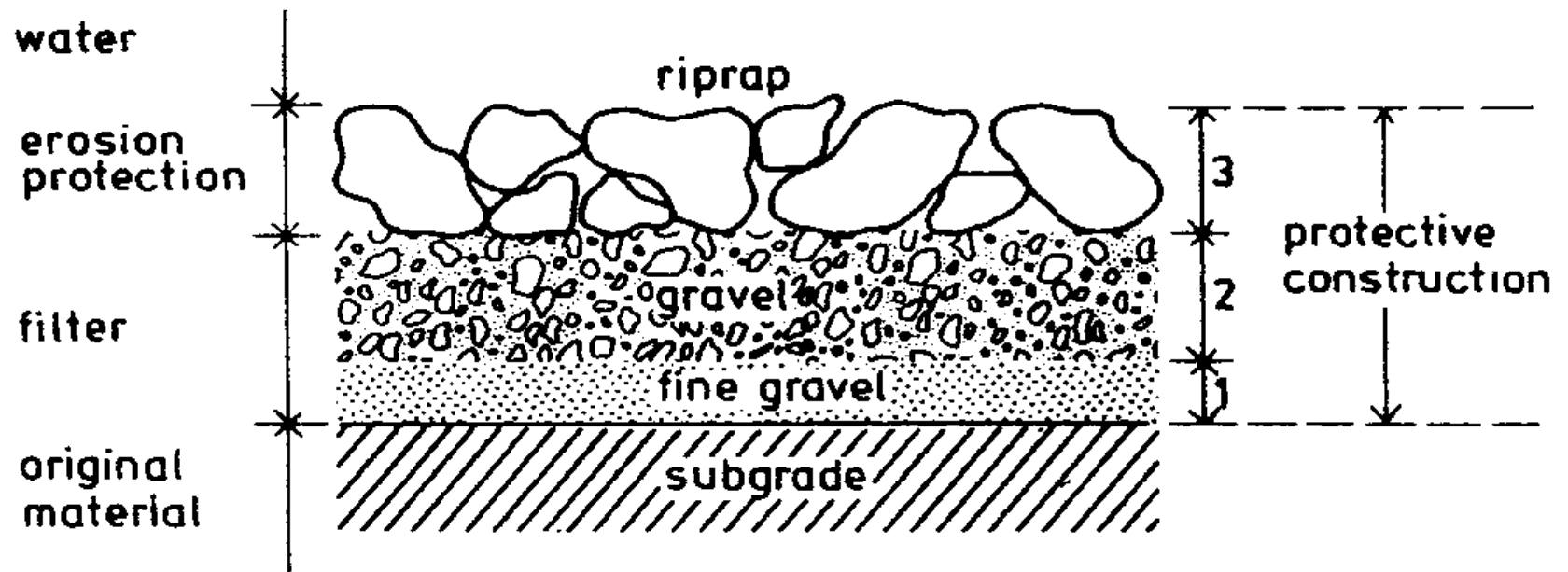
ความยาวของการป้องกันการกัดเซาะ(ต่อ)

- ✧ **Rip Rap** ด้านเหนือน้ำ ยาวไม่น้อยกว่าความลึกน้ำเหนือสันฝาย
- ✧ **Rip Rap** ด้านท้ายน้ำ ไม่น้อยกว่า 4 เท่า ของความลึกน้ำด้านท้ายอาคารระบายพลังงาน



ความหนาของชั้นหินทิ้งและหินเรียง

- ✱ ประกอบด้วยส่วนเคละของหินขนาดตั้งแต่ 3 นิ้ว ไปจนถึงขนาดใหญ่สุดตามเกณฑ์
- ✱ 40 % ของปริมาณหินต้องมีขนาดเล็กกว่าหินใหญ่ที่ต้องการ
- ✱ ความหนาชั้นหิน ไม่ควรน้อยกว่า 1.5 เท่า ของขนาดหินที่ใหญ่ที่สุด
- ✱ จัดเรียงให้หินก้อนเล็กอยู่เต็มช่องว่างระหว่างหินขนาดใหญ่



ตัวอย่างของชั้นตัวกรองระหว่าง Riprap และดินเดิม(Subgrade)