วศ.ชป. 423

การออกแบบอาคารส่งน้ำชลประทาน

(Design of Water Conveyance Irrigation Structurcs)

โดย

รศ.ปฏิภาณ อมาตยกุล

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

ในการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบอาคารชลประทานนั้น ผู้ที่จะศึกษาควรจะมีพื้นความรู้ในทางชลศาสตร์ (Hydraulics) การคำนวณโครงสร้าง (Structural Design) การวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis) กลศาสตร์ของดิน (Soil Mechanics) และการเขียนแบบ (Working Drawing) มาเป็นอย่างดีจึงจะทำให้การศึกษาการออกแบบอาคารชลประทานได้ง่ายยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาวิชาการต่าง ๆ เมื่อได้ผ่านมานาน ๆ แม้ว่าในหลักการทุกคนจะยังเข้าใจได้ดี แต่ในรายละเอียดและสูตรต่าง ๆ ย่อมหลงลืมกันได้ ดังนั้นจึงใคร่ขอนำเอาสูตรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมารวมไว้ในบทนี้ด้วย

1.1 ด้านชลศาสตร์ (Hydraulics)

1.1.1 สูตรในการคำนวณปริมาณน้ำผ่านคลองหรือท่อต่าง ๆ

$$Q = A.V$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

ในเมื่อ Q = ปริมาณน้ำ เป็น $ม.^3/วินาที$

A = พื้นที่หน้าตัดทางน้ำ เป็น $ม.^2$

V = ความเร็วเฉลี่ยของน้ำเป็น ม./วินาที

n = สัมประสิทธิ์ของความขรุขระของวัสดุที่น้ำไหลผ่าน

R = รัศมีอุทกศาสตร์ เป็น ม.

$$= \frac{A}{P}$$

P = ความยาวของเส้นขอบเปียก เป็น ม.

S = ส่วนลดลาดของ เส้นพลังน้ำ (Energy Gradeline)

1.1.2 การไหลของน้ำในความลึกวิกฤต (Critical Flow)

การไหลด้วยความลึกปกติ (Normal Flow) นั้นเป็นการไหลของน้ำในทางน้ำใด ๆ ที่มีความลึกคงที่โดยตลอดสำหรับค่าปริมาณน้ำค่าหนึ่ง ๆ และมีค่าของพื้นที่หน้าตัดและรูปร่าง

หน้าตัดที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นส่วนลดลาดของผิวน้ำ ก้นทางน้ำ และ Energy Gradeline จึงขนานกันเสมอ

การไหลด้วยความลึกวิกฤต (Critical Flow)นั้นเป็นการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ทำให้เกิด Specific Energy น้อยที่สุดนั่นเอง

Specific Energy ก็คือผลรวมของความลึกของการไหลของน้ำกับ Velocity head $\frac{v^2}{2g}$ นั่นเอง

ในการไหลของน้ำด้วยความลึกที่น้อยกว่าความลึกวิกฤต (Super Critical Flow) เมื่อมีการเปลี่ยนสภาพของทางน้ำ จะทำให้น้ำไหลด้วยความลึกใหม่ทันที ซึ่งเราเรียกความลึกใหม่นี้ว่า Alternate Depth

ส่วนการไหลของน้ำผ่านเขื่อน (Barrage) ฝาย (Weir) หรือทางทิ้งน้ำ (Spillway) นั้น โดยทางทฤษฎีนั้นค่าของ Specific Energy หน้าอาคารจะต้องมีค่า Energy Head เนื่องจาก Approaching Velocity เสมอ แต่ในวิชาการออกแบบนั้นเราถือว่า Approaching Velocity V_o มีค่าน้อยมากจึงตัดทิ้งเสีย และเราจะสามารถตั้งสมการของเบอร์นูรี่ (Bernoulli's Equation) ได้ดังนี้.-

$$y_d + y_o = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_j \quad \text{.....} \bullet$$

และค่า y_1 และ y_2 นี้ เราจะหาได้จากสูตร

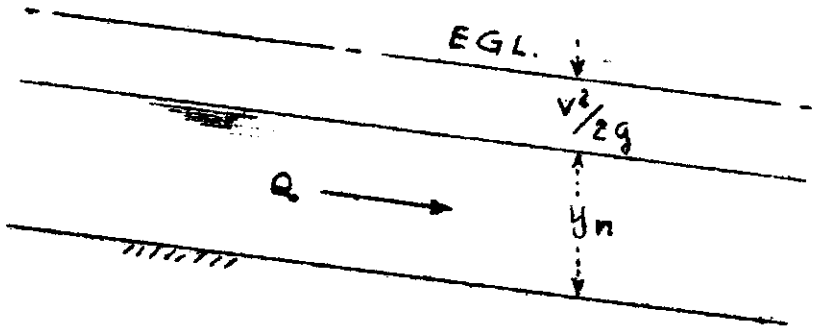
$$y_2 = -\frac{y_1}{2} \pm \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2\,v_1^2 \cdot y_1}{g}} \quad \text{.....} \bullet$$

ในเมื่อ y_d = ความสูงของสันเขื่อน

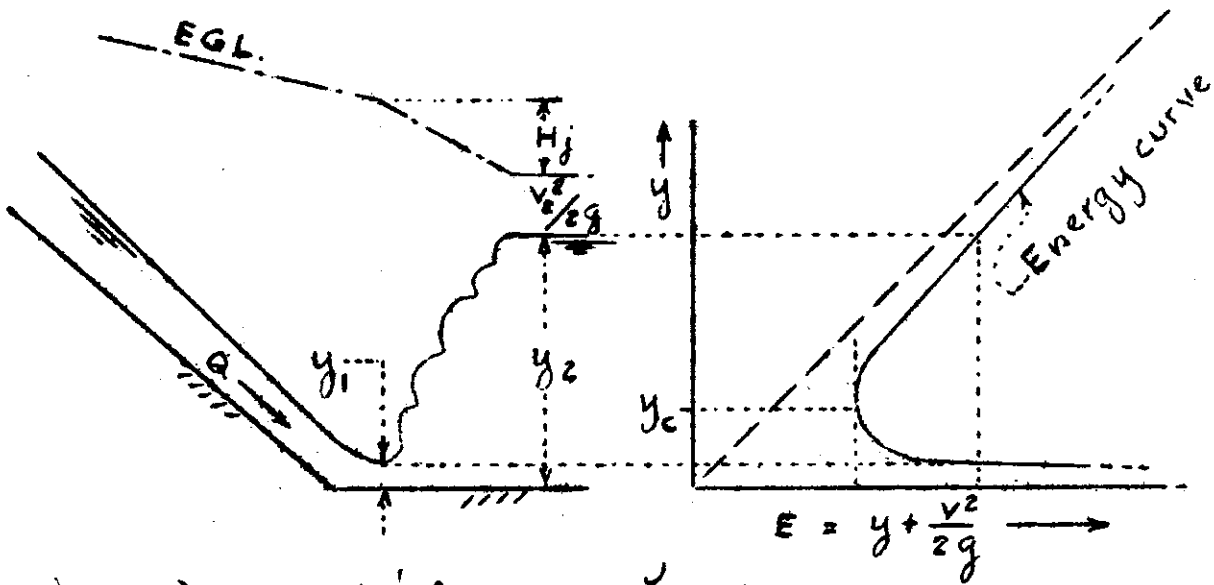
y_o = ความลึกของน้ำเหนือสันเขื่อน

y_1 = ความลึกของน้ำที่ต่ำกว่าความลึกวิกฤต (Depth before jump)

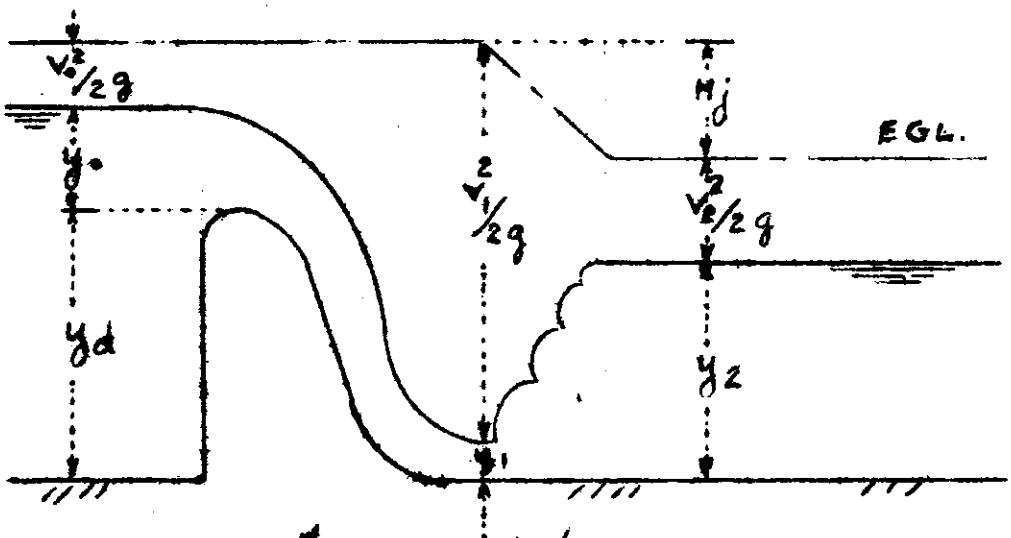
y_2 = ความลึกของน้ำที่สูงกว่าความลึกวิกฤต (Depth after jump or conjugate depth or alternate depth)



การไหลของน้ำด้วยความลึกปกติ (Normal flow)



การไหลของน้ำที่เกิดความลึกขั้น 2 ค่า (Alternate depths)



การไหลของน้ำผ่านทางทิ้งน้ำ (Flow over spillway)

V_1 = ความเร็วของน้ำที่ y_1

V_2 = ความเร็วของน้ำที่ y_2

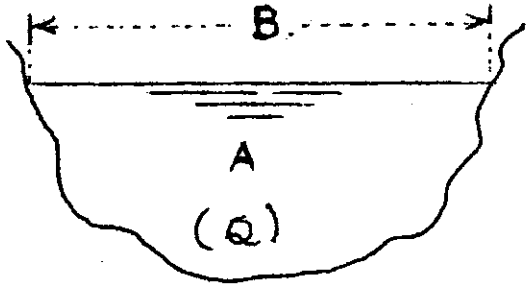
g = อัตราโน้มถ่วงของโลก (Gravitation)

H_j = Energy Loss เนื่องจาก Hydraulic Jump

ในการกำหนดระดับพื้นท้ายเขื่อน ฝาย หรือทางทิ้งน้ำ นั้น ไม่จำเป็นต้องกำหนดให้ y_2 เท่ากับความลึกท้ายน้ำเสมอไป เพราะการคำนวณด้วยปริมาณน้ำต่าง ๆ กันนั้นย่อมทำให้ค่า y_1, y_2 และความลึกของน้ำท้ายอาคารเปลี่ยนไปหลายค่า ดังนั้นควรพิจารณาให้ y_2 น้อยกว่าความลึกของน้ำท้ายอาคาร และหาความยาวของ Jump ที่มีค่ามากที่สุดเพื่อกำหนดความยาวพื้นท้ายน้ำ (Downstream Apron) ก็พอ จึงใคร่แสดงรูปของ Hydraulic Jump เมื่อเทียบกับความลึกของน้ำท้ายอาคารในสภาพต่าง ๆ ไว้ดังนี้.-

1.1.3 สูตรที่ใช้หาความลึกวิกฤต (Formula for computing critical depth)

– <u>สำหรับพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ</u> (Various sections)



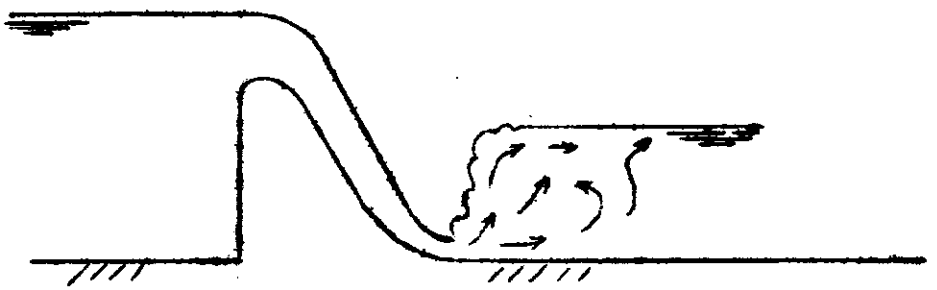
$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{B} \quad \ldots\ldots\ldots *$$

ในเมื่อ Q = ปริมาณน้ำ

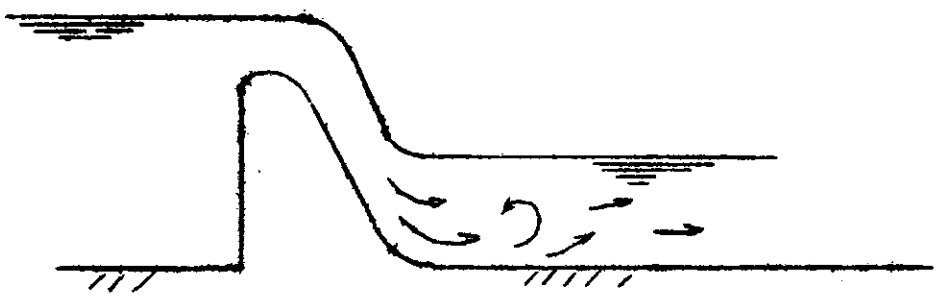
A = พื้นที่หน้าตัดของทางน้ำ

B = ความกว้างผิวน้ำ

g = อัตราโน้มถ่วงของโลก



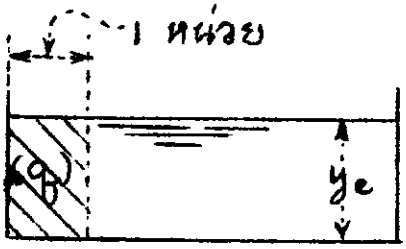
ความลึกของน้ำท้ายอาคาร เท่ากับ y_2 ทำให้ Hydraulic jump เกิดขึ้น ณ จุดเริ่มพื้นท้ายน้ำ (Toe of dam)



ความลึกของน้ำท้ายอาคารมากกว่า y_2 ทำให้ Hydraulic jump จมอยู่ใต้ผิวน้ำ (Jump is vanished)

ความลึกของน้ำท้ายอาคารน้อยกว่า y_2 แต่มากกว่าความลึกวิกฤต ทำให้ Hydraulic jump ไปเกิดที่จุดปลายสุดของความยาวของ Jump.

- <u>สำหรับพื้นที่หน้าตัด ย</u> (Rectangular section)



ให้ y_c เป็นความลึกวิกฤต

q เป็นปริมาณน้ำต่อความกว้างทางน้ำ 1 หน่วย

เราจะหาสูตรความลึกวิกฤตสำหรับทางน้ำกว้าง 1 หน่วย ได้ดังนี้

$$\frac{q^2}{g} = \frac{(y_c \times 1)^3}{1}$$

$$y_c^3 = \frac{q^2}{g}$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad \text{.....} \bullet$$

1.1.4 ความลึกของการไหลต่าง ๆ (Various depths of flow)

- ส่วนลาดเทของ Energy gradeline ที่รามกว่าส่วนลาดเทวิกฤตจะให้ $y_n > y_c$ เรียกว่าการไหลแบบ Sub-critical flow

- ส่วนลาดเทของ Energy gradeline ที่ชันกว่าลาดเทวิกฤต จะให้ $y_n < y_c$ เรียกว่าการไหลแบบ Super-critical flow

1.1.5 สมการที่เกี่ยวข้องกับ Hydraulic jump

ค่า Froude number $F = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$ .....•

สูตรการหาค่า Alternately depth y_2 คือ

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2V_1^2 \cdot y_1}{g}}$$

ถ้าเอาค่า $F^2 = \frac{V_1^2}{g \cdot y_1}$ ไปแทนจะได้

$$\frac{y_2}{y_1} = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 2F^2}$$

$$= \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8F^2} - 1\right) \quad \text{.....} \bullet$$

ถ้า $F = 1$; $\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8(1)^2} - 1\right)$

$\therefore \quad y_1 = y_2$

นั่นแสดงว่า ถ้า $F < 1$ จะไม่เกิด Hydraulic jump

$F = 1$ เป็นการไหลของน้ำในความลึกวิกฤต

$F > 1$ จะเกิด Hydraulic jump ได้

1.2 <u>ด้านการออกแบบโครงสร้าง</u> (Structural design)

สำหรับด้านคอนกรีตเสริมเหล็กนี้จะขอยกเอาสูตรที่ใช้ในการคำนวณด้าน Working stress design มาไว้เท่านั้นคือ

$$M_c = \frac{1}{2} f_c \cdot K \cdot j \cdot b \cdot d^2 \quad \text{.....} \bullet$$

$$M_s = A_s \cdot f_s \cdot j \cdot d \quad \text{.....} \bullet$$

$$v = \frac{V}{b \cdot j \cdot d} \quad \text{.....} \bullet$$

$$u = \frac{V}{\Sigma_o \cdot j \cdot d} \quad \text{.....} \bullet$$

$$k = \frac{n \cdot f_c}{f_s + n \cdot f_c} \quad \text{.....} \bullet$$

$$j = 1 - \frac{k}{3}$$

$$n = \frac{29 \times 10^6}{w^{1.5} \times 33 f'_c}$$

ในเมื่อ w = น้ำหนักของคอนกรีต เป็น ปอนด์/(ฟุต)^3

f'_c = อัตราการรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตอายุ 28 วัน

= 3,000 ปอนด์/(นิ้ว)^2

= 210 กก./ซม.^{2}

การคำนวณแรงเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำร่วมกับโมเมนต์ (Combined bending and axial load) ใช้สูตร

$$S = \frac{P}{A} \pm \frac{M.C}{I} \quad \text{.....} \ (*)$$

ส่วนด้านการคำนวณโครงสร้างไม้ เรามีสูตรใช้งานดังนี้

$$f = \frac{6\ M}{b.d^2} \quad \text{.....} \ (*)$$

และ $$v = \frac{3\ V}{2b.d} \quad \text{.....} \ (*)$$

ในเมื่อ M_c = โมเมนต์ที่เกิดในเนื้อคอนกรีต

M_s = โมเมนต์ที่เกิดในเนื้อเหล็ก

M = โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเนื้อไม้

V = แรงเฉือนที่เกิดขึ้นทั้งหมด

v = แรงเฉือนต่อ 1 หน่วยพื้นที่

u = แรงยึดเหนี่ยวต่อ 1 หน่วยพื้นที่

Σ_o = ความยาวเส้นรอบวงของเหล็กเสริมคอนกรีต

b = ความกว้างของคาน

d = ความลึกใช้งานของคาน (สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก)

= ความลึกทั้งหมดของคาน (สำหรับไม้)

f_s = แรงเค้นใช้งานของเหล็ก

f_c = แรงกดใช้งานของคอนกรีต

S = แรงเค้นต่อ 1 หน่วยพื้นที่

A = พื้นที่รับแรง

C = ระยะจากผิวของคานถึงแกน (Neutral axis)

I = โมเมนต์ของความเฉื่อย (Moment of inertia)

1.3 <u>ด้านวิเคราะห์โครงสร้าง</u> (Structural analysis)

ควรจะได้ทบทวนการวิเคราะห์แรงและโมเมนต์โดยวิธีต่าง ๆ เช่น Moment distribution, Slope area ฯลฯ การเขียนไดอาแกรมของแรง (Freebody diagram) การเขียนไดอาแกรมของโมเมนต์ (Moment diagram) การเขียนไดอาแกรมของแรงเฉือน (Shear diagram) การหาค่าการแอ่นตัวของคาน (Deflection)

1.4 <u>ด้านกลศาสตร์ของดิน</u> (Soil mechanics)

- <u>แรงดันดิน</u> (Earth pressure)

แรงดันของดินคิดได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

ก. แรงดันโดยตรง (Active pressure) เป็นแรงดันของดินที่กระทำต่ออาคารที่เราออกแบบ มีสูตรดังนี้

$$P_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \cdot \gamma \cdot h = K_a \cdot \gamma \cdot h \quad \ldots\ldots\ldots\ldots$$

ในเมื่อ P_a = แรงดันโดยตรง

γ = น้ำหนักดินต่อ 1 หน่วยบริมาตร

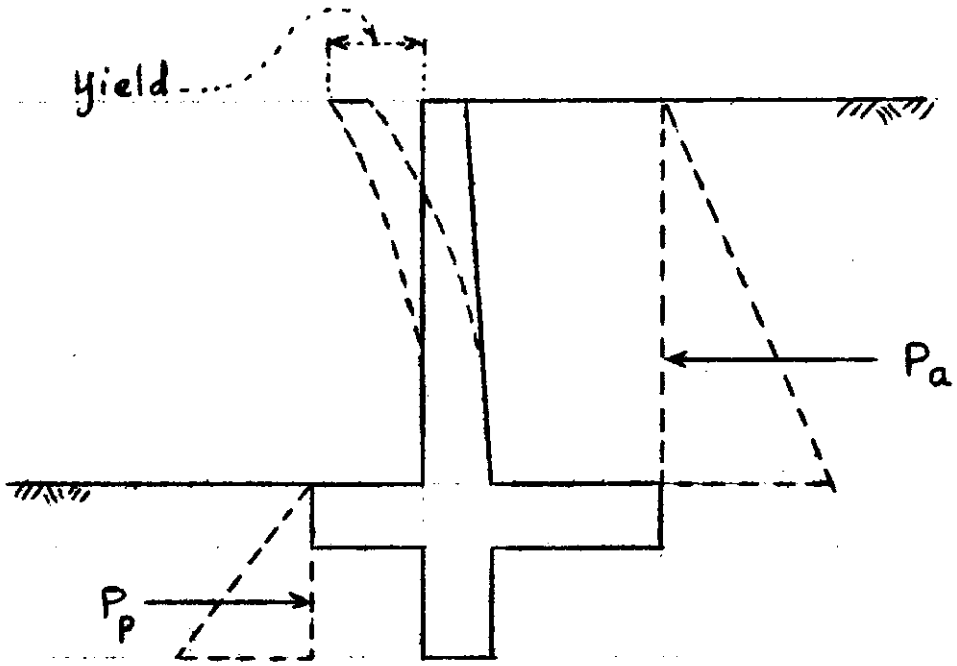
h = ความลึกของดินที่เกิดแรงดัน

ϕ = มุมทรงตัวของดิน (Angle of repose, angle of internal friction or angle of shearing resistance)

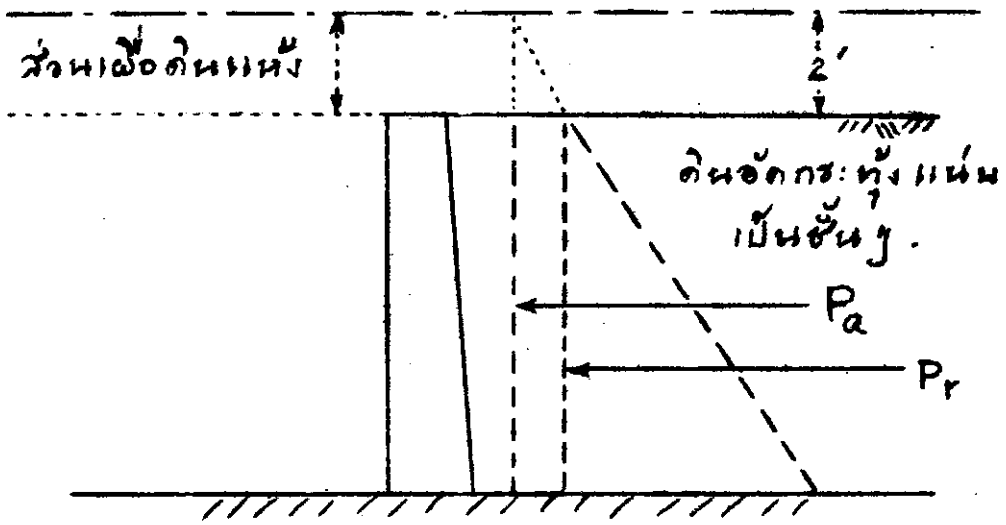
ข. แรงดันต้านกลับ (Passive pressure) เป็นแรงดันของดินที่ต้านทานการเขยื้อนตัวของอาคาร โดยมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันโดยตรง มีสูตรดังนี้

$$P_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \gamma \cdot h = K_p \cdot \gamma \cdot h$$

$$= \frac{1}{K_a} \cdot \gamma \cdot h \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$



รูปแสดง แรงดันโดยตรง และ แรงดันต้านกลับ ในเนื้อเกิดการโย้ตัวของอาคาร



รูปแสดงแรงดันดิ่งจากดินอัดกระทุ้งแน่นเมื่อตัวอาคารแข็งแรงมาก และ แรงดันโดยตรงจากส่วนเผื่อของดิน 2 ฟุต

ค. แรงดันนิ่ง (At-rest pressure) เป็นแรงดันดินที่กระทำต่ออาคารในลักษณะที่แน่ใจได้ว่าส่วนของอาคารส่วนนั้นจะไม่เกิดแอ่นตัวหรือโย้ตัว (Yielding) ดังนั้นในกรณีของกำแพงกันดิน (Retaining Wall) ที่ออกแบบไว้แข็งแรงมาก (Rigid) และมีการถมดินกระทุ้งแน่นเป็นชั้น ๆ (Tamping backfill) จึงต้องคิดเป็นแรงดันนิ่ง (At-rest pressure) ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$P_r = K_r \cdot \gamma \cdot h \quad \text{.....} *$$

โดยที่ K_r จะมีค่าแปรอยู่ระหว่าง K_a และ K_p และตามปกติแล้วถ้าเป็นแรงดันของดินที่ถมกระทุ้งแน่นเป็นชั้น ๆ มักใช้ $K_r = 0.80$ และจะใช้ค่าแรงดันนิ่ง (At-rest pressure) กับแรงดันโดยตรง (Active pressure) เท่านั้น จะใช้กับแรงดันต้านกลับ (Passive pressure) ไม่ได้เด็ดขาด

สำหรับการคิดแรงดันดินในกรณีที่มีเครื่องจักรเครื่องมือทำงานใกล้ ๆ ควรเพิ่มส่วนเผื่อ (Surcharge) เท่ากับดินแห้งที่มีความสูง 2 ฟุต

– <u>อัตราการรับน้ำหนักของดิน</u> (Soil bearing capacity)

ก. อัตราการรับน้ำหนักสูงสุดของดินสำหรับดินที่มีแรงยึดตัวเอง (Ultimate bearing capacity of cohesive soil) หาได้จากสูตร

$$q_b = 2.85\ q_u \quad \text{.....} *$$

ข. อัตราการรับน้ำหนักใช้งานของดิน (Working bearing capacity) หาได้จากสูตร

$$q_w = \frac{q_b}{F.S.} \quad \text{.....} *$$

ค. อัตราการรับแรงดันที่ยอมให้ใช้ได้ สำหรับดินที่มีแรงยึดตัวเอง (Allowable pressure for cohesive soil) หาได้จากสูตร

$$q_a = \frac{N - 3}{5}$$

ง. อัตราการรับแรงเฉือนของดิน (Shearing Strength of Soil) หาได้จากสูตร

$$S = C + p \cdot \tan \phi$$

$$S_n = p \cdot \tan \phi$$

ในเมื่อ q_b = อัตราการรับน้ำหนักสูงสุดสำหรับดินที่มีแรงยึดตัวเอง

q_w = อัตราการรับน้ำหนักใช้งานสำหรับดินที่มีแรงยึดตัวเอง

q_a = อัตราการรับแรงดันที่ยอมให้ใช้ได้สำหรับดินที่มีแรงยึดตัวเอง เป็น กก./ซม.^{2}

S = อัตราการรับแรงเฉือนของดินที่มีแรงยึดตัวเอง

S_n = อัตราการรับแรงเฉือนของดินที่ไม่มีแรงยึดตัวเอง

q_u = ค่าของแรงกดที่ทดลองกดแท่งดิน โดยไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Test)

F.S. = อัตราส่วนเผื่อ เพื่อความปลอดภัย (Factor of safety) ขึ้นอยู่ว่าเราจะกำหนดให้ใช้เท่าใด โดยมีขอบเขตว่าจะยอมให้ดินทรุดตัวได้เท่าใด และใช้น้ำหนักบรรทุกดูว่ามีค่าเท่าใด จึงจะเกิดการทรุดตัวไม่เกินที่กำหนด

N = จำนวนครั้งในการตอกเซ็มให้จมลง 1 ฟุต

C = ค่า Cohesion

p = น้ำหนักแท่งดินที่อยู่เหนือจุดที่ทดลอง

ϕ = มุมทรงตัวของดิน

บทที่ 2

ข้อกำหนดและข้อมูลต่าง ๆ (Criteria and various datas)

2.1 ข้อมูลที่ใช้พิจารณาโครงการชลประทาน

2.1.1 แผนที่ภูมิประเทศ (Topographic maps)

– แผนที่เพื่อวางผังบริเวณหัวงาน (Site plan for headworks) ขนาดมาตราส่วน 1:2,000 หรือ 1:4,000

– แผนที่เพื่อวางระบบการส่งน้ำ (Irrigation systems) ขนาดมาตราส่วน 1:10,000 โดยมีเส้นลายขอบเนิน (Contour) ทุก ๆ ระดับ 1.00 ม.

– แผนที่เพื่อวางระบบระบายน้ำ (Drainage system) ขนาดมาตราส่วน 1:10,000 โดยมีเส้นลายขอบเนินทุก ๆ ระดับ 0.50 ม.

– แผนที่เพื่อปรับระดับพื้นที่ดิน (Land leveling) ขนาดมาตราส่วน 1:1,250, 1:2,500 หรือ 1:5,000 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ที่จะทำการปรับระดับ โดยมีเส้นลายขอบเนินทุก ๆ ระดับ 0.05 – 0.25 ม. แล้วแต่ลักษณะของผิวดิน

– แผนที่เพื่องานจัดรูปที่ดิน (Land consolidation) ขนาดมาตราส่วน 1:2,000 โดยมีเส้นลายขอบเนินทุก ๆ ระดับ 0.25 ม.

2.1.2 รายละเอียดแบ่งประเภทที่ดิน (Land classification) เป็นแผนที่แสดงประเภทของที่ดินในพื้นที่เขตโครงที่กรมพัฒนาที่ดินจัดทำขึ้น เพื่อนำมาพิจารณาความเหมาะสมในการเลือกชนิดของพืชที่ปลูก

2.1.3 แผนการปลูกพืช (Cropping pattern) เพื่อนำมาใช้กำหนดปริมาณน้ำที่ผ่านคลองส่งน้ำแต่ละสายและแต่ละช่วงตอน

2.1.4 ด้านอุทกวิทยา (Hydrology) เพื่อได้ทราบสถิติปริมาณและระดับน้ำนอง ปริมาณและระดับน้ำในแต่ละเดือน ปริมาณน้ำฝน และปริมาณการระเหยในแต่ละเดือน ตลอดจนปริมาณการใช้น้ำในแต่ละฤดูกาล

2.1.5 ด้านธรณีวิทยา (Geology) เพื่อได้ทราบสภาพและลักษณะของดินฐานราก เพื่อนำมากำหนดความคงทนถาวรของอาคาร ซึ่งเกี่ยวข้องอย่างมากกับการกำหนดรูปแบบของอาคาร

และเกี่ยวข้องไปถึงราคางานด้วย นอกจากนี้ยังอาจศึกษาถึงระดับน้ำใต้ดินในแต่ละเดือนด้วย

2.1.6 ด้านเศรษฐกิจ (Economics) เพื่อศึกษาถึงประโยชน์ที่จะได้รับทั้งในปัจจุบันและในอนาคต ตลอดจนเปรียบเทียบค่าลงทุนกับผลประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เพื่อกำหนดออกมาในค่าของ Benefit cost ratio เพื่อพิจารณาว่าการเปิดโครงการขึ้นจะคุ้มค่าลงทุนหรือไม่

2.2 <u>ค่าของแรงเค้นดัดแรงเฉือนและแรงยึด (Flexural stress, shearing stress and bond stress) ที่ใช้ในการทำตัวอย่างในตำราเล่มนี้</u>

2.2.1 สำหรับไม้ (Timber)

- แรงเค้นดัด ..... 100 – 120 กก./ซม.^{2}
- แรงเค้นอัด
  - แนวขนานกับเสี้ยนไม้ ..... 75 – 90 กก./ซม.^{2}
  - แนวตั้งฉากกับเสี้ยนไม้ ..... 22 – 30 กก./ซม.^{2}
- แรงเค้นเฉือนในแนวขนานกับเสี้ยนไม้... 10 – 12 กก./ซม.^{2}

2.2.2 สำหรับเหล็กและคอนกรีต (Reinforced steel & concrete)

f_s ..... 1,400 กก./ซม.^{2}

f'_c ..... 175 กก./ซม.^{2}

n 12

p 0.0113

j 0.87

k 0.40

R 13.7

- แรงเค้นดัด (Flexural stress)

งานทั่วไป $f_c = 0.45\ f'_c = 79$ กก./ซม.^{2}

งานฐานราก $f_c = 0.03\ f'_c = 5.2$ กก./ซม.^{2}
(คอนกรีตล้วน)

- แรงเค้นเฉือน (Shearing stress)

งานคานที่มีเหล็กปลอก, $v_c = 0.12\ f'_c = 21$ กก./ซม.^{2}

งานฐานราก, $v_c = 0.03\ f'_c = 5.2$ กก./ซม.^{2}

- แรงเค้นยึด (Bond stress)

งานคาน, $u = 0.045\ f'_c = 7.9$ กก./ซม.^{2}

งานฐานราก, $u = 0.045\ f'_c = 7.9$ กก./ซม.^{2}

- แรงเค้นกด (Bearing stress)

กดเต็มพื้นที่, $f_c = 0.25\ f'_c = 44$ กก./ซม.^{2}

33% ของพื้นที่, $f_c = 0.375\ f'_c = 66$ กก./ซม.^{2}

นอกจากนี้จะขอแสดงตารางเปรียบเทียบแรงเค้นสำหรับงานต่าง ๆ สำหรับค่า f'_c และ f_s ต่าง ๆ ไว้ด้วย

2.3 น้ำหนักดินและวัสดุต่าง ๆ (Weight of soils and materials)

น้ำ (Water)	1,000	กก./ม.^{3}
ดินแห้ง (Dry earth)	1,600 – 1,800	"
ดินอัดแน่น (Compacted earth)	1,900	"
ดินอิ่มตัว (Saturated earth)	2,150	"
หินหรือกรวด (Stone or gravel)	1,600 – 2,000	"
ทรายแห้ง (Dry sand)	1,600 – 1,800	"
ทรายเปียก (Wet sand)	1,900 – 2,200	"
คอนกรีตหยาบ (Lean concrete)	2,200	"
คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete)	2,400	"
เหล็กหล่อ (Cast iron)	7,000 – 7,700	"
เหล็กเหนียว (Steel)	7,600 – 7,900	"

ตารางแสดงแรงเค้นปลอดภัยของคอนกรีตและเหล็กเสริม (Working stresses)

แรงเค้นปลอดภัยในคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับอาคารนอกจากการรถไฟ และ การทหาร

รายการ		แรงเค้นปลอดภัย				
		เปอร์เซ็นต์ของกำลังแตกหักที่สัดส่วนผสมต่างๆ $n = \frac{2100}{f'_c}$	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน			
			$f'_c = 105$ กก./ซม.^{2} 1 : 4 : 8	$f'_c = 140$ กก./ซม.^{2} 1 : 3 : 6	$f'_c = 175$ กก./ซม.^{2} 1 : 2½ : 5	$f'_c = 210$ กก./ซม.^{2} 1 : 2 : 4
แรงเค้นประลัย (F_{cu}) = f'_c, กก./ซม.^{2}						
แรงเค้นอัดยอม	f_c	$0.45 f'_c$	45	60	75	95
แรงเค้นเฉือนยอม (สำหรับรับแรงเฉือนที่คอนกรีตต้านทาน)	f_v	$0.03 f'_c$	3.1	4.2	5.2	6.3
แรงยึดเกาะ (Bond) : U, กก./ซม.^{2}						
...	U_1	$0.07 f'_c$	7.4	9.8	12.2	14.8
...	U_2	$0.05 f'_c$	5.3	7.0	8.8	10.5
...	U_3	$0.04 f'_c$	4.2	5.6	7.0	8.4
...	U_4	$0.03 f'_c$	3.2	4.2	5.2	6.3
... (Slab panel)	U_5	$0.03 f'_c$	3.2	4.2	5.2	6.3
...	U_6	$0.02 f'_c$	2.1	2.8	3.5	4.2
...	U_7	$0.05 f'_c$	5.3	7.0	8.8	10.5
...	U_8	$0.03 f'_c$	3.2	4.2	5.2	6.3
แรงเฉือนยึดเหนี่ยว : v, กก./ซม.^{2}						
เหล็กปลอก						
...	U	$0.11 f'_c$	11.6	15.4	19.2	23.1
...	U	$0.04 f'_c$	4.2	5.6	7.0	8.4
...	U	$0.045 f'_c$	5.2	6.3	7.9	9.4
...	U	$0.06 f'_c$	6.3	8.4	10.5	12.6
...	U	$0.07 f'_c$	7.3	9.8	12.2	14.7
เหล็กดัด						
...	U	$0.03 f'_c$	3.2	4.2	5.2	6.3
...	U	$0.0526 f'_c$	4.5	6.2	7.8	9.4
...	U	$0.045 f'_c$	4.2	5.6	7.0	8.4
...	U	$0.056 f'_c$	5.9	7.8	9.8	11.8
...	U	$0.05 f'_c$	5.2	7.0	8.7	10.4

ตารางแสดงแรงเค้นปลอดภัยของคอนกรีตและเหล็กเสริม (Working stresses) (ทอ)

รายการ		แรงเค้นปลอดภัยสำหรับคอนกรีต				
		% ของกำลังสูงสุดของคอนกรีต $n=\frac{2,100}{f'_c}$	f'_c = 110 กก/ซม² n=18	f'_c=140 กก/ซม² n=15	f'_c=175 กก/ซม² n=12	f'_c=210 กก/ซม² n=10
เหล็กปลอก						
เหล็กปลอกแบบไม่ต้องคำนวณ	u	$0.04f'_c$	44	56	70	84
เหล็กปลอกแบบไม่ต้องคำนวณ	u	$0.05f'_c$	55	70	87	105
เหล็กปลอกแบบต้องคำนวณ	u	$0.06f'_c$	66	84	105	126
เหล็กปลอกแบบต้องคำนวณ	u	$0.075f'_c$	82	105	131	157
เหล็กปลอกแบบพิเศษ	u	$0.10f'_c$	110	140	175	210
แรงอัดประลัย (Bearing) : f_c, กก/ซม²						
ที่ผิวสัมผัส	f_c	$0.25f'_c$	28	35	44	53
ที่ผิวสัมผัสที่มีขนาดใหญ่กว่าที่รับแรง	f_c	$0.375f'_c$	41	52	66	79
แรงอัดประลัย (Axial compression and bearing) : f_c, กก/ซม²						
ที่ผิวสัมผัสที่มีขนาดใหญ่กว่าที่รับแรง	f_c	$0.25f'_c$	28	35	44	53
f_c = 1400	n		13	11	10	9
	p		0.0034	0.0091	0.0113	0.0130
	J		0.87	0.87	0.87	0.87
	K		0.40	0.40	0.40	0.40
	R		3	4.5	5.5	6.5

เหล็กข้อต่อแรง

แรงดึงในแนวตั้งฉากของคอนกรีตที่รับแรงเฉือน และแรงดึงในเหล็กลูกตั้ง ..... f_s = 1,120 กก/ซม²

แรงดึงในแนวตั้งฉากของคอนกรีตที่รับแรงเฉือน (ถ้าไม่ต้องการคำนวณหาขนาดและระยะของเหล็กปลอก) และแรงดึงในเหล็กลูกตั้ง ..... f_s = 1,400 กก/ซม²

เหล็กข้อต่อแรงดึง

แรงดึงในแนวตั้งฉากของคอนกรีตที่รับแรงเฉือน และแรงดึงในเหล็กลูกตั้ง ..... f_s = 1,120 กก/ซม²

แรงดึงในแนวตั้งฉากของคอนกรีตที่รับแรงเฉือน (ถ้าไม่ต้องการคำนวณหาขนาดและระยะของเหล็กปลอก) ..... f_s = 1,400 กก/ซม²

เหล็กข้อต่อแรงอัด

แรงดึงในแนวตั้งฉากของคอนกรีตที่รับแรงเฉือน และแรงดึงในเหล็กลูกตั้ง ..... f_s = 1,120 กก/ซม²

แรงดึงในแนวตั้งฉากของคอนกรีตที่รับแรงเฉือน (ถ้าไม่ต้องการคำนวณหาขนาดและระยะของเหล็กปลอก) ..... f_s = 1,260 กก/ซม²

ตารางแสดงแรงต้านสูงสุดของคอนกรีตและเหล็กเสริม (Ultimate stresses)

แรงเค้นปลอดภัยสำหรับคอนกรีต 140 กก และเหล็กเสริม

รายการ	อาคารที่ออกแบบ ...	...	อาคารสำหรับ ...
แรงเค้นสูงสุดที่ยอมให้ใช้ (Ultimate allowable stress) f_c'	140 กก/ซม²	140 กก/ซม²	140 กก/ซม²
แรงเค้นดัด (Flexure) : f_c, กก/ซม²			
แรงเค้นอัดที่ผิว	$0.45 f_c' + 63$	$0.35 f_c' + 49$	$0.33 f_c' + 46$
แรงเค้นอัดที่ขอบด้านรับแรงอัดของคาน ...	$0.45 f_c' + 63$	$0.40 f_c' + 56$	$0.33 f_c' + 46$
แรงเค้นที่ผิวในของ ...	$0.05 f_c' + 4.2$	$0.05 f_c' + 4.2$	$0.05 f_c' + 4.2$
แรงเค้นเฉือน (Shear) : v_c, กก/ซม²			
...	$0.02 f_c' + 2.8$	$0.02 f_c' + 2.8$	$0.02 f_c' + 2.8$
...	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.03 f_c' + 4.2$
...	$0.06 f_c' + 8.4$	$0.04 f_c' + 5.6$	$0.046 f_c' + 6.4$
...	$0.12 f_c' + 16.8$	$0.09 f_c' + 12.5$	$0.09 f_c' + 8.4$
(ที่ V_c มากกว่า) $0.09 f_c'$ เหล็กลูกตั้ง ...			
...	$0.02 f_c' + 2.8$	$0.02 f_c' + 2.8$	$0.02 f_c' + 2.8$
...	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.03 f_c' + 4.2$
...	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.03 f_c' + 4.2$
...	$0.09 f_c' + 8.4$	$0.06 f_c' + 8.4$	$0.046 f_c' + 6.4$
แรงเค้นยึดเกาะ (Bond) : u, กก/ซม²			
เหล็กข้ออ้อย			
...	$0.05 f_c' + 4.2$	$0.04 f_c' + 3.5$	$0.05 f_c' + 4.2$
...	$0.04 f_c' + 3.5$	$0.04 f_c' + 5.6$	$0.04 f_c' + 5.6$
...	$0.045 f_c' + 6.3$	$0.045 f_c' + 6.3$	$0.045 f_c' + 6.3$
...	$0.064 f_c' + 8.4$	$0.05 f_c' + 7.0$	$0.05 f_c' + 6.4$
...	$0.07 f_c' + 9.8$	$0.06 f_c' + 8.4$	$0.07 f_c' + 9.8$
เหล็กกลมเรียบและเหล็กรูปพรรณ			
...	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.03 f_c' + 4.2$
...	$0.03751 f_c' + 5.2$	$0.03 f_c' + 4.2$	$0.0375 f_c' + 5.2$
...	$0.045 f_c' + 6.3$	$0.045 f_c' + 6.3$	$0.045 f_c' + 6.3$
...	$0.054 f_c' + 7.8$	$0.045 f_c' + 6.3$	$0.054 f_c' + 7.8$
...	$0.06 f_c' + 8.4$	$0.05 f_c' + 7.0$	$0.06 f_c' + 8.4$

ตารางแสดงแรงเค้นสูงสุดของคอนกรีตและเหล็กเสริม (Ultimate stresses) (ต่อ)

แรงเค้นปลอดภัยสำหรับคอนกรีต 140 กก/ซม² และเหล็กเสริม			
รายการ	อาคารในคลองทุกชนิด นอกจากทางรถไฟและทางหลวง.	อาคารสำหรับทางรถไฟ	อาคารสำหรับทางหลวง
รายการ			
เหล็กเกลี้ยงปลายไม่ทำงอ	$0.04 f'_c + 5.6$	$0.04 f'_c + 5.6$	$0.04 f'_c + 5.6$
เหล็กข้ออ้อยปลายไม่ทำงอ	$0.05 f'_c + 7.0$	$0.05 f'_c + 7.0$	$0.05 f'_c + 7.0$
เหล็กเกลี้ยงปลายทำงอ	$0.06 f'_c + 8.4$	$0.06 f'_c + 8.4$	$0.06 f'_c + 8.4$
เหล็กข้ออ้อยปลายทำงอ	$0.075 f'_c + 10.5$	$0.075 f'_c + 10.5$	$0.075 f'_c + 10.5$
เหล็กข้ออ้อยแรงยึดสูง	$0.10 f'_c + 14.0$	$0.10 f'_c + 14.0$	$0.10 f'_c + 14.0$
แรงที่ผิวรับ (Bearing) : f_c, กก/ซม²			
เต็มพื้นที่	$0.25 f'_c + 35$	$0.25 f'_c + 35$	$0.25 f'_c + 35$
บนพื้นที่ซึ่งรองรับกว้างกว่า	$0.375 f'_c + 52$	$0.35 f'_c + 49$	$0.35 f'_c + 49$
แรงเค้นอัดและดัดร่วมกัน (Axial compression and bending) : f_c, กก/ซม²			
วงกลม (แรงยึดรอบนอกเป็นเหล็กเกลียว)	$0.25 f'_c + 35$	$0.25 f'_c + 35$	$0.25 f'_c + 35$
อื่นๆ (แรงยึดรอบนอกเป็นเหล็กเกลียว ดูข้อ 1.15.2.4, แรงยึดเป็นเหล็กปลอก ดูข้อ 1.15.2.9)			
$f_s = 1400$	n 15	15	15
	p 0.0025	0.0025	0.0034
	j 0.87	0.88	0.89
	k 0.40	0.39	0.35
	R 10.9	7.5	6.8

หมายเหตุ ค่าของ f_s ใช้ค่าเดียวกับท้ายตาราง "แรงเค้นปลอดภัยในคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับอาคารนอกจากทางรถไฟและทางหลวง".

ตารางแสดงพื้นที่หน้าตัด (A_s) และเส้นรอบวง (Σ_o) ของเหล็กเสริม ในการวางเหล็กระยะห่างต่าง ๆ

Ø หน	Σ_o ซม. / A_s ซม.²	เนื้อที่หน้าตัดรวม และความยาวของเส้นรอบวงรวม ต่อพื้นที่กว้าง 1.00 เมตร ระยะห่างเหล็ก เป็น ซม.																			
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22	24	25	26	28	30
6	A_s	5.65	4.71	4.04	3.53	3.14	2.83	2.57	2.36	2.17	2.02	1.88	1.77	1.57	1.41	1.29	1.17	1.13	1.09	1.01	0.94
	Σ_o	37.70	31.42	26.93	23.56	20.94	18.85	17.14	15.71	14.50	13.46	12.57	11.78	10.47	9.42	8.57	7.85	7.54	7.25	6.73	6.28
9	A_s	12.72	10.60	9.09	7.95	7.07	6.36	5.78	5.30	4.89	4.54	4.24	3.98	3.53	3.18	2.89	2.65	2.54	2.45	2.27	2.12
	Σ_o	56.55	47.12	40.39	35.34	31.42	28.27	25.70	23.56	21.75	20.20	18.85	17.67	15.71	14.14	12.85	11.78	11.31	10.87	10.10	9.42
12	A_s	22.62	18.85	16.16	14.14	12.57	11.31	10.28	9.42	8.70	8.08	7.54	7.07	6.28	5.65	5.14	4.71	4.52	4.35	4.04	3.77
	Σ_o	75.40	62.83	53.86	47.12	41.89	37.70	34.21	31.42	29.00	26.93	25.13	23.56	20.94	18.85	17.14	15.71	15.08	14.50	13.46	12.57
15	A_s	35.34	29.45	25.24	22.09	19.63	17.67	16.06	14.73	13.59	12.62	11.78	11.04	9.82	8.83	8.03	7.36	7.07	6.79	6.31	5.89
	Σ_o	94.25	78.54	67.32	58.90	52.36	47.12	42.84	39.27	36.25	33.66	31.42	29.45	26.18	23.56	21.42	19.63	18.85	18.12	16.83	15.71
19	A_s	56.71	47.25	40.50	35.44	31.50	28.35	25.77	23.63	21.81	20.25	18.90	17.72	15.75	14.18	12.89	11.81	11.34	10.90	10.12	9.45
	Σ_o	119.38	99.48	85.27	74.61	66.32	59.69	54.26	49.74	45.98	42.64	39.79	37.13	33.16	29.84	27.13	24.87	23.88	22.96	21.32	19.90
22	A_s	76.03	63.35	54.30	47.52	42.24	38.01	34.56	31.68	29.24	27.15	25.34	23.76	21.12	19.00	17.28	15.84	15.20	14.62	13.58	12.67
	Σ_o	138.23	115.13	98.73	86.39	76.79	69.11	62.83	57.60	53.16	49.37	46.08	43.20	38.40	34.56	31.42	28.80	27.65	26.58	24.68	23.04
25	A_s	98.18	81.81	70.13	61.36	54.54	49.09	44.62	40.91	37.76	35.06	32.72	30.68	27.27	24.54	22.31	20.45	19.60	18.88	17.53	16.36
	Σ_o	157.08	130.90	112.20	98.18	87.27	78.54	71.40	65.45	60.42	56.10	52.36	49.09	43.63	39.27	35.70	32.73	31.42	30.21	28.05	26.18

ตารางแสดงพื้นที่หน้าตัด (A_s) และเส้นรอบรูป (Σ_o) ของเหล็กเส้น

สำหรับจำนวนเส้นของเหล็กต่าง ๆ

ขนาดเหล็ก มม.	ΣA ซม^2 / Σo ซม	เนื้อที่หน้าตัด และความยาวรอบเส้นรอบรูป จำนวนเส้น									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	ΣA	0.28	0.57	0.85	1.13	1.41	1.70	1.98	2.26	2.54	2.83
	Σo	1.88	3.77	5.65	7.54	9.42	11.31	13.20	15.08	16.96	18.85
9	ΣA	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	3.82	4.45	5.09	5.72	6.36
	Σo	2.83	5.65	8.48	11.31	14.14	16.96	19.72	22.62	25.44	28.27
12	ΣA	1.13	2.26	3.39	4.52	5.65	6.79	7.92	9.05	10.18	11.31
	Σo	3.77	7.54	11.31	15.08	18.85	22.62	26.39	30.16	33.93	37.70
15	ΣA	1.77	3.53	5.30	7.07	8.84	10.60	12.37	14.14	15.90	17.67
	Σo	4.71	9.42	14.14	18.85	23.56	28.27	32.99	37.70	42.41	47.12
19	ΣA	2.83	5.67	8.50	11.34	14.18	17.01	19.85	22.68	25.52	28.35
	Σo	5.97	11.94	17.91	23.88	29.84	35.81	41.78	47.75	53.72	59.69
22	ΣA	3.80	7.60	11.40	15.20	19.00	22.81	26.61	30.41	34.21	38.01
	Σo	6.91	13.82	20.73	27.64	34.56	41.47	48.38	55.29	62.20	69.11
25	ΣA	4.91	9.82	14.73	19.64	24.54	29.45	34.36	39.27	44.18	49.09
	Σo	7.85	15.71	23.56	31.42	39.27	47.12	54.98	62.83	70.69	78.54

น้ำหนักต่อความยาว 1.00 เมตร (กก)

ขนาดเหล็ก	6	9	12	15	19	22	25
น้ำหนัก	0.222	0.499	0.890	1.390	2.230	2.980	3.850

2.4 <u>แรงคันลมต่ออาคาร</u> (Wind pressure)

เหนือผิวดินไม่เกิน 15.00 ม. ..... 100 กก./ม.^{2}

เหนือดิน 15 – 30 ม. ..... 150 กก./ม.^{2}

นอกจากนี้ยังมีหลักเกณฑ์ในการหาแรงคันลมต่ออาคารอีกแบบหนึ่ง เป็นสูตรดังนี้.–

$$P = 0.0032\ V^2$$

ในเมื่อ P = แรงคันลม เป็น ปอนด์/(ฟุต)^2

V = ความเร็วลม เป็น ไมล์/ชม.

และกรมอุทกศาสตร์ได้ทำการวัดความเร็วลมที่แรงที่สุด ณ สนามบินดอนเมืองที่ระดับสูงจากพื้นดิน 2.00 ม. ได้ 65 กม./ชม.

<u>ความเร็วลม</u> (ไมล์/ชม.)	<u>แรงคันลม</u> (กก./ม.^{2})
20	6
40	25
60	56
80	100
100	156

2.5 <u>สัมประสิทธิ์ของการเลื่อนตัวในทางราบของอาคาร</u> (Coefficient of sliding)

อาคารชลประทานมักจะถูกดันให้เลื่อนไถล เนื่องจากแรงดันในทางราบ แต่อาคารเหล่านั้นสามารถคงทนอยู่ได้ก็เพราะแรงเสียดทาน (Friction) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของอาคารกับพื้นดินที่รองรับอาคาร และค่าของแรงเสียดทานนี้จะหาได้จากผลคูณระหว่างน้ำหนักของอาคารกับสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน "C" ตามค่าข้างล่างนี้ และนิยมใช้ส่วนเผื่อของความปลอดภัย (Factor of safety) 1.5 – 2.0

- หน้าสัมผัสของคอนกรีตกับกรวด, C = 0.5
- หน้าสัมผัสของคอนกรีตกับทราย, C = 0.4
- หน้าสัมผัสของคอนกรีตกับดินเหนียว, C = 0.3

2.6 <u>ความยาวของการไหลของน้ำเลาะอาคาร</u> (Percolation length)

ทางน้ำที่ถูกปิดกั้นจนทำให้เกิดระดับแตกต่างของน้ำด้านเหนือและด้านท้ายอาคารนั้น ย่อมทำให้น้ำพยายามไหลเลาะตามแนวสัมผัสระหว่างอาคารกับดินที่รองรับทั้งด้านใต้และด้านข้างของตัวอาคาร ถ้าความยาวที่น้ำไหลเลาะอาคารนี้ไม่พอก็จะทำให้น้ำไหลแรงจนสามารถพัดพาเมล็ดดินออกไปทำให้เกิดเป็นโพรงขึ้นที่ใต้และข้างอาคาร ทำให้อาคารทรุดตัวและเสียหายได้

การที่จะกำหนดความยาวของการไหลของน้ำพอเหมาะพอควรได้จะต้องอาศัยอัตราส่วนระหว่างความยาวของการไหลของน้ำเลาะอาคาร กับระดับต่างของน้ำด้านเหนือและด้านท้ายอาคาร H ซึ่งเรียกว่า Weighted creep ratio C_w

ค่า C_w นั้น Lane ได้ให้ค่าที่เรียกว่า Lane's ratio ไว้ดังต่อไปนี้.-

<u>ลักษณะดินใต้อาคาร</u>	<u>ค่า C_w</u>
ทรายละเอียดมากหรือดินตะกอน	8.5
ทรายละเอียด	7.0
ทรายขนาดปานกลาง	6.0
ทรายหยาบ	5.0
กรวดละเอียด	4.0
กรวดขนาดปานกลาง	3.5
กรวดหยาบหรือหินเล็ก	3.0
ดินเหนียวที่อ่อนตัว	3.0
หินใหญ่ปนหินเล็กปนกรวด	2.5
ดินเหนียวปานกลาง	2.0

ค่า C_w ดังกล่าวจะลดลงเหลือเพียง 80 % ถ้าได้ทำระบบกรองน้ำที่ดี (Reversed filter) ทางด้านท้ายน้ำของตัวอาคาร

สำหรับค่า L มีหลักเกณฑ์ในการคิดดังนี้

- ถ้าเป็นระยะตามแนวดิ่งหรือแนวเอียงที่ทำมุมกับพื้นราบเป็นมุมเกินกว่า 45° ให้ใช้ความยาวจริง
- ถ้าเป็นระยะตามแนวราบเลาะด้านข้างอาคาร ให้ใช้ความยาวจริง
- ถ้าเป็นระยะตามแนวราบที่เลาะใต้พื้นอาคาร หรือแนวเอียงที่ทำมุมกับพื้นราบน้อยกว่า 45° ให้ใช้ 1/3 ของความยาวจริง
- ช่วงตอนใดที่มีเข็มรับน้ำหนัก (Foundation pile) รองรับช่วงตอนนั้น ไม่ให้คิดเป็นระยะ L
- ช่วงตอนที่มีเข็มพืด (Sheet pile) ตั้งแต่ 2 แถวขึ้นไป ถ้าระยะระหว่างแถวของเข็มพืดสั้นกว่าผลรวมของความยาวของเข็มพืดทั้งสองแถวนั้น ให้คิดว่าน้ำไหลลัดจากปลายเข็มพืดแถวหนึ่งไปสู่ปลายเข็มพืดอีกแถวหนึ่งเท่านั้น

2.7 การกำหนดระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมคอนกรีต (Spacing)

การกำหนดระยะห่างของเหล็กเสริมโดยวัดจากผิวถึงผิวใช้เกณฑ์ดังนี้.-

- เหล็กกลม (Round bar) $\leq$ 1.5 d
- เหล็กเหลี่ยม (Square bar) $\leq$ 2.0 d

(d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม)

หรือ $\leq$ 1.5 เท่าของขนาดหินที่ใหญ่ที่สุดที่ใช้ผสมคอนกรีต

- ในกรณีเสริมเหล็กมากกว่า 1 แถว ควรวางแนวเหล็กแต่ละแถวให้ตรงกันด้วย

2.8 การต่อเหล็ก (Splicing)

ถ้าต้องมีการต่อเหล็กที่ใช้เสริมคอนกรีตโดยวิธีทาบต่อกันเฉย ๆ จะต้องอาศัยหลักเกณฑ์ดังนี้.-

- อย่าต่อเหล็ก ณ จุดที่เกิดโมเมนต์มากที่สุด
- การเสริมเหล็กพื้นและกานจะต้องให้ความยาวในช่วงที่ต่อซ้อนกันพอสำหรับแรงเค้นแรงยึด และแรงเฉือน ซึ่งตามปกติจะใช้เท่ากับ 36 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเสริม

สำหรับเหล็กข้ออ้อย (High bond bar) และใช้ 48 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเสริมสำหรับเหล็กผิวเรียบ (Plain bar)

– ถ้าการต่อเหล็กทำโดยการเชื่อม (Welding) ไม่จำเป็นต้องอาศัยหลักเกณฑ์ข้างต้น

2.9 <u>ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม</u> (Covering)

	ผิวบน		ผิวล่าง		ความหนา ซม.	หมายเหตุ
	สภาพผิวคอนกรีต	ส่วนที่หุ้ม ซม.	สภาพผิวคอนกรีต	ส่วนที่หุ้ม ซม.		
เสริมเหล็กผิวเดียว	ไม่สัมผัสอากาศ	2	วางใกล้แบบ	3	7.5	* เมื่อสัมผัสกับอากาศ
			วางใกล้ดิน ใกล้หิน	5	10	
	สัมผัสอากาศ และเสริมเหล็กไม่เกิน ϕ 19 มม.	4	วางใกล้แบบ	3	10	
			วางใกล้ดิน ใกล้หิน	5	12.5	
	ฐานตอม่อ	4	วางใกล้ดิน ใกล้หิน	8	15	
เสริมเหล็กสองผิว	ไม่สัมผัสอากาศ หรือพื้นสพาน	3	วางใกล้แบบ	3, 4*	17.5	
			วางใกล้ดิน ใกล้หิน	8	20	
	สัมผัสอากาศ และเสริมเหล็กไม่เกิน ϕ 19 มม.	4	วางใกล้แบบ	3, 4*	17.5	
			วางใกล้ดิน ใกล้หิน	8	22.5	
	ฐานตอม่อ	4	วางใกล้ดิน ใกล้หิน	8	22.5	

นอกจากนี้ผิวคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับกระแสน้ำ ให้เพิ่มความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม จากที่กล่าวไว้ในตารางข้างบนนี้อีก 1 ซม. ทุก ๆ ความเร็วของกระแสน้ำ 2.5 ม./วินาที และความหนาส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ให้นำไปรวมคิดเป็นส่วนของความลึกใช้งาน (Effective depth) ในการคำนวณโครงสร้างเค็ดขาด

2.10 <u>เหล็กเสริมหลัก</u> (Main reinforcement)

เหล็กเสริมหลักที่ใช้เสริมในคอนกรีตนั้นนอกจากจะคำนวณขนาดและจำนวนออกมาตามขนาดของโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นแล้ว ยังมีหลักเกณฑ์เพิ่มเติมในการใส่เหล็กอีกดังนี้

2.10.1 คานใด ๆ ก็ตาม เหล็กเสริมหลักไม่ควรวางให้ห่างกันเกิน 2 เท่าของความหนาของคานนั้นหรือห่างกันไม่เกิน 0.45 ม. แล้วแต่ว่าไหนจะสั้นกว่ากัน

2.10.2 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่ควรวางเหล็กหลักห่างกันเกิน 3 เท่าของความหนาของพื้นนั้น หรือห่างกันไม่เกิน 0.30 ม. แล้วแต่ว่าไหนจะสั้นกว่ากัน

2.11 <u>เหล็กเสริมรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ</u> (Temperature steel)

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศได้รับการถ่ายทอดไปสู่เนื้อของคอนกรีตในช่วงความลึกไม่เกิน 0.40 ม. ดังนั้นจึงเกิดการยืดและหดตัวในเนื้อคอนกรีตในช่วงความหนา 0.40 ม. อยู่ตลอดเวลา อันเป็นผลให้เนื้อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเพราะ Shrinkage ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเสริมเหล็กด้วยจำนวนที่พอเพียงสำหรับรับ Shrinkage นี้เสมอในสภาวะการณ์ต่าง ๆ ซึ่งมีหลักเกณฑ์พอสรุปได้ดังนี้.-

2.11.1 <u>จำนวนเหล็กเสริม</u> เพื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะต้องไม่น้อยกว่า ϕ 9 มม. @ 0.30 ม. เมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสอากาศ และไม่น้อยกว่า ϕ 9 มม. @ 0.45 ม. เมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสอากาศ และจะต้องวางห่างจากผิวคอนกรีตไม่เกินกว่า 1/3 เท่าของความหนาของคอนกรีตส่วนนั้น

2.11.2 <u>การเสริมเหล็กผิวเดียว</u> จำนวนของเหล็กเสริมเพื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใช้หลักเกณฑ์ดังนี้

ก. คอนกรีตคาดคลองหนาไม่เกิน 0.10 ม. และมีรอยต่อไม่เกิน 5.00 ม. ให้ใส่เหล็กตรงกลาง ..... 0.10 %

ข. พื้นทั่วไป หรือคลองคาด ที่ไม่สัมผัสแสงแดดโดยตรง และรอยต่อห่างกันไม่เกิน 10.00 ม. ให้ใส่เหล็ก ..... 0.20 %

ก. พื้นทั่วไปหรือคลองคาดที่สัมผัสแสงแดดเต็มที่ และรอยต่อห่างกันไม่เกิน 10.00 ม. ให้ใส่เหล็ก ..... 0.25 %

ง. พื้นทั่วไปหรือคลองคาดที่มีรอยต่อห่างกันเกินกว่า 10.00 ม. ให้ใส่เหล็ก ..... 0.30 – 0.35 %

2.11.3 <u>การเสริมเหล็กสองผิว</u> จำนวนเปอร์เซนต์ของเหล็กที่กำหนดให้นี้ เป็นค่าที่ใช้เพื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงผิวเดียวเท่านั้น ดังนั้นในการเสริมเหล็กสองผิวจึงต้องแยกกันคิด โดยอาศัยหลักเกณฑ์ดังนี้

ก. ผิวคอนกรีตสัมผัสดิน และมีรอยต่อห่างกันไม่เกิน 10.00 ม. ให้ใส่เหล็ก ..... 0.20 %

ข. ผิวกอนกรีตไม่สัมผัสดินและไม่ถูกแสงแดด มีรอยต่อห่างกันไม่เกิน 10.00 ม. ให้ใส่เหล็ก ..... 0.15 %

ค. ผิวคอนกรีตไม่สัมผัสดินแต่ถูกแสงแดดเต็มที่ มีรอยต่อห่างกันไม่เกิน 10.00 ม. ให้ใส่เหล็ก ..... 0.20 %

ง. ส่วนของอาคารกอนกรีตเสริมเหล็กใด ๆ ที่มีช่วงยาวในแนวขนานกับเหล็กเสริมเกินกว่า 10.00 ม. ให้เพิ่มเหล็กเสริม เพื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแนวนั้นขึ้นอีก

จ. การคิดพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตเพื่อหาจำนวนเหล็กเสริมเพื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้น ถ้าความหนาของคอนกรีตส่วนนั้นหนาเกินกว่า 0.40 ม. ให้คิดความหนาเพียง 0.40 ม. เท่านั้น

2.12 <u>การยึดเหล็กเสริมหลัก</u> (Anchorage of main reinforced steel)

การเสริมเหล็กหลักใด ๆ ก็ตามเมื่อจะมีการหยุดเหล็กเนื่องจากมีความเพียงพอสำหรับต้านโมเมนต์และแรงเฉือนแล้ว จะต้องมีส่วนยื่นของเหล็กต่อไปอีกให้พอในด้านแรงยึด (Bond stress) และความยาวของส่วนที่ยื่นออกไปนี้จะหาได้จากสูตร

$$L = \frac{f_s \cdot D}{4u}$$

ในเมื่อ L = ความยาวของเหล็กเสริมที่ต้องยื่นเพิ่มขึ้นเป็นนิ้ว หรือ ซม.

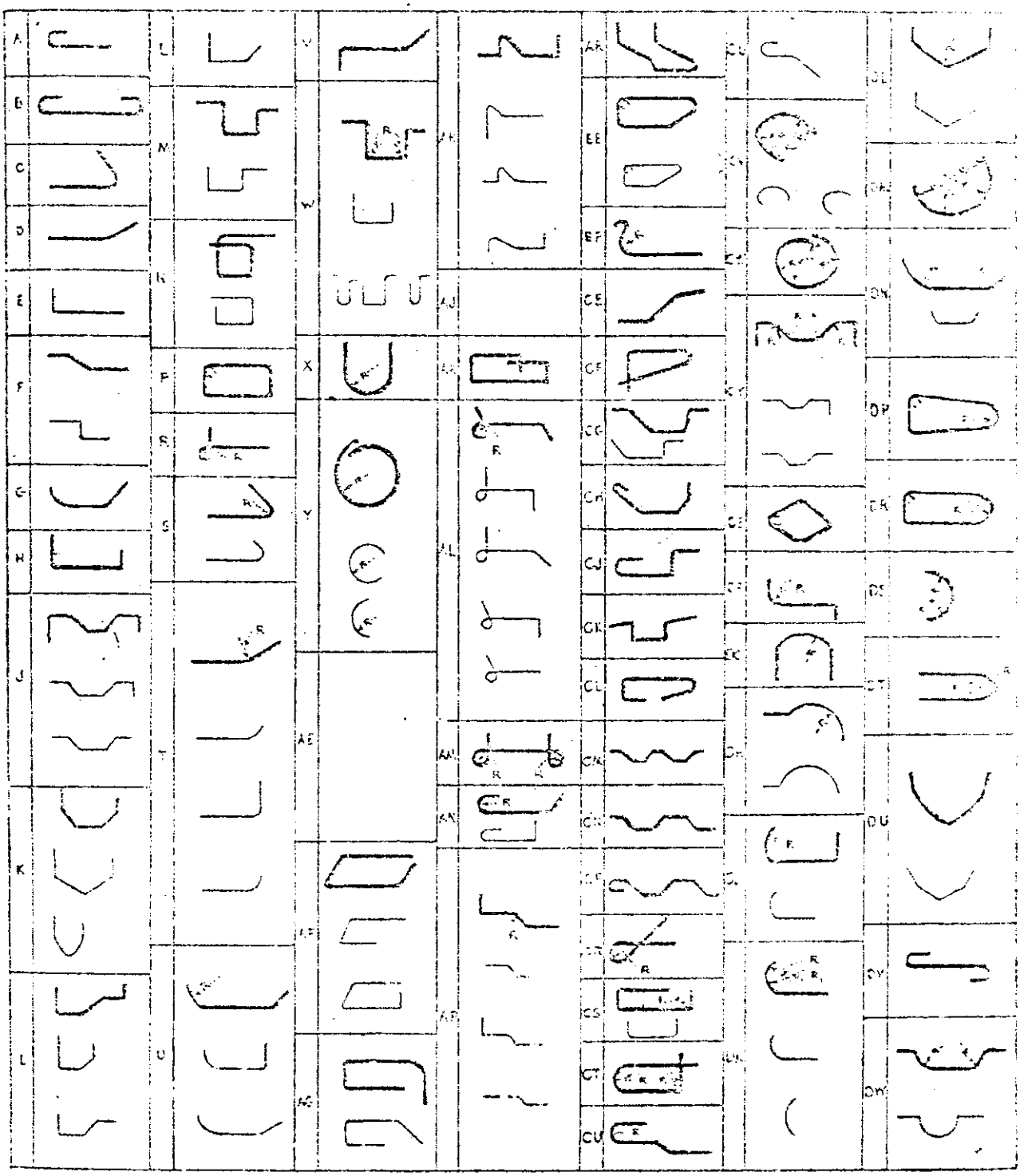
f_s = แรงเค้นใช้งานของเหล็กที่เกิดขึ้นจริง ๆ ซึ่งจะหาได้จากสูตร $f_s = \frac{M}{A_s \cdot j \cdot d}$ มีหน่วยเป็นปอนด์/(นิ้ว)^2 หรือ กก./(ซม.)^2

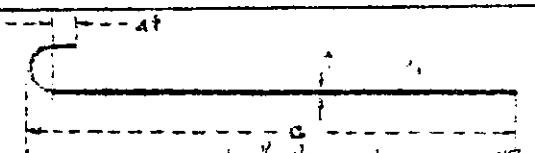
D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมหลักนั้นเป็นนิ้ว หรือ ซม.

u = แรงยึดของเหล็กเสริมหลักเป็นปอนด์/(นิ้ว)^2 หรือ กก./(ซม.)^2

2.13 <u>สัญญลักษณ์ของเหล็กเสริม</u> (Symbol of reinforced steel)

ในงานออกแบบอาคารชลประทานนั้น รูปแบบ (Drawing) ของงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เขียนออกมามักเกิดปัญหาในการถอดแบบเหล็กเสริมอยู่เสมอ กรมชลประทานจึงได้ออกสัญญลักษณ์ของเหล็กเสริมมาเพื่อใช้บอกรูปร่างของเหล็กเสริมให้เกิดความสะดวกทั้งผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานก่อสร้าง โดยเริ่มใช้มาตั้งแต่งานก่อสร้างโครงการเขื่อนเจ้าพระยา และยังคงใช้มาจนถึงปัจจุบัน ดังรูปที่แนบมาท้ายบทนี้





ความยาว "a" เท่ากับความยาวของเหล็กทั้งเส้นลบด้วยระยะแก้ในการดัดปลายเป็นรอบข้างเคียง การดัดปลายเป็นรอต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ถ้าจะดัดปลายให้เป็นรอแยะลูกตั้งต้องแล้วแต่ตัวอักษรหมาย

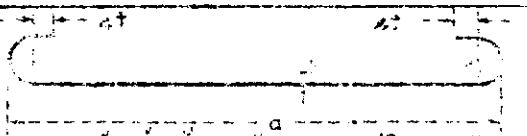
เหล็กเบอร์		3	4	5	6	7	8	9	10	11
ขนาด	นิ้ว	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1	1.128	1.270	1.410
เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กหลัก	นิ้ว	2	3	4	5	6	8	9	10	11
มาตรฐาน	ซม.	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0	22.5	25.0	27.5
เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กหลัก	นิ้ว	1	1	2	2					
แบบลูกตั้ง	ซม.	2.5	2.5	5.0	5.0					
		ระยะแก้ ซึ่งเมื่อนำไปลบออกจากความยาวทั้งหมด จะได้ความยาว "a"								
ระยะแก้เมื่อดัดแบบมาตรฐาน		10	14	19	22	27	34	39	43	46
ระยะแก้เมื่อดัดแบบลูกตั้ง		8	9	13	15					

หมายเหตุ

ลักษณะสำหรับเหล็กรอ - ตัวเลขจำนวนแรกหมายถึงขนาดเหล็กซึ่งต่างกันขนาดเหล็กเส้นเดียวไว้ด้วยกัน ตัวเลขจำนวนต่อมาแสดงความยาวของเหล็กเป็นเมตรและเซนติเมตร เช่น 05 หมายถึงเหล็กยาว 5.00 เมตร ถ้าในงานเดียวกันต้องทำการต่อสั่งงานหลายรูปงาน เหล็กซึ่งจะนำไปใช้ในงานแต่ละงาน ต้องมีตัวอักษรกำกับไว้ข้างหน้าตัว "A" เช่น BA605 หมายถึงเหล็กเบอร์ 6 แบบ A ยาว 5.00 เมตร ที่ใช้ในงาน ระบบโครงสร้าง ซึ่งจะใช้ตัวอักษร "S" กำกับไว้ในแบบเลขที่ 29504

ตัวอย่าง

ลักษณะ	หมายถึงเหล็ก		ความยาว "a"
	ขนาด	ความยาว - ม	
A605	# 6	5.00	4.77
*A604.60	# 6	4.60	4.45
A610.10	# 8	10.10	9.74
A1112.80	# 11	12.80	12.32



ความยาว "a" เท่ากับความยาวของเหล็กทั้งเส้นลบด้วยระยะที่ใช้ในการดัดปลายเป็นของต่องดัด การดัดงอ
เป็นของต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ถ้าจะดัดงอให้เป็นของแบบจุกสั่งต้องแจ้งไว้ด้วยเสมอ ๆ

เหล็กเบอร์		3	4	5	6	7	8	9	10	11
ขนาด	นิ้ว	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1	1.128	1.270	1.410
เส้นผ่าศูนย์กลางของ	นิ้ว	2	3	4	5	6	8	9	10	11
เหล็กหลักมาตรฐาน	ซม.	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0	22.5	25.0	27.5
เส้นผ่าศูนย์กลางของ	นิ้ว	1	1	2	2					
เหล็กหลักแบบจุกสั่ง	ซม.	2.5	2.5	5.0	5.0					
		ระยะที่ต้องเพิ่มนำไปลบออกจากความยาวทั้งหมด เพื่อให้ความยาว "a"								
ระยะที่ต้องดัดแบบมาตรฐาน		20	29	38	46	55	69	77	84	95
ระยะที่ต้องดัดแบบจุกสั่ง		13	18	27	30					

หมายเหตุ

ลักษณะดัดสำหรับเหล็กข้อ - ที่จะจำนวนหรือหมายถึงเบอร์เหล็กซึ่งเท่ากับขนาดเหล็กลักษณะดัดไว้บนบน ตัวเลขจำนวนต่อมาหลังความยาวของเหล็กเป็นเมตร และเซนติเมตร เช่น 08.00 หมายถึงเหล็กยาว 8.00 เมตร ถ้าในงานเดียวกันต้องทำการก่อสร้างงานหลายๆงาน เหล็กชิ้นจะนำไปใช้ในงานแต่ละงานต้องมีตำแหน่งกำกับไว้ข้างหน้าคำว่า "B" เช่น SB 403.00 หมายถึงเหล็กเบอร์ 4 แบบ B ยาว 3.00 เมตร ใช้ในงาน Switchyard ซึ่งขอกไว้ด้วยคำว่า "S" ดูวิธีลักษณะดัดกำกับเหล็กไว้ในแบบเลขที่ 23534

ตัวอย่าง

ลักษณะดัด	หมายถึงเหล็ก		ความยาว "a"
	ขนาด	ความยาว - M	
B 403 90	# 4	3.90	3.61
B3 404	# 4	4.00	3.70
B 611	# 6	11.00	10.54
B 1103.50	# 11	12.00	11.03

รูปเดิม	ดัดเป็นรองเข้าข้างใน		ดัดเป็นรองออกข้างนอก	
	ปลายเดียว A	สองปลาย B	ปลายเดียว C	สองปลาย D
C	CA	CB	CC	CD
D	DA	DB	DC	DD
E	EA	EB	EC	ED
F	FA	FB	FC	FD
G	GA	GB	GC	GD
H	HA	HB	HC	HD

เหล็ก S,T,U,V และ K เมื่อจะดัดปลายให้เป็นรอ ให้ทำเช่นเดียวกับเหล็ก C,D,G,F และ H

ความยาวของส่วนต่างๆ ของเหล็กให้ดูในแบบเลขที่ 29512 - 29514

การดัดปลายเป็นรองข้างเดียวให้ดัดต่อจากปลายซึ่งมีความยาว "a" ส่วนการดัดปลายเป็นรองทั้งสองข้าง ให้ดัดต่อจากอีกปลายที่เหลือด้าย

เหล็กที่ดัดเป็นรองออกเหนือไปจากรูปที่แสดงไว้ถือว่าเป็นเหล็กแบบพิเศษ

รูปลักษณ์	ลักษณะปลายเรียว		ลักษณะปลายหยัก	
	ปลายเรียว A	ปลายเรียว B	ปลายหยัก C	ปลายหยัก D
J	JA	JB	JC	JD
L	LA	LB	LC	LD
M	MA	MB	MC	MD
N	NA	NB	NC	ND
R	RA	RB	RC	RD
Y	YA	YB	YC	YD

เหล็ก W เมื่อระดับปลายให้เป็นรอย ให้ทำเช่นเดียวกับเหล็ก H หรือ M
ความยาวและขนาดต่าง ๆ ระบุเหล็กให้เป็นไปตามมอก. 20512 - 20514
การดัดปลายเป็นรอยข้างเดียวให้ดัดต่อจากปลายขึ้นมีความยาวไม่ น้อยกว่าการดัดปลาย
เป็นรอยทั้งสองข้าง ให้ดัดต่อจากจุดปลายที่เหลือข้าง
เหล็กที่ดัดเป็นรอยหลายแห่งให้ระบุชื่อแสดงไว้ในแบบดัดและจำนวน

บทที่ 3

คลองส่งน้ำชลประทาน (Irrigation Canals)

คลองส่งน้ำชลประทานเป็นระบบส่งน้ำ (Distribution system) ที่ถือว่าเป็นอาคารชลประทาน (Irrigation structure) ประเภทหนึ่ง จึงได้นำมากล่าวรวมไว้ในเรื่องของการออกแบบอาคารชลประทานในระบบส่งน้ำด้วย แต่ว่าจะกล่าวเน้นถึงในด้านของการออกแบบเป็นหลักใหญ่ และคลองส่งน้ำชลประทานนี้แบ่งในแง่ของการออกแบบได้เป็น 2 ประเภท คือ คลองดิน (Earth or unlined canal) และคลองคาด (Lined canal) การพิจารณาว่าจะออกแบบคลองเป็นประเภทใดย่อมขึ้นอยู่กับสิ่งเกี่ยวข้อง (Factors) ดังต่อไปนี้

ก. การรั่วซึม (Seepage) การรั่วซึมนี้นับได้ว่าเป็นต้นเหตุแห่งการเกิดความคิดที่จะคาดคลอง ทั้งนี้เนื่องจากการรั่วซึมของน้ำจากคลองส่งน้ำชลประทานนี้นอกจากจะสูญเสียน้ำจากคลองส่งน้ำอย่างมากมายแล้ว ในพื้นที่ที่เนื้อดินระบายน้ำออกได้ยากย่อมเกิดปัญหาการระบายน้ำตามมาและ[illegible] waterlog ในที่สุด ซึ่งทำให้พื้นที่เพาะปลูกในบริเวณนั้นใช้ในการเพาะปลูกต่อไปไม่ได้

ข. ส่วนลดลาดของพื้นผิวดิน (Land slope) ถ้าพื้นผิวดินมีส่วนลดลาดชัน ถ้าจะขุดคลองที่มีส่วนลดลาดตามพื้นผิวดิน ความเร็วของน้ำในคลองจะสูงมากจนกระทั่งอาจเกิดการกัดเซาะขึ้นได้ แต่ครั้นจะกำหนดส่วนลดลาดของคลองดินตามความต้องการ ก็จะต้องสร้างอาคารน้ำตก (Drop structures) ขึ้นเป็นจำนวนมากมายเกินความจำเป็น กรณีเช่นนี้ก็อาจจะพิจารณาขุดคลองทำเป็นคลองคาดมากกว่า

ค. ขนาดของคลองและเขตคลอง (Size of canal and right of way) เนื่องจากกระแสน้ำที่ไหลในคลองคาดสามารถกำหนดให้สูงกว่ากระแสน้ำที่ไหลในคลองดินมาก ดังนั้นในความจุของคลองเท่า ๆ กัน ขนาดของคลองคาดย่อมเล็กกว่าคลองดิน ปริมาณดินขุดก็น้อยกว่า และยังสามารถกำหนดเขตคลองให้แคบกว่า ดังนั้นถ้าค่าลงทุนในการขุดดินและค่าซื้อที่ดินเขตคลองที่ลดลงเนื่องจากใช้คลองคาดมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าลงทุนในการขุดคลองดินที่เพิ่มขึ้นแล้ว ก็มักนิยมออกแบบให้เป็นคลองคาดจะดีกว่า

ง. ค่าบริหารงานส่งน้ำและบำรุงรักษา (Operation and Maintenance costs costs) อัตราค่าส่งน้ำและบำรุงรักษา คลองดาด ย่อมต่ำกว่าของคลองดินเป็นที่แน่นอน แต่จะต่ำกว่ามากน้อยเพียงใดย่อมขึ้นอยู่กับวิธีการบริหารงานส่งน้ำ (Operation and water management) วิธีการใช้น้ำของกสิกร (Irrigation methods) คุณค่าของน้ำชลประทาน (Water cost) ปัญหาการระบายน้ำ (Drainage) และปัญหาทางการเมือง (Politic) จึงต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในแต่ละปัญหา

จ. ค่าก่อสร้างอาคาร (Structure costs) เนื่องจากคลองดาดมีขนาดเล็กกว่าคลองดินและไม่มีปัญหาในเรื่องการกัดเซาะ ดังนั้นจึงสามารถลดขนาดของส่วนประกอบของอาคารในคลองส่งน้ำให้เล็กลงตามไปด้วย เช่นช่วงเชื่อมต่อของอาคารทั้งทางเข้าและทางออก (Inlet & outlet transition) ส่วนป้องกันการกัดเซาะท้ายน้ำ (Downstream protection) เช่น หินเรียง (Riprap) หินเรียงยาแนว (Grouted riprap) ไม่ต้องใช้เลย ดังนั้นถ้าในคลองน้ำสายนั้นมีอาคารมากแห่งแล้วก็จะลดค่าก่อสร้างอาคารลงไปได้มาก

นอกจากจะแบ่งประเภทคลองส่งน้ำชลประทานดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีการแบ่งประเภทในแง่ของการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างระดับผิวดินกับระดับน้ำสูงสุด (Full supply level) ได้เป็น 3 ประเภทคือ

ก. คลองประเภทขุดดิน (Thoroughly cut canal) เป็นคลองประเภทที่ระดับน้ำสูงสุดในคลองอยู่เสมอ หรือต่ำกว่าระดับผิวดินเดิม (Natural ground level) มักเป็นคลองส่งน้ำประเภทที่ทำหน้าที่เก็บกักน้ำ (Conservation canal) หรือเป็นช่วงตอนของคลองส่งน้ำที่ผ่านที่เนินหรือที่สูง และเป็นช่วงตอนที่ไม่ต้องส่งน้ำออกจากคลองส่งน้ำ คลองชนิดนี้มีความแข็งแรงดีก่อสร้างง่ายเพราะตัวคลองวางอยู่บนดินเดิมทั้งหมด แต่ในบางกรณีอาจหลีกเลี่ยงไปสร้างเป็นรางน้ำ (Bench flume) แทนคลองส่งน้ำ ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 5

ข. คลองประเภทกึ่งลอย (Partially filled canal) เป็นคลองประเภทที่ระดับน้ำสูงสุดในคลองอยู่สูงกว่าระดับผิวดินเดิมเล็กน้อย และเป็นคลองที่นิยมออกแบบใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เพราะให้ประสิทธิภาพในการส่งน้ำได้ดี ส่งน้ำออกจากคลองได้ง่ายไม่มีปัญหาในการส่งน้ำขึ้นที่สูงในพื้นที่เขตโครงการ (Project area) คลองแบบนี้ตัวคลองส่วนใหญ่วางอยู่บนพื้นดินเดิม

ค. คลองลอยหรือเหนือดิน (Thoroughly filled canal) เป็นคลองประเภทที่ระดับก้นคลองสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับระดับผิวดินเดิม ดังนั้นตัวคลองทั้งหมดจะวางอยู่บนดินถม มีปัญหาในด้านก่อสร้างและรั่วซึมมาก คลองประเภทนี้มักเป็นช่วงตอนของคลองส่งน้ำที่วางแนวผ่านที่ลุ่ม ซึ่งถ้าไม่จำเป็นจริง ๆ แล้วมักหลีกเลี่ยงไปสร้างเป็นสะพานน้ำ (Elevated flume) จะปลอดภัยกว่าบำรุงรักษาง่ายกว่า ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 5

3.1 คลองดิน (Earth or unlined canal)

คลองดินคือทางน้ำเปิด (Open channel) ซึ่งขุดหรือเปิดขึ้นในเนื้อดินไม่ว่าจะเป็นดินเดิมหรือดินที่ถมขึ้นใหม่ก็ตามให้เป็นรูปร่างหน้าตัด (Cross-section area) ตามความต้องการ เช่น รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal section) รูปโค้งของวงกลม (Circular section) รูปทรงรูปไข่ (Elliptical section) หรือรูปโค้งพาราโบล่า (Parabolic section) เป็นต้น โดยปราศจากการตกแต่งเป็นพิเศษตามแนวเส้นรอบเปียก (Wetted perimeter) ส่วนการถมอัดดินที่ก้นคลอง (Embankment) เพื่อความมั่นคง (Stability) นั้นไม่ถือว่าเป็นการลาดคลอง

3.1.1 แนวทางการออกแบบคลองส่งน้ำ (Criteria for design of canal)

ก. การคำนวณหาส่วนของคลอง (Dimensions of canal) ใช้สูตรของเชสซี่ (Chezy's Formula) ซึ่งมีรูปสูตรดังนี้

$$V = \sqrt{R.S.} \quad \text{.....} \quad *$$

ประกอบกับสูตร $Q = A.V.$ ..... *

ในเมื่อ Q = ปริมาณน้ำ เป็น ม.^{3}/วินาที หรือ (ฟุต)^3/วินาที

A = พื้นที่หน้าตัดของแห่งน้ำ เป็น ม.^{3} หรือ (ฟุต)^3

V = ความเร็วเฉลี่ยของน้ำในคลอง เป็น ม./วินาที หรือ ฟุต/วินาที

S = ส่วนลาดเทของก้นคลองในค่าของ Tangent

R = รัศมีอุทกศาสตร์ มีหน่วยเป็น ม. หรือ ฟุต

$= \frac{A}{P}$

P = ความยาวเส้นขอบเปียกเป็น ม. หรือ ฟุต

C = สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำ (Coefficient of discharge)

สำหรับค่า C นี้มีผู้นิยมใช้แยกเป็น 2 พวก คือ เป็นค่า C ของแมนนิ่ง (Manning's coefficient) และค่า C ของคัตเตอร์ (Kutter's coefficient) ซึ่งมีรูปดังนี้

Manning's "C"

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \qquad \text{(หน่วยเมตริก)}$$

$$C = \frac{1.486}{n} R^{1/6} \qquad \text{(หน่วยอังกฤษ)}$$

Kutter's "C"

$$C = \frac{\frac{1}{n} + 23 + \frac{0.00155}{S}}{1+(23+\frac{0.00155}{S})\frac{n}{\sqrt{R}}} \qquad \text{(หน่วยเมตริก)}$$

$$C = \frac{\frac{1.811}{n} + 41.65 + \frac{0.00281}{S}}{1+(41.65+\frac{0.00281}{S})\frac{n}{\sqrt{R}}} \qquad \text{(หน่วยอังกฤษ)}$$

ในเมื่อ n = สัมประสิทธิ์ของความขรุขระของผิวทางน้ำ (Coefficient of roughness) ซึ่งกำหนดไว้ดังตาราง

ค่า n สำหรับลักษณะและสภาพพื้นผิวทางน้ำต่าง ๆ					หมายเหตุ
ลักษณะพื้นผิวทางน้ำ	สภาพพื้นผิวทางน้ำ				
	ดีเยี่ยม	ดี	ปานกลาง	เลว	
<u>คลองส่งน้ำและคูน้ำ</u>					* เป็นค่าที่นิยมใช้ในการคำนวณออกแบบ
คลองดินที่มีแนวตรงและรูปตัดสม่ำเสมอ	0.017	0.020	0.0225*	0.025	
คลองดินที่ลาดตลิ่งเป็นดินปนกรวดปนหิน	0.028	0.030	0.033	0.035	
คลองดินที่ก้นคลองมีดินปนกรวด ตลิ่งมีหญ้าขึ้น	0.025	0.030	0.035	0.040	
คลองขุดผ่านหินและตกแต่งผิวเรียบ	0.025	0.030	0.033*	0.035	
คลองขุดผ่านหินตะปุ่มตะป่ำและรูปตัดไม่สม่ำเสมอ	0.035	0.040	0.045	–	
คลองดินที่คดเคี้ยวมาก	0.0225	0.025*	0.0275	0.030	
คลองดาดคอนกรีต	0.012	0.014*	0.016	0.018	
<u>รางน้ำหรือสพานน้ำ</u>					
คอนกรีตผิวเรียบ	0.012	0.014*	0.016*	0.018	
ไม้ผิวขัดเรียบ	0.010	0.012*	0.013	0.014	
ไม้ผิวไม่เรียบ	0.011	0.013*	0.014	0.015	
โลหะรูปครึ่งวงกลมผิวเรียบ	0.011	0.012	0.013	0.015	
โลหะรูปครึ่งวงกลมผิวเป็นลอน	0.0225	0.025	0.0275	0.030	
<u>ท่อชนิดต่าง ๆ</u>					
เหล็กหล่อไม่ฉาบผิว	0.012	0.013	0.014	0.015	
เหล็กหล่อฉาบผิวเรียบ	0.011	0.012*	0.013*	–	
เหล็กดำไม่ฉาบผิว	0.012	0.013	0.014	0.015	
เหล็กดำอาบสังกะสี	0.013	0.014	0.015	0.017	
ทองเหลืองผิวเรียบ หรือหลอดแก้ว	0.009	0.010	0.011	0.013	
ดินเผาใช้ทำท่อน้ำโสโครก	0.011	0.012	0.014	0.017	
อิฐก่อ ใช้เป็นท่อน้ำโสโครก	0.012	0.013	0.015	0.017	
คอนกรีต	0.012	0.013	0.015*	0.016	
ไม้	0.010	0.011	0.012	0.013	

ข. การกำหนดความกว้างขานคลอง (Berm width) คลองประเภทขุดดินที่มีความลึกมาก ๆ จะต้องทำขานคลองไว้เป็นชั้น ๆ ทุก ๆ ความลึก 5.00 ม. เพื่อป้องกันการพังของลาดตลิ่งเนื่องจากน้ำหนักของดินและ Slip circle จึงจำเป็นที่ต้องกำหนดความกว้างของขานคลอง ซึ่งปกติแล้วจะกำหนดขึ้นตามความกว้างของเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการลอกคลองที่จะต้องทำขึ้นในระยะหลัง

ค. การกำหนดความกว้างของคันคลอง (Top bank width) มีเกณฑ์ที่จะกำหนดพอแยกได้ดังนี้

– กรณีที่เป็นคลองลอย (Thoroughly filled canal) กำหนดได้จากการควบคุมของลาดอุทกศาสตร์ (Hydraulic gradeline) โดยเทียบกับระดับน้ำในคลองที่สูงจากผิวดินเดิม

– กรณีที่ใช้คันคลองเป็นถนน กำหนดจากความกว้างของผิวจราจรที่ต้องการรวมกับไหล่ถนนอีกข้างละไม่น้อยกว่า 1.00 ม.

– กรณีที่เป็นคลองขุดดินหรือคลองกึ่งลอย (Thoroughly cut or Partially cut canals) ที่มีดินขุดเหลือมากจะต้องแบ่งความกว้างคันคลองให้กว้างพอที่จะทิ้งดินส่วนที่เหลือด้วย

ง. การกำหนดความสูงของคันคลอง (Top bank height) จะกำหนดได้จากความลึกของน้ำในคลองกับส่วนเผื่อของความลึก (Free board) และส่วนยุบตัวของดินอีกประมาณ 20 % และอาจต้องคำนึงถึงระดับน้ำนอกคลองในกรณีระดับน้ำนอกคลองสูงกว่าระดับน้ำในคลองในฤดูน้ำนองด้วย

จ. การกำหนดความกว้างเขตคลอง (Right-of-way) การกำหนดเขตคลองนั้นนอกจากจะกำหนดจากความกว้างของรูปตัดขวางของคลองแล้วยังจะต้องคำนึงถึงที่กองดินส่วนที่เหลือจากคันคลอง หรือหลุมยืม (Borrow Pits) ในกรณีที่ดินขุดคลองไม่พอทำคันคลอง หรือกรณีที่คิดว่าต่อไปจะมีการขยายขนาดคลองในอนาคตด้วย

3.1.2 <u>ลักษณะสัดส่วนของคลอง</u> (Dimensions of canal) สัดส่วนของคลองจะแสดงออกมาในรูปของความกว้างก้นคลอง (Bed width, b) และความลึกของน้ำในคลอง (Depth, d)

สำหรับความกว้างก้นคลองถ้าเป็นคลองส่งน้ำไม่ควรเล็กกว่า 1.00 ม. ถ้าเป็นคูน้ำไม่ควรเล็กกว่า 0.50 ม. การเพิ่มก้นคลองนั้นควรเพิ่มออกช่วงละไม่น้อยกว่า 0.25 ม. แต่ถ้าเป็นคลองขนาดใหญ่ควรเพิ่มช่วงละ 1.00 ม. ส่วนการกำหนดสัดส่วนอย่างอื่นนั้นมีหลักเกณฑ์ที่ใช้กันอยู่ดังนี้

ก. คลองที่ให้คุณสมบัติทางชลศาสตร์ดีที่สุด (Good hydraulic properties) เป็นสัดส่วนของคลองที่มีความจุ (Capacity) มากที่สุดถ้าพื้นที่หน้าตัดคงที่ เรื่องนี้จะเห็นได้ง่ายจากสูตร

$$Q = A.V$$

ถ้า A คงที่

จะได้ $Q \propto V$

และจากสูตรของเชสซี่:

$$V = C\sqrt{R.S.}$$

ถ้า S คงที่

จะได้ $V \propto \sqrt{R}$

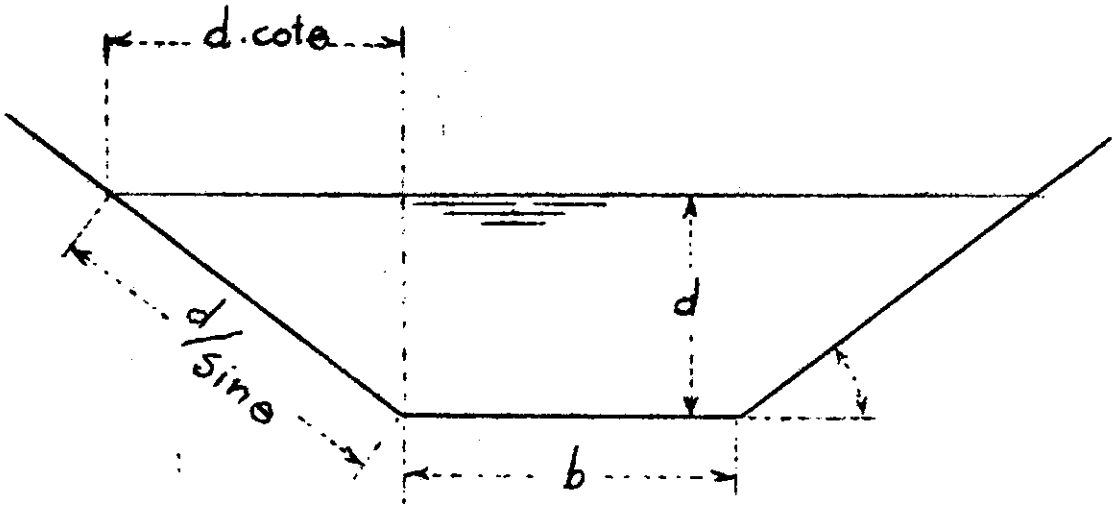
หรือ $V \propto \sqrt{\frac{A}{P}}$

หรือ $V \propto \sqrt{\frac{1}{P}}$

นั่นคือ V จะมากที่สุดได้ต่อเมื่อ P น้อยที่สุดนั่นเอง

ดังนั้นในคลองที่มีคุณสมบัติทางชลศาสตร์ดีที่สุดก็คือสัดส่วนของคลองที่มีความยาวของเส้นขอบเปียกสั้นที่สุด ซึ่งจะแสดงออกมาได้เป็น 2 กรณี

<u>กรณีที่ 1</u> หาค่ามาในรูปความสัมพันธ์ของรัศมีอุทกศาสตร์กับความลึกของน้ำ



<u>รูปตัดขวางของคลอง</u>

$$P = b + \frac{2d}{\sin\theta} \quad \text{..... (i)}$$

ถ้ากำหนดให้ $\frac{b}{d} = r_{bd}$

จะได้ $b = r_{bd} \cdot d$ ..... (ii)

และ $A = (d \cdot r_{bd} + d \cdot \cot\theta)d = d^2(r_{bd} + \cot\theta)$

หรือ $d = \sqrt{\frac{A}{r_{bd} + \cot\theta}}$ ..... (iii)

แทนค่า (ii), (iii) ใน (i);

$$P = r_{bd}\sqrt{\frac{A}{r_{bd} + \cot\theta}} + \frac{2}{\sin\theta}\sqrt{\frac{A}{r_{bd} + \cot\theta}}$$

$$= (r_{bd} + \frac{2}{\sin\theta})\sqrt{\frac{A}{r_{bd} + \cot\theta}} \quad \text{..... (iv)}$$

ต้องการหาค่า P น้อยที่สุด จึง differentiate (iv) ในเทอม r_{bd} แล้วให้เท่ากับ 0

จะได้ $r_{bd} - 2\cdot\frac{1 - \cos\theta}{\sin\theta} = 0$

$$r_{bd} = 2\cdot\frac{1 - \cos\theta}{\sin\theta} = 2\tan\frac{\theta}{2} \quad \text{.....} *$$

แทนค่า (iv) ใน (iii);

$$d = \sqrt{\frac{A}{\frac{2(1-\cos\theta)}{\sin\theta} + \cot\theta}} = \sqrt{\frac{A}{\frac{2-2\cos\theta+\cos\theta}{\sin\theta}}}$$

$$\therefore \quad d = \sqrt{\frac{A\sin\theta}{2-\cos\theta}} \quad \text{.....} *$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{d^2(r_{bd} + \cot A)}{b + \frac{2d}{\sin\theta}}$$

$$= \frac{d^2\left\{\frac{2(1-\cos\theta)}{\sin\theta} + \frac{\cos\theta}{\sin\theta}\right\}}{\frac{2d(1-\cos\theta)}{\sin\theta} + \frac{2d}{\sin\theta}}$$

$$= \frac{d^2(2-\cos\theta)}{2d(1-\cos\theta)+2d} = \frac{d^2(2-\cos\theta)}{2d(2-\cos\theta)}$$

$$= \frac{d}{2} \quad \text{.....} ***$$

สมการ $R = \frac{d}{2}$ นี้นิยมใช้มากในกรณีนี้

<u>กรณีที่ 2</u> หาค่ามาในรูปของมุมที่ลาดตลิ่งทำกับพื้นราบ

จาก $r = \frac{d}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{A\sin\theta}{2-\cos\theta}}$

differentiate r ในเทอมของ θ แล้วให้เท่ากับ 0 จะได้

จะได้ $2 \cos \theta - 1 = 0$

$\cos \theta = \frac{1}{2}$

$\therefore \quad \theta = 60^\circ$ ..... ***

กรณีนี้ไม่ค่อยนิยมใช้เพราะไปจำกัดลาดตลิ่ง (Side slope)

ข. คลองที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

เพื่อขจัดความยุ่งยากในการคำนวณ กรมชลประทานสหรัฐ ฯ จึงกำหนดให้ใช้สูตรดังนี้.-

$$d = \frac{1}{2}\sqrt{A}$$

แต่ในอินเดียนิยมใช้สูตรดังนี้

$$d = \sqrt{\frac{A}{3}} = 0.577\sqrt{A}$$

ในเมื่อ d = ความลึกของน้ำในคลอง เป็น ฟุต

A = พื้นที่หน้าตัดของน้ำในคลอง เป็น $(\text{ฟุต})^2$

3.1.3 <u>การเลือกใช้ลาดตลิ่งคลอง</u> (Side slope)

ส่วนที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุดของคลองหลังจากคลองนั้นขุดไปแล้วนาน ๆ ก็คือลาดตลิ่ง ดังนั้นเพื่อให้คลองส่งน้ำคงสภาพเดิมตามที่ออกแบบไว้ให้มากที่สุด ก็จะต้องกำหนดลาดตลิ่งที่เหมาะสม คือไม่ชันเกินไปและไม่ราบจนเกินไป ดังนั้นจึงต้องอาศัยเกณฑ์กำหนดที่ใช้ได้ผลมาแล้วตามชนิดของดินต่าง ๆ ดังนี้

<u>ชนิดของดิน</u>	<u>ลาดตลิ่งคลองในค่า Tangent</u>
หินแข็ง	1 : $\frac{1}{4}$
หินร้าว หินที่สลายตัว	1 : $\frac{1}{2}$

ชนิดของดิน	ลาดตลิ่งคลองในค่า Tangent
กรวดจับตัวแน่น ดินเหนียวที่แข็ง	1 : $\frac{3}{4}$
กรวด ดินเหนียว ดินเชิงเขา	1 : 1
ดินร่วนปานกลาง ดินร่วนปนกรวด	1 : $1\frac{1}{2}$
ดินซุย ดินทราย	1 : 2
ดินทรายที่ซุยมาก	1 : 3

3.1.4 <u>ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในคลองส่งน้ำที่ผ่านดินชนิดต่าง ๆ</u>

ในสมัยก่อน (เมื่อกรมชลประทานออกแบบโครงการชลประทานเจ้าพระยา) การออกแบบคลองส่งน้ำนิยมกำหนดความเร็วของกระแสน้ำที่พอดีไม่กัดเซาะ (Eroded) และไม่ตกตะกอน (Silting) โดยคุมการคำนวณด้วยสูตรของเคนเนดี้ (Kennedy's Formula) ซึ่งมีรูปดังนี้.-

$$V_o = C \cdot d^m$$

ในเมื่อ V_o = ความเร็ววิกฤตของกระแสน้ำ (Critical velocity)

C = เป็นสัมประสิทธิ์ของกระแสน้ำ (Coefficient of Velocity) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนไปตามสภาพของตะกอน

= 0.365 ตะกอนละเอียดและเบามาก

= 0.544 ตะกอนละเอียดและเบา

= 0.586 ตะกอนทรายหยาบและเบา

= 0.645 ตะกอนดินทรายหยาบ

= 0.770 ตะกอนทรายหยาบและหนัก

แต่ที่กรมชลประทานใช้ในการออกแบบคลองส่งน้ำในภาคกลางของประเทศไทยนั้น ใช้ C = 0.350 ในภาคเหนือใช้ 0.547

d = ความลึกเฉลี่ยของน้ำในคลอง

m = เลขกำลังซึ่งมีค่า 0.64 หรือ 0.66

และในการคำนวณนั้นจะต้องคุมให้ $v/v_o \approx 1$ เสมอ ในเมื่อ v คือความเร็วกระแสน้ำที่คำนวณจากสูตรของคัตเตอร์หรือแมนนิ่ง

มาในระยะหลังปรากฏว่าเกิดความยุ่งยากในการคำนวณและไม่ได้ผลในทางปฏิบัตินัก เพราะการเปลี่ยนแปลงความลึกของน้ำในคลองเพียงเล็กน้อย $v/v_o \neq 1$ ทันที ยิ่งการส่งน้ำในปัจจุบันนิยมส่งน้ำแบบเป็นรอบเป็นเวร (Rotation flow) สูตรของเคนเนดี้จะคุมไม่ได้เลย จึงได้เปลี่ยนกฎเกณฑ์ในการคำนวณออกแบบคลองเป็นว่า ไม่ยอมให้เกิดการกัดเซาะ แต่ยอมให้ตกตะกอนได้เพราะสามารถขุดลอกได้ภายหลัง ดังนั้น สูตรของเคนเนดี้จึงเลิกใช้ไปโดยปริยาย แต่ได้มีการกำหนดอัตราเร็วสูงสุดของกระแสน้ำในคลองส่งน้ำสำหรับดินแต่ละชนิดไว้ดังนี้.-

ชนิดของดิน	ความเร็วกระแสน้ำ ม./วินาที
ดินปนทรายละเอียด หรือตะกอนที่ร่วนซุย	0.15
ทรายล้วน	0.30
ดินปนทรายมีดินเหนียว 15 %	0.35
ดินปนทรายมีดินเหนียว 40 %	0.55 – 0.60
ทรายหยาบ	0.45 – 0.60
ดินปนกรวด	0.75
ดินร่วนธรรมดา	0.75
ดินร่วนที่จับตัวอย่างดี มีดินเหนียว 60 %	0.90
ดินร่วนปนดินเหนียวเนื้อแน่น	1.25
กรวดยึดแน่นกับดินเหนียว	1.50 – 2.00
ดินเหนียวอย่างแน่น	1.80
ดินดานอย่างอ่อน	2.00
หินชั้น	2.40
หินก้อนใหญ่	2.40 – 4.50
หินแข็ง	4.00

3.1.5 <u>ส่วนเผื่อความลึกของน้ำ</u> (Freeboard) ส่วนเผื่อนี้มีความจำเป็นในการป้องกันน้ำล้นคลองมาก เพราะจะมีสาเหตุได้จากการยุบตัวของคันคลอง (Settlement) 10% – 20 % ฝนตกหนักในขณะส่งน้ำเต็มคลอง หรือมีการรับน้ำเข้าคลอง (Inlet) มาหลาย ๆ แห่งแล้วจึงทิ้งน้ำออกไป (Outlet) เป็นจุด ๆ ก็ได้ ซึ่งในการกำหนดส่วนเผื่อความลึกของน้ำมีเกณฑ์กว้าง ๆ ดังนี้

คลองขนาดเล็ก ใช้ส่วนเผื่อของความลึกไม่น้อยกว่า 1'

คลองขนาดใหญ่ ใช้ส่วนเผื่อของความลึกไม่น้อยกว่า 3'

หรือไม่น้อยกว่า 1/3 เท่าของความลึกของน้ำในคลองแล้วแต่ว่าค่าไหนจะมากกว่ากัน

3.2 <u>คลองคาด</u> (Lined canal)

คลองคาดคือคลองดินที่ฉาบพื้นผิวหน้าของดินที่ขุดคลองและลาดตลิ่งขึ้นมาจนสูงพ้นระดับน้ำสูงสุดในคลอง (Full supply level) ด้วยวัสดุต่าง ๆ อาทิ คอนกรีตล้วน (Plain Concrete) คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete) ดินซีเมนต์ (Soil cement) แผ่นซีเมนต์ผสมหล่อสำเร็จ (Prefabricated asbestos-cement) คาดด้วยอิฐ (Brick lining) ยางมะตอยผสมหิน (Asphaltcrete) แผ่นปลาสติคบาง (Plastic membrane) ลาดยางมะตอย (Sprayed-in-place asphalt) และดินเหนียวอัดแน่น (Compacted clay blanket) ซึ่งวัสดุในการใช้คาดคลองดังที่กล่าวมานี้อาจแบ่งออกได้เป็น 3 พวก ดังนี้

ก. วัสดุคาดคลองผิวแข็ง (Hard surface linings) เป็นวัสดุที่คงทนต่อการกระทบกระแทกได้โดยไม่เสียหายหรือแตกร้าว จึงสามารถคาดคลองได้โดยปล่อยให้พื้นผิววัสดุสัมผัสบรรยากาศและน้ำได้ เช่น คอนกรีตล้วน คอนกรีตเสริมเหล็ก แผ่นซิเมนต์ผสมหล่อสำเร็จ คาดด้วยอิฐและยางมะตอยผสมหิน เป็นต้น

ข. วัสดุคาดคลองผิวอ่อนและบาง (Buried-membrane linings) เป็นพวกที่มีเนื้อวัสดุอ่อนทนการกระแทกหรือฉุดขีดได้ไม่เต็มที่ เมื่อคาดคลองด้วยวัสดุชนิดนี้แล้วจะต้องถมหรือปูทับด้วยดินหรือหินเรียงเพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุคาดคลองอีกทีหนึ่ง เช่น การลาดยางมะตอยแล้วใช้หินเล็กปูทับอีกชั้นหนึ่ง หรือแผ่นปีทูมีนัส (Bituminus) เป็นต้น

ค. วัสดุดาดคลองที่เป็นดินและส่วนผสมของดิน (Earth lining) เป็นพวกที่มีเนื้อแข็งแต่ความคงทนถาวรน้อย อายุการใช้งานค่อนข้างสั้น แต่ค่าลงทุนต่ำมาก เช่น ดาดด้วยดินเหนียวอัดแน่น ดินซีเมนต์ และเป็นโนไนท์ผสมดิน (Belonite soil mixtures) เป็นต้น

3.2.1 <u>วัตถุประสงค์ในการดาดคลอง</u>

ก. ลดการรั่วซึมจากคลอง (Seepage) การสูญเสียน้ำจากคลองส่งน้ำเป็นไปได้ 2 ทางคือ การระเหยและรั่วซึมในด้านการระเหยนั้นไม่มีทางที่จะไปจำกัดลงได้ นอกจากการทำพื้นที่ผิวน้ำให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ส่วนในด้านการรั่วซึมนั้นจะตัดออกให้หมดไปโดยเด็ดขาดได้ ก็โดยการดาดคลองเท่านั้น

ข. รักษารูปทรงของคลอง (Constant & permanent section) ตามปกติรูปทรงของคลองส่งน้ำที่ดีที่สุดก็คือรูปครึ่งวงกลมแต่ว่าขอบตลิ่งด้านบนซึ่งอยู่ในแนวดิ่งนี้พังได้ง่าย จึงเลี่ยงมาใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูโดยอาศัยหลักของ $R = \frac{d}{2}$ แต่ก็ปรากฏว่าในภายหลังคลองดังกล่าวจะแปรรูปเป็นพาราโบล่า (Parabolic curve) ทั้งสิ้น เว้นเสียแต่ว่าเราจะดาดคลองเท่านั้น รูปทรงของคลองจึงจะคงสภาพอยู่ได้โดยไม่เสียคุณสมบัติทางชลศาสตร์

ค. รักษาลาดตลิ่ง (Permanent side slope) ในท้องถิ่นที่มีฝนตกชุกนั้น ลาดตลิ่งของคลองดินมักถูกน้ำฝนกัดเซาะเป็นร่องลึก ทำให้ดินเลื่อนไหลลงไปตกจมที่ก้นคลองทำให้คลองตื้นเขินเร็วมาก ยิ่งในปัจจุบันนิยมส่งน้ำเป็นรอบเป็นเวร (Rotation flow) หรือส่งน้ำตามคำขอของผู้ใช้น้ำ (Demand flow) ระดับน้ำในคลองจะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ทำให้ตลิ่งคลองเลื่อนลงสู่ก้นคลองเป็นสิ่งกีดขวางในที่สุด จะเกิดกระแสน้ำวน (Turbulent flow) ที่บริเวณนั้น ๆ และเกิดการกัดเซาะที่ก้นคลองเพิ่มขึ้นอีก จึงจำเป็นต้องดาดคลอง

ง. การตกแต่งรูปทรงของคลอง (Sectioning) ในกรณีที่ขุดคลองผ่านเชิงเขาหินหรือบริเวณที่เป็นหินดานที่ก้นคลองแม้ว่าการรั่วซึมจะไม่เกิดขึ้นก็ตาม แต่การระเบิดหินนั้นไม่อาจระเบิดให้ได้รูปร่างที่ต้องการได้อย่างแท้จริง จึงต้องดาดและแต่งพื้นผิวคลองให้ได้รูป เพื่อคุณสมบัติทางชลศาสตร์ และเพื่อลดขนาดของคลองอันเนื่องจากกำหนดความเร็วกระแสน้ำในคลองให้สูงขึ้น จึงเป็นการลดค่าระเบิดหินไปด้วย

จ. ลดค่าบริหารการส่งน้ำและบำรุงรักษา (Operation and maintenance costs) เมื่อสามารถกำหนดความเร็วของกระแสน้ำในคลองดาดให้สูงขึ้นได้ก็ย่อมลดระยะเวลาในการส่งน้ำให้น้อยลง และเมื่อรูปทรงของคลองไม่เสียหายก็ไม่ต้องบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมคลองนั้น ๆ

ฉ. เป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมในประเทศ (Industrial extension) ปัจจุบันนี้เราผลิตปูนซีเมนต์ ยางมะตอย แผ่นปลาสติค ตลอดจนบิทูมินัสขึ้นใช้ได้เองในประเทศ ดังนั้นหากเราได้นำวัสดุดังกล่าวมาใช้ในการดาดคลองก็จะเป็นการส่งเสริมการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นในประเทศได้ทางหนึ่ง

3.2.2 <u>สัดส่วนของคลองดาด</u> (Dimensions of lined canal)

การดาดคลองส่งน้ำในงานชลประทานในประเทศไทยนั้น ได้เคยทดลองใช้ดินซีเมนต์ (Soil cement) ดาดคลองส่งน้ำของโครงการชลประทานเพชรบุรี เมื่อประมาณ ปี 2505 แต่ปรากฏผลว่าในระยะหลังต้องล้มเหลวเพราะดินซีเมนต์แตกร้าวคลอดสายจึงล้มเลิกไป ต่อมาได้ทดลองใช้แผ่น PVC. ดาดคลองด้วยวิธีการต่าง ๆ ก็ไม่เป็นที่นิยมและได้ผลไม่เป็นที่พอใจ ในที่สุดก็มาสรุปลงที่ว่าคลองดาดด้วยคอนกรีตนั้นเหมาะสมที่สุด คงทนที่สุด และที่สำคัญก็คือผู้ทำการก่อสร้างมีความชำนาญในด้านนี้เสียแล้ว ดังนั้นคลองดาดของงานชลประทานจึงมีแต่คลองดาดด้วยคอนกรีตทั้งสิ้น ในที่นี้จึงจะกล่าวเน้นเฉพาะสัดส่วนของคลองดาดด้วยคอนกรีตเท่านั้น

ก. ลาดตลิ่ง (Side slope) โดยทั่วไปจะยึดหลักในการกำหนดลาดตลิ่งตามลักษณะดิน (ค่าของมุมทรงตัวของดิน) เช่นเดียวกับที่ใช้ในคลองดินนั่นเอง ดังนั้นจึงให้ใช้ตัวเลขที่กล่าวไว้แล้วในเรื่องของคลองดิน

ข. สัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (Coefficient of roughness) สำหรับ n นี้นิยมใช้ระหว่าง 0.012 – 0.014 ส่วนคลองแยกซอย (Sublateral) หรือคลองที่ห่างไกลการดูแลรักษาอาจใช้ถึง 0.018 แต่สำหรับวัสดุอื่น ๆ นั้นยังใช้ค่า n แตกต่างออกไปอีกแต่ละชนิดดังนี้

ชนิดของวัสดุ	ค่า "n"
คอนกรีตที่ผสมด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	0.014
คอนกรีตที่ตกด้วยการอัดฉีด	0.016 – 0.017
ยางมะตอยผสมหินเล็ก	0.014
แผ่นบิทูมินัส	0.015
ดินซีเมนต์	0.015 – 0.016
วัสดุผิวอ่อนและบาง	
– คลองที่มีความจุ < 100 (ฟุต)^3/วินาที	0.025
– คลองที่มีความจุ > 100 (ฟุต)^3/วินาที	0.020 – 0.0225

นอกจากนี้ยังมีค่าของ "n" ที่ใช้ในกรมชลประทาน สหรัฐ ฯ ซึ่งแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์กับรัศมีอุทกศาสตร์ (Hydraulic radius) ดังที่แนบไว้ท้ายบทนี้แล้ว

ค. ส่วนเผื่อความลึกและความสูงหลังคันคลอง (Freeboard and height of top bank) คือระยะตามแนวดิ่งระหว่างระดับน้ำสูงสุดในคลองถึงขอบบนของส่วนที่ถูกตกและถึงหลังคันคลองตามลำดับ และมีตัวเลขกำหนดไว้ตามความจุของคลองดังนี้

ปริมาณน้ำ (ม.^{3}/วินาที)	ส่วนเผื่อความลึก (ม.)	ความสูงหลังคันคลอง (ม.)
0.233	0.152	0.366
0.567	0.152	0.396
0.850	0.152	0.427
1.133	0.158	0.457
1.700	0.171	0.512
2.267	0.189	0.555
2.833	0.207	0.595
5.667	0.268	0.725
11.333	0.354	0.865
17.000	0.412	0.951
22.667	0.445	1.021

ปริมาณน้ำ ($ม.^3$/วินาที)	ส่วนเผื่อความลึก (ม.)	ความสูงหลังคันคลอง (ม.)
28.333	0.482	1.075
56.667	0.572	1.250
113.333	0.695	1.432
170.000	0.758	1.548
283.333	0.837	1.686
566.667	0.945	1.890

ส่วนของกรมชลประทาน สหรัฐ ฯ ก็ใช้ค่าต่างไปจากนี้เล็กน้อย ดังกราฟที่แนบไว้ท้ายบทนี้

ง. ความกว้างขานคลองและความกว้างหลังคันคลอง (Berm width and top bank width)

สำหรับงานของกรมชลประทาน ประเทศไทยไม่นิยมให้คลองดาดมีขานคลอง แต่ถ้าจำเป็นจะต้องมีขานคลองก็ให้ใช้หลักเกณฑ์ในการกำหนดความกว้างขานคลอง และความกว้างหลังคันคลองเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในเรื่องของคลองดิน

ส่วนงานของกรมชลประทานสหรัฐ ฯ นั้น ได้กำหนดตัวเลขไว้เป็นความสัมพันธ์กับความกว้างก้นคลอง ดังกราฟที่แนบอยู่ท้ายบทนี้

จ. ความหนาของคอนกรีตที่ดาด (Thickness of concrete lining) ใช้ตัวเลขที่มีความสัมพันธ์กับความจุของคลองดังนี้

ปริมาณน้ำ ($ม.^3$/วินาที)	ความหนาของคอนกรีตล้วน (ซม.)
0 – 2.5	5
2.5 – 5.0	6
5.0 – 15.0	7
15.0 – 40.0	8
40.0 – 100.0	9
มากกว่า 100.0	10

ปริมาณน้ำ ($ม^3$/วินาที)	ความหนาของคอนกรีตเสริมเหล็ก (ซม.)
0 – 14	9
14 – 55	10
มากกว่า 55	11.5

ฉ. รูระบายน้ำใต้ดิน (Drain outlet) คลองคาดทุกชนิดจะต้องมีรูระบายน้ำทั้งทางก้นคลอง (Underdrain) และด้านลาดตลิ่ง (Side drain) เพื่อลดแรงดันของน้ำจากใต้ดิน (Uplift pressure) ซึ่งปกติจะนิยมทำเป็นแบบรูระบายน้ำเปิด (Weep hole) ส่วนข้างใต้จะเป็นระบบกรอง (Revesed filter) แต่ในกรณีที่ไม่แน่ใจว่าจะมีตะกอนไหลปนมากับน้ำด้วย รูระบายน้ำที่ก้นคลองอาจจะใช้เป็นแบบรูระบายน้ำปิด (Flap valve drain outlet) ก็ได้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันตะกอนไปอุดตัน ส่วนระยะที่ติดตั้งขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ความลึกของคลอง และปริมาณน้ำที่ระบายออกมา

ช. หลักเกณฑ์เพิ่มเติมสำหรับคลองคาดคอนกรีต

จากผลการประชุมเพื่อกำหนดสัดส่วนของคลองคาดคอนกรีต ที่กรมชลประทานประเทศไทย เมื่อพฤศจิกายน 2513 ได้สรุปผลออกมาดังนี้

– คลองคาดทุกชนิดและทุกขนาดไม่มีขานคลอง แต่จะทำลาด 1:2 จากขอบบนสุดของส่วนที่คาดขึ้นไปหาหลังคันคลอง

– สำหรับคลองกึ่งลอย (Partially filled canal) ให้ถมดินถึงระดับหลังคันคลอง และให้ทำลาด 2 % บนหลังคันคลอง เอียงลาดออกนอกตัวคลอง

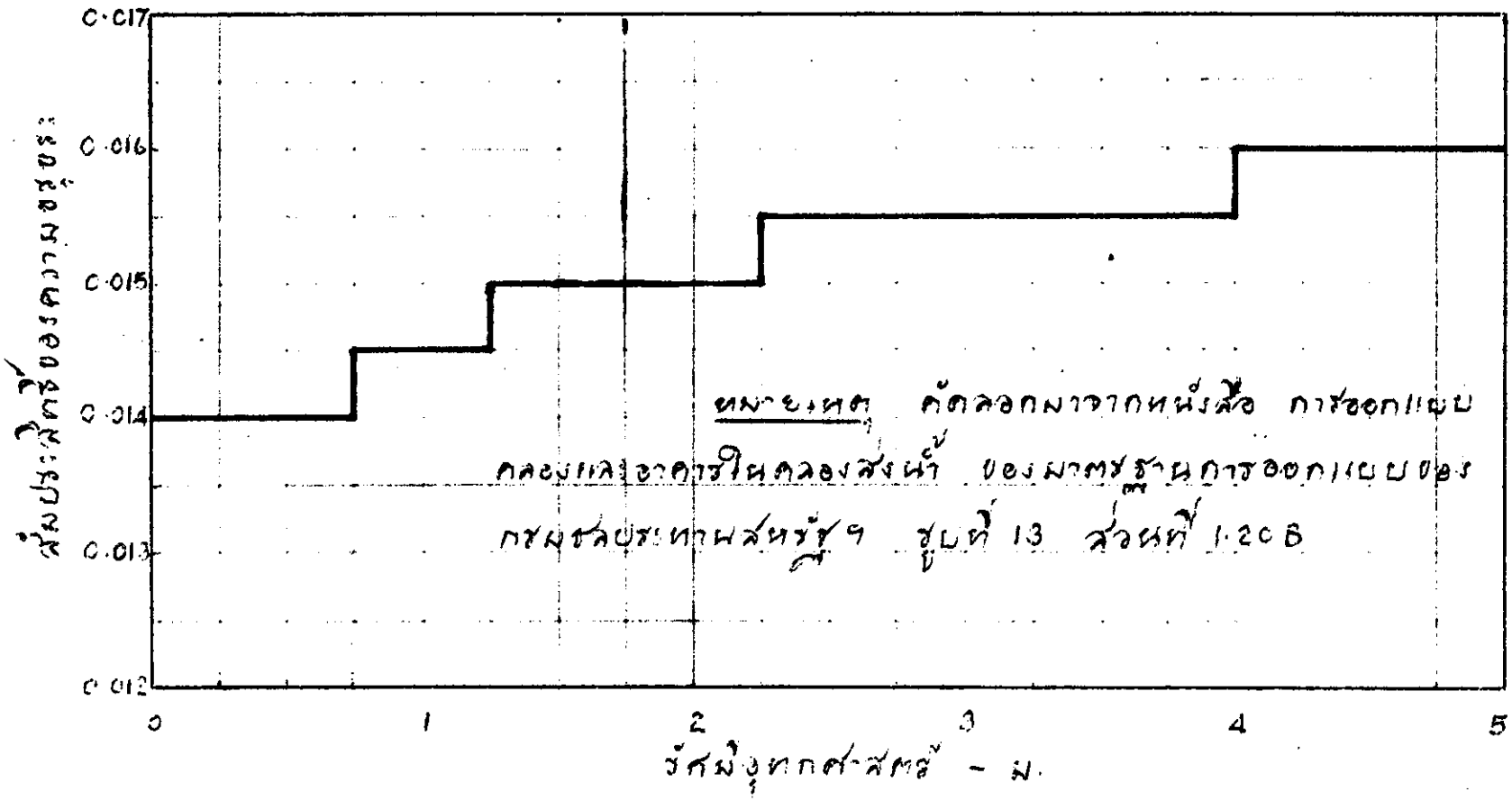
– ส่วนคลองจมดิน (Thoroughly cut) ให้ตัดดินเดิมที่ระดับหลังคันคลอง ทำลาด 2 % ที่หลังคันคลองออกนอกตัวคลอง และที่ขอบบนนอกของหลังคันคลองให้ทำช่องระบายน้ำฝน (Interception ditch) แล้วจึงทำลาด 1:2 ขึ้นไปหาระดับดินเดิม ในกรณีที่หลังคันคลองต่ำกว่าระดับดินเดิมเกิน 5.00 ม. ที่ตัดขานคลองทุก ๆ ความสูง 5.00 ม. ทำลาด 2 % พร้อมช่องระบายน้ำฝนทุก ๆ ช่วง

– ความสูงของหลังคันคลองจากขอบบนของส่วนที่คาดให้ใช้เกณฑ์ดังนี้.–

ปริมาณน้ำ ($ม^3$/วินาที)	ความสูง (ซม.)
1	30
5	40
30	58
60	65
100	72

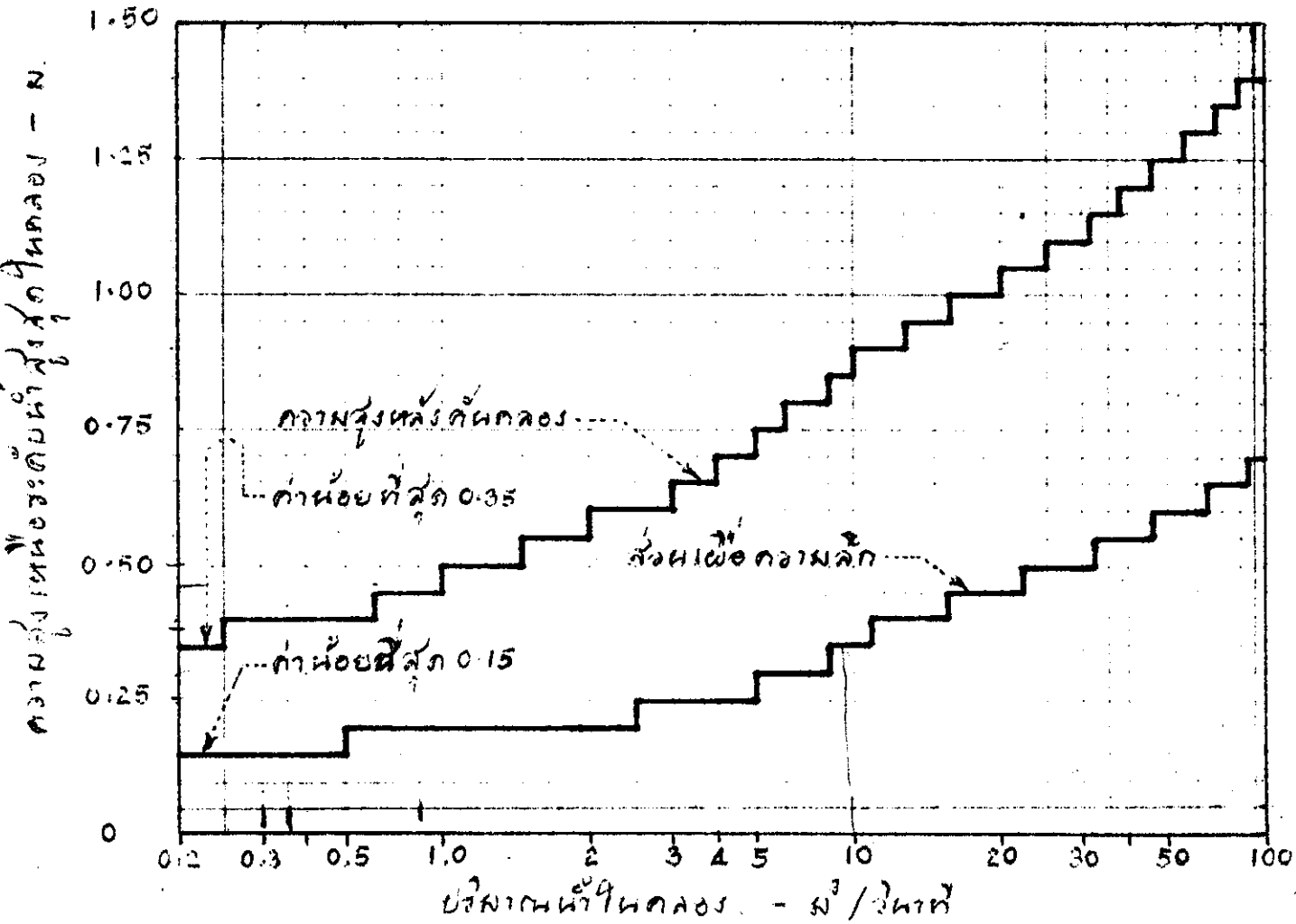
– รูระบายระบายน้ำใต้ดินให้ใช้รูระบายน้ำเปิด (Open pipe weep hole) ทั้งด้านคันคลองและลาดตลิ่ง

กราฟกำหนดสัมประสิทธิ์ของความขรุขระในคลองดาดคอนกรีต

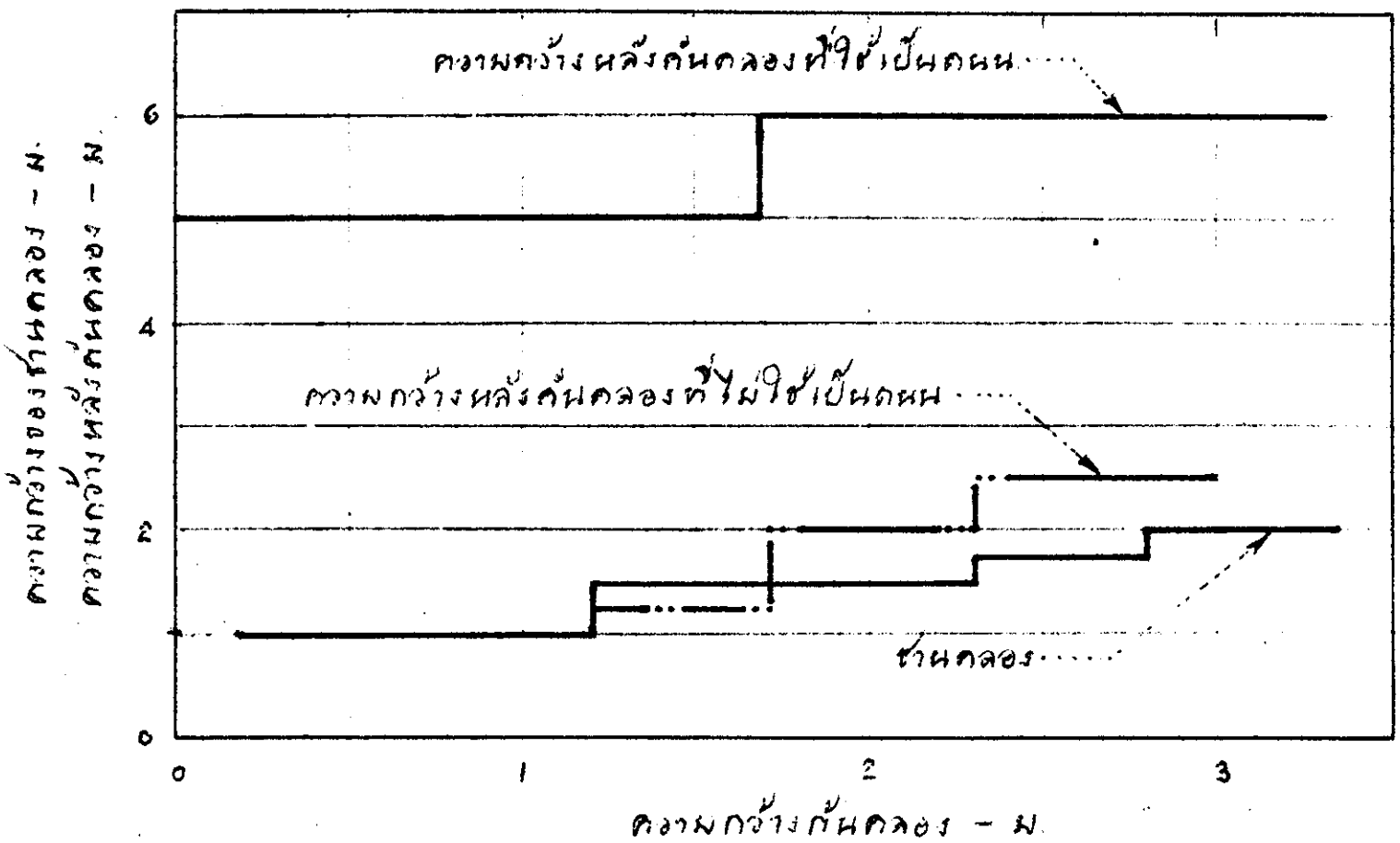


หมายเหตุ คัดลอกมาจากหนังสือ การออกแบบคลองและอาคารในคลองส่งน้ำ ของมาตรฐานการออกแบบของกรมชลประทาน สหรัฐฯ ชุดที่ 13 ส่วนที่ 1.206

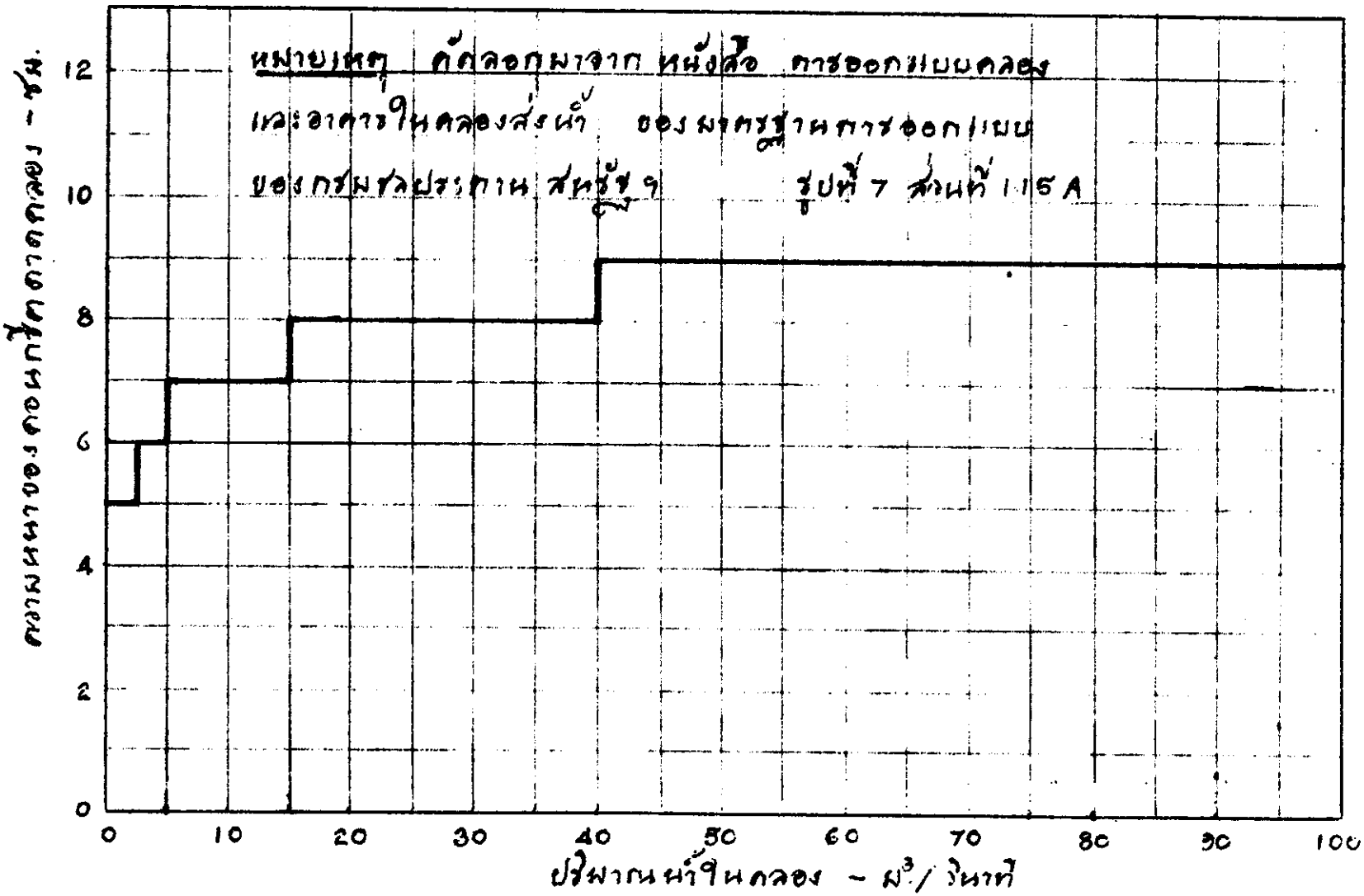
กราฟกำหนดความสูงหลังคันคลอง และส่วนเผื่อความลึก ของคลองระดับคลองน้ำชลประทาน



กราฟกำหนดความกว้างของร่านคลอง และหลังคันคลอง ของคลองตามตอนกรีต.



กราฟกำหนดความหนาของคอนกรีตสำหรับใช้ในการทดลอง



บทที่ 4

ส่วนต่าง ๆ ของอาคาร (Various parts of structures)

ส่วนต่าง ๆ ของอาคารซลประทานนั้นมีส่วนแยกแยะออกไปหลายส่วนและมีการเรียกชื่อโดยเฉพาะตัวของมันไม่เหมือนอาคารที่อยู่อาศัยหรืออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกไว้โดยเฉพาะในบทนี้ เพื่อให้ทราบชื่อ เข้าใจหน้าที่และลักษณะของส่วนนั้น ตลอดจนเกณฑ์การกำหนดขนาดและการคำนวณออกแบบทั้งในด้านชลศาสตร์และโครงสร้าง ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ไม่สับสนในการศึกษาการออกแบบอาคารชลประทานชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทต่อ ๆ ไป

4.1 ส่วนพอกมุม (Fillets) เป็นส่วนของเนื้อคอนกรีตที่พอกไว้ที่มุมด้านในของอาคารทุกแห่ง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของมุมด้านในและรับแรงเฉือน (Shearing stress) ได้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้แลดูสวยงาม และช่วยให้การถอดแบบ (Concrete form) ทำได้สะดวกและไม่ทำความเสียหายแก่คอนกรีตส่วนนั้นในตอนที่ถอดแบบด้วย ขนาดของส่วนพอกมุมที่กำหนดให้ใช้สำหรับมุมด้านในของท่อสี่เหลี่ยมกับความสูงของกำแพงทั้ง หรือส่วนของอาคารอื่น ๆ ที่เทียบเคียงกันได้มีดังนี้

ขนาดของส่วนพอกมุม (เมตร)	ขนาดของท่อสี่เหลี่ยม (เมตร)	ความสูงของกำแพงทั้ง (เมตร)
0.05	0 – 1.20	–
0.075	1.20 – 1.75	0 – 2.50
0.10	1.75 – 2.50	2.50 – 4.00
0.15	เกินกว่า 2.50	เกินกว่า 4.00

4.2 ส่วนสมมุมหรือบัว (Chamfered parts) ส่วนของอาคารที่เป็นมุมด้านนอกที่แหลมคมและเห็นได้เด่นชัด และอาจได้รับการกระทบกระแทกได้ง่าย อาจได้รับการกระแทกจากสิ่งที่ลอยมากับน้ำหรือสิ่งอื่น ๆ ทำให้คอนกรีตกระเทาะขาดความสวยงาม หรือถ้าคอนกรีตแตกลึกเข้าไปถึงเหล็กเสริมคอนกรีต จะทำให้เหล็กขึ้นและเกิดอันตรายแก่อาคารได้ นอกจากนี้มุมที่แหลมคมของคอนกรีต

จะหลุดได้ง่ายในขณะถอดแบบ (Concrete form) ดังนั้นจึงต้องลบมุมดังกล่าวโดยมีขนาดตั้งแต่ 1 ซม. ถึง 5 ซม. ทั้งนี้แล้วแต่ขนาดของอาคารและความเหมาะสมสวยงาม

4.3 <u>กำแพงล่าง</u> (Cutoffs, Cutoff walls or Keywalls) กำแพงล่างนี้เป็นส่วนที่ติดต่อกับพื้นของอาคารที่ฝังลึกลงในดินตามแนวดิ่ง โดยมีความยาวตลอดความกว้างของตัวอาคาร โดยที่นิยมกันนั้นจะออกแบบให้มีกำแพงล่างนี้ที่ปลายสุดของอาคารทั้งด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ และอาจจะมีที่ใต้พื้นตอม่อของตัวอาคารเพิ่มขึ้นอีกก็ได้ตามความจำเป็น โดยสรุปแล้วหน้าที่ของกำแพงล่างมีดังนี้

4.3.1 ป้องกันดินใต้พื้นอาคารทะลักหนีออกทางด้านข้างในเมื่อมีน้ำหนักกดทับบนผิวดิน ซึ่งกรณีเช่นนี้อาจออกแบบให้มีกำแพงล่างล้อมรอบใต้พื้นอาคารทั้งสี่ด้าน

4.3.2 เพิ่มความยาวของทางเดินที่น้ำจะไหลลอดใต้พื้นอาคาร (Percolation path) เรื่องนี้ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แล้ว ซึ่งจะเห็นว่าระยะทางตามแนวดิ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางการไหลของน้ำใต้พื้นอาคารได้มาก (ตามเกณฑ์ของ Lane's Ratio) สำหรับหน้าที่ของกำแพงล่างในกรณีนี้ ในอาคารบางแห่งซึ่งมีความยาวของทางเดินที่น้ำไหลลอดใต้พื้นอาคารไม่พอจำเป็นต้องตอกเข็มพืด (Sheet piles) ก็มักตอกเข็มพืดตามแนวกำแพงล่าง และใช้กำแพงล่างนี้หุ้มหัวเข็มพืดอีกทีหนึ่งด้วย

4.3.3 ป้องกันน้ำกัดเซาะดินใต้พื้นอาคาร สำหรับกำแพงล่างที่ทำหน้าที่ป้องกันน้ำกัดเซาะดินใต้พื้นอาคารนี้ โดยแท้จริงคือกำแพงล่างที่อยู่ปลายสุดของพื้นด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำเพียงสองแห่งเท่านั้น และโดยเฉพาะตัวที่อยู่ด้านท้ายน้ำจะมีความสำคัญมากกว่า เพราะน้ำที่ผ่านอาคารชนประทานไปแล้วจะมีการไหลที่ปั่นป่วน อาจจะพัดพาส่วนป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำ(Downstream protection) ให้หลุดลอยไปแล้วกัดพาดินใต้พื้นอาคารให้หลุดหายไปได้ ทำให้พื้นท้ายน้ำ (Downstream apron) หักเสียหายในที่สุด สำหรับอาคารชนประทานที่ออกแบบไว้สมัยเก่า ๆ นิยมใช้กระดานทับแนว (เป็นแผ่นไม้ตีเป็นแผงคล้ายเข็มพืดแต่เจาะรูเป็นระยะ ๆ ให้น้ำที่ไหลลอดใต้พื้นอาคารผ่านออกไปได้ แล้วหล่อกำแพงล่างหุ้มหัวไม้ทับแนวอีกทีหนึ่ง) ช่วยป้องกันการกัดเซาะนี้

4.3.4 ช่วยรับแรงในการเลื่อนไถลของอาคาร (Sliding) ในการตรวจสอบความมั่นคงของอาคาร (Stability of structures) ส่วนหนึ่งคือการตรวจสอบการเลื่อนไถลของอาคาร ดังนั้นถ้าความฝืดของพื้นอาคารกับผิวดินมีไม่พอที่จะรับการเลื่อนไถลของอาคาร เราจะต้องอาศัยกำแพงล่างช่วยรับแรงด้วย ในกรณีเช่นนี้ขนาดของกำแพงล่างอาจใหญ่กว่าขนาดที่จะกำหนดให้ข้างล่างนี้ได้ เพราะจะต้องออกแบบกำแพงล่างให้เป็นคานยื่น (Cantilever beam) รับแรงดันดิน (Passive pressure) ด้วย

ขนาดของกำแพงล่างที่กำหนดเป็นมาตรฐานตามตัวเลขข้างล่างนี้เป็นขนาดที่เล็กที่สุดที่ยอมให้ใช้ โดยกำหนดขึ้นตามความลึกของน้ำเหนือพื้นอาคารส่วนนั้น ซึ่งมีค่าดังนี้

ความลึกของน้ำ (เมตร)	ความลึกของแกนคอนกรีต (เมตร)	ความหนาของแกนคอนกรีต (เมตร)
ไม่เกิน 1.00	0.50	0.20
1.00 – 2.00	1.00	0.30
2.00 – 3.00	1.50	0.40
มากกว่า 3.00	ไม่น้อยกว่า 2.00	0.50
อาคารขนาดเล็ก	0.50	0.15

4.4 ส่วนป้องกันการกัดเซาะด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (Upstream and downstream protections) เนื่องจากตรงช่วงต่อของตัวอาคารกับเนื้อดินเดิมที่รองรับอาคารนั้นเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ (Coefficient of roughness) อย่างกระทันหัน ซึ่งทำให้ความเร็วของน้ำเปลี่ยนไปโดยทันทีทันใดย่อมเกิดการปั่นป่วน (Turbulent) ซึ่งจะมีอิทธิพลที่จะกัดเซาะพื้นผิวดินขึ้นได้ จึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีราคาไม่สูงนักและหาได้ง่ายในท้องถิ่น และต้องมีขนาดและน้ำหนักมากพอที่จะต้านทานกระแสน้ำได้ปิดทับผิวดินในระหว่างช่วงต่อของอาคารกับดิน และวัสดุที่ใช้กันอยู่ก็มี หินขนาดต่าง ๆ (Various sizes of stone) ในลักษณะที่เป็นหินเรียง (Riprap) หรือหินทิ้ง (Dumped rock) แท่งคอนกรีต (Concrete cube) หรือหินที่บรรจุในตาข่ายเหล็ก (Gabion) และการใช้วัสดุดังกล่าวนี้เป็นส่วนป้องกันการกัดเซาะจะต้องใช้หินขนาดเล็กหลาย ๆ ขนาดปนกันรองอยู่ข้างล่างเป็นชั้นหนาไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของ

ขนาดก้อนหินที่ใช้ หรือไม่น้อยกว่า 15 ซม.

สำหรับส่วนป้องกันการกัดเซาะเหนือน้ำ (Upstream protection) นั้นไม่ค่อยจะได้รับความเสียหายเนื่องจากการกัดเซาะมากนัก ดังนั้นในการกำหนดขนาดของก้อนหินและความยาวของช่วงตอนนี้จึงไม่มีกฎเกณฑ์ที่กำหนดขึ้นใช้ เป็นแต่ผู้ออกแบบกำหนดขึ้นตามที่เห็นสมควรและเหมาะสมกับขนาดของอาคารเท่านั้น แต่ส่วนป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำ (Downstream protection) นั้น เป็นส่วนที่ต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วน เพราะถูกกัดเซาะได้ง่ายจากกระแสน้ำที่ผ่านอาคารไปแล้ว แม้จะได้ถูกทำลายพลังความรุนแรงด้วยส่วนกระจายพลังน้ำ (Energy dissippator) แล้วก็ตาม ก็ยังคงมีพลังพอที่จะกัดพาส่วนป้องกันการกัดเซาะท้ายน้ำไปด้วย ถ้ากำหนดขนาดของวัสดุที่ให้เล็กหรือมีน้ำหนักไม่พอ หรือกำหนดความยาวของส่วนป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำสั้นเกินไป ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นการกำหนดขนาดของวัสดุที่ใช้กับความยาวของส่วนป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำไว้ดังนี้

<u>สมการของเบอรี่</u> (Berry's equation)

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

ในเมื่อ V_b = ความเร็วกระแสน้ำที่ก้นร่องน้ำเป็นฟุต/วินาที

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของหินที่นำมาใช้เป็นนิ้ว

สมการของเบอรี่นี้ใช้ได้ในกรณีที่วัสดุที่ใช้เป็นก้อนหินเท่านั้น และจะมีค่าถูกต้องมากที่สุดเมื่อหินที่ใช้มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) 2.65

<u>ตัวอย่าง</u> ให้หาขนาดของก้อนหินที่ใช้เป็นส่วนป้องกันการกัดเซาะท้ายน้ำของอาคารชลประทานแห่งหนึ่ง ซึ่งมีความเร็วของกระแสน้ำที่ก้นคลอง 10 ฟุต/วินาที

$$10 = 2.57\sqrt{d}$$

$$\sqrt{d} = 3.891$$

$$\therefore \quad d = 15.14 \text{ นิ้ว}$$

$$= 38.5 \text{ ซม.}$$

ในการเรียงหินด้านท้ายน้ำที่ได้จากผลของตัวอย่างข้างบนนี้ ถ้าจะให้ได้ผลดีควรเรียงหินขนาดไม่เล็กกว่า 38.5 ซม. จำนวน 60 % ปนกับหินที่มีขนาดเล็กกว่า 38.5 ซม. ลดหลั่นกันลงมาอีก 40 % โดยวางอยู่บนชั้นของหินเล็กที่หนาไม่น้อยกว่า 15 ซม.

นอกจากนี้มาวิสและลอชชี่ (Mavis and Laushcy) ยังได้ให้สมการสำหรับกำหนดขนาดของวัสดุอื่นที่ใช้เป็นส่วนป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำไว้ดังนี้

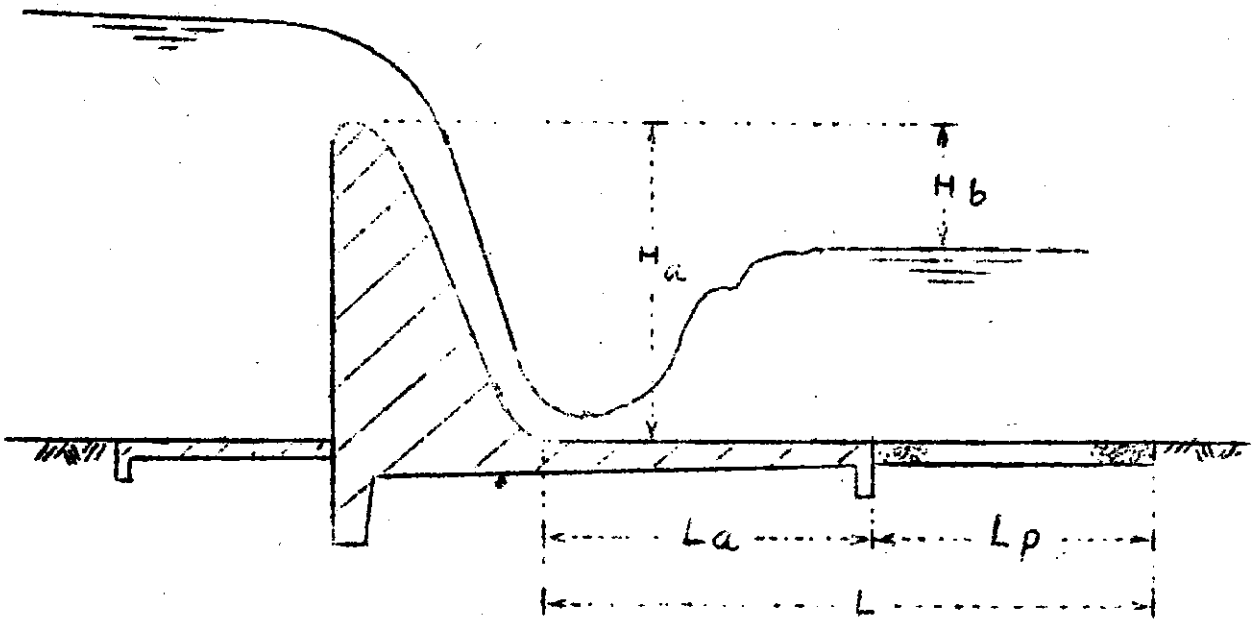
$$V_b = \frac{1}{2}\sqrt{d_1} \cdot \sqrt{S-1}$$

ในเมื่อ V_b = ความเร็วกระแสน้ำที่กันทางน้ำเป็น เมตร/วินาที

d_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุที่ใช้เป็น ซม.

S = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ส่วนการกำหนดความยาวของส่วนป้องกันการกัดเซาะท้ายน้ำนั้น ไบลย์ (Bligh) ได้ให้สูตรไว้ดังนี้



$$L_a = 4C\sqrt{H_a/13}$$

$$L = 0.355\ C\sqrt{H_b \cdot q}$$

$$L_p = L - L_a$$

ในเมื่อ L_a = ความยาวของพื้นทึบท้ายอาคาร (Impervious floor) เป็นฟุต

L = ความยาวพื้นทึบรวมกับความยาวของส่วนป้องกันการกัดเซาะท้ายน้ำ เป็นฟุต

L_p = ความยาวส่วนป้องกันการกัดเซาะท้ายน้ำ เป็นฟุต

H_a = ความสูงของสันอาคารจากระดับพื้นท้ายน้ำ เป็นฟุต

H_b = ความสูงของสันอาคารจากระดับน้ำต่ำสุดด้านท้ายน้ำ เป็นฟุต

q = ปริมาณน้ำนอง เป็น ลบ.ฟุต/วินาที/ความกว้าง 1 ฟุต

C = ค่า C_w ของ Lane's ratio นั่นเอง

4.5 <u>รอยต่อคอนกรีต</u> (Joints) อาคารคอนกรีตที่มีความยาวมาก ๆ หรือเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ หรืออาคารที่ช่วงตอนต่าง ๆ อาจเกิดการทรุดตัว (Settlement) หรือเกิดการแอ่นตัว (Deflection) ที่ไม่เท่ากัน จำเป็นต้องกำหนดให้มีรอยต่อเป็นช่วงเป็นตอนตามความจำเป็นและเหมาะสม ซึ่งชนิดของรอยต่อดังกล่าวอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

4.5.1 รอยต่อเพื่อการก่อสร้าง (Construction joints) เป็นรอยต่อที่ใช้กับอาคารขนาดใหญ่ซึ่งต้องเทคอนกรีตจำนวนมากติดต่อกัน และระยะเวลาที่ใช้ในการเทคอนกรีตนั้นเกินกว่าระยะเวลาการแข็งตัวของคอนกรีต (Initial setting time) ดังนั้นถ้าหากยังคงเทคอนกรีตและกระทุ้งหรือสั่นคอนกรีตโดยเครื่องสั่น (Vibrator) ในขณะคอนกรีตเริ่มจะแข็งตัว จะทำให้คอนกรีตลดความแข็งแรง (Strength) ลงไปมาก ย่อมเป็นผลเสียต่ออาคารส่วนนั้นได้

การกำหนดรอยต่อชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับปริมาณคอนกรีตที่จะใช้เทในแต่ละช่วงตอนของรอยต่อที่สามารถเทได้ในระยะเวลาที่ไม่เกินระยะเวลาการแข็งตัวของคอนกรีต และควรกำหนดให้รอยต่ออยู่ตรงตำแหน่งที่โมเมนต์มีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้เหล็กเสริมคอนกรีตในช่วงที่ผ่านรอยต่อจะต้องวางต่อเนื่องกันไป (ไม่ตัดขาดออกจากกัน)

4.5.2 รอยต่อเพื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Expansion and contraction joints) อุณหภูมิของอากาศระหว่างกลางวันกับกลางคืน หรือในฤดูร้อนกับฤดูหนาวนั้น มีความแตกต่างกันมาก ย่อมทำให้คอนกรีตเกิดการขยายและหดตัวสลับกันไปเช่นนี้เสมอ ซึ่งในขณะที่คอนกรีตขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอาจทำให้คอนกรีตแตกเพราะเกิดแรงเค้นอัด (Compressive stress) หรือในทางกลับกันเมื่อคอนกรีตหดตัวเพราะอุณหภูมิลดลง คอนกรีตก็อาจจะแตกเพราะแรงเค้นดึง (Tensile stress) ได้เช่นกัน

การออกแบบรอยต่อชนิดนี้จึงมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างรอยต่อแต่ละช่วง กับระยะห่างของคอนกรีตตรงรอยต่อ ซึ่งจะคิดได้จากสูตรการขยายตัวของวัตถุในวิชาความร้อนดังนี้

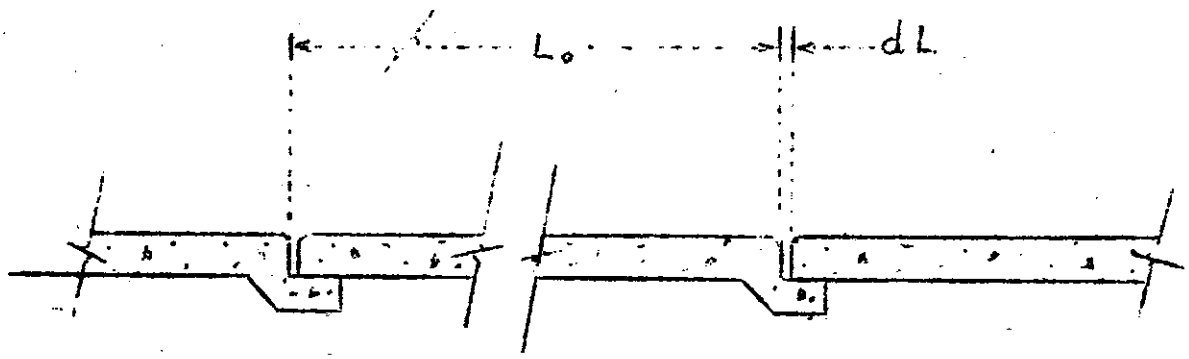
$$d_L = L_o \cdot \alpha \cdot t$$

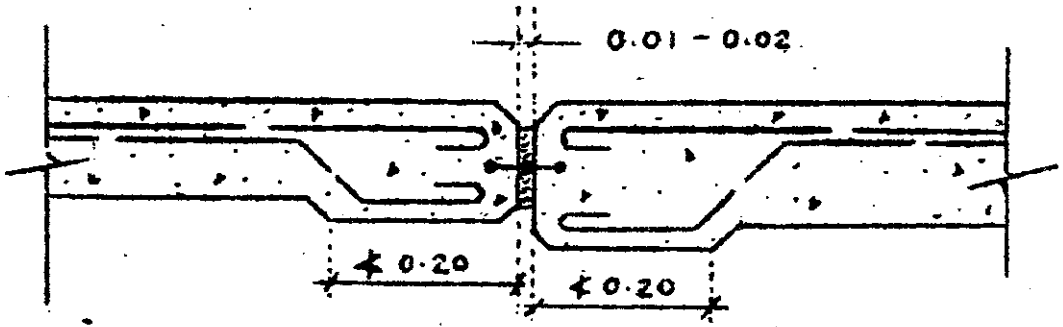
ในเมื่อ d_L = ระยะห่างของคอนกรีตตรงรอยต่อเป็น ซม.

L_o = ระยะห่างระหว่างรอยต่อแต่ละช่วงเป็น ซม.

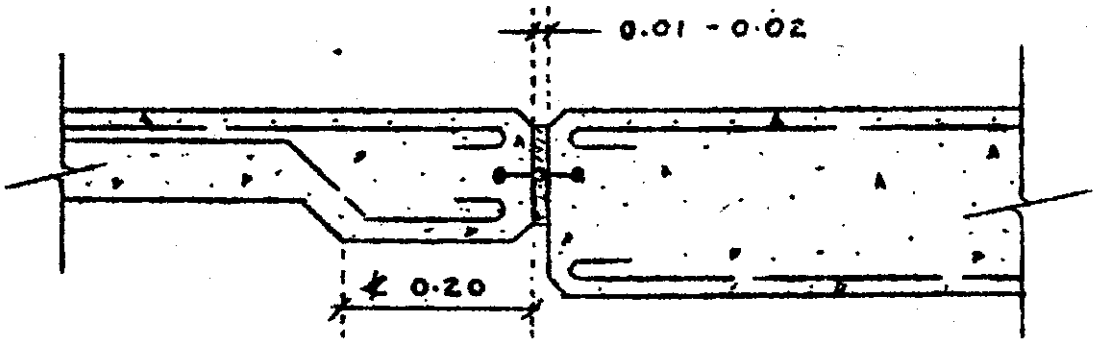
α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของคอนกรีตเป็น ซม./°ซ.

t = อุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นเป็น °ซ.

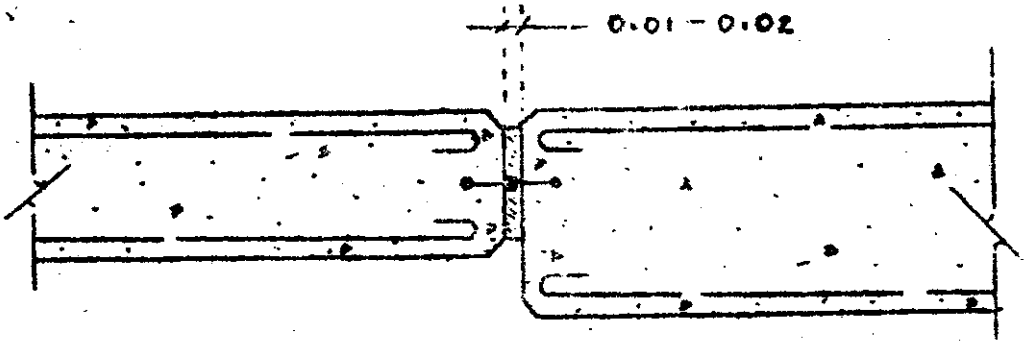




รอยต่อแบบเสริมเหล็กผิวเดียวทั้งสองข้าง



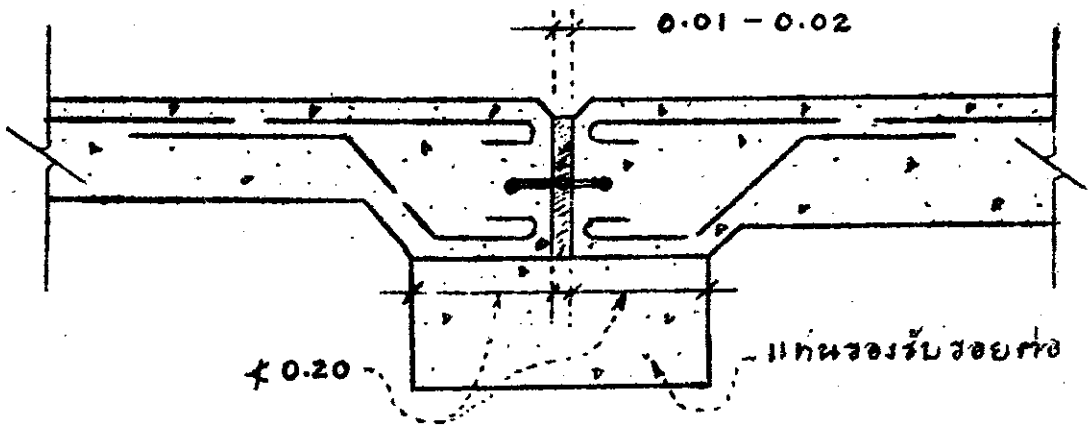
รอยต่อแบบเสริมเหล็กผิวเดียวข้างหนึ่ง และอีกข้างหนึ่งเสริมเหล็กสองผิว



รอยต่อแบบเสริมเหล็กสองผิวทั้งสองข้าง

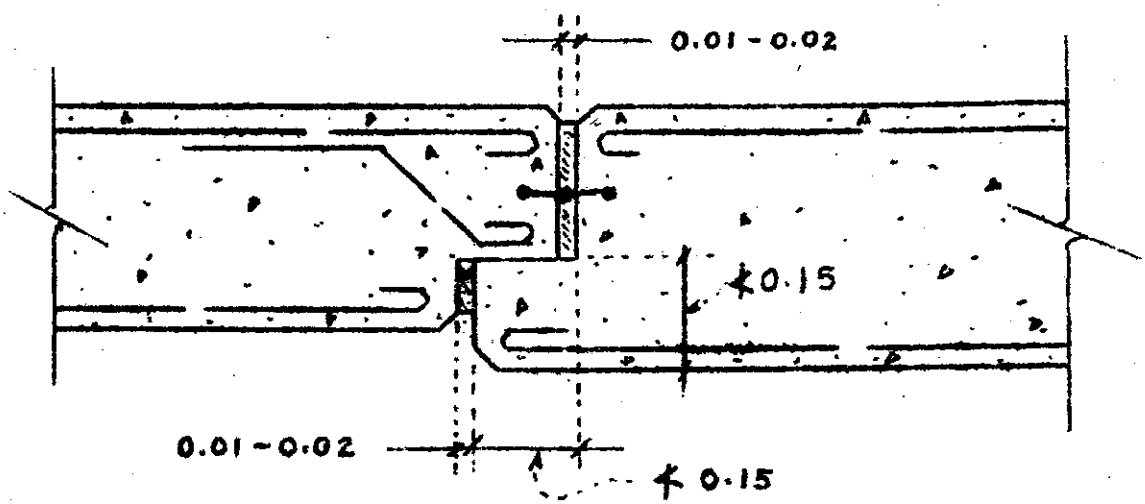
รูปแสดงลักษณะและวิธีการเสริมเหล็กในรอยต่อแบบต่อชน

(Butt Joints)



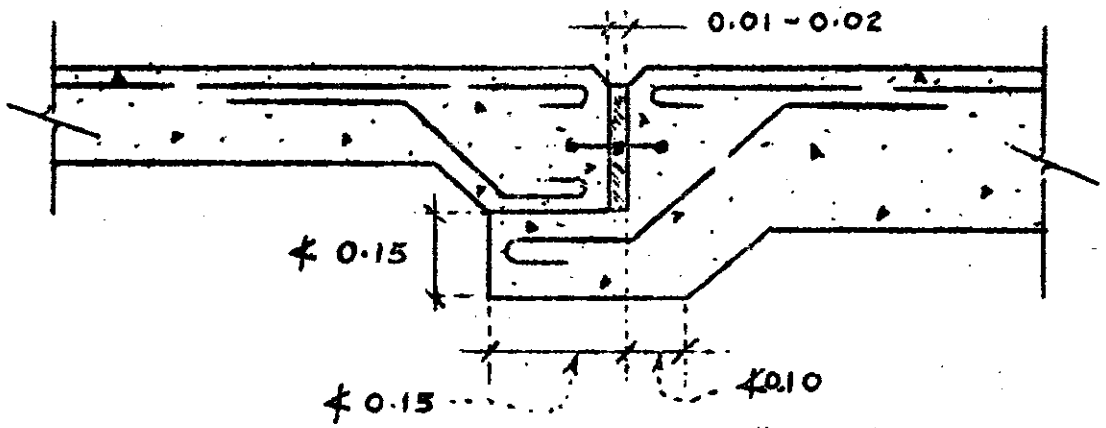
รูปแสดงลักษณะและวิธีการเสริมเหล็กในรอยต่อแบบนั่งแท่น

(Sleeper Joint)

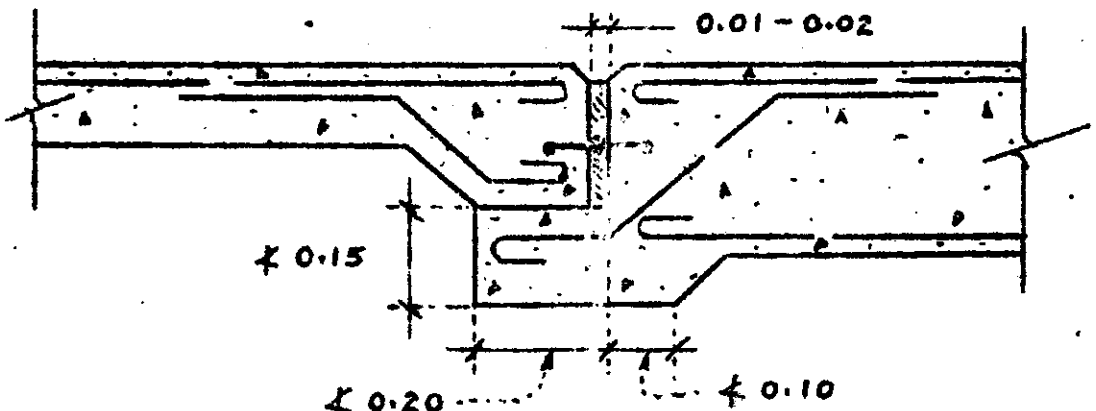


รูปแสดงลักษณะและวิธีการเสริมเหล็กในรอยต่อแบบผสมรอยบางส่วน

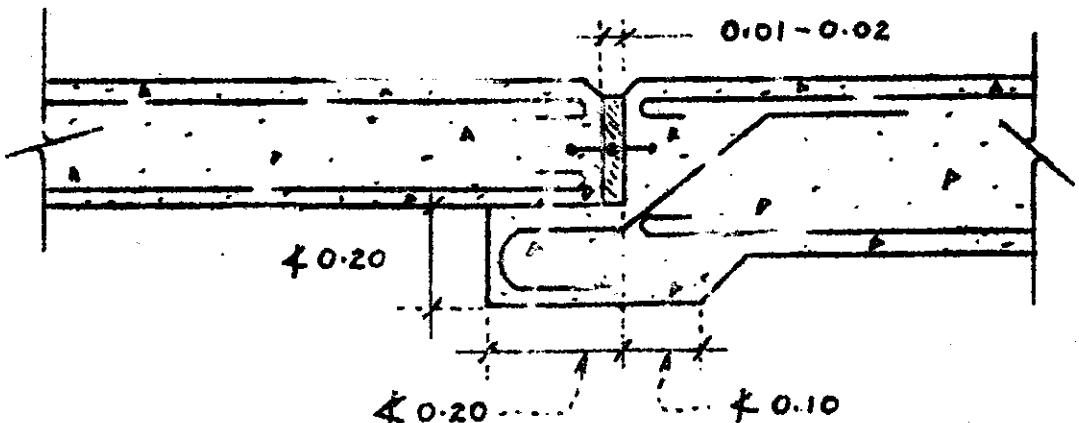
(Step Joint)



รอยต่อแบบเสริมเหล็กผิวเดียวทั้งสองข้าง



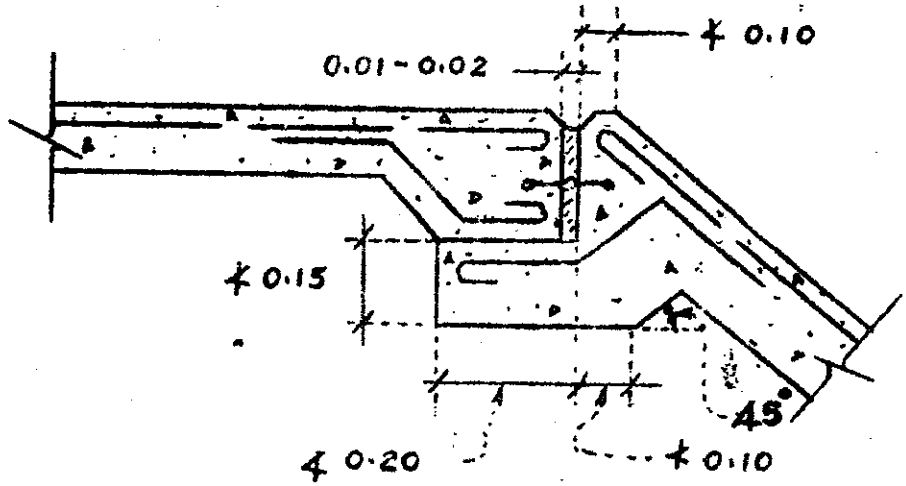
รอยต่อแบบเสริมเหล็กผิวเดียวข้างหนึ่งและอีกข้างหนึ่งเสริมเหล็กสองผิว



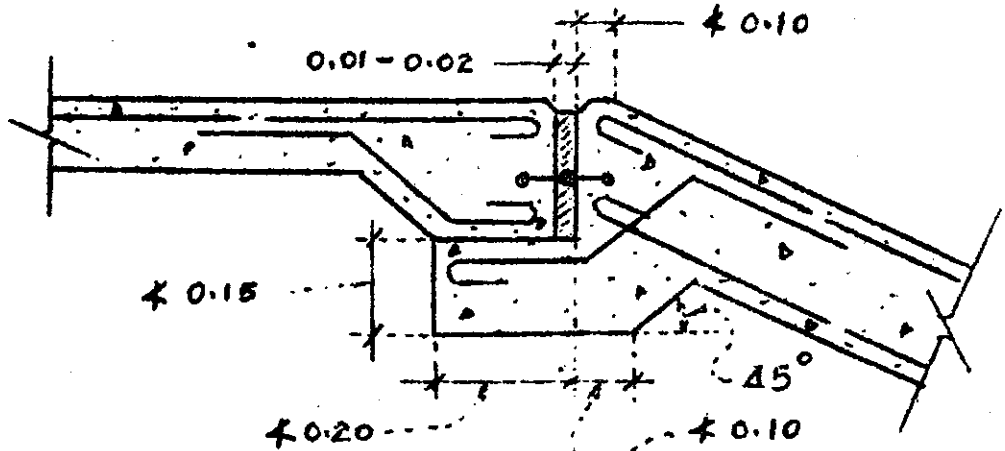
รอยต่อแบบเสริมเหล็กสองผิวทั้งสองข้าง

รูปแสดงลักษณะและวิธีการเสริมเหล็กในรอยต่อแบบอมรอยเต็มหน้า ชนิดต่อแนวตรง

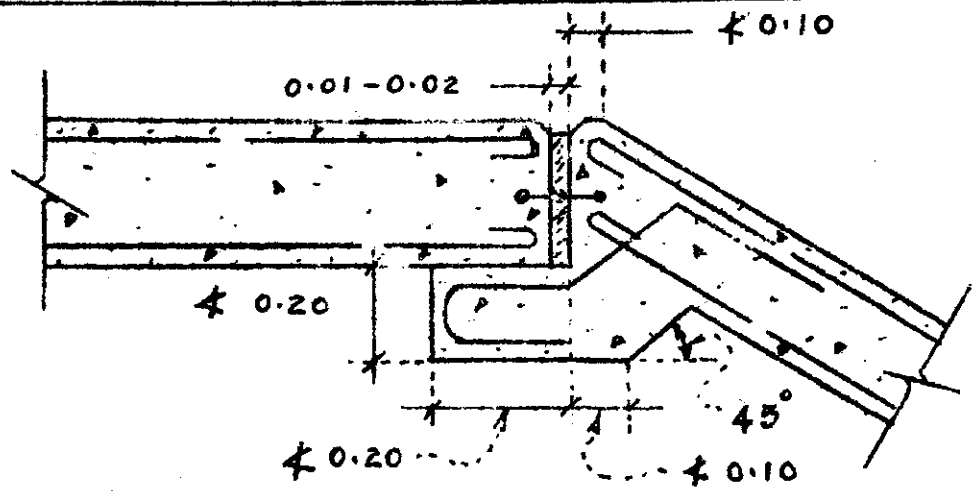
(Straight bell Joints)



รอยต่อแบบเสริมเหล็กผิวเดียวทั้งสองข้าง



รอยต่อแบบเสริมเหล็กผิวเดียวข้างหนึ่ง และอีกข้างหนึ่งเสริมเหล็กสองผิว



รอยต่อแบบเสริมเหล็กสองผิวทั้งสองข้าง

รูปแสดงลักษณะและวิธีการเสริมเหล็กในรอยต่อแบบอมรอยเต็มหน้า

ชนิดต่อแนวหักมุม

(Angular bell Joints)

สำหรับในงานชลประทานนั้นกำหนดให้ใช้ระยะห่างระหว่างรอยต่อแต่ละช่วงไม่เกิน 10 เมตร (เนื่องจากความยาวของเหล็กเส้นในท้องตลาดยาว 10 เมตร จึงสะดวกที่ไม่ต้องตัดต่อเหล็ก) และเหมาะสมกับระยะห่างของคอนกรีตตรงรอยต่อ 1 ซม. และรอยต่อชนิดนี้แตกต่างจากรอยต่อเพื่อการก่อสร้างตรงที่เหล็กเสริมตรงรอยต่อจะต้องตัดขาดออกจากกัน

4.5.3 รอยต่อเพื่อควบคุมแรงเค้นส่วนเกิน (Control joints) ในการที่อาคารคอนกรีตตั้งแต่สองส่วนขึ้นไปมาเชื่อมต่อกัน แต่ส่วนของอาคารดังกล่าวสร้างขึ้นไม่พร้อมกัน หรือสร้างบนเข็มราก (Foundation piles) ที่ยาวไม่เท่ากัน หรือวางอยู่บนฐานรากที่มีสภาพแตกต่างกัน ย่อมเกิดการทรุดตัวไม่เท่ากัน ส่วนที่ทรุดตัวมากกว่าจะดึงหรือเหนี่ยวส่วนที่ทรุดตัวน้อยกว่า จะทำให้เกิดแรงเค้นเพิ่มขึ้นโดยที่มิได้คำนวณเผื่อเอาไว้ อาจเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตได้ประการหนึ่ง อีกประการหนึ่งนั้นก็คือ คานยื่น (Cantilever beams) ตั้งแต่สองตัวขึ้นไปมาเชื่อมต่อกันคนละทิศทาง ถ้าการแอ่นตัว (Deflection) ของคานแต่ละตัวไม่เท่ากันแล้วก็จะเกิดการหน่วงเหนี่ยวซึ่งกันและกันทำให้เกิดแรงเค้นเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำรอยต่อไว้ตรงแนวที่ส่วนของอาคารหรือปลายของคานยื่นมาชนกันไว้เพื่อป้องกันแรงเค้นส่วนเกินที่จะเกิดขึ้นในลักษณะดังกล่าวข้างต้น

นอกจากนี้รูปลักษณะของรอยต่อยังแบ่งออกให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ออกเป็น 4 ชนิดคือ

ก. รอยต่อแบบต่อชน (Butt joints) เป็นรอยต่อที่เกิดจากชิ้นส่วนของอาคารสองส่วนมาต่อชนกันโดยตรงโดยไม่มีสิ่งบังคับหรือรองรับใด ๆ ทั้งสิ้น เป็นแบบที่ใช้ในงานก่อสร้างถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก หรืออาคารอยู่อาศัยทั่ว ๆ ไป ส่วนอาคารชลประทานขนาดเล็ก ๆ หรือรอยต่อของคลองดาดด้วยคอนกรีตจึงจะใช้รอยต่อชนิดนี้ แต่ว่าต้องใส่ยางกันน้ำ (Rubber water stop) เพื่อกันน้ำรอดผ่านรอยต่อนี้ด้วย

ข. รอยต่อแบบนั่งแท่น (Sleeper joints) เป็นรอยต่อที่มีลักษณะเดียวกับแบบแรก แต่ได้เพิ่มแท่นรองรับตรงรอยต่อขึ้นมาอีกเพื่อป้องกันการแยกตัวของรอยต่ออันเกิดจากการทรุดตัวไม่เท่ากัน จึงมักนิยมใช้กับรอยต่อที่ฐานรากของอาคารทั่ว ๆ ไป สำหรับงานชลประทานก็มีที่ใช้เหมือนกับแบบแรก

ค. รอยต่อแบบอมรอยบางส่วน (Step joints) รอยต่อชนิดนี้ใช้ในกรณีที่ส่วนหนาของคอนกรีตตรงรอยต่อหนามาก ความหนาของคอนกรีตแต่ละข้างแตกต่างกันมากสามารถแบ่ง

ความหนาเป็นชั้นเพื่อรองรับซึ่งกันและกันได้ นิยมใช้รอยต่อชนิดนี้กับอาคารชลประทานทั่ว ๆ ไป และเป็นอาคารขนาดใหญ่ที่พื้นหนามาก กับใช้ในงานสพานทั่วไปด้วย

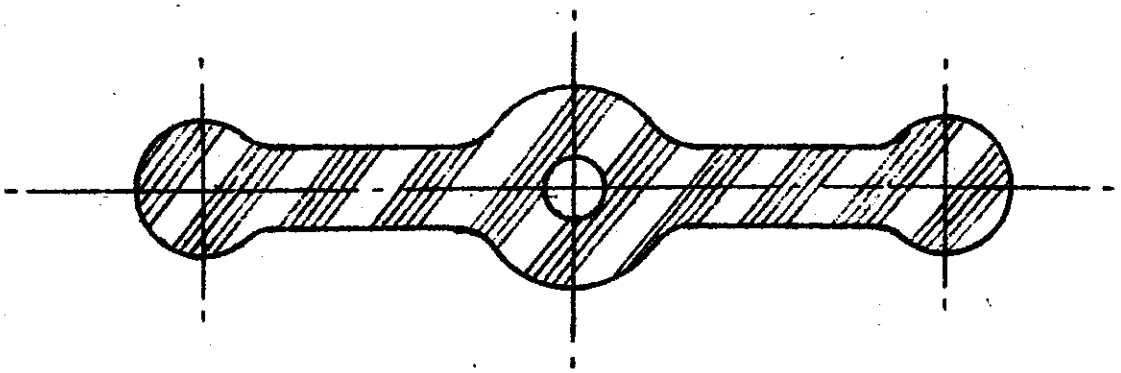
ง. รอยต่อแบบอมรอยเต็มหน้า (Bell joints) เป็นรอยต่อที่มีลักษณะเดียวกับรอยต่อแบบอมรอยบางส่วน หากแต่ได้เพิ่มความหนาของส่วนที่รองรับขึ้น ให้สามารถปรับเป็นรอยต่อรองรับส่วนของอาคารอีกข้างหนึ่งได้เต็มความหนาของมัน ทำให้เกิดความมั่นคงแข็งแรงแก่รอยต่อนั้นยิ่งขึ้น ถือว่าเป็นแบบของรอยต่อที่นิยมใช้กับอาคารชลประทานทุกขนาด และใช้กับรอยต่อทุกรูปแบบ

รูปลักษณะและวิธีการเสริมเหล็กในรอยต่อชนิดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในรูปแล้ว

สำหรับในงานชลประทานนั้นรอยต่อดังกล่าวในข้อ 4.5.2 และ 4.5.3 นั้น จะต้องทำให้ผิวสัมผัสของคอนกรีตตรงรอยต่อเรียบและมักนิยมทาน้ำมันดิน (Tar) เพื่อให้เกิดการเลื่อนตัวได้สะดวกด้วย นอกจากนี้ตลอดความยาวของรอยต่อจะต้องฝังวัสดุกันน้ำซึ่งอาจจะเป็นยางกันน้ำ (Rubber water stop) หรือโลหะกันน้ำ (Metal seal) ซึ่งอาจจะเป็นแผ่นทองแดง (Copper seal) แผ่นทองเหลือง (Brass seal) หรือวัสดุอย่างอื่นที่มีความเหนียวและคงทนต่อการเกิดสนิมได้อย่างดี และสามารถทนทานต่อแรงกดดันของน้ำได้อย่างพอเพียง เพื่อป้องกันน้ำรั่วลอดรอยต่อดังกล่าว และในระหว่างช่องว่างของรอยต่อจะต้องติดตั้งวัสดุยืดหยุ่น (Elastic filler) ไว้โดยตลอดความยาวของรอยต่อเช่นกัน เพื่อป้องกันตะกอนทรายไปอุดตันซึ่งจะเป็นอุปสรรคในการทำงานของรอยต่อดังกล่าวได้ วัสดุยืดหยุ่นที่ใช้ทั่ว ๆ ไปก็มี ยาง (Rubber filler) ไม้ก๊อก (Cock filler) หรือแผ่นบิทูมินัส (Bituminus fiber sheet)

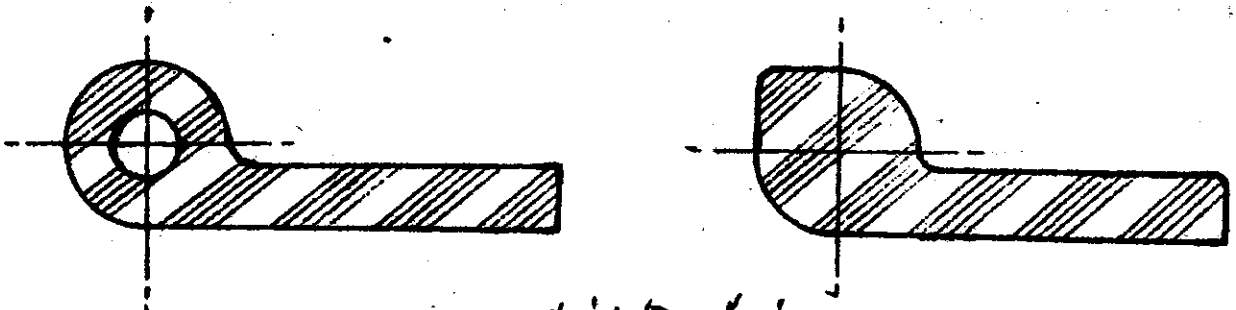
4.6 <u>ไม้อัดน้ำและช่องอัดน้ำ</u> (Stop log and Stop plank grooves)

อาคารชลประทานเกือบทุกชนิดที่ใช้ทำหน้าที่ปิดกั้นน้ำหรือระบายน้ำไม่ว่าจะมีบานบังคับน้ำของมันเองหรือไม่ก็ตามมักนิยมทำช่องอัดน้ำ (Stop plank groove) ไว้ทั้งด้านหน้าและด้านท้าย หรือเฉพาะด้านหน้าของอาคารเสมอ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ที่รองรับไม้อัดน้ำ (Stop log) หรือแผงอัดน้ำ (Stop plank) เพื่อทำหน้าที่อัดน้ำแทนบานบังคับน้ำในบางกรณีเช่น บานชำรุด หรือในขณะที่ซ่อมบานระบายหรือคอม่อ เป็นต้น



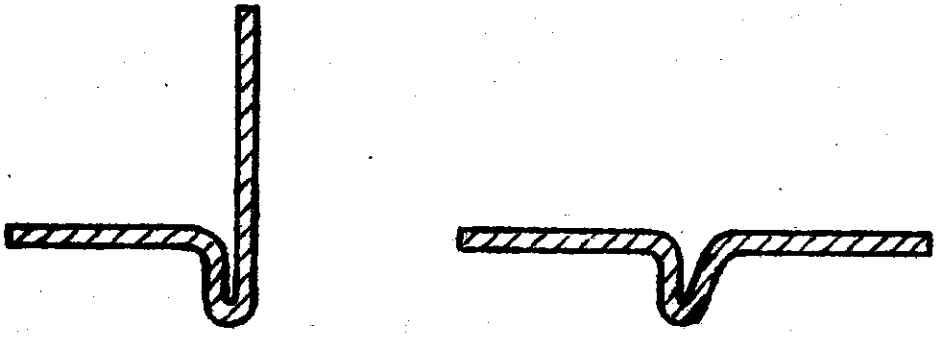
ลักษณะรูปตัดของยางกันน้ำที่ใช้กับรอยต่อของอาคาร

(Rubber water stop)



ลักษณะรูปตัดของยางกันน้ำที่ใช้ติดตั้งที่ขอบบานระบาย

(Rubber seal)



ก่อนติดตั้ง ติดตั้งแล้ว

ลักษณะรูปตัดของแผ่นโลหะกันน้ำที่ใช้กับรอยต่อของอาคาร

(Metal seal)

สำหรับไม้อัดน้ำ (Stop log) นั้น ลักษณะเป็นไม้ท่อน โดยใช้แต่ละท่อนใส่ลงในช่องอัดน้ำ (Stop plank greove) ส่วนแผงอัดน้ำ (Stop plank) ก็คือไม้อัดน้ำที่เย็บตัดกันเป็นแผงนั่นเอง ส่วนความกว้างของแผงก็กำหนดขึ้นตามน้ำหนักที่สามารถยกได้สะดวกและไม่หนักจนเกินไป ชนิดของไม้ที่จะใช้เป็นไม้อัดน้ำได้จะต้องเป็นไม้ที่ไม่ผุง่ายและมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ เช่น ไม้ตะเคียน ไม้มะค่า หรือไม้แดง เป็นต้น

การคำนวณขนาดของไม้อัดน้ำนั้นให้คิดไม้อัดน้ำเป็นคานธรรมดา (Simple beam) โดยมีช่วงคาน (Span length) เท่ากับความกว้างของช่องผ่านน้ำ (Gate opening) ส่วนความกว้างของคานก็คือความกว้างของไม้อัดน้ำแต่ละท่อน หรือความกว้างของแผงอัดน้ำแต่ละแผงแล้วแต่กรณี และตรวจสอบค่าของแรงเค้นด้วยสูตรดังนี้

$$f = \frac{6M}{b.d^2}$$

และ $$v = \frac{3V}{2b.d}$$

ในเมื่อ f = แรงเค้นดัด (Flexural stress) เป็น กก./ซม.^{2}

M = โมเมนต์สูงสุด (Maximum moment) เป็น กก.–ซม.

b = ความกว้างของไม้อัดน้ำ เป็น ซม.

d = ความหนาของไม้อัดน้ำ เป็น ซม.

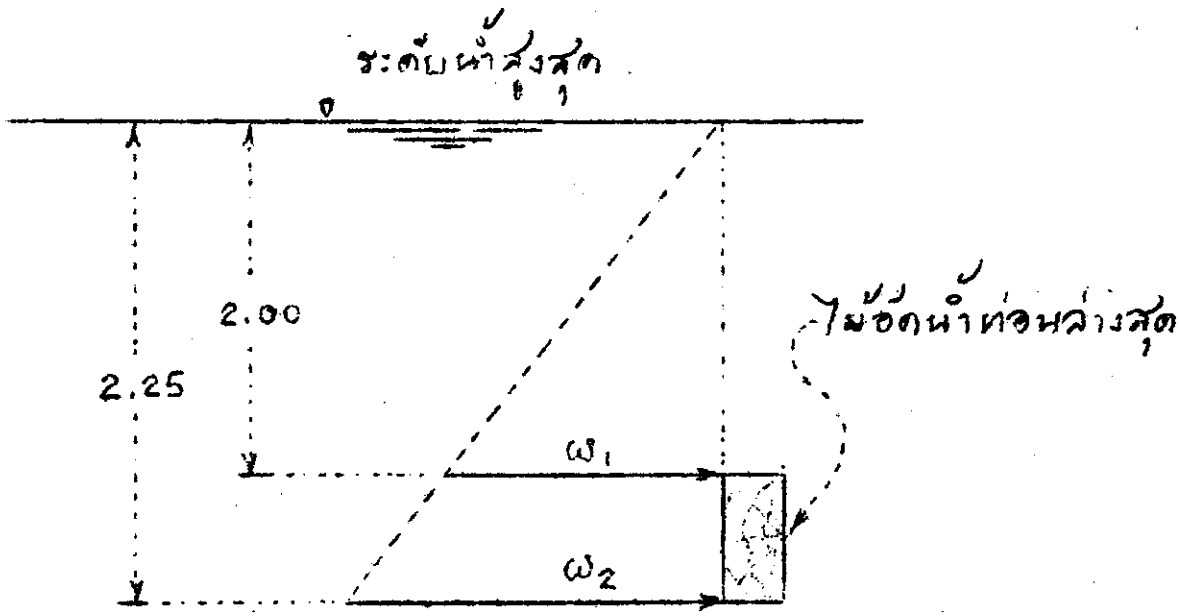
v = แรงเค้นเฉือน (Shearing stress) เป็น กก./ ซม.^{2}

V = แรงเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shearing stress) เป็น กก.

<u>ตัวอย่าง</u> จงออกแบบไม้อัดน้ำที่ใช้กับช่องผ่านน้ำ กว้าง 4.00 ม. ในเมื่อความลึกของน้ำสูงสุดด้านเหนือน้ำ 2.25 ม. ด้านท้ายน้ำแห้ง

คุณสมบัติของไม้และทำแรงเค้นใช้งาน

ชื่อไม้		ประเภท									
กระบือ	SANDORICUM INDICUM		0.67	660	469	74,500	171	77	93		
จำปาป่า	MICHELIA CHAMPACA		0.71	690	553	76,300	214	71	137		
ตะแบก	PALAQUIUM OBOVATUM		0.60	630	493	64,000	210	87	123		
เต็ง	CANARIUM LATIFOLIUM		0.53	550	391	57,500	227	95	132	60	45
ตะเคียน	CEDRELA TOONA		0.53	530	400	44,500	210	58	92		
ยางแดง	DIPTEROCARPUS ALATUS		0.70	693	613	58,000	372	65	161		
ตะเคียนหิน	LOPHOPETALUM DUPERREANUM		0.61	650	467	53,000	195	103	92		
กระบาก	DIPTEROCARPUS INTRICATUS		0.89	870	756	82,500	242	106	136		
หว้าหิน	HOLOPTELEA INTEGRIFOLIA		0.71	720	615	65,000	248	103	145		
ตะแบกเปลือกบาง	ANISOPTERA GLABRA		0.72	740	723	103,000	217	62	82		
กระบากดำ	CARAPA OBOVATA		-	590	643	88,000	363	99	119		
ยางนา	LITSEA FITIOLATA		0.95	960	662	68,500	-	62	164	80	60
พลวง	PODOCARPUS NERIIFOLIA		0.77	770	647	87,000	310	43	186		
หลุมพอ	SHOREA FLORIBUNDA		0.83	730	717	84,000	246	67	135		
ยางกราด	DIPTEROCARPUS PILOSUS		-	760	772	112,000	467	65	181		
สัก	TECTONA GRANDIS		0.63	630	481	73,500	327	86	134		
ตะแบกเลือด	LAGERSTROEMIA FLOS-REGINAE		0.65	640	497	98,000	340	77	167		
หว้า	ACNNA CORDIFOLIA		0.68	680	560	81,000	272	57	136		
ยางหยวก	HOPEA ODORATA		0.77	760	816	104,000	354	111	177		
[illegible]	ANISOPTERA COCHINCHINENSIS		0.64	860	810	94,000	454	176	98		
ยางขาว	LAGERSTROEMIA CALYCULATA		0.78	780	708	118,000	491	142	214		
ตะเคียนทอง	ANOGEISSUS PENDULA		0.74	770	721	111,000	388	102	81		
ยางแม่น้ำ	PENTACME SIAMENSIS		0.68	810	613	107,000	344	123	138	100	75
ยางกล่อง	DIPTEROCARPUS TUBERCULATUS		0.64	640	598	119,000	341	99	134		
รกฟ้า	SHOREA SIAMENSIS		0.89	890	891	120,000	329	231	164		
ยาง	DIPTEROCARPUS GRANDIFLORUS		0.77	760	666	110,000	364	178	174		
ตะเคียน	TERMINALIA ALATA		1.04	1040	912	150,000	524	155	192		
เคี่ยม	DIPTEROCARPUS COSTULATUS		0.96	900	810	140,000	458	119	211		
ตะแบกนา	FAGRAEA FRAGRANS		0.93	930	870	130,000	364	125	98		
แดง	XYLIA KERRII		1.25	1250	1110	150,000	534	219	170		
ตะเคียนชันตาแมว	SCHLEICHERA OLEOSA		1.15	1090	1150	145,000	418	218	155		
[illegible]	DELPHYA MURICATA		1.11	1110	960	120,000	370	210	138		
กระบากใบใหญ่	CARAPA MOLUCCENSIS			650	1070	110,000	384	154	139		
เหียง	SHOREA OBTUSA		1.07	1070	824	110,000	442	164	149		
ปีบแดง	PTEROCARPUS MACROCARPUS		0.82	810	1110	120,000	457	203	191		
หูกวางบ้าน	TERMINALIA MUCRONATA		1.02	1020	1131	150,000	520	225	144	120	90
เหลืองปรือ	AFZELIA XYLOCARPA		0.85	850	990	104,000	403	121	107		
มะค่าโมง	CHUKRASIA VELUTINA		0.88	870	1005	120,000	258	114	136		
ตะคร้อ	PENTACME SIAMENSIS		1.15	1150	1106	150,000	498	169	170		
มะม่วงป่า	BERRYA MOLLIS		0.98	990	1150	160,000	462	178	209		
ยางปาย	PAYENA TYRAMIDATA		0.90	900	1060	120,000	467	164	140		
เสลา	LAGERSTROEMIA TOMENTOSA		0.72	730	560	110,000	450	118	123		
[illegible]	AFZELIA [illegible]		-	950	1070	130,000	500	163	146		
ตะแบกใบใหญ่	SHOREA GLAUCA		0.78	970	1040	130,000	395	125	151		
เสม็ด	COTYLELOBIUM LANCEOLATUM		-	960	-	-	-	-	-		
กระพี้จั่น	DALBERGIA CULTRATA		1.09	1090	1557	140,000	500	217	174		
ชิงชัน	DIALIUM COCHINCHINENSE		1.16	1160	1200	150,000	520	217	138		
ยาง	ERYTHROPHLEUM FORDII		1.02	1020	1140	130,000	500	206	159	150	115
ตะเคียนหนู	VATICA DISPERMA		0.95	950	1000	120,000	450	220	178		
[illegible]	AFZELIA BIJUGA		1.10	1100	1200	140,000	500	210	129		



สมมติใช้ไม้อัดน้ำเป็นไม้แดงขนาด 6" + 10" หรือ 0.15 + 0.25 ม.^{2}

w_1 = $.h_1$ = 1,000 + 2.00 = 2,000 กก./ม.^{2}

= $.h_2$ = 1,000 + 2.25 = 2,250 กก./ม.^{2}

∴ แรงดันน้ำที่กระทำต่อไม้อัดน้ำที่ยาว 1 เมตร

$w = \frac{1}{2} + 0.25\ (2,000 + 2,250) = 531.25$ กก./ม.

ความกว้างช่องผ่านน้ำ l = 4.00 ม.

∴ โมเมนต์สูงสุด $\frac{wl^2}{8} = \frac{531.25(4)^2}{8}$

= 1,062.50 กก.-ม.

และแรงเค้นเฉือนสูงสุด $\frac{wl}{2} = \frac{531.25 + 4}{2}$

= 1,062.50

แรงเค้นดัดที่เกิด $f = \frac{6M}{b.d^2}$

$= \frac{6 + 1,062.50 + 100}{25 + (15)^2}$

= 113.33 กก./ซม.^{2}

แรงเค้นเฉือนที่เกิด $v = \frac{3 \neq 1,062.50}{2 \neq 25 \neq 15}$

$= 4.25$ กก./ซม.^{2}

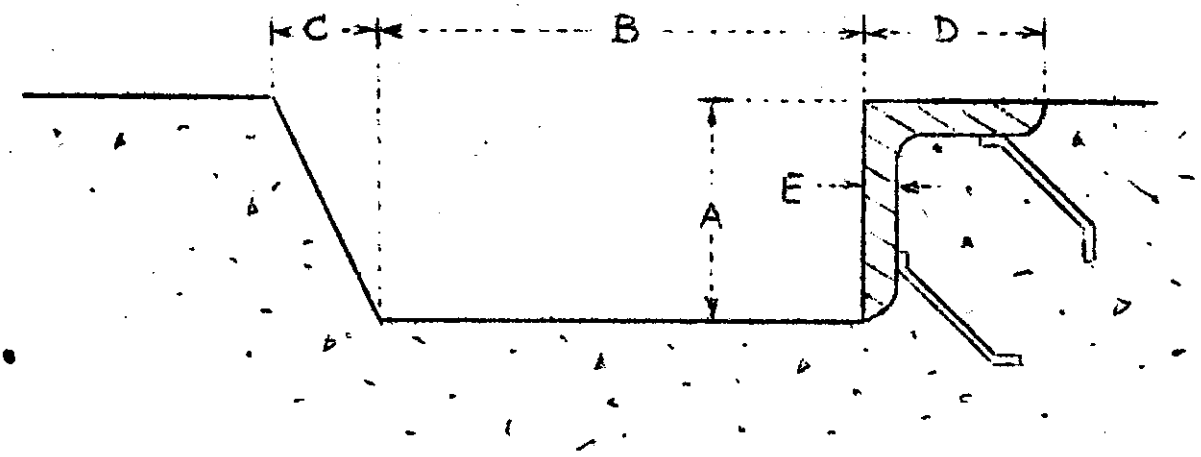
แต่ไม้แดงมี $f = 120$ กก./ซม.^{2} และ $v = 12$ กก./ซม.^{2}

∴ ไม้อัดน้ำขนาด 6" ≠ 10" ใช้ได้

ในกรณีที่ความลึกของน้ำหน้าอาคารมีมาก หรือช่องผ่านน้ำกว้างเกินกว่าไม้อัดน้ำที่ขนาด 8" จะรับแรงได้ การจัดทำเป็นแผงอัดน้ำจะช่วยได้บ้างเล็กน้อย แต่ถ้าเป็นเขื่อนระบายน้ำ (Barrage) ขนาดใหญ่ หรือประตูระบายปากคลองส่งน้ำ (Head regulator) ขนาดใหญ่จะไม่มีโอกาสที่จะใช้ไม้อัดน้ำหรือแผงอัดน้ำ จำเป็นต้องใช้แผงเหล็กอัดน้ำ (Bulkhead gate) แทนซึ่งจะต้องออกแบบโดยฝ่ายเครื่องกล กรณีเช่นนี้จะไม่ทำช่องอัดน้ำ (Stop plank groove) แต่จะติดตั้งเหล็ก I-beam ไว้ที่หัวตอม่อเพื่อเป็นที่รับแผงเหล็กอัดน้ำดังกล่าวข้างต้น

สำหรับขนาดของช่องอัดน้ำและเหล็กฉากที่เหมาะสมกับความหนาของไม้อัดน้ำนั้นได้กำหนดขนาดมาตรฐานไว้ดังนี้

ความหนาของไม้อัดน้ำ (นิ้ว)	ขนาดช่องอัดน้ำ (นิ้ว)			ขนาดของเหล็กฉาก (นิ้ว)		
	(A)	(B)	(C)	(A)	(D)	(E)
2	$2\frac{1}{2}$	3	1/2	$2\frac{1}{2}$	2	1/4
3	3	4	3/4	3	$2\frac{1}{2}$	5/16
4	3	5	3/4	3	$2\frac{1}{2}$	5/16
6	4	7	1	4	3	3/8
8	5	9	$1\frac{1}{4}$	5	$3\frac{1}{2}$	3/8



4.7 <u>แผ่นรับบาน แผ่นกันกระทบ และยางกันน้ำบานระบาย</u>

(Gate seat, Wall plate and Gate seal)

เป็นส่วนประกอบของอาคารชลประทานในส่วนที่ป้องกันการรั่วของน้ำที่บานระบายในขณะที่บานระบายปิดอัดน้ำอยู่ ซึ่งจะขอแยกกล่าวในรายละเอียดแต่ละอย่างดังนี้

4.7.1 แผ่นรับบาน (Gate seat) บางครั้งก็เรียกว่าขรณีประตู เป็นแผ่นโลหะที่ไม่เป็นสนิม เช่นทองเหลือง ทองแดง หรือเหล็กสเตนเลส หนาไม่เกิน 1" มีความกว้าง 0.20 – 0.30 ม. ฝังไว้ที่พื้นตอม่อตรงแนวที่ขอบล่างของบานระบายจะวางอยู่บนพื้นตอม่อ ยึดติดโดยสลักเกลียวที่สามารถถอดเปลี่ยนได้ ผิวของโลหะดังกล่าวต้องเรียบและติดตั้งเสมอผิวของคอนกรีตพื้นตอม่อ

4.7.2 แผ่นกันกระทบ (Wall plate) เป็นโลหะที่มีสภาพการติดตั้งเช่นเดียวกับแผ่นรับบาน โดยติดตั้งไว้ที่ด้านข้างของตอม่อในแนวโค้งหรือดิ่งตามแนวการเลื่อนตัว ปิด–เปิด ของบานระบายโค้ง (Radial gate) หรือบานระบายตรง (Vertical gate) เพื่อใช้เป็นที่ป้องกันขอบบานระบายกระแทกคอนกรีตของตอม่อและป้องกันน้ำรั่วด้านข้างบานระบายด้วย

4.7.3 ยางกันน้ำบานระบาย (Gate seal) เป็นแผ่นยางที่ติดไว้ที่ขอบบานระบายด้านล่างและด้านข้าง ซึ่งจะสัมผัสแนบสนิทกับแผ่นรับบาน และแผ่นกันกระทบ ในขณะที่บานระบายอยู่ในตำแหน่งที่ปิดกั้นน้ำ นอกจากนี้ในขณะเปิดหรือปิดบานระบาย การเสียดสีระหว่างยางกับแผ่นโลหะผิวเรียบจะทำให้เกิดการสึกหรอน้อยที่สุดด้วย

4.8 <u>ผนังคอนกรีตกันน้ำ</u> (Diaphragm wall)

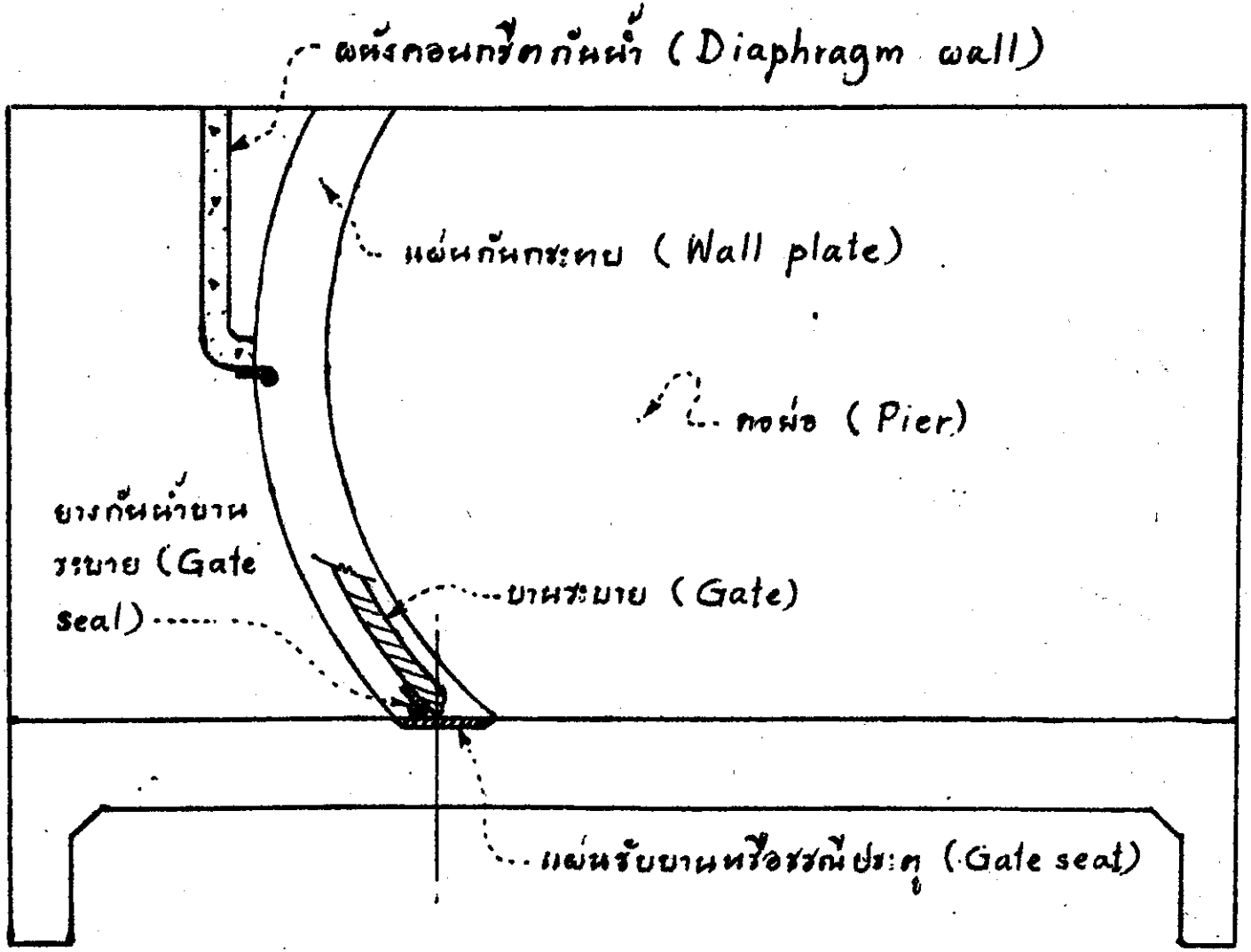
ในกรณีที่ประตูระบายมีลักษณะสูงเพราะระดับน้ำด้านหน้าอาคารลึกมาก แต่ปริมาณน้ำสูงสุดที่ต้องผ่านอาคารนั้นไม่ต้องการเปิดบานระบายจนสุดบาน จึงเห็นได้ว่าจะต้องทำขนาดของบานระบายให้สูงจนพ้นระดับน้ำด้านหน้าอาคารซึ่งจะแพงมากเกินไป จึงมักนิยมออกแบบผนังคอนกรีตปิดกั้นตอนบนของทอม่อ โดยเปิดช่องตอนล่างไว้ให้สูงพอที่จะผ่านปริมาณน้ำสูงสุดได้ โดยสามารถลดความสูงของบานระบายลงในลักษณะเช่นนี้ จะต้องติดตั้งแผ่นโลหะที่ทำหน้าที่กลายแผ่นรับบานไว้ที่ขอบล่างของผนังคอนกรีตกันน้ำ

การออกแบบผนังคอนกรีตกันน้ำนี้ให้คิดแรงดันน้ำส่วนที่อยู่เหนือขอบล่างกระทำต่อคานยึก (Fixed beam) ที่มีช่วงคาน (Span length) เท่ากับช่องผ่านน้ำ (Gate opening)

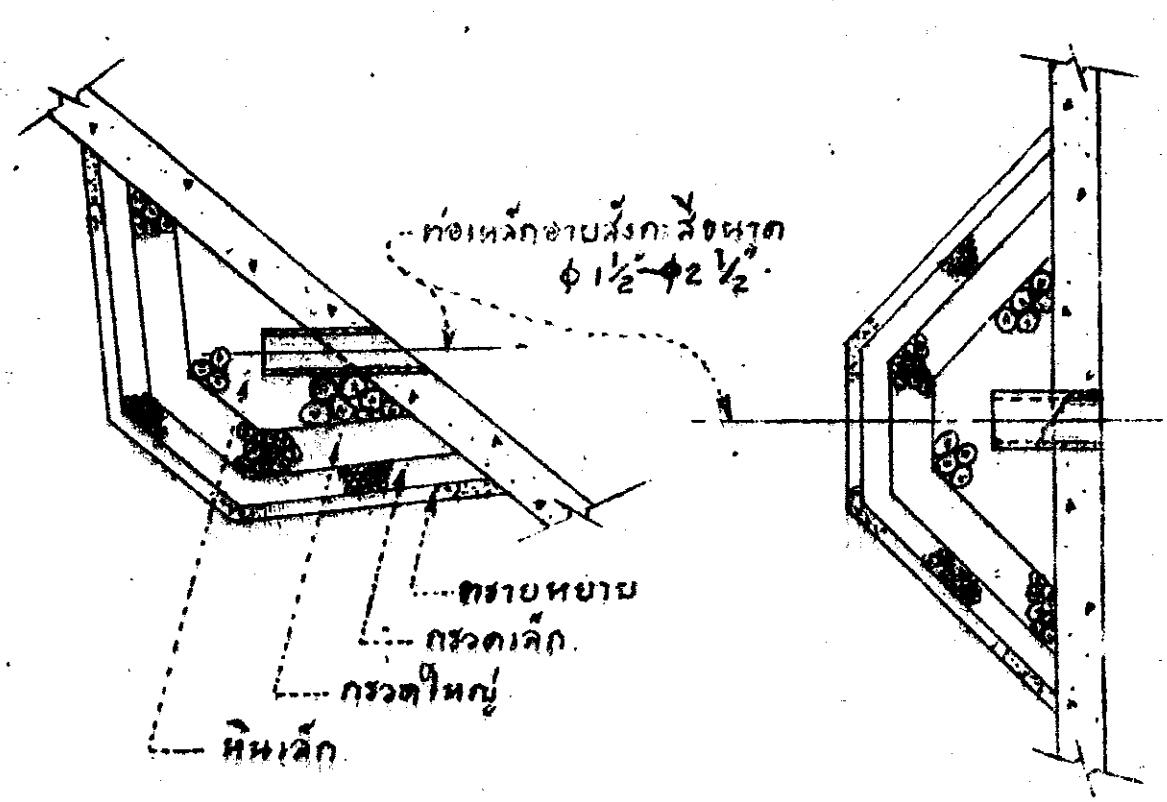
4.9 <u>รูระบายน้ำเปิดและรูระบายน้ำปิด</u> (Weep holes and flap valves)

ในส่วนประกอบบางส่วนของอาคารชลประทานที่ต้องรับแรงดันของดิน หรือแรงดันของน้ำ เช่น กำแพงหน้าอาคาร (Head wall) กำแพงกันดิน (Retaining wall) ตอม่อริม (Abutment) ลาดด้านข้างและก้นคลองดาด (Side slope and bed of lined canal) พื้นท้ายอาคาร (Downstream apron) เมื่อฝนตกน้ำฝนที่ซึมลงในดินจะไปเพิ่มปริมาณน้ำใต้ดิน ทำให้น้ำหนักของดินเพิ่มขึ้น หรือการลดระดับน้ำในคลองส่งน้ำในทันทีทันใด ดินลาดตลิ่งของอาคารคายน้ำออกไม่ทันก็จะไปเพิ่มแรงดันต่อกำแพงหรือลาดตลิ่ง จึงจำเป็นที่จะต้องหาทางระบายน้ำในดินดังกล่าวให้ออกมาอย่างรวดเร็วโดยที่ไม่มีตะกอนดินไหลปนมาด้วย จึงมักนิยมติดตั้งรูระบายน้ำเปิดเป็นระยะ ๆ ตามปริมาณน้ำที่จะระบายออก รูระบายน้ำเปิดนี้จะประกอบด้วยชั้นของ หิน กรวด ทราย เรียงลดหลั่นกันลงไปจากหยาบไปหาละเอียดแล้วฝังท่อขนาด ϕ 1 $\frac{1}{2}$" – ϕ 2 $\frac{1}{2}$" เป็นตัวรับน้ำจากชั้นที่หยาบที่สุดออกไปทิ้งด้านนอกอีกทีหนึ่ง ส่วนประกอบทั้งหมดนี้เรียกว่า Weep hole

สำหรับกรณีที่ระบายน้ำออกจากใต้พื้นอาคารเพื่อลดแรงดันน้ำใต้พื้นอาคาร (Uplift pressure นั้น เนื่องจาก ตะกอนทรายที่แขวนลอยมากับน้ำมีโอกาสที่จะไปอุดตันในท่อได้ง่าย ซึ่งจะทำให้รูระบายน้ำที่ติดตั้งไว้ระบายน้ำไม่ออก จึงต้องทำลิ้นปิด–เปิดอัตโนมัติครอบปลายท่อไว้ เพื่อว่าเมื่อแรงดันน้ำใต้พื้นอาคารสูงกว่าแรงดันน้ำบนพื้นอาคาร แรงดันดังกล่าวจะดันให้ฝาครอบ

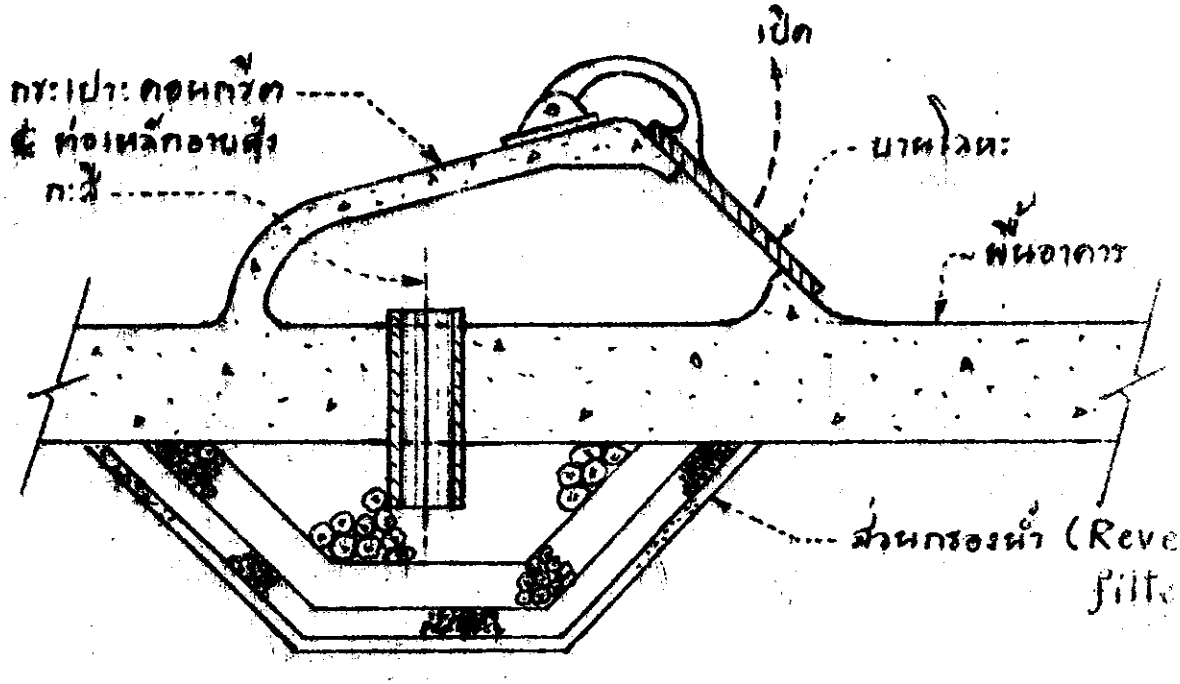


รูปตัดตามยาวของตอม่อแสดงส่วนประกอบในข้อ 4.7 และ 4.8



ใช้กับผลาดชัน ใช้กับกำแพงกั้น

รูปตัดแสดงระบายน้ำเปิด (Weep holes)



รูปตัดแสดงระบายน้ำปิด (Flap valve)

เปิดออก น้ำใต้พื้นอาคารก็จะไหลออกมาได้โดยไม่มีตะกอนดินออกมาด้วย และเมื่อแรงดันน้ำบนพื้นอาคารสูงกว่าก็จะดันให้ฝาครอบปิด ตะกอนทรายก็จะไม่สามารถไหลลงไปอุดตันในท่อได้ อุปกรณ์ดังกล่าวนี้รวมเรียกว่า Weephole and Flap valve

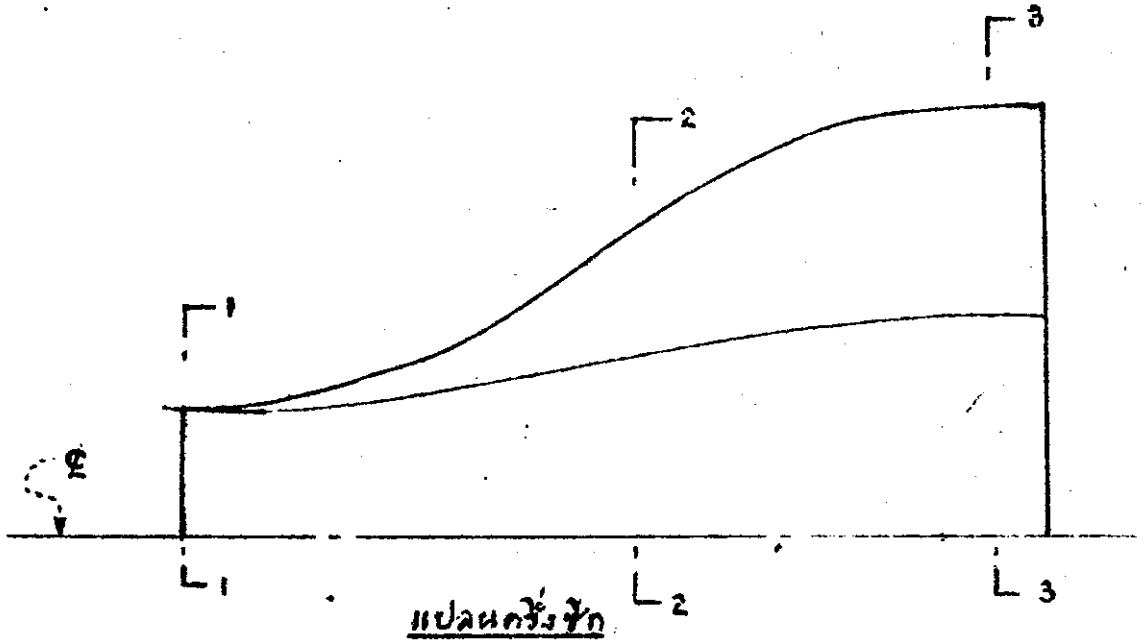
การออกแบบช่องระบายน้ำนี้ไม่ค่อยมีปัญหาอะไร เพราะมีแบบเป็นมาตรฐานแล้ว (ดังรูป) แต่ความสำคัญอยู่ที่การติดตั้ง เพราะการติดตั้งรูระบายน้ำจะต้องทำก่อนที่จะเทคอนกรีตส่วนของอาคาร น้ำปูนที่เป็นส่วนผสมของคอนกรีตจึงมักไหลลงไปในชั้นหิน กรวด และทรายที่เรียงเอาไว้ ทำให้ส่วนดังกล่าวขาดคุณสมบัติที่จะกรองน้ำได้ และใช้งานไม่ได้ในที่สุด จึงจำเป็นที่จะต้องพิถีพิถันในการติดตั้งเป็นพิเศษในขณะทำการก่อสร้าง

4.10 ช่วงต่อเชื่อม (Transition)

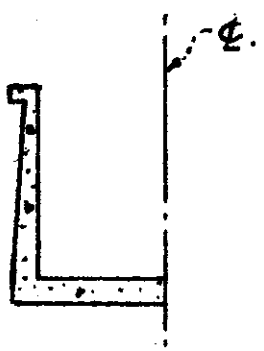
เป็นส่วนของอาคารที่ใช้ต่อเชื่อมทางน้ำเข้ากับอาคารชลประทาน หรือใช้ต่อเชื่อมทางน้ำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่เท่ากัน หรือรูปร่างของหน้าตัดไม่เหมือนกัน ในกรณีที่ใช้ต่อเชื่อมทางน้ำกับอาคารชลประทานนั้นจะต้องมีทั้งช่วงต่อเชื่อมเหนือน้ำ (Inlet transition) และช่วงต่อเชื่อมท้ายน้ำ (Outlet transition) แต่ถ้าเป็นการต่อเชื่อมทางน้ำเข้าด้วยกันจะใช้ช่วงต่อเชื่อมเพียงอันเดียว จุดประสงค์ของการใช้ช่วงต่อเชื่อมก็เพื่อต้องการลดความปั่นป่วนในการไหลของน้ำที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดที่ไม่เท่ากันหรือไม่เหมือนกันโดยไม่เกี่ยวข้องกับพลังน้ำ (Hydraulic energy) ที่เกิดขึ้นเลย

4.10.1 แบบของช่วงต่อเชื่อม (Types of Transition) แบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

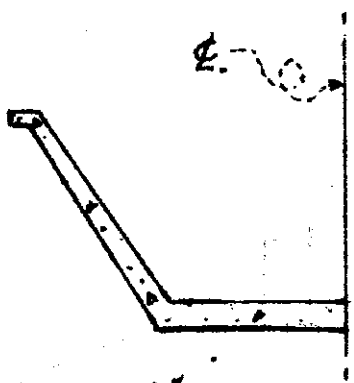
4.10.1.1 ช่วงต่อเชื่อมแบบขอบโค้ง (Streamline warped transition) เป็นแบบที่มีรูปร่างกลมกลืนตามแนวเส้นการไหลของน้ำ (Streamlines) ให้มากที่สุด จึงให้คุณสมบัติทางชลศาสตร์ดีมาก (Good hydraulic property) เกิดการสูญเสียระดับน้ำน้อย (Minimum headlocs) และเกิดการปั่นป่วนของการไหลน้อยที่สุดด้วย จึงเหมาะที่จะใช้กับอาคารขนาดใหญ่ที่ผ่านปริมาณน้ำจำนวนมาก แนวเส้นขอบคลื่งและเชิงลาดของช่วงต่อเชื่อมแบบนี้จะเป็นโค้งกลับ (Reversed curves) และส่วนลาดเทของลาดคลื่ง (Side slope) จะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่แนวคิ่งจนกระทั่งไปเท่ากับส่วนลาดเทของคลื่งของทางน้ำ จึงให้ความยุ่งยากในการก่อสร้างพอสมควร



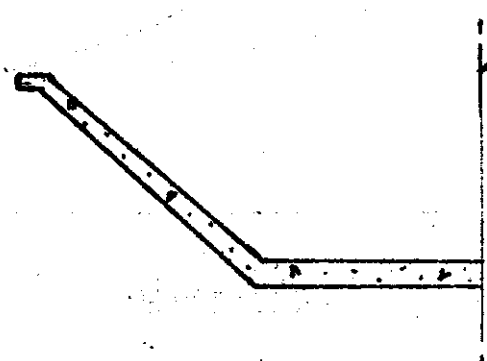
แปลนครึ่งซีก



รูปตัด 1 – 1



รูปตัด 2 – 2



รูปตัด 3 – 3.

รูปแสดงช่วงต่อเรือมแบบขอบโค้ง
(Streamline - warped transition)

4.10.1.2 ช่วงต่อเชื่อมแบบขอบตรง (Straight-warped transition) เป็นแบบที่ดัดแปลงมาจากแบบแรก เพื่อให้ก่อสร้างง่ายขึ้น แต่คุณสมบัติทางชลศาสตร์จะไม่ดีนัก เหมาะสำหรับอาคารขนาดใหญ่และขนาดกลาง

4.10.1.3 ช่วงต่อเชื่อมแบบลาดด้านข้างสองชั้น (Broken back or Dog leg transition) เป็นแบบที่แนวเส้นขอบตลิ่งและแนวเส้นเชิงลาดเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับช่วงต่อเชื่อมแบบขอบตรง แต่ลาดด้านข้างนั้นทำเป็นสองช่วงตอนคือ ตอนล่างมีส่วนลดลาดลงที่เท่ากับส่วนลดลาดของทางน้ำ และตอนบนเป็นแนวลิ่ง คุณสมบัติทางชลศาสตร์พอใช้ได้ และเป็นแบบที่ก่อสร้างง่าย เหมาะสำหรับอาคารชลประทานขนาดเล็ก และอาคารในระบบส่งน้ำทั่วไป

4.10.2 การออกแบบชลศาสตร์ (Hydraulic design of Transition) จะต้องคำนวณตามขั้นตอนดังนี้

4.10.2.1 การกำหนดความยาวของช่วงต่อเชื่อม จะกำหนดขึ้นมาด้วยมุมที่เกิดจากเส้นผิวน้ำสูงสุดตัดกับลาดด้านข้าง ซึ่งทำกับแนวศูนย์กลางของช่วงต่อเชื่อมนั้น (สมมติให้เป็นมุม θ) เกณฑ์การกำหนดค่าของมุม θ มีดังนี้

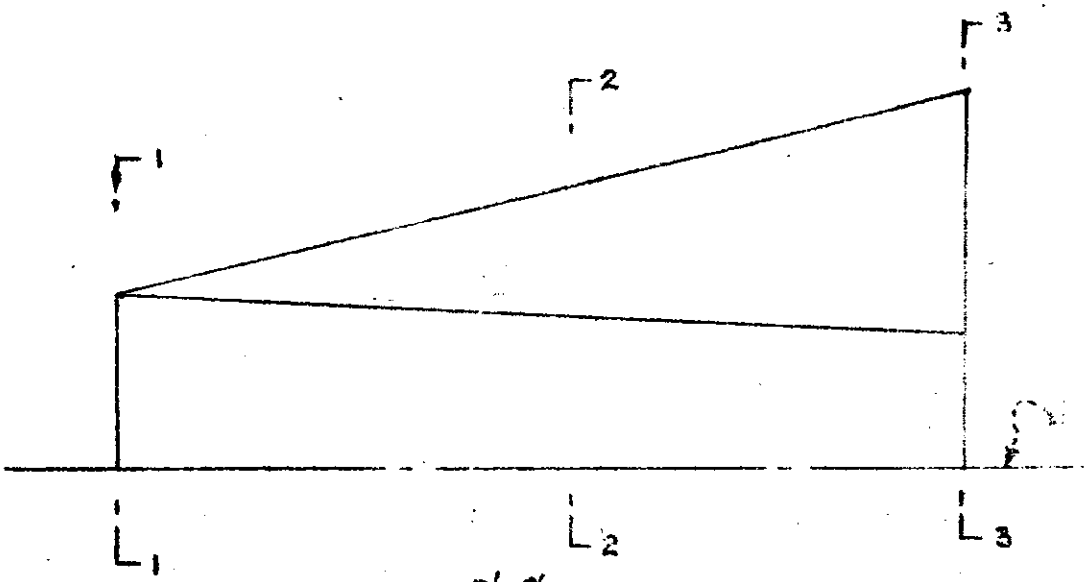
– ในกรณีที่เป็นอาคารใหญ่ และต้องการคุณสมบัติทางชลศาสตร์ดีที่สุด ให้ใช้ $\theta = 27\frac{1}{2}^\circ$ สำหรับช่วงต่อเชื่อมด้านเหนือน้ำ $\theta = 22\frac{1}{2}^\circ$ สำหรับช่วงต่อเชื่อมด้านท้ายน้ำ

– ในกรณีที่เป็นอาคารใหญ่ แต่ต้องการลดค่าก่อสร้าง อาจจะใช้ $\theta = 25^\circ$ สำหรับทั้งช่วงต่อเชื่อมด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำก็ได้

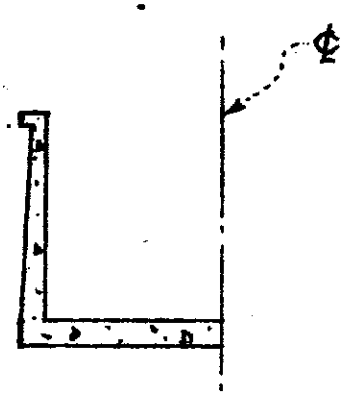
– ในกรณีที่เป็นอาคารเล็กและอาคารนั้นทำหน้าที่อัดน้ำด้วย (Check) อาจจะใช้ $\theta = 30^\circ$ สำหรับช่วงต่อเชื่อมด้านเหนือน้ำ

นอกจากนี้สำหรับพื้นของทางช่วงต่อเชื่อมแบบลาดด้านข้างสองชั้น การกำหนดให้มีความลาดชันไม่เกิน 1:6 เพื่อป้องกันการกัดเซาะทางด้านท้ายน้ำ เว้นเสียแต่จะเรียงหินด้านท้ายน้ำให้มีความยาวเพียงพอเท่านั้น

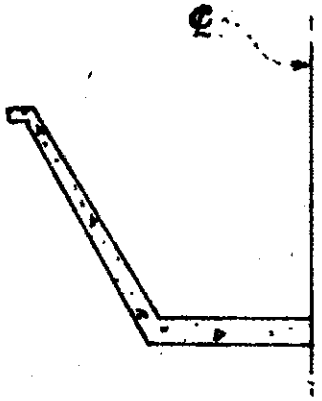
4.10.2.2 การหาการสูญเสียระดับน้ำที่ผ่านช่วงต่อเชื่อม การออกแบบเพื่อช่วยให้การไหลของน้ำผ่านช่วงต่อเชื่อมเป็นไปโดยราบเรียบและเกิดการสูญเสียระดับน้ำน้อยที่สุด ควร



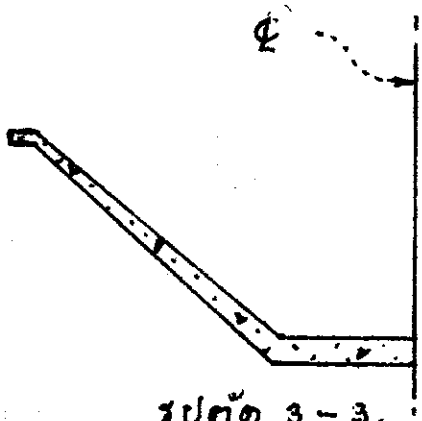
แปลนครึ่งซีก



รูปตัด 1 – 1

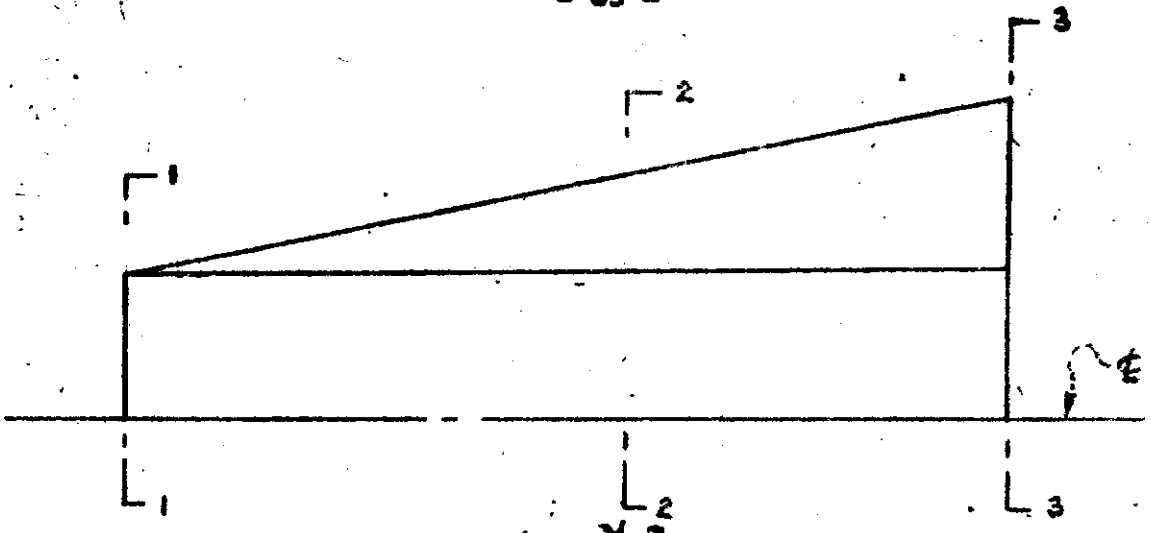


รูปตัด 2 – 2

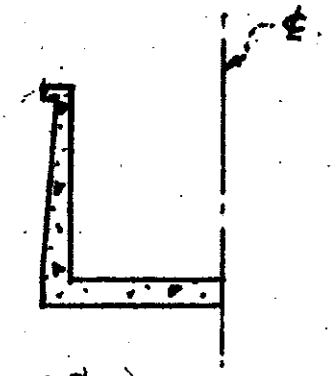


รูปตัด 3 – 3

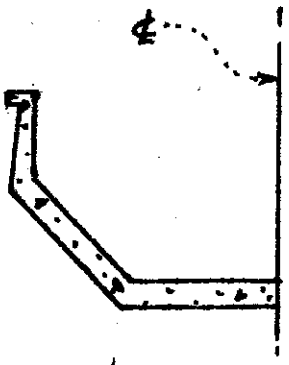
รูปแสดงช่วงต่อเชื่อมแบบขอบตรง
(Straight-warped transition)



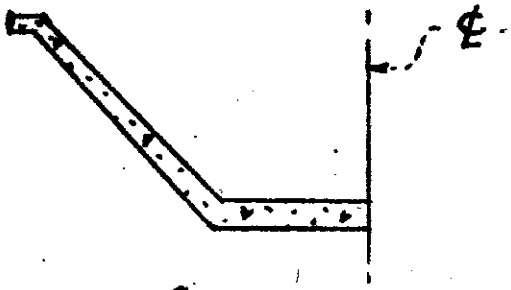
แปลนครึ่งซีก.



รูปตัด 1-1



รูปตัด 2-2.



รูปตัด 3-3.

รูปแสดงช่วงต่อเชื่อมแบบลาดด้านข้างสองชั้น
(Broken back or dog leg transition.)

กำหนดให้ขอบบนของช่องเปิด (Opening) ของอาคารอยู่ต่ำกว่าระดับไม่น้อยกว่า 3" สำหรับช่วงต่อเชื่อมด้านเหนือน้ำ ส่วนขอบบนของช่องเปิดของอาคารด้านช่วงต่อเชื่อมด้านท้ายน้ำไม่ควรให้ต่ำกว่าระดับผิวน้ำเลย แต่ถ้าจะต้องมีระดับต่ำกว่าระดับผิวน้ำจะต้องต่ำกว่าไม่เกิน $\frac{1}{6}$ เท่าของความลึกของช่องเปิดของอาคาร ถ้าต่ำกว่าเกิน $\frac{1}{6}$ เท่าของความลึกของช่องเปิดของอาคาร จะต้องคำนวณค่าการสูญเสียระดับน้ำ โดยหลักการของการไหลสู่ที่กว้างโดยกระทันหัน (Sudden enlargement) แทนการหาค่าการสูญเสียระดับน้ำที่จะกล่าวต่อไป

ค่าการสูญเสียระดับน้ำจะหาได้จากสูตร

$$h_L = K \cdot \frac{(v_1^2 \sim v_2^2)}{2g}$$

ในเมื่อ h_L = ค่าการสูญเสียระดับน้ำ เป็น ม.

v_1 และ v_2 = ความเร็วของน้ำที่ปลายทั้งสองของช่วงต่อเชื่อม เป็น ม./วินาที

g = ความโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 ม./(วินาที)^2

K = สัมประสิทธิ์ซึ่งดูได้จากตารางข้างล่างนี้

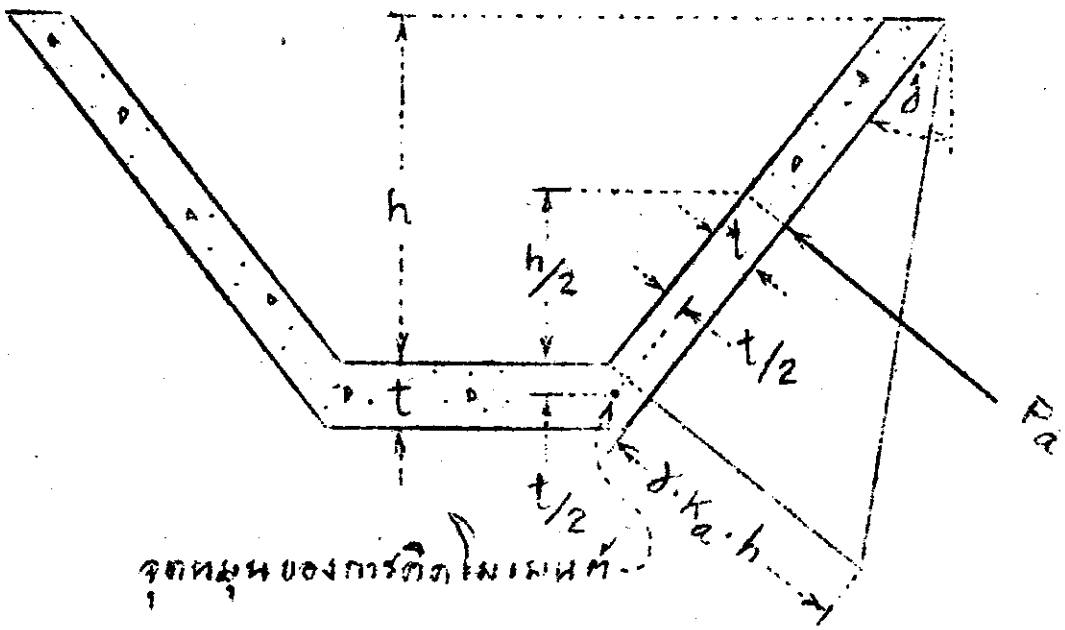
<u>ตารางสัมประสิทธิ์ที่ใช้หาค่าการสูญเสียระดับน้ำในทางผ่านน้ำแบบต่าง ๆ</u>

ชนิดของช่วงต่อเชื่อม	สัมประสิทธิ์ K	
	เหนือน้ำ	ท้ายน้ำ
แบบขอบโค้งสู่รูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	0.1	0.2
แบบขอบตรงสู่รูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	0.2	0.3
แบบขอบตรง (ขอบล่างพอกมุม) สู่ท่อ	0.3	0.4
แบบสองชั้นสู่รูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	0.3	0.5
แบบสองชั้นสู่ท่อ	0.4	0.7
แบบปิดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าสู่รูปตัดกลม	0.1	0.2

4.11.3 การออกแบบโครงสร้าง (Structural design of Transition) ในการคำนวณค้านโครงสร้างของช่วงต่อเชื่อมทุก ๆ แบบ จะต้องพิจารณาตัดความยาวของช่วงต่อเชื่อมเป็นช่วง ๆ เพื่อลดเหล็กเสริมและลดความหนาของคอนกรีตเป็นระยะ ๆ ไป ส่วนวิธีการคำนวณนั้นจะแบ่งเป็น 2 พวก

พวกที่ 1 แบบขอบโค้งและแบบขอบตรง (Streamline Warped and Straight-Warped Transition)

– กรณีที่ความกว้างของพื้นช่วงต่อเชื่อมไม่มากนักจะออกแบบให้ลาดด้านข้างและพื้นเป็นคอนกรีตชิ้นเดียวกันตลอด โดยคิดว่าลาดด้านข้างเป็นคานยื่น (Cantilever beam) ที่รับแรงดันของดิน ดังรูปข้างล่างนี้



$$Pa = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot \frac{Ka}{\cos j}$$

$$Ka = \frac{\cos^2(\phi + j)}{\cos^2 j\left(1 + \frac{\sin\phi}{\cos j}\right)^2}$$

ในเมื่อ P_a = แรงดันดินต่อความยาวของช่วงต่อเชื่อม 1 ม. เป็น กก.

γ = น้ำหนักของดิน เป็น กก./ม^3

h = ความสูงของลาดด้านข้าง เป็น ม.

ϕ = มุมทรงตัวของดิน เป็น องศา

i = มุมเอียงจากแนวดิ่งของลาดด้านข้าง เป็นองศา

K_a = ค่าคงที่

ค่าของโมเมนต์ที่เกิดกับลาดด้านข้างคิดจากแรง P_a กับน้ำหนักคอนกรีตของลาดด้านข้างนั้น ส่วนแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ P_a

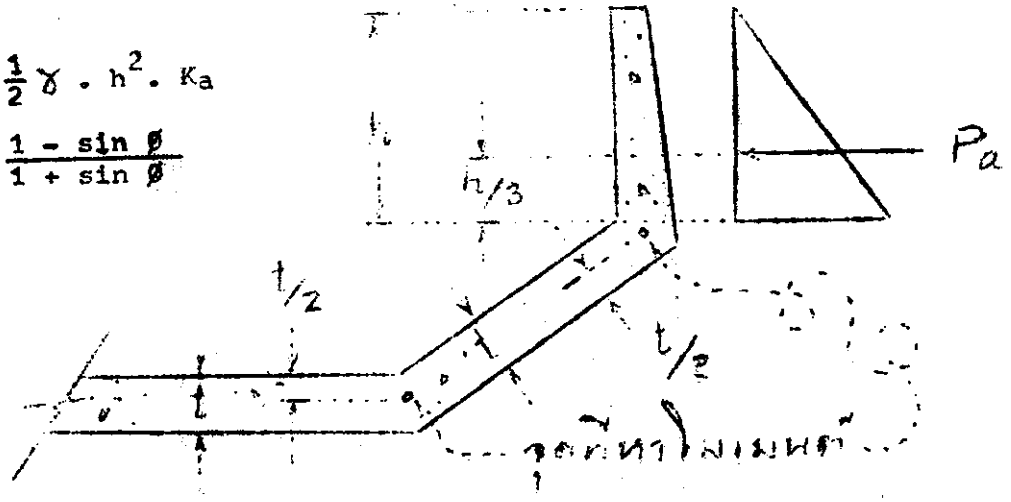
สำหรับส่วนพื้นให้คิดน้ำหนักของลาดด้านข้างทั้งสองมาเฉลี่ยบนความกว้างของพื้นเป็นน้ำหนักแผ่ (Distributed load) ที่กระทำใต้พื้นนั้น โดยมีค่าของโมเมนต์ที่เกิดจากลาดด้านข้างมากระทำที่ขอบพื้นทั้งสองอีกทีหนึ่ง

— กรณีที่ความกว้างของพื้นช่วงต่อเชื่อมนั้นกว้างมากอันอาจเป็นผลให้ต้องคำนวณความหนาและจำนวนเหล็กเสริมที่พื้นมากเกินไป มักนิยมแยกตัวพื้นตัดขาดจากลาดด้านข้างทั้งสองข้าง และคำนวณให้พื้นวางอยู่บนพื้นดินมีความหนาพอที่จะต้านแรงดันน้ำใต้พื้น (Uplift pressure) ได้ ส่วนเหล็กให้ใส่เหล็กเสริมเผื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature steel) เพียงอย่างเดียว สำหรับลาดด้านข้างถ้าสูงไม่มากนักให้คำนวณเป็นคานยื่น (Cantilever beam) แต่ถ้าสูงมากให้คิดเป็นบัทเตรส (Buttress) หรือเคาน์เตอร์ฟอร์ท (Counterfort) โดยรับแรงดันของดินและน้ำหนักตัวลาดด้านข้างเอง และต้องกำหนดความกว้างของฐานรับลาดด้านข้างให้พอที่จะต้านทานการพลิกหงาย (Overturning) และการเลื่อนตัว (Sliding) โดยอาจจะใส่กำแพงล่าง (Cutoff) ด้วยก็ได้

<u>พวกที่ 2</u> แบบลาดด้านข้างสองชั้น (Broken back Transition) การออกแบบลาดด้านข้างให้คิดแรงดันดินปกติตามสูตรทางกลศาสตร์ของดินที่กระทำเฉพาะช่วงที่เป็นกำแพงตั้งดิ่งเท่านั้น ส่วนการหาค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในช่วงที่เป็นแนวเอียงจะต้องคิดแรงดันดินและน้ำหนักกดของตัวลาดด้านข้างกับกำแพงตั้งดิ่งด้วยเสมอ ส่วนพื้นนั้นให้คิดเช่นเดียวกับพวกที่ 1 แต่แบบนี้ไม่นิยมแยกพื้นกับลาดด้านข้างจากกันเพราะเป็นช่วงต่อเชื่อมที่ใช้กับอาคารขนาดเล็ก จึงมีความกว้างของพื้นไม่มากนัก

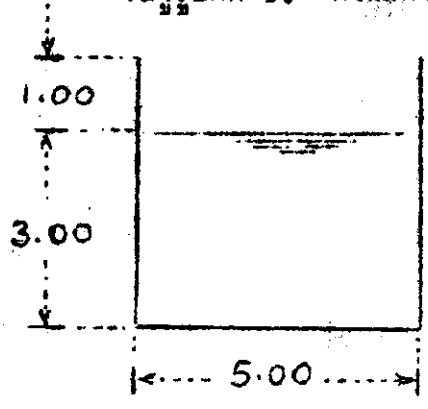
$$P_a = \frac{1}{2}\gamma \cdot h^2 \cdot K_a$$

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

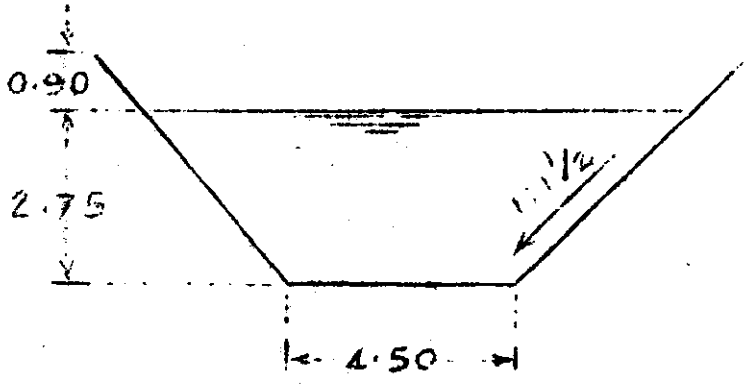


รูปแสดงลักษณะแรงดันดิน

ตัวอย่าง ให้กำหนดความยาวช่วงต่อเชื่อมกำแพงท้ายน้ำของอาคารใหญ่ โดยต่อเชื่อมจากรูปตัด ก. ไปสู่รูปตัด ข. ดังแสดงข้างล่างนี้



รูปตัด ก.



รูปตัด ข.

วิธีทำ

ความกว้างของผิวน้ำของรูปตัด ก. คือ 5.00 ม.

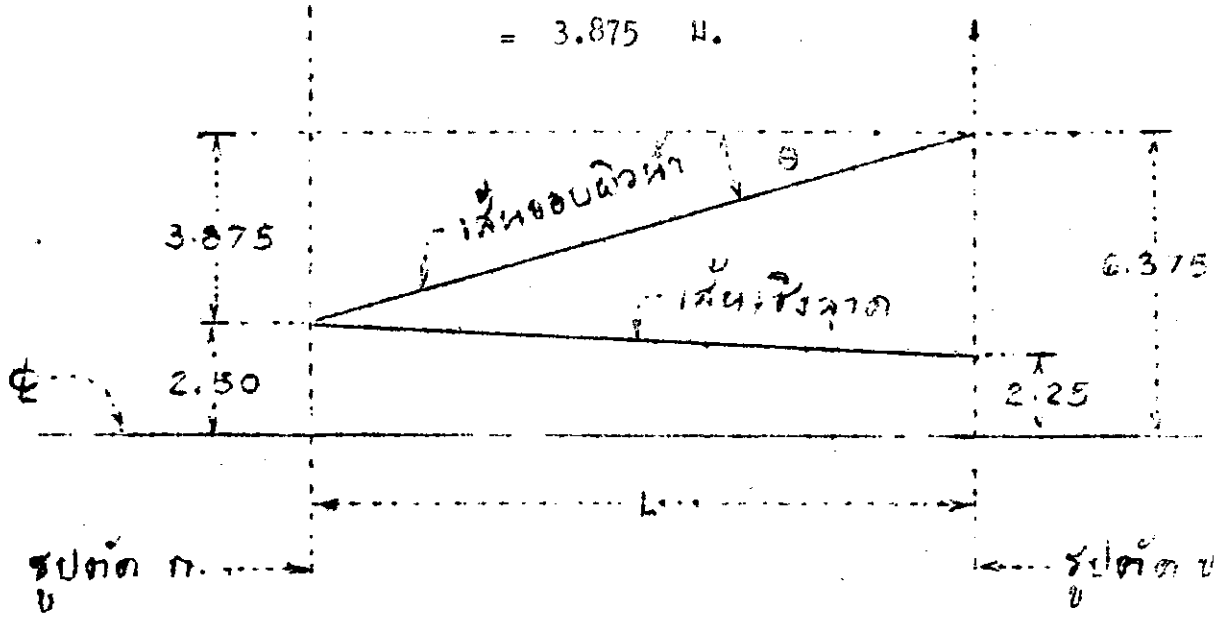
และความกว้างของผิวน้ำของรูปตัด ข. = 4.50 + 2(2.75 + 1.5)

= 12.75 ม.

∴ ลอยระดับผิวน้ำที่รูปตัด ก. กับรูปตัด ข. จึงต่างกันในแนวดิ่งเป็นระยะ

$= \frac{1}{2}(12.75 - 5.00)$

$= 3.875$ ม.



<u>แปลนของช่วงต่อเชื่อม</u>

สำหรับอาคารขนาดใหญ่กำหนดให้ใช้มุมที่เส้นขอบผิวน้ำกระทำกับแนวศูนย์กลาง (θ) มีขนาดไม่เกิน $22\frac{1}{2}^\circ$

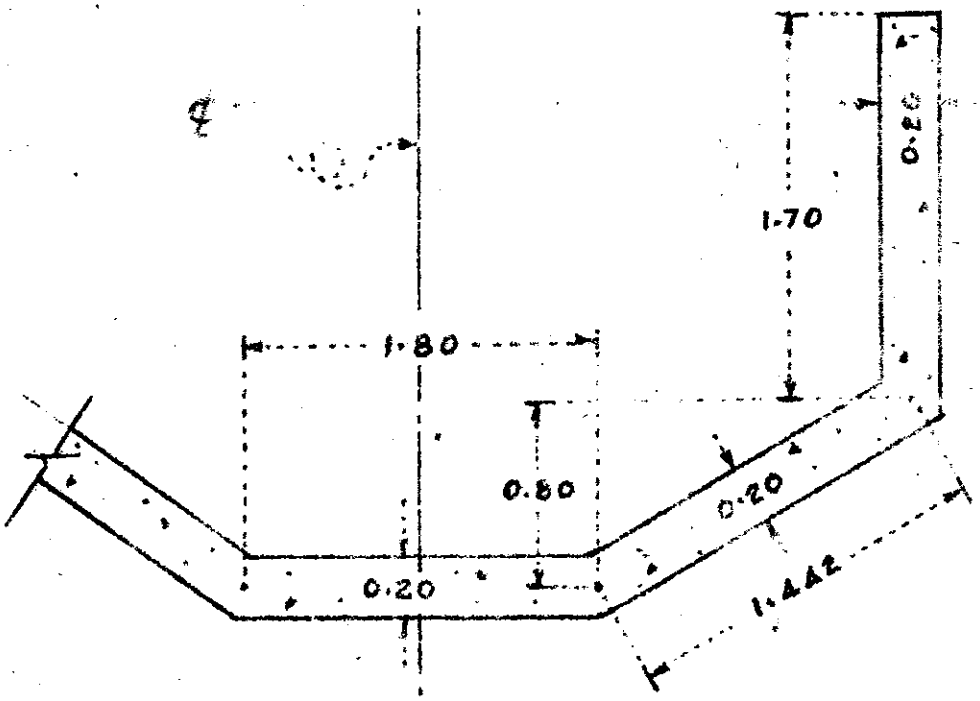
ดังนั้น $\frac{3.875}{L} = \tan 22\frac{1}{2}^\circ$

$L = \frac{3.875}{0.4142}$

$= 9.355$ ม.

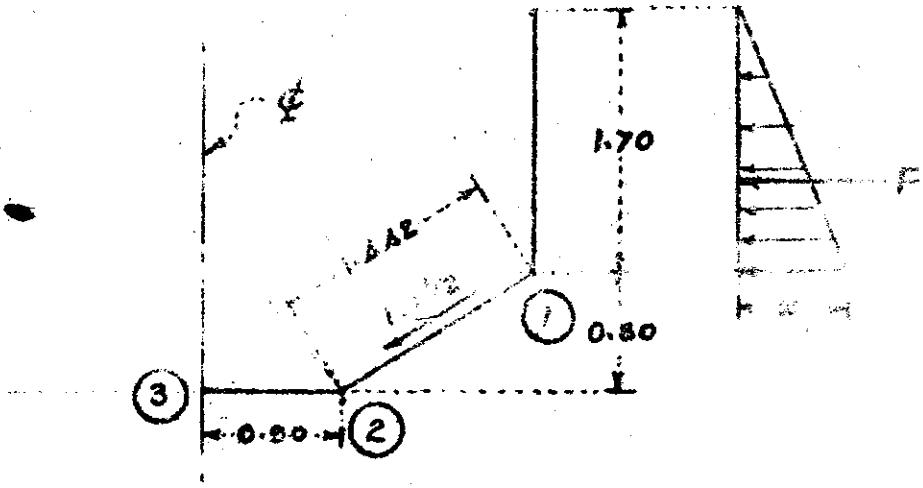
∴ ควรใช้ช่วงต่อเชื่อมด้านท้ายน้ำยาว 9.50 ม.

<u>ตัวอย่าง</u> ให้ออกแบบช่วงต่อเชื่อมแบบลาดด้านข้างสองชั้น (Broken back transition) ตามรูปตัดที่กำหนดให้ โดยกำหนดให้ดินด้านข้างเป็นดินอิ่มตัว (Saturated earth) มุมทรงตัวของดิน (Angle of repose) 30° ไม่คิดน้ำหนักส่วนเกิน (Sureharge)



วิธีทำ

สมมุติความหนาของผนังกำแพงส่วนเรียวและกำแพงหัง 0.20 ม.



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

เมื่อ $\phi = 30^\circ$

$$K_a = \frac{1 - \sin 30^\circ}{1 + \sin 30^\circ} = \frac{1}{3}$$

$w = \frac{1}{3}(2,150-1,000)\times 1.70 + (1,000\times 1.70) = 2,352$ กก./ม.^{2}

$V_1 = \frac{1}{2} \times 2,352 \times 1.70 = 1,999$ กก.

$M_1 = 1,999 \times \frac{1.70}{3} = 1,133$ กก.-ม.

$M_2 = 1,999(0.80 + \frac{1.70}{3}) - (1.70 \times 0.20 \times 2,400 \times 1.20) -$

$(0.20 \times 1.442 \times 2,400 \times 0.60) = 1,338$ กก.-ม.

$d_V = \frac{1,999}{100 \times 0.87 \times 5.2} = 4.419$ ซม.

$d_M = \sqrt{\frac{1,338 \times 100}{13.7 \times 100}} = 9.88$ ซม.

$\therefore$ ใช้ d = 15 ซม. และความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็ก 5 ซม.

$A_{s_1} = \frac{1,133 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 15} = 6.20$ ซม.^{2}

$A_{s_2} = \frac{1,338 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 15} = 7.32$ ซม.^{2}

$\Sigma_o = \frac{1,999}{7.9 \times 0.87 \times 15} = 19.39$ ซม.

เหล็กรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

$= 0.002 \times 100 \times 20 = 4.00$ ซม.^{2}

ดังนั้น จุด (1) ใช้เหล็ก ø 12 มม. @ 0.18

A_s = 6.28 ซม.^{2}, Σ_o = 20.94 ซม.

จุด (2) ใช้เหล็ก ø 12 มม. @ 0.15

A_s = 7.54 ซม.^{2} Σ_o = 23.18 ซม.

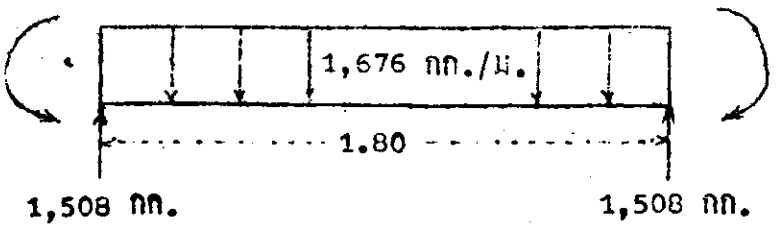
ส่วนเหล็กรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ø 9 มม. @ 0.15; A_s = 4.20 ซม.^{2}

น้ำหนักกำแพงตั้งกับกำแพงส่วนเอียง

= (1.70 + 1,442) x 0.20 x 2,400 x 2

= 3,016 กก.

คิดเป็นน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอ $\frac{3,016}{1.8}$ = 1,676 กก./ม.



รูปแสดงน้ำหนักที่กระทำแก่ผืน

$M_3 = M_{\text{ซ้าย}}$

= - 1,338 + (1,508 x 0.90) - (1,676 x 0.90 x 0.45)

- 1,338 + 1,357 - 679 = - 660 กก.- ม.

$A_{s_3} = \frac{660 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 15}$ = 3.61 ซม.^{2} < 4.00 ซม.^{2}

ใส่เหล็กรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแทน

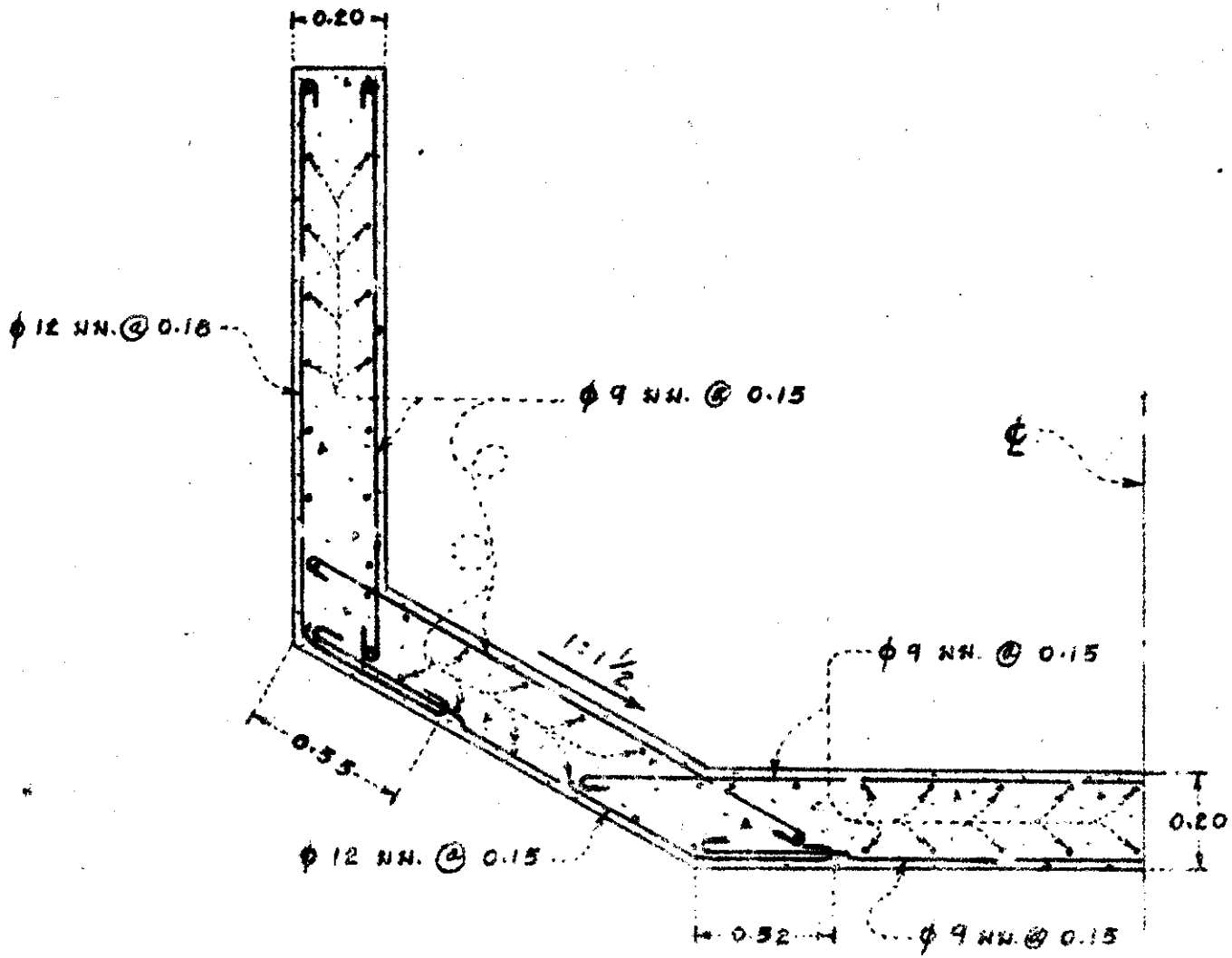
หาระยะการยึดเหล็ก

$f_{s_{(1)}} = \frac{M}{A_s \cdot j \cdot d} = \frac{1,133 \times 100}{6.28 \times 0.87 \times 15}$ = 1,382 กก./ซม.^{2}

$f_{s_{(2)}} = \frac{1,338 \times 100}{7.54 \times 0.87 \times 15}$ = 1,359 กก./ซม.^{2}

$L = \frac{f_s \cdot d}{4U}$

$L_{(1)} = \frac{1,382 \times 1.20}{4 \times 7.9}$ = 52.48 ≈ 0.55 ม.


0.20
ϕ 12 NN. @ 0.18
ϕ 9 NN. @ 0.15
℄
1:1½
ϕ 9 NN. @ 0.15
0.55
ϕ 12 NN. @ 0.15
0.20
0.52
ϕ 9 NN. @ 0.15

$$L_{(2)} = \frac{1.358 \times 1.2}{4 \times 7.9} = 513617 \text{ ...}$$

$$\simeq 0552 \text{ ม.}$$

4.11 <u>ตอม่อ</u> (Piers) ส่วนประกอบของอาคารประเภทเขื่อนระบายน้ำ (Barrage) ประตูระบายปากคลองส่งน้ำชนิดมีตอม่อและบานบังคับน้ำ (Head regulator) ประตูระบายอัดน้ำกลางคลองประเภทมีตอม่อและบานบังคับน้ำ (Check regulator) จะต้องมีตอม่อเป็นส่วนประกอบสำหรับติดตั้งบานระบาย (Gate) สพานเครื่องกว้านบานระบาย (Operating platform) และสพานเดินรถ (Service bridge) เสมอ

ในการคำนวณออกแบบตอม่อนั้น น้ำหนักต่าง ๆ ที่จะบรรทุกอยู่บนตอม่อจะประกอบด้วยน้ำหนักของสิ่งเหล่านี้

4.11.1 สพานเดินรถ (Service bridge) ใช้หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณออกแบบ [illegible] การของสพานทางหลวงทั่วไปกับน้ำหนักของตัวสพาน (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกแห่งการ (Live load) จะรวมมากดลงบนตอม่อทั้งสิ้น โดยมีหลักเกณฑ์ดังนี้

4.11.2 สพานเครื่องกว้านบานระบาย (Operating platform) ต้องกำหนดให้เป็นคานธรรมดา (Simple beam) พาดระหว่างตอม่อรับน้ำหนักต่าง ๆ ดังนี้

4.11.2.1 น้ำหนักของตัวสพาน (Dead load) ซึ่งใช้ขนาดความกว้างมาตรฐานไม่น้อยกว่า 2.00 ม. ความหนาคิดตามโมเมนต์ และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักต่าง ๆ

4.11.2.2 น้ำหนักบรรทุก (Live load) อื่น ๆ จะประกอบด้วย

- น้ำหนักของเครื่องกว้านและล้อม้วนลวด (Drivers and drums)

จะกำหนดขึ้นจากอัตรากำลังยก (Lifting capacity) ของเครื่องกว้านนั้น ๆ คือ

<u>อัตรากำลังยก</u>	<u>น้ำหนักเครื่องกว้าน</u>	<u>น้ำหนักล้อม้วนลวด 1 ชุด</u>
(ตัน)	(กก.)	(กก.)
4	945	460
6	1,145	680
12	1,600	760

- ขนาดและน้ำหนักของบานระบายที่เหมาะสมกับเครื่องกว้านแต่ละขนาดนั้นมีเกณฑ์ดังนี้

อัตรากำลังยกของเครื่องกว้าน (ตัน)	พื้นที่ผิวหน้าของบานระบาย ($ม.^2$)
2	12
4	20
6	26
9	35

- ความฝืดที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของขอบบานระบายกับแผ่นกันกระแทก (Wall plate) ของบานระบายแต่ละแบบนั้นหาได้จากผลคูณระหว่างแรงดันน้ำทั้งหมดที่กระทำต่อบานระบายกับค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดซึ่งมีค่าดังนี้

ชนิดของบานระบาย	สัมประสิทธิ์
บานเหล็กตรงมีล้อที่ขอบบาน	0.05
บานเหล็กตรงไม่มีล้อที่ขอบบาน หรือบานไม้ที่มีขอบเป็นโลหะ	0.30
บานไม้ไม่มีล้อและไม่มีขอบโลหะ	0.60
บานโค้ง	ใช้ค่า 75 กก. ต่อความยาวขอบบาน 1.00 ม. (คิดแต่ละขอบ)

สำหรับการคำนวณออกแบบตอม่อจะแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ ตอม่อกลาง (Intermediate piers) ประเภทหนึ่ง และตอม่อริม (Abutments) อีกประเภทหนึ่ง โดยแยกขั้นตอนเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ก. การกำหนดความหนาของตอม่อมีเกณฑ์กำหนดดังตารางข้างล่างนี้

ชนิดของตอม่อ	ความสูง (ม.)	ความหนาอย่างน้อยที่สุดที่กำหนดให้ใช้ (ซม.)
1. ตอม่อริม หรือกำแพงกันดิน ชนิดที่เป็นคานยื่น		
– เสริมเหล็กผิวเดียว	0–2.5	8 ซม. ต่อความสูง 1 ม. แต่ต้องไม่น้อยกว่า 10 ซม.
– เสริมเหล็กสองผิว	0–2.5	20
	> 2.5	20 ซม. บวกกับอีก 5 ซม. ของทุก ๆ ความสูง 1 ม. ที่เกิน 2.5 ม.
2. กำแพงข้างของท่อสี่เหลี่ยม หรือตอม่อริมกับลาดด้านข้าง ของช่วงต่อเชื่อมที่เป็นเลาน์ เตอร์ฟอร์ท หรือบัสเตรส ซึ่งต้องเสริมเหล็กสองผิว	0–2.5	20
	> 2.5–3.0	22.5
	> 3.0–3.5	25
	> 3.5–4.0	27.5
	> 4.0–5.1	30
3. ตอม่อกลางคอนกรีตเสริมเหล็ก	0–5.0	10 ซม. ทุก ๆ ความสูง 1 ม. และต้องไม่น้อยกว่า 20 ซม.
	> 5.0	ต้องกำหนดความหนาเป็นพิเศษ
4. ตอม่อกลางคอนกรีตล้วน หรือหินก่อ	0–3.0	50
	> 3.0	กำหนดโดยอัตราส่วนระหว่างความหนาต่อความสูงจะต้องไม่น้อยกว่า 1/6
5. กำแพงหรือตอม่อใด ๆ ก็ตาม ถ้าเสริมเหล็กสองผิวจะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 20 ซม. เสมอ		

ข. การคำนวณค่าโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปคำนวณเหล็กเสริมนั้น สำหรับตอม่อริมให้กำหนดว่าด้านในน้ำแห้ง ส่วนด้านนอกมีดินถมอัดกระทุ้งแน่นสูงเท่าความเป็นจริงในภูมิประเทศ รวมกับส่วนเผื่อของน้ำหนัก (Surcharge) เทียบเท่ากับดินแห้งสูงไม่น้อยกว่า 60 ซม. ส่วนตอม่อกลางให้คิดว่าด้านหนึ่งน้ำแห้งและอีกด้านหนึ่งมีน้ำเต็มที่ถึงระดับสันบานระบาย และถือว่าโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าเท่ากันทั้งสองข้าง

ค. การเสริมเหล็กในตอม่อทั้งสองประเภทนี้ให้ถือว่าเหล็กตั้งเป็นเหล็กเสริมหลัก (Main reinforcement) และให้ตัดช่วงตอนความสูงของตอม่อเป็นระยะ ๆ เพื่อลดจำนวนเหล็กเสริมหลักลงตามความสูงตอม่อที่ลดลงด้วย ส่วนเหล็กนอนนั้นให้คิดเป็นเหล็กเสริมเพื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature steel) ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในบทที่ 2

4.12 <u>แท่นรับแกนหมุนบานระบาย</u> (Gate pin bearing supports)

แท่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ติดตั้งไว้ด้านข้างของตอม่อเพื่อใช้เป็นที่ติดตั้งแกนหมุนบานระบายนี้ใช้เฉพาะกรณีที่บานระบายเป็นบานโค้ง (Radial gate) เท่านั้น บานระบายแบบนี้ใช้เป็นโครงยก การกำหนดขนาดและคำนวณเหล็กเสริมนั้นจะต้องให้รับได้ทั้งแรงดันของน้ำที่กระทำต่อบานระบายและน้ำหนักของบานระบายเองด้วย ซึ่งมีแนวทางคำนวณแยกเป็น 2 ส่วนคือ

4.12.1 การออกแบบแท่นรับแกนหมุน เป็นการกำหนดขนาดและเสริมเหล็กในตัวแท่นรับแกนหมุนบานระบายมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

4.12.1.1 การกำหนดความสูงของส่วนที่เกี่ยวข้องออกมาในรูปของส่วนเผื่อความสูง (Freeboard) ของส่วนต่าง ๆ (ที่มีค่าน้อยที่สุด) ซึ่งจะมีค่าสัมพันธ์กับความลึกของน้ำหน้าบานระบาย (D) โดยมีสูตรดังนี้

- ส่วนเผื่อความสูงของบานระบาย (Freeboard of gate

$$F_G = 0.10 + 0.05\ D$$

- ส่วนเผื่อความสูงของช่วงต่อเชื่อม (Freeboard of transition)

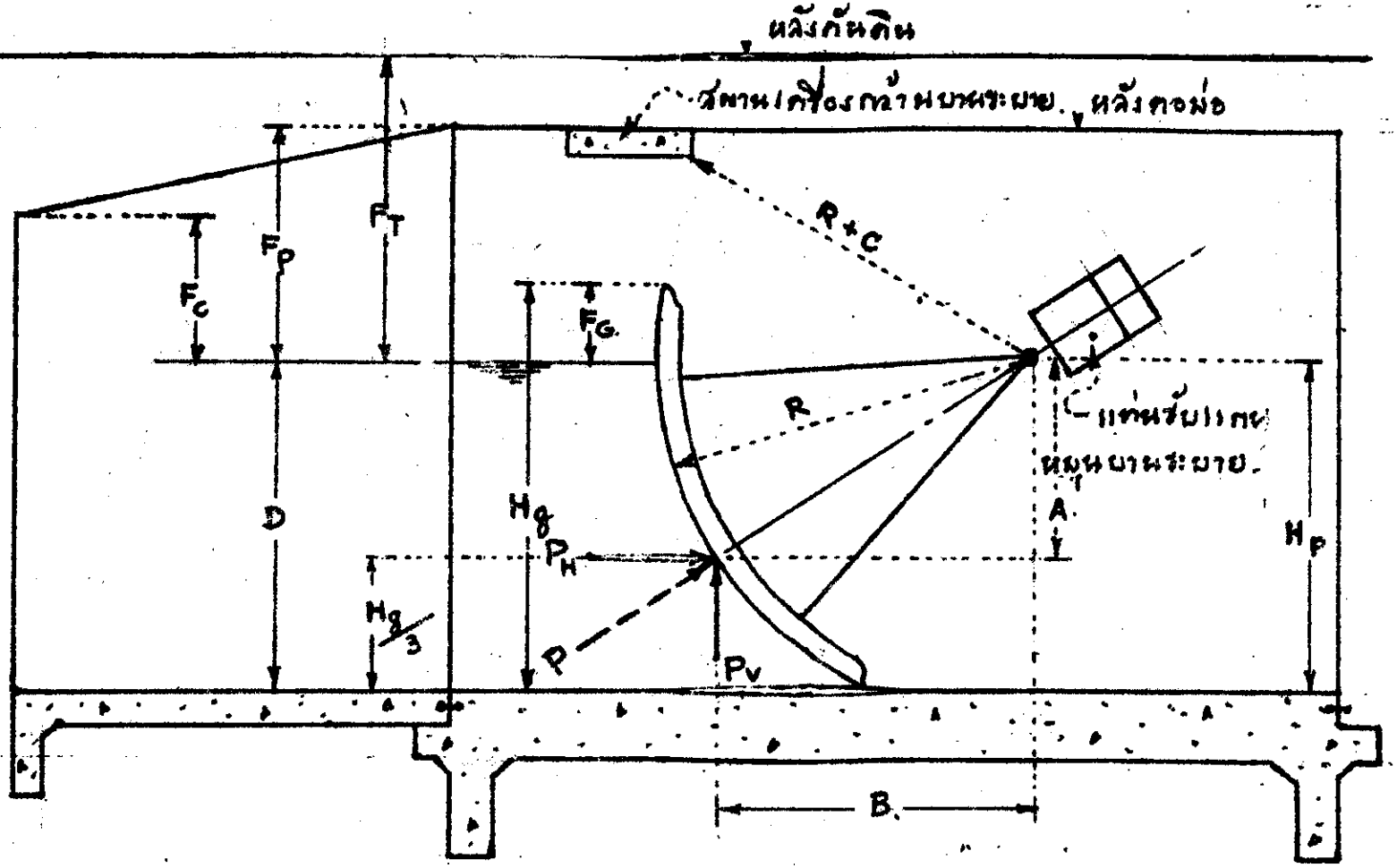
$$F_C = 0.20 + 0.10\ D$$

- ส่วนเผื่อความสูงของตอม่อ (Freeboard of pier)

$$F_P = 0.20 + 0.15\ D$$

- ส่วนเผื่อความสูงของคันกั้นน้ำ (Freeboard of dyke)

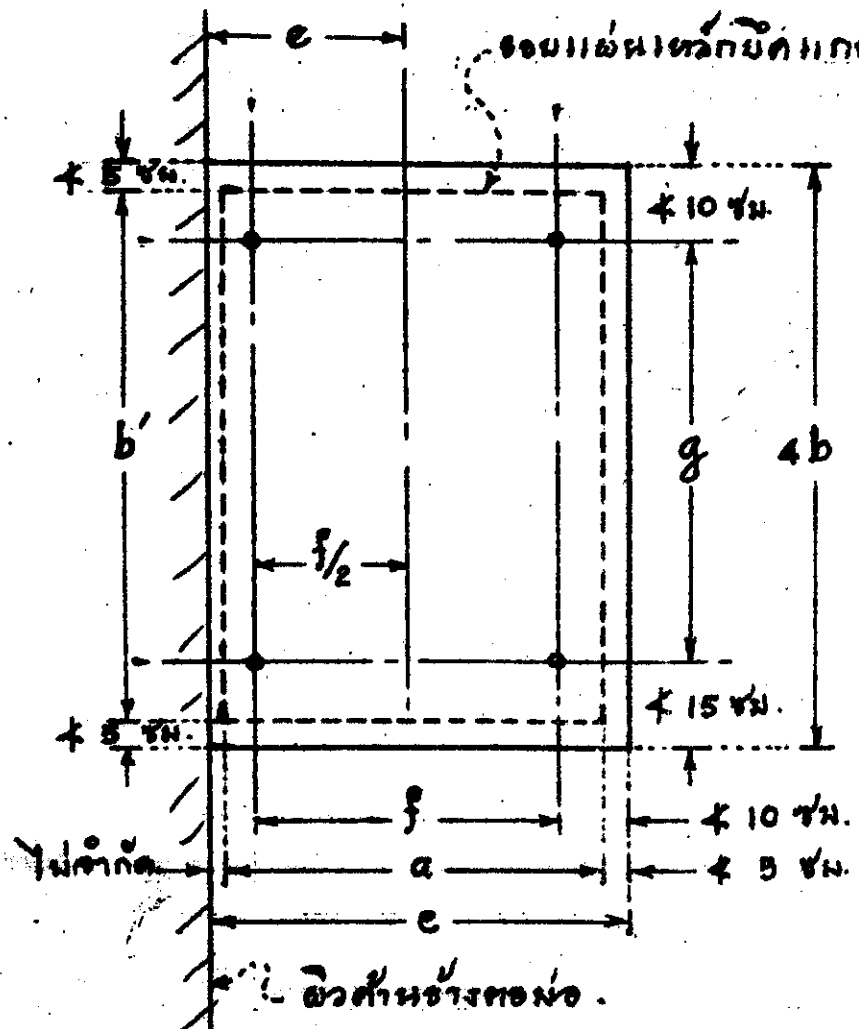
$$F_T = 0.20 + 0.20\ D$$



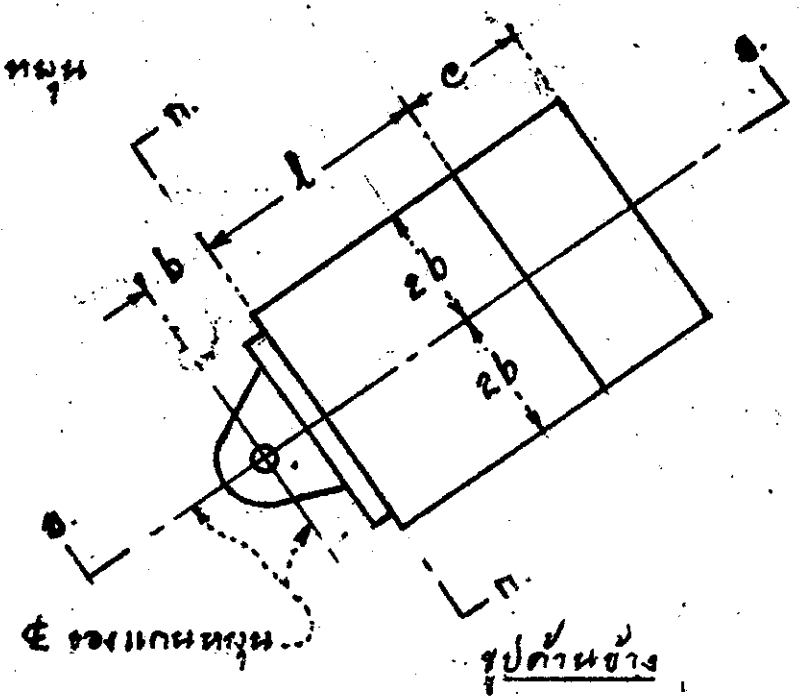
รูปตัดตอม่อแสดงแท่นรับแรงหมุนกำหนดทะลาย และส่วนประกอบที่เกี่ยวข้อง

4.12.1.2 สัดส่วนของบานระบาย (Gate dimensions) ความกว้างของบานระบายจะเท่ากับช่องผ่านน้ำระหว่างตอม่อ (Gate opening) หักออกด้วยช่องว่าง (Clearance) ระหว่างขอบบานระบายกับผิวตอม่อ (ทางฝั่งออกแบบบานระบายจะเป็นผู้กำหนด) ความสูงของบานระบาย (Hg) จะเท่ากับ $D + F_G$ ซึ่งจะเป็นตัวเลขที่ใช้กำหนดรัศมีความโค้งของบานระบายดังตารางข้างล่างนี้

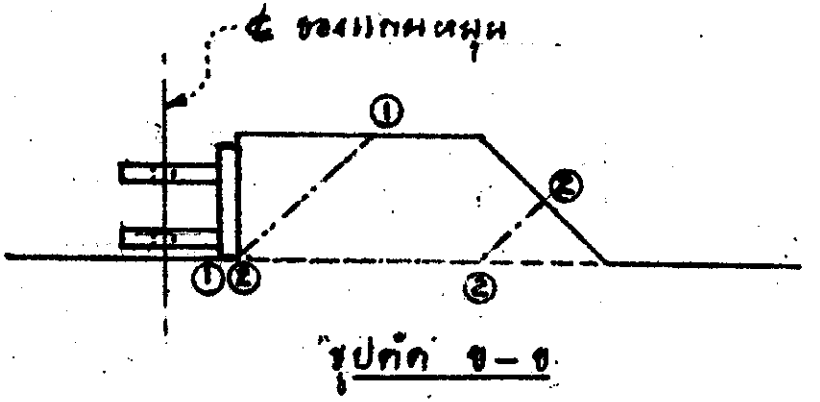
H_g		R	H_p		R+C
ต่ำสุด	สูงสุด		ต่ำสุด	สูงสุด	
1.00	1.30	1.25	0.50	0.98	1.40
1.30	1.60	1.63	0.65	1.20	1.78
1.60	1.90	2.00	0.80	1.43	2.15
1.90	2.20	2.38	0.95	1.65	2.53
2.20	2.50	2.75	1.10	1.88	2.90
2.50	2.80	3.13	1.25	2.10	3.28
2.80	3.10	3.50	1.40	2.33	3.65
3.10	3.40	3.88	1.55	2.55	4.03
3.40	3.70	4.25	1.70	2.78	4.42
3.70	4.00	4.63	1.85	3.00	4.81
4.00	4.30	5.00	2.00	3.23	5.20
4.30	4.60	5.38	2.15	3.45	5.59
4.60	4.90	5.75	2.30	3.68	5.98
4.90	5.20	6.13	2.45	3.90	6.37
5.20	5.50	6.50	2.60	4.13	6.76
5.50	5.80	6.88	2.75	4.35	7.15
5.80	6.10	7.25	2.90	4.58	7.54
6.10	6.40	7.63	3.05	4.80	7.93
6.40	6.70	8.00	3.20	5.03	8.32
6.70	7.00	8.38	3.35	5.25	8.70



รูปด้าน ก–ก.



รูปด้านข้าง



รูปตัด ข–ข

รายละเอียดต่างๆ ของระยะที่ใช้ออกแบบแท่นรับแกนหมุนบานระบาย

4.12.1.4 คำนวณค่าแรงดันของน้ำที่กระทำต่อบานระบายใช้สูตรดังนี้

$$A = H_p - \frac{H_g}{3}$$

$$B = \sqrt{R^2 - A^2}$$

$$P_H = 1{,}000 \frac{H_g^2}{2} \cdot \frac{S}{2} \quad (S = \text{ช่องผ่านน้ำระหว่างตอม่อ})$$

$$P_V = \frac{A}{B} \cdot P_H$$

$$P = \frac{R}{B} \cdot P_H$$

4.12.1.5 ตรวจสอบแรงเค้นในช่วงตอนต่าง ๆ โดยอาศัยสูตรต่าง ๆ ดังนี้

- แรงเค้นกดใต้แผ่นเหล็กยึดแกนหมุน (Bearing stress)

$$\frac{P}{a.b'} \not> \frac{2}{3}(0.25\, f'_c)$$

- แรงเค้นเฉือนตามระนาบ (1) - (1) (Shearing stress)

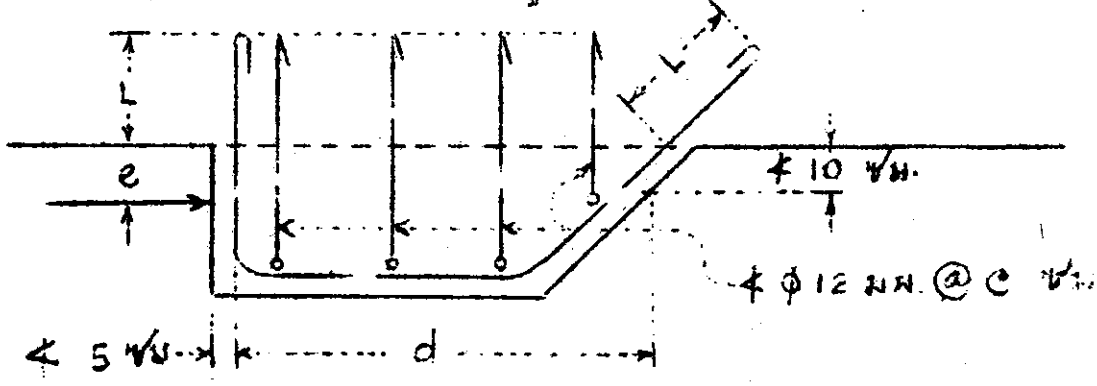
$$\frac{P}{8b(c-e+\frac{a}{2})} \not> 0.066\, f'_c$$

- แรงเค้นเฉือนตามระนาบ (2)-(2)-(2) (Shearing stress)

ซึ่งมีความยาวเท่ากับ $(1 + \frac{c}{2})$

$$\frac{P}{4b(1+\frac{c}{2})} \not> 0.03\, f'_c$$

4.12.1.6 การใส่เหล็กเสริม ใช้สูตรคำนวณได้ดังนี้



$$A_s = \frac{P.e}{f_s \cdot j \cdot d}$$

$$f_c = \frac{P.e}{2b \cdot j \cdot k \cdot d^2}$$

$$o = \frac{P}{u \cdot j \cdot d}$$

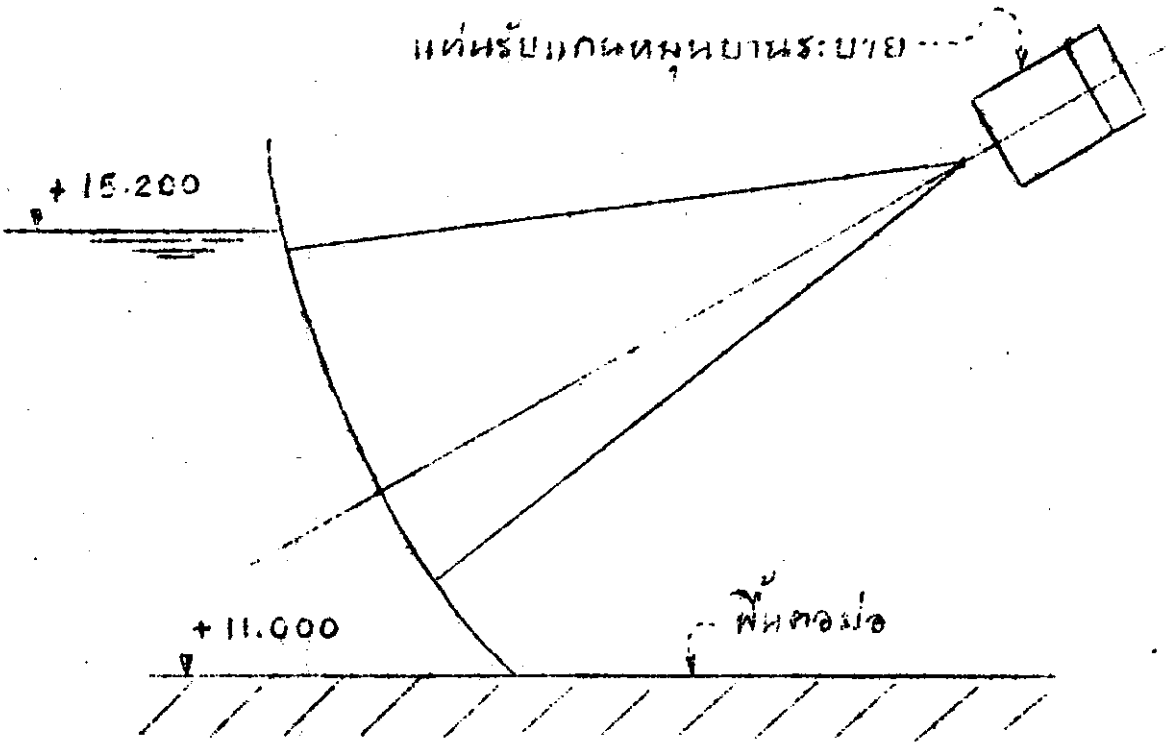
$$L = \frac{P.e}{\Sigma_o \cdot u \cdot j \cdot d}$$

หรือ ϕ 12 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม (กรณีปกติ)

หรือ ϕ 35 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม (กรณีพิเศษ)

ในเมื่อ A_s, f_s, u, Σ_o, j, f_c และ k มีความหมายเดียวกับที่กล่าวไว้ในบทที่ 1

<u>ตัวอย่าง</u> ให้ออกแบบแท่นรับแกนหมุนบานระบายที่แสดงในรูปให้เหมาะสม โดยกำหนดให้ระดับน้ำผ่านระหว่างคอม่อ 6.00 ม.



วิธีทำ

$D = 15.200 - 11.000 = 4.20$ ม.

$F_G = 0.10 + 0.05\ D$

$= 0.10 + (0.05 \times 4.20) = 0.31$ ม.

≈ 0.35 ม.

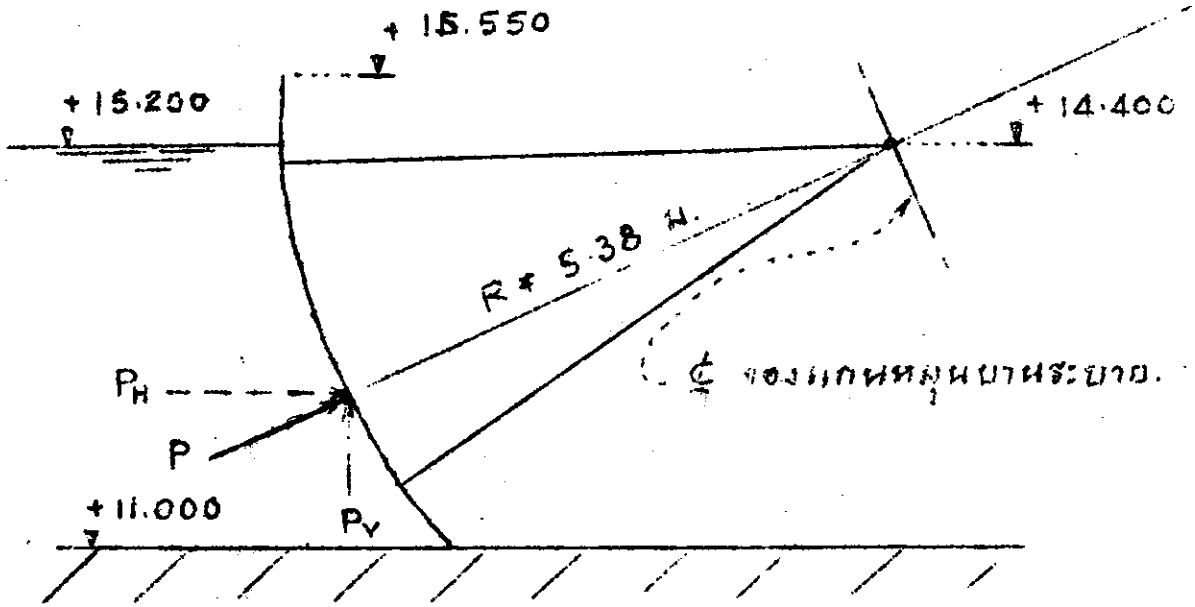
$\therefore H_g = 4.20 + 0.35 = 4.55$ ม.

จากตารางกำหนดขนาดบานระบายควรใช้

$R = 5.38$

$H_p = 2.15$ ถึง $3.45 \approx 3.40$ ม.

และ $R + C = 5.59 \approx 5.60$ ม.



$A = 3.40 - \frac{4.55}{3} = 1.883$ ม.

$B = \sqrt{(5.38)^2 + (1.883)^2} = 5.70$ ม.

$P_H = 1{,}000 \times \frac{(4.55)^2}{2} \times \frac{6.00}{2} = 31{,}054$ กก.

$P_V = \frac{1.883}{5.04} \times 31,054 = 11,602$ กก.

$P = \frac{5.38}{5.04} \times 31,054 = 33,149$ กก.

จากตารางกำหนดค่า b. , เมื่อ H_g = 4.55 ม. , S = 6.00 ม.

จะต้องใช้ $b \leq 0.18$

$\therefore 4b = 0.72 \approx 0.75$ ม.

สมมุติ c = 0.30 ม.

a = 0.25 ม.

b' = 0.60 ม.

- ตรวจสอบแรงเค้นกดใต้แผ่นเหล็ก

$\frac{2}{3} \times (0.25\ f'_c) = \frac{2}{3} \times 0.25 \times 175$

$= 29.167$ กก./ซม.^{2}

$\frac{P}{a \cdot b'} = \frac{33,149}{25 \times 60}$

$= 22.099 < \frac{2}{3}(0.25\ f'_c)$ - ใช้ได้

- ตรวจสอบแรงเค้นเฉือนตามระนาบ (1) – (1)

$0.06\ f'_c = 0.06 \times 175$

$= 10.5$ กก./ซม.

$\frac{P}{8(c - e + \frac{a}{2})b} = \frac{33,149}{8(30 - 12.5 + \frac{25}{2})\ 18.75}$

$= 7.367 < 0.06\ f'_c$ - ใช้ได้

– หาค่า l จากแรงเค้นเฉือนตามระนาบ (2) – (2) – (2)

$$\frac{P}{4b(1 + \frac{c}{2})} = 0.03\ f'_c$$

$$\frac{33,149}{75(1 + \frac{30}{2})} = 0.03 \times 175$$

$$33,149 = 393.75\ l + 5,906$$

$$\therefore\ l = 69.189 \text{ ซม.}$$

$$\approx 0.70 \text{ ม.}$$

– หาเหล็กเสริมหลัก

$$A_s = \frac{33,149 \times 12.5}{1,400 \times 0.87 \times 85} = 4.001 \text{ ซม.}^2$$

$$f_c = \frac{33,149 \times 12.5}{2 \times 18.75 \times 0.87 \times 0.40 \times (85)^2}$$

$$= 4.395 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$< 79 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ – ใช้ได้}$$

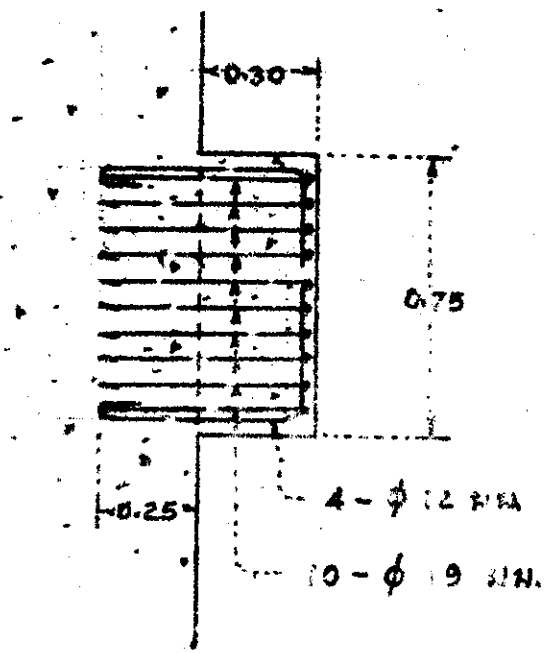
$$\Sigma_o = \frac{33,149}{7.9 \times 0.87 \times 85} = 56.742 \text{ ซม.}$$

ใช้เหล็ก 10 – ∅ 19 มม., $A_s = 28.35$ ซม.^{2} $\Sigma_o = 59.69$ ซม.

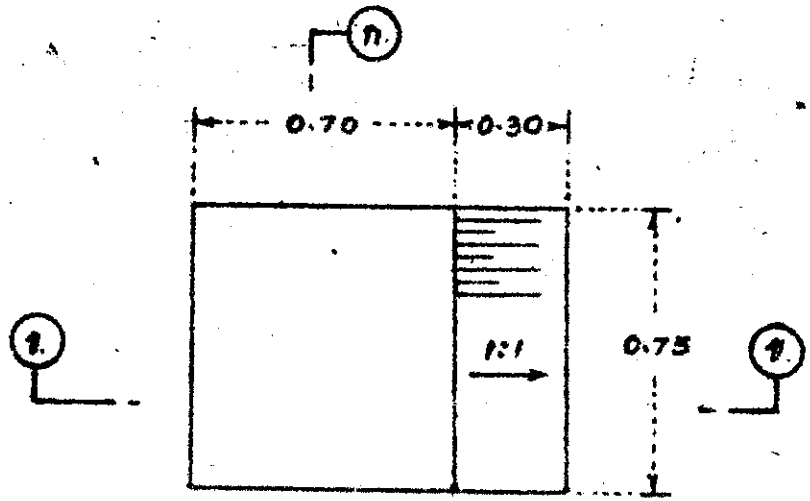
$$L = \frac{33,149 \times 12.5}{59.69 \times 7.9 \times 0.87 \times 85} = 11.883 \text{ ซม.}$$

$$L = 12 \times 1.9 = 22.8 \text{ ซม.}$$

$$\approx 0.25 \text{ ม.}$$

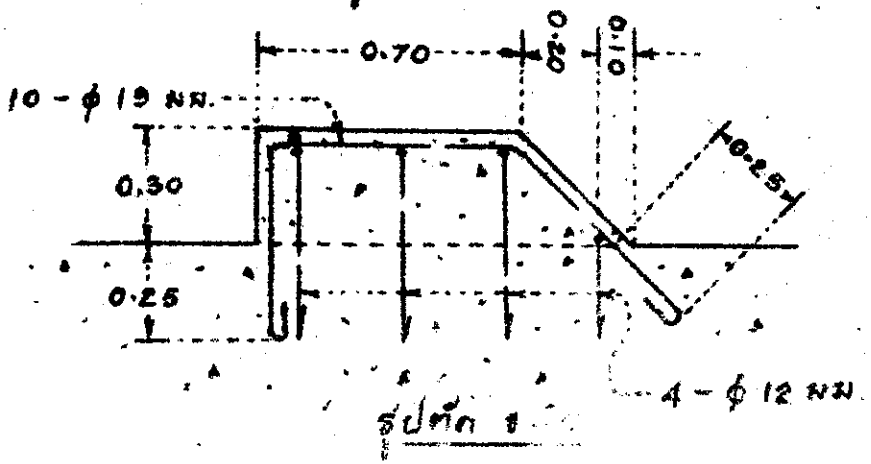


รูปตัด ก-ก



ก

รูปด้านข้าง



รูปตัด ข

รูปแสดงการเสริมเหล็ก[illegible]

ระยะห่างของเหล็กเสริมหลัก $\frac{0.75 - 0.10}{9} = 0.07$ ม.

$> 2.5\ \phi$ – ใช้ได้

– หาเหล็กรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

$$A_{s_T} = 0.002 \times 30 \times 75 = 4.5 \text{ ซม.}^2$$

และ ϕ 12 มม. @ 0.30 ม. นั้น เป็นจำนวนเหล็ก 4 เส้น

เป็น $A_s = 4 \times 1.13 = 4.52 \text{ ซม.}^2$

∴ ใช้ 4 – ϕ 12 มม. เป็นเหล็กรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

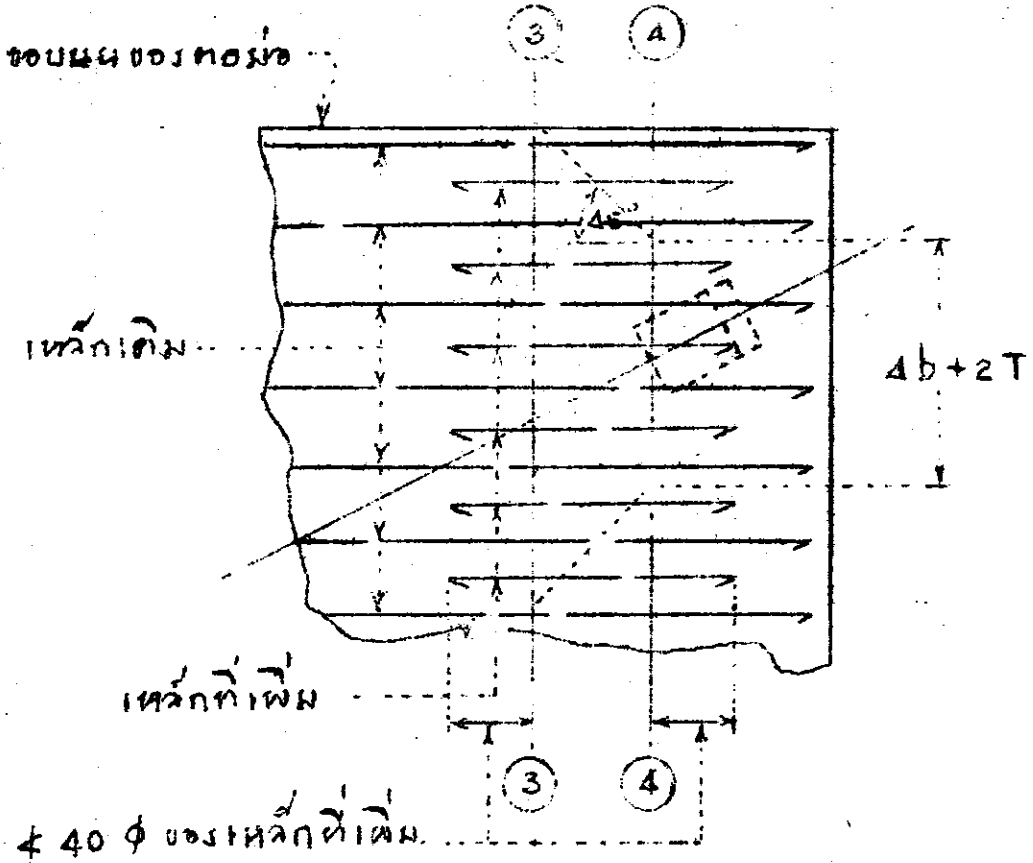
(ดูรูปการเสริมเหล็ก)

4.12.2 การเสริมเหล็กเพิ่มในตอม่อเพื่อรับแรงถ่ายทอดจากแผ่นรับแกนหมุนบานระบาย แยกคิดออกเป็น 2 กรณีคือ สำหรับตอม่อกลางจะคิดตั้งแต่รับแกนหมุนบานระบายทั้งสองด้านจึงไม่เกิดแรงบิด (Twisting moment) ในเนื้อตอม่อด้านรอบแกนดิ่ง แต่ตอม่อริมนั้นคิดตั้งแต่รับแกนหมุนเพียงด้านนอก (มีน้ำ) ด้านเดียวจึงเกิดแรงบิดรอบแกนดิ่งของตัวตอม่อ ซึ่งต้องคิดแรงไม่เหมือนกัน

4.12.2.1 การเสริมเหล็กเพิ่มในตอม่อกลาง (Design of Wall-gate thrust acting on both sides)

– การหาจำนวนเหล็กที่จะเสริมเพิ่มตามแนวนอน (Longitudinal intermediate reinforcement) นั้น พื้นที่หน้าตัดของเหล็กในแต่ละผิวของตอม่อที่ต้องการรับการถ่ายทอดแรงจากแท่นรับแกนหมุนบานระบายในช่วง 4 b + 2 T (เมื่อ T = ความหนาของตอม่อ) จะหาได้จากสูตร

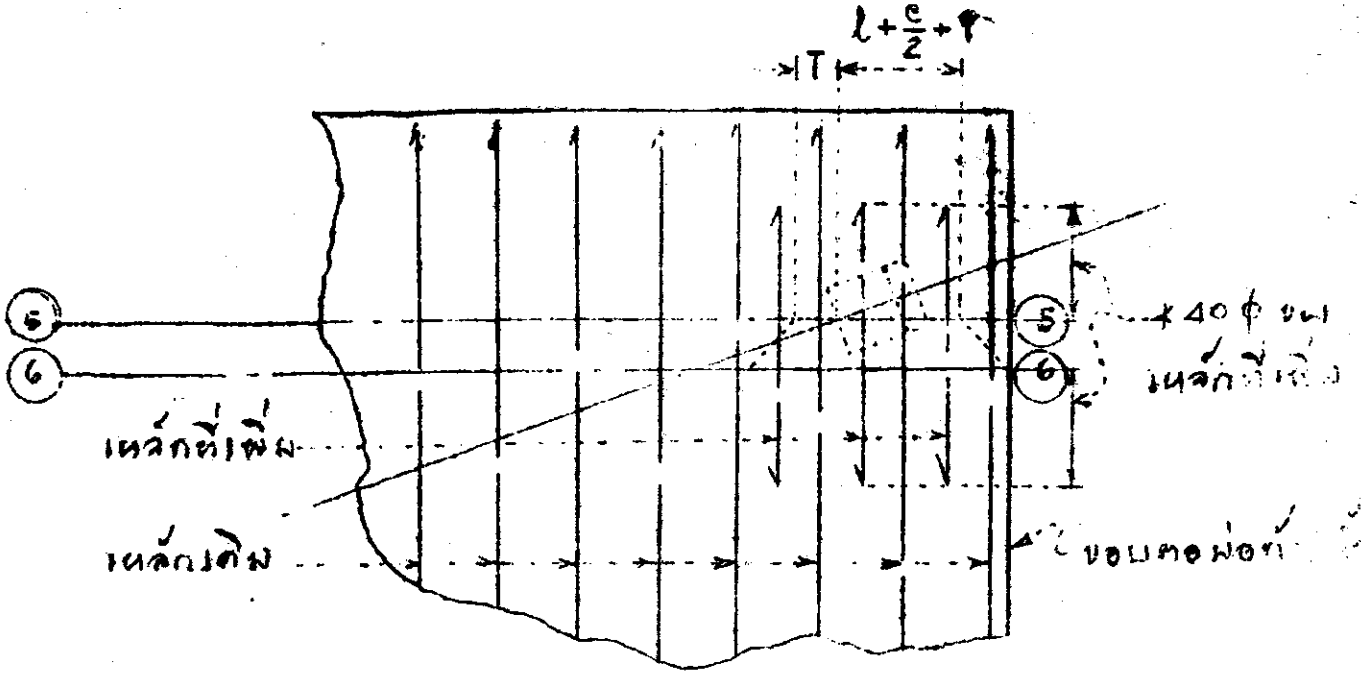
$$A_{s_H} = \frac{P_H}{f_s}$$



<u>รูปแสดงการเสริมเหล็กเพิ่มตามแนวนอน</u>

และเหล็กที่จะต้องเสริมเพิ่มจะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A_{s_H} ลบด้วยพื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมเดิมในแนวนอนในช่วง $4b + 2T$ นั่นเอง

ส่วนระยะห่างระหว่างระนาบ (3) – (3) กับ (4) – (4) นั้น จะหาได้จากการลากเส้นทำมุม 45° จากจุดปลายทั้งสองของระยะ $4b + 2T$ ของระนาบ (4) – (4) ไปตัดกับขอบบนของตอม่อจุดตัดนั้นจะเป็นแนวระนาบ (3) – (3) แต่ระยะดังกล่าวจะต้องไม่เกิน $4b + 2T$ ด้วย



รูปการเสริมเหล็กเพิ่มตามแนวตั้ง

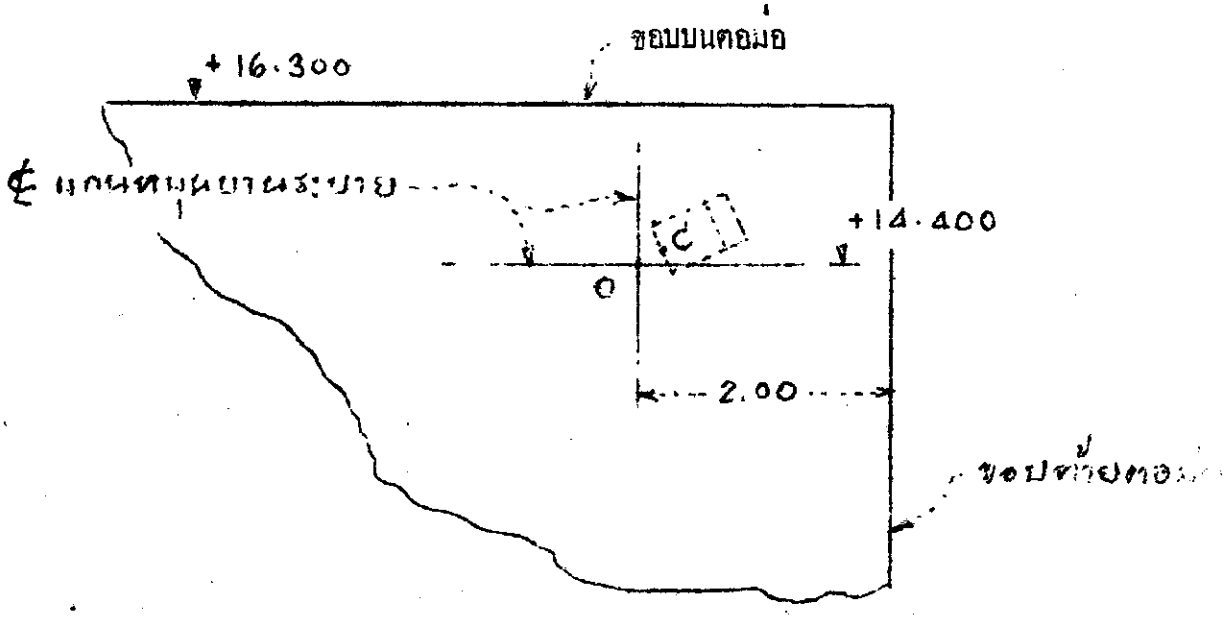
– การหาจำนวนเหล็กเสริมเพิ่มตามแนวตั้ง (Vertical intermediate reinforcement) นั้น พื้นที่หน้าตัดของเหล็กในแต่ละผิวของตอม่อที่ต้องการรับการถ่ายทอดแรงจากแผ่นรับแกนหมุนบานระบาย ในช่วง $1 + \frac{c}{2} + 2T$ จะหาได้จากสูตร

$$A_{s_V} = \frac{P_V}{f_s}$$

และเหล็กที่จะเสริมเพิ่มจะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A_{s_V} ลบด้วย พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมเดิมในแนวตั้งในช่วง $1 + \frac{c}{2} + 2T$ นั่นเอง

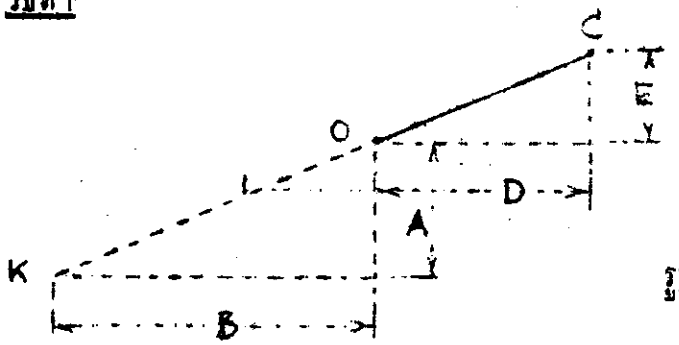
ส่วนระยะห่างระหว่างระนาบ (5) – (6) กับ (6) – (6) นั้น จะหาได้จากการลากเส้นทำ 45° จากจุดปลายทั้งสองของระยะ $1 + \frac{c}{2} + 2T$ ของระนาบ (5) – (5) ไปตัดขอบตอม่อด้านท้ายน้ำ จุดตัดนั้นจะเป็นแนวระนาบ (6) – (6) แต่ระยะดังกล่าวจะต้องไม่เกิน $1 + \frac{c}{2} + 2T$ ด้วย

<u>ตัวอย่าง</u> จากตัวอย่างเดิมของแท่นรับแกนหมุนบานระบาย ถ้ากำหนดให้ขอบบนของตอม่ออยู่ที่ระดับ El + 16.300 และขอบตอม่อด้านท้ายน้ำอยู่ห่างจากแกนหมุนของบานระบาย 2.00 ม. ให้หาเหล็กเสริมเพิ่มในตอม่อกลาง (Intermediate piers) ถ้าเหล็กเสริมเดิมในแนวดิ่งคือ ø 15 มม. 0.18 เหล็กเสริมเดิมตามแนวนอนคือ ø 12 @ 0.20 และความหนาของตอม่อ 0.60 ม.



<u>รูปแสดงจุดที่ตั้งแกนหมุนของตอม่อ</u>

<u>วิธีทำ</u>



<u>รูปแสดงตำแหน่งศูนย์กลางของหัวแท่นรับแกนบานระบาย</u>

จากตัวอย่างที่แล้วได้คำนวณมาแล้วคือ

OC = 0.18 ม.

A = 1.883 ม.

B = 5.04 ม.

OK = R = 5.38 ม.

จากสามเหลี่ยมคล้ายทั้งสองรูปจะได้

$D = \frac{0.18}{5.38} \times 5.04 = 0.167$ ม.

$E = \frac{0.18}{5.38} \times 1.883 = 0.063$ ม.

(1) หาเหล็กเสริมเพิ่มตามแนวนอน

$4b' + 2T = 0.75 + (2 \times 0.60) = 1.95$ ม.

ดังนั้นจุดปลายของขอบเขต $4b + 2T$ อยู่ต่ำกว่าขอบบนของคอมอ

$= 1.90 - 0.063 - \frac{1.95}{2} = 0.862$ ม.

ซึ่ง $< 4b + 2T$

∴ ระนาบ (3) — (3) กับ (4) — (4) ห่างกัน 0.862 ม.

เหล็กเสริมเดิม ϕ 12 มม. @ 0.20

∴ ในระยะ 1.95 ม. เป็นเหล็ก ϕ 12 มม. 10 เส้น

ซึ่งเป็น $A_s = 11.31$ ซม.^{2}

$A_{s_H} = \frac{P_H}{f_s}$

$= \frac{31,054}{1,400} = 22.18$ ซม.^{2}

∴ ต้องเสริมเหล็กเพิ่มอีก $22.18 - 11.31 = 10.87$ ซม.^{2}

ใช้ 10 — ϕ 12 มม., $A_s = 11.31$ ซม.^{2} เสริมในขอบเขตของปลายเส้น 45° ของ $4b + 2T$

(2) หาเหล็กเสริมเพิ่มตามแนวตั้ง

$$1 + \frac{c}{2} + 2T = 0.60 + \frac{0.30}{2} + (2 \times 0.60) = 1.95 \text{ ม.}$$

ดังนั้นจุดปลายของขณเขต $1 + \frac{c}{2} + 2T$ อยู่ห่างจากขอบตอม่อด้านท้ายน้ำ

$$= 2.00 - 0.167 - 1.35 = 0.483 \text{ ม.}$$

ซึ่ง $< 1 + \frac{c}{2} + 2T$

∴ ระนาบ (5) – (5) กับ (6) – (6) ห่างกัน 0.483 ม.

เหล็กเสริมเดิม ϕ 15 มม. @ 0.18

∴ ในระยะ 1.95 ม. เป็นเหล็ก ϕ 15 มม. 11 เส้น

ซึ่งเป็น $A_s = 19.44$ ซม.^{2}

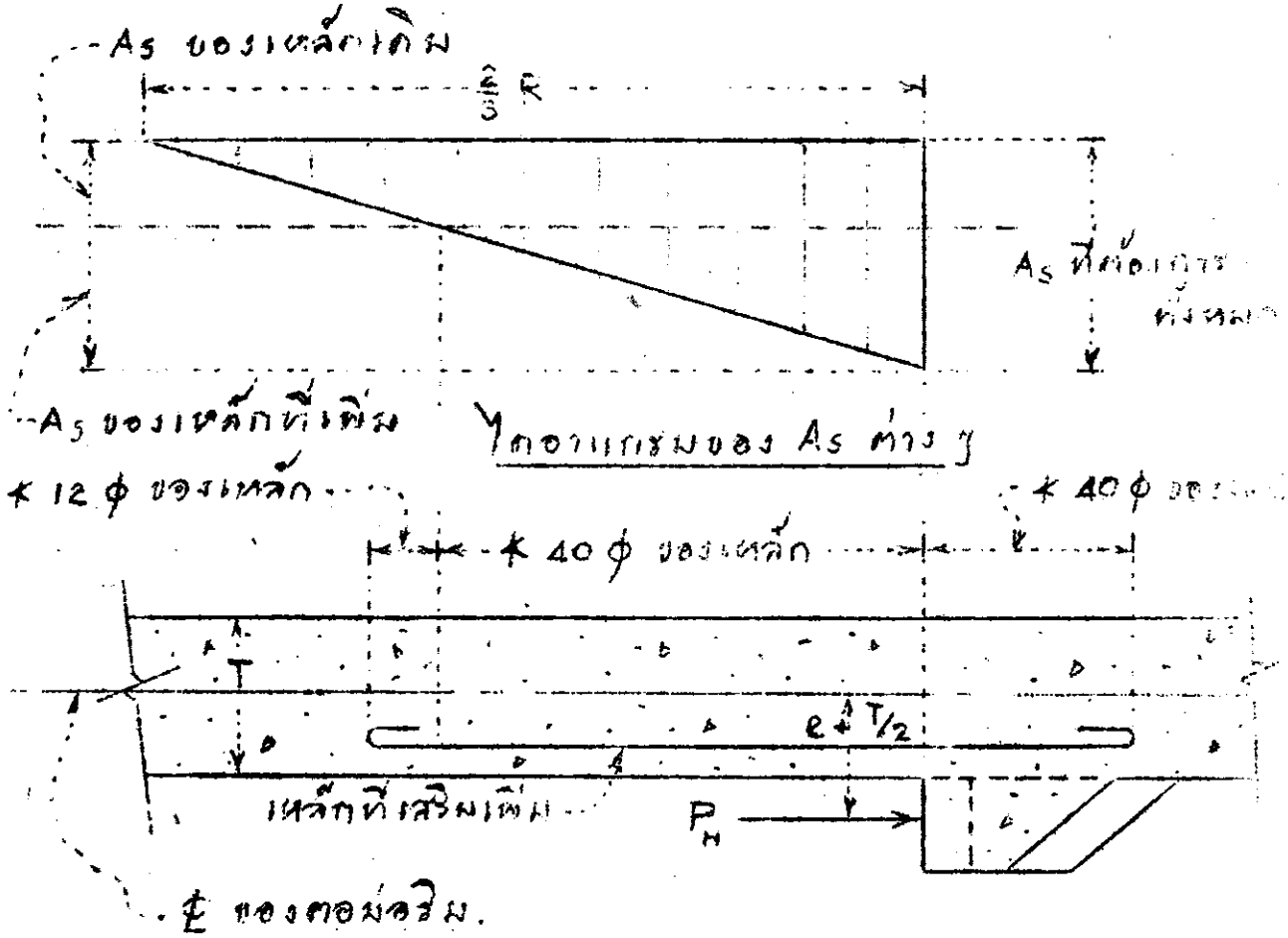
$$A_{s_V} = \frac{P_V}{f_s}$$

$$= \frac{11,602}{1,400} = 8.287 \text{ ซม.}^2$$

นั่นคือ $A_{s_V} < A_s$ ไม่ต้องเสริมเหล็กเพิ่ม

4.12.2.2 การเสริมเหล็กเพิ่มในตอม่อริม (Design of wall-gate thrust acting on one side)

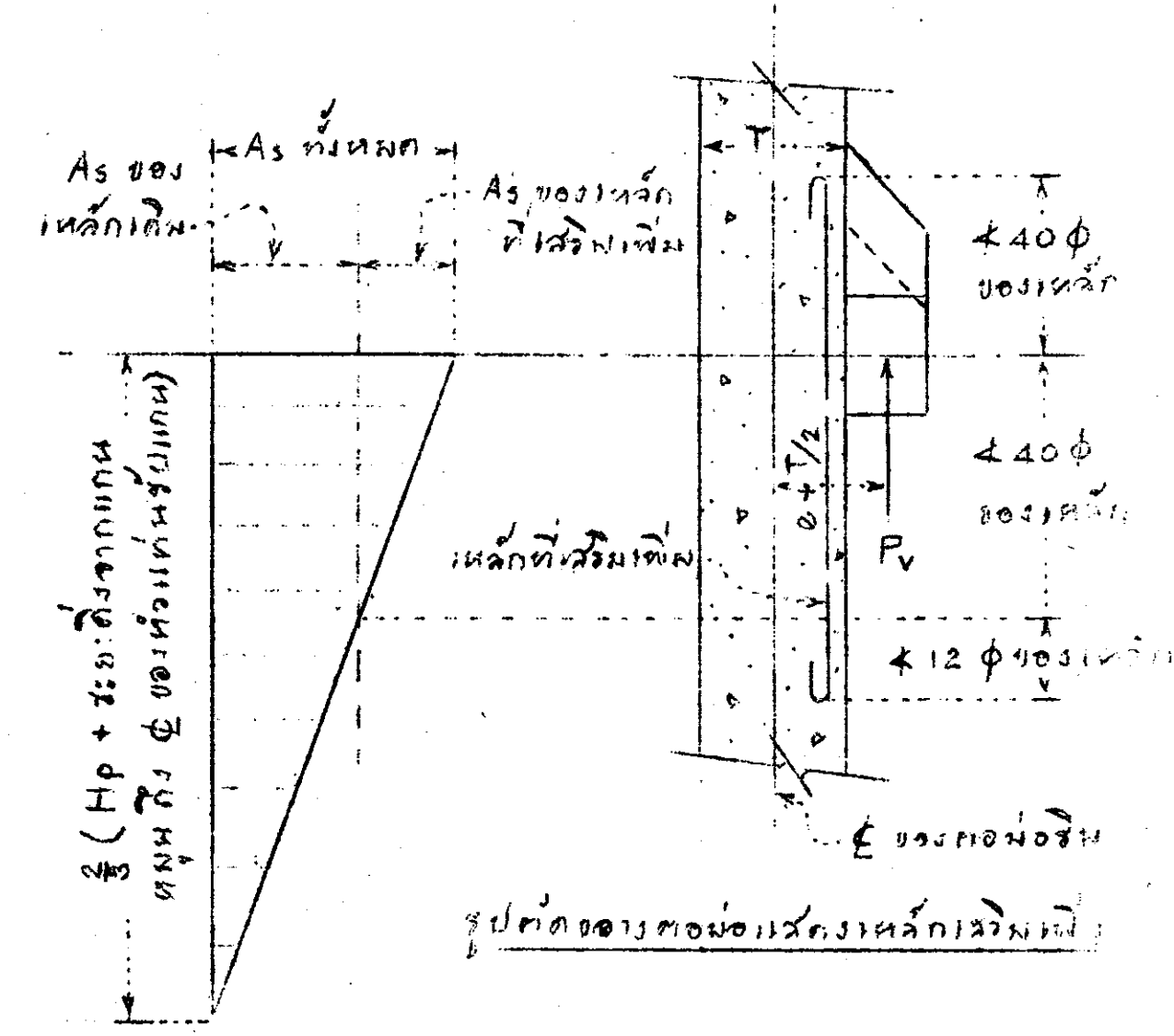
– การหาจำนวนเหล็กเสริมเพิ่มตามแนวนอน คงคำนวณตามหลักการเดียวกับการหาจำนวนเหล็กเสริมเพิ่มตามแนวนอนของตอม่อกลาง เป็นแต่เพียงว่าจำนวนเหล็กเสริมจะต้องคำนวณโดยสูตรผสมของโมเมนต์และแรงดึง (Combined bending and tension โดยคิดว่าแรง P_H แผ่โดยสม่ำเสมออยู่บนขอบเขตของ 4b + 2T



แปลนของตอม่อริมแสดงเหล็กเสริมเพิ่ม

สำหรับความยาวของเหล็กเสริมเพิ่มและตำแหน่งที่ใส่เหล็กนั้น ให้หาโดยเขียนไดอาแกรมของจำนวนเหล็กเสริมต่าง ๆ ประกอบกับแปลนของตอม่อ ดังรูปข้างบนนี้

– การหาจำนวนเหล็กเสริมเพิ่มตามแนวตั้ง ก็คำนวณเช่นเดียวกับการหาจำนวนเหล็กเสริมเพิ่มตามแนวตั้งของตอม่อกลาง แต่ต้องใช้สูตรรวมของโมเมนต์และแรงดึง (Combined bending and tension) โดยคิดว่าแรง P_v นั้น แผ่โดยสม่ำเสมอมาจนถึงเซต ของ $1 + \frac{c}{2} + 2T$



รูปตัดของคอม่อแสดงเหล็กเสริมเพิ่ม

ไดอาแกรมของเหล็กเสริมต่าง ๆ

ส่วนความยาวของเหล็กเสริมเพิ่มตามแนวตั้งและตำแหน่งที่ใส่เหล็กนั้น ให้หาโดยเขียนไดอาแกรมของเหล็กเสริมต่าง ๆ ประกอบกับรูปตัดขวางของตอม่อ ดังรูปข้างบนนี้

4.13 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคาร (Stilling basin)

ในการที่น้ำไหลผ่านอาคารชลประทานใด ๆ ก็ตาม น้ำจะถูกบีบตัว และเมื่อการไหลผ่านพ้นตัวอาคารออกมาแล้ว ความเร็วของกระแสน้ำก็ยังคงสูงมากจนสามารถกัดเซาะและทำความ

สภาพคลื่นและกระแสน้ำทางด้านท้ายน้ำได้ จึงจำเป็นจะต้องมีส่วนประกอบของอาคารเพื่อลดพลังน้ำและลดความเร็วของกระแสน้ำ (Dissipation of energy) ก่อนที่จะให้น้ำผ่านไปสู่ทางน้ำด้านท้ายน้ำ โดยมีความเร็วของการไหลที่เหมาะสมกับสภาพของทางน้ำนั้น ๆ ซึ่งมีหลักการกว้าง ๆ คือ

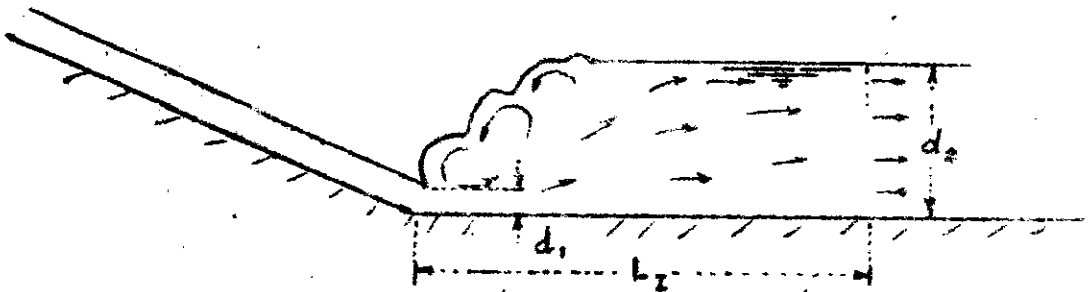
- ลดพลังน้ำโดยอาศัยการกระแทกตัว (Impaction) ระหว่างแห่งน้ำต่อแห่งน้ำเอง หรือระหว่างแห่งน้ำที่พุ่งออกจากอาคารกับวัตถุผิวแข็ง (Hard surface) ใด ๆ

- ลดพลังน้ำโดยอาศัยการเสียดสี (Friction) ระหว่างน้ำกับอากาศ น้ำกับพื้นผิวของร่องน้ำ หรือระหว่างน้ำกับน้ำในขณะที่เกิดการไหลปั่นป่วน (Turbulent flow)

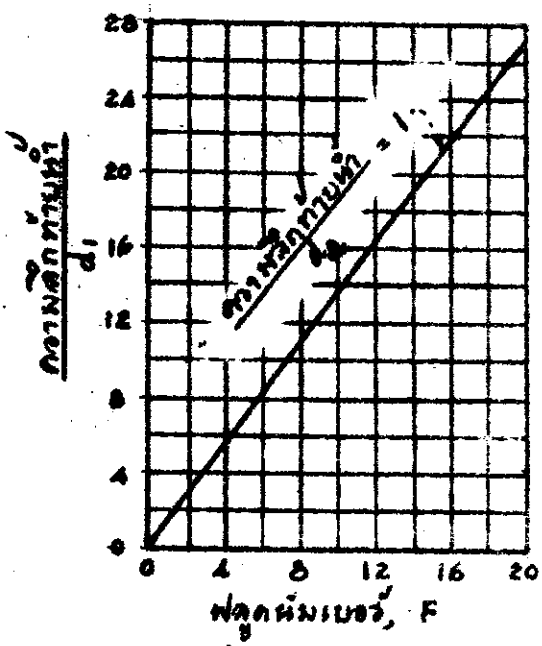
จากหลักการทั้งสองประการนี้เองจึงได้เกิดเป็นอ่างลดพลังน้ำท้ายอาคาร (Stilling basin) ขึ้นมาเป็นแบบต่าง ๆ ดังนี้

4.13.1 อ่างลดพลังน้ำแบบที่ I เป็นแบบที่ทำพื้นท้ายน้ำให้เป็นพื้นราบที่มีความยาวพอเพียงที่แห่งน้ำที่พุ่งออกจากท้ายอาคารมากระแทกกับแห่งน้ำที่ขังอยู่ด้านท้ายอาคาร และลดพลังน้ำไปโดยตัวของมันเอง เป็นแบบที่ไม่นิยมใช้กันนักเพราะจะเกิด Hydraulic jump ห่างออกมาจากท้ายอาคารมาก และเมื่อรวมกับความยาวของ Hydraulic jump แล้ว จะทำให้ความยาวของพื้นอ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารยาวมากเกินไป

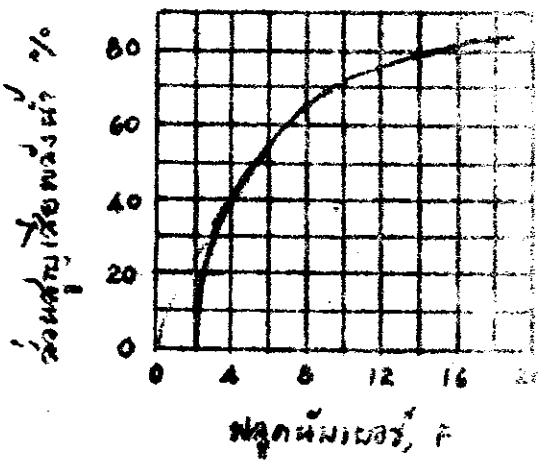
สำหรับความยาวของ Hydraulic jump ที่เกิดขึ้นในอ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ I นี้ ได้มีผู้คิดค้นสูตรขึ้นมามากมาย จึงขอนำมารวมไว้ในที่นี้ด้วยดังนี้



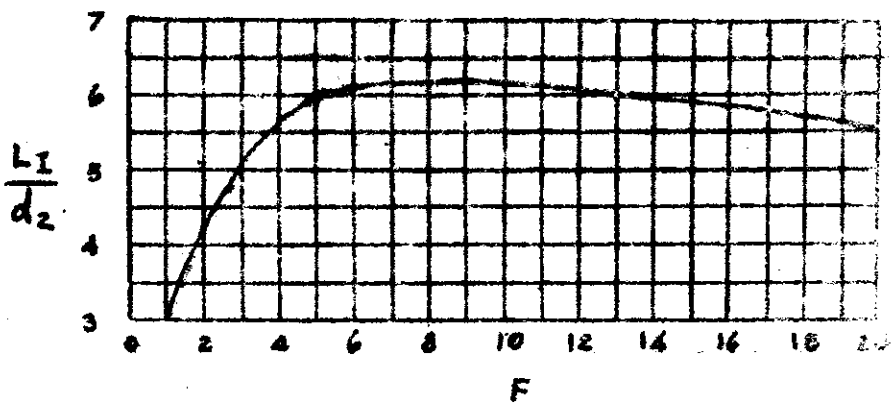
ร่างลดพลังน้ำท้ายอาคาร แบบที่ I



กราฟหาความลึกท้ายน้ำ



กราฟหาการสูญเสียพลังน้ำ



กราฟหาความยาวของตัวต่าง

สูตรหาความยาว Hydraulic jump บนพื้นราบ

สูตรที่	ชื่อเจ้าของสูตร	สูตรที่ใช้ (ทุกตัวมีหน่วยเป็นฟุต)
*1	แม้ทกี้ แบกเกตเทฟ (Bakheteff, Matzke)	$Lj = 5(d_2 - d_1)$
2	สเมทตานา (Smetana)	$Lj = 6(d_2 - d_1) - 0.16$
3	วู (Wu)	$Lj = 10(d_2 - d_1)F_1$
4	เพจ (Page)	$Lj = 5.6\ d_2$
5	เชอร์ตูสซอฟ (Chertoussov)	$Lj = 10.3d_1(F_1 - 1)^{0.8}$
6	โปสซี่ (Poscy)	$Lj = 4.5 - 7\ (d_2 - d_1)$

Lj = ความยาวของ Hydraulic jump

d_1 = ความลึกของน้ำก่อนเกิด Hydraulic jump

d_2 = ความลึกของน้ำหลังเกิด Hydraulic jump

F_1 = ฟลูดนัมเบอร์ (Froude number)

* = สูตรที่นิยมใช้

สำหรับการออกแบบนั้นจะใช้ค่าฟลูดนัมเบอร์ระหว่าง 4.5 ถึง 9.0 ซึ่งจะทำให้เกิด Hydraulic jump ที่แน่นอนและดีที่สุด โดยที่แม้บางครั้งความลึก d_2 จะต่างกับความลึกของน้ำด้านท้ายน้ำไปบ้างก็ตาม

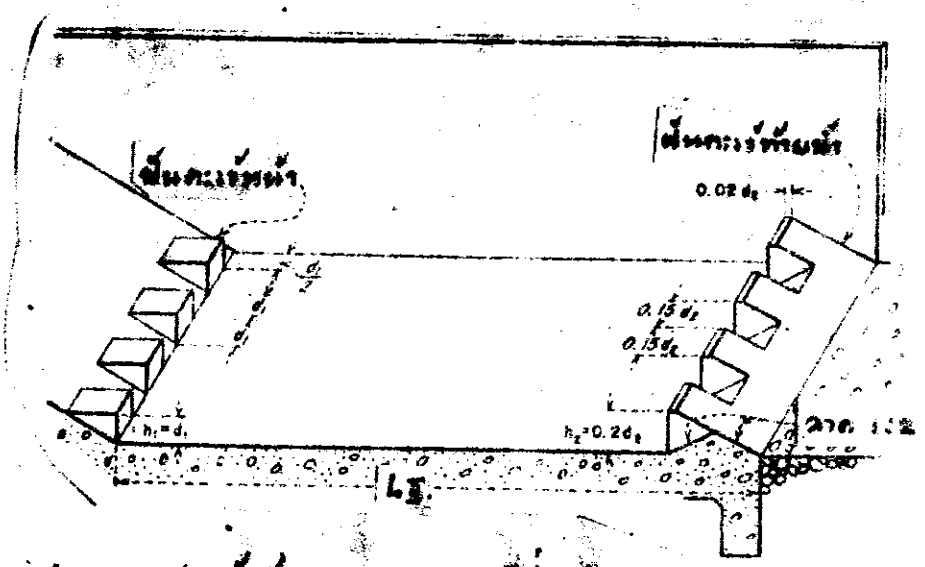
4.13.2 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ II เป็นแบบที่พื้นอ่างเป็นพื้นราบ และมีส่วนประกอบของฟันตะเข้หน้า (Chute blocks) และฟันตะเข้ท้ายน้ำ (Dentated sill) ใช้ในกรณีที่ฟรูดนัมเบอร์มีค่าระหว่าง 4.5 ถึง 22 ความเร็วกระแสน้ำที่ความลึก d_1 ไม่เกิน 50 ฟุต/วินาที และปริมาณน้ำต่อความกว้าง 1 ฟุตไม่น้อยกว่า 200 (ฟุต)^3/วินาที/ฟุต จึงเหมาะที่จะใช้กับอาคารทิ้งน้ำ (Spillway) ของเขื่อนที่สูงมาก และอาคารขนาดใหญ่ในระบบการส่งน้ำเท่านั้น ส่วนอัตราส่วนระหว่างความลึกของน้ำด้านท้ายน้ำต่อความลึก d_2 จะใช้อยู่ระหว่าง 0.73 ถึง 1.67 หรือใช้ค่าเฉลี่ย 0.99 ซึ่งพูดง่าย ๆ ว่าพยายามกำหนดระดับพื้นท้ายน้ำให้ความลึกของน้ำเท่ากับ d_2 นั่นเอง

4.13.3 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ III เป็นแบบที่มีพื้นอ่างเป็นพื้นราบและมีส่วนประกอบฟันตะเข้หน้า (Chute blocks) ฟันตะเข้กลาง (Floor blocks or baffle piers) และสันท้ายน้ำ (End sill) ใช้ในกรณีที่ฟรูดนัมเบอร์มากกว่า 4.5 ความเร็วกระแสน้ำที่ระหว่าง 50 ถึง 60 ฟุต/วินาที และปริมาณน้ำต่อความกว้าง 1 ฟุต น้อยกว่า 200 (ฟุต)^3/วินาที/ฟุต เนื่องจากเป็นแบบที่ให้ความยาวของอ่างไม่มากนักจึงเหมาะสำหรับอาคารในระบบส่งน้ำทั่วไป และทางทิ้งน้ำและอาคารส่งน้ำ (Spillway or outlet works) ขนาดเล็กทั่ว ๆ ไป

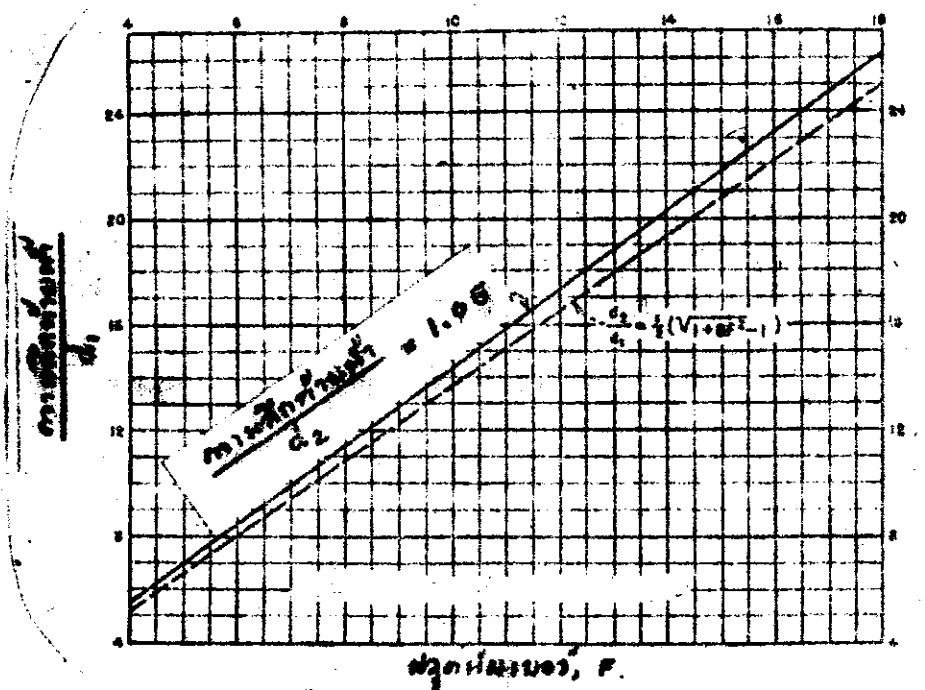
4.13.4 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ IV เป็นแบบที่ใช้กับอาคารเล็กในคลองส่งน้ำ หรือท้ายฝาย ในกรณีที่ฟรูดนัมเบอร์มีค่าระหว่าง 2.5 ถึง 4.5 สำหรับความยาวของอ่างให้กำหนดเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในอ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ I ส่วนพวกฟันตะเข้ต่าง ๆ มีไว้เพื่อลดคลื่นท้ายน้ำ (Standing wave) เท่านั้นเอง ส่วนการกำหนดระดับพื้นท้ายน้ำจะกำหนดให้ความลึกของน้ำท้ายน้ำมากกว่าความลึก d_2 ระหว่าง 5 % ถึง 10 % ซึ่งกรณีที่ความลึกของน้ำท้ายน้ำเท่ากับ 1.1 d_2 คลื่นท้ายน้ำ (Standing wave) จะลดลงไปเป็นอย่างมาก

เนื่องจากอ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบนี้จุดใหญ่จะใช้ลดคลื่นท้ายน้ำ ดังนี้บางครั้งจะนิยมสร้างเป็นแผงลดคลื่นท้ายน้ำ (Wave Suppressors) แทน โดยมีลักษณะเป็นแผงติดตั้งที่ระดับพื้นด้านเหนือน้ำแต่ยื่นอยู่ในแนวระดับหรือเอียงลงประมาณ 3° มาทางท้ายน้ำ เหมาะที่จะใช้กับอาคารน้ำตกขนาดเล็กซึ่งมีค่าฟรูดนัมเบอร์ 2.5 – 4.5 ส่วนความยาวของแผง L นั้นหาได้จากสูตร

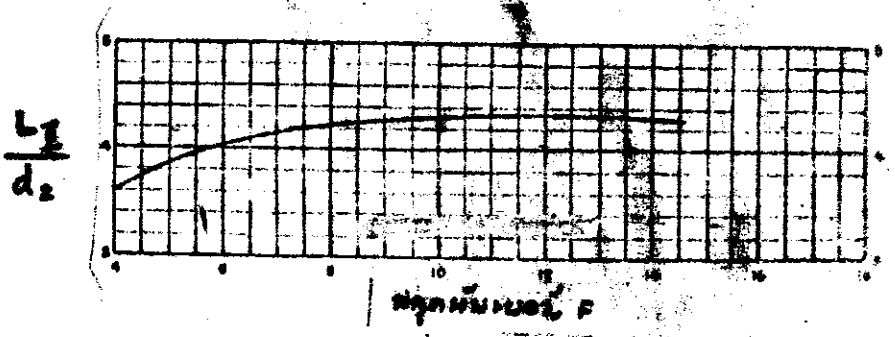
$$L = \frac{Q}{C.S.N\sqrt{2g.d}}$$



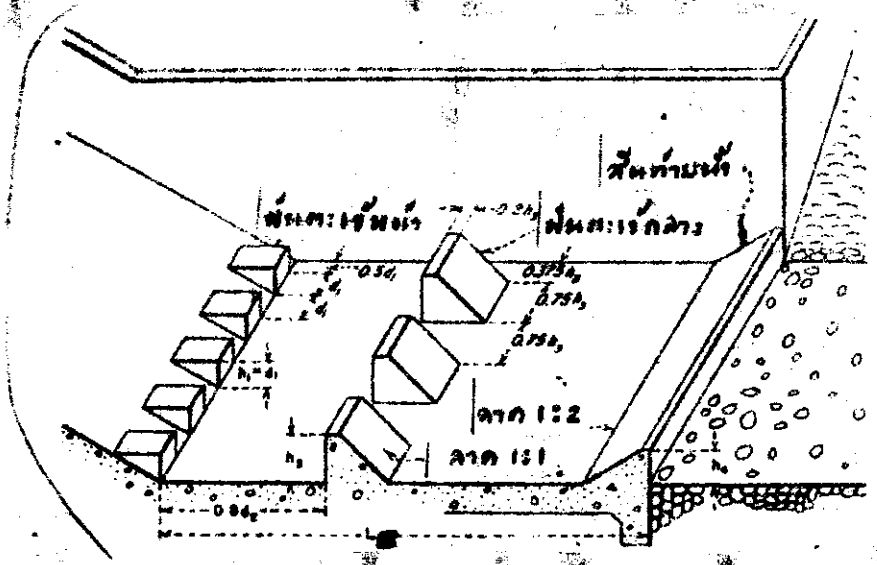
ส่วนลดพลังน้ำด้วยอากาศ แบบที่ ๒.



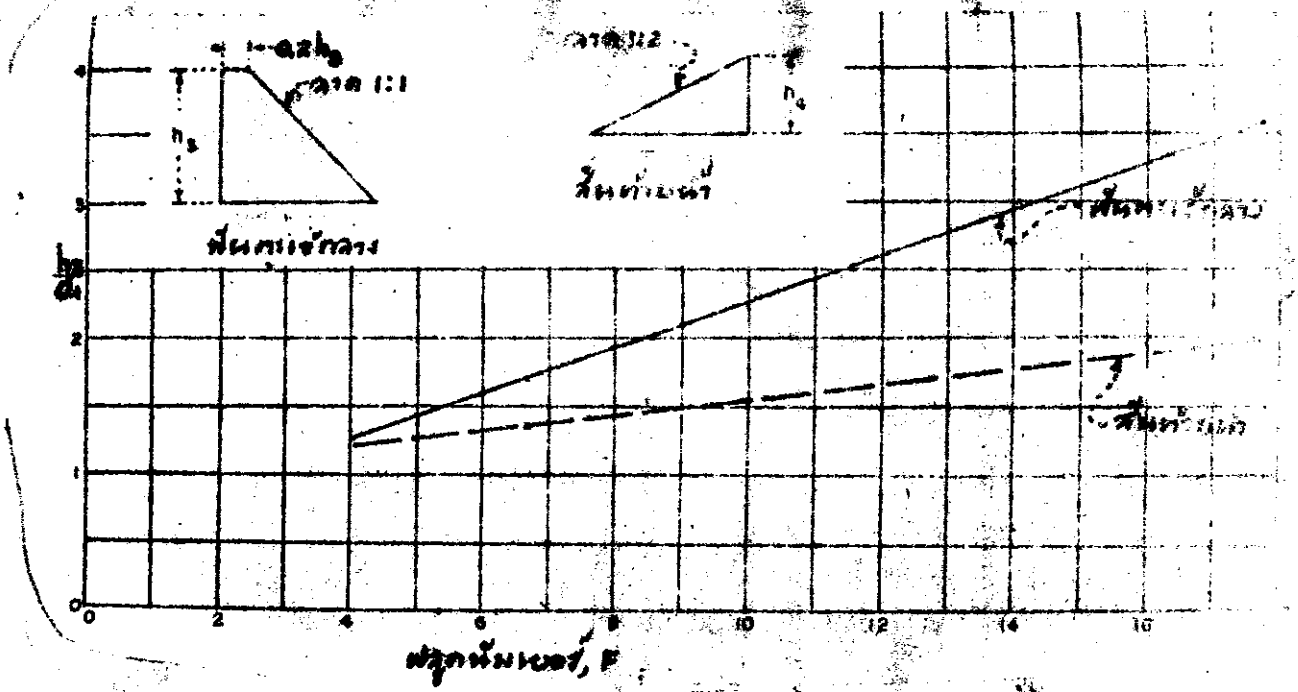
กราฟหาความลึกด้านหน้า



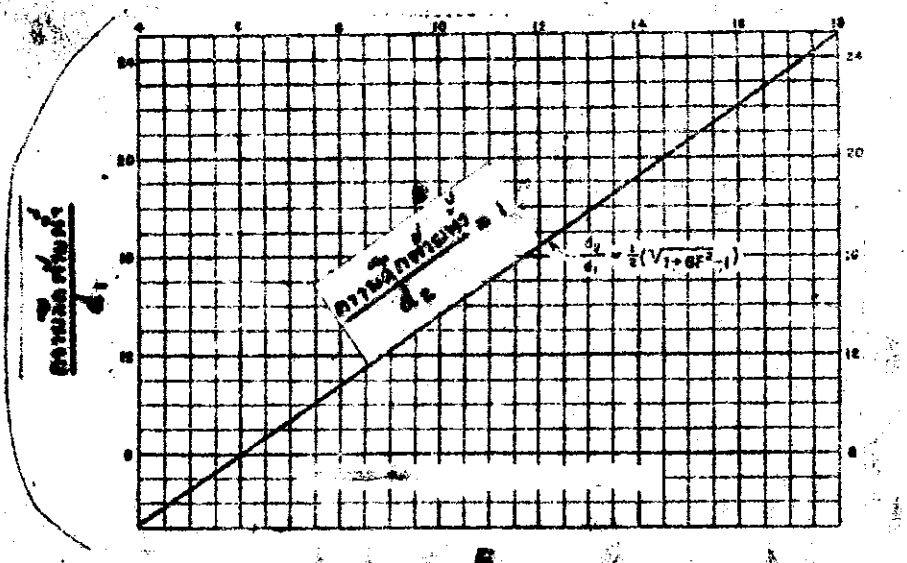
กราฟหาความยาวของตัวส่วน



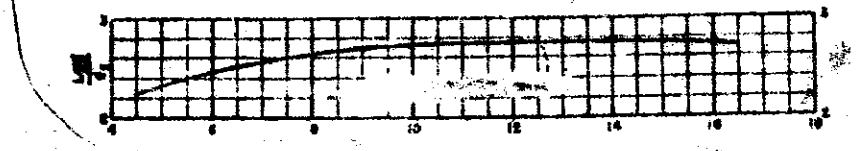
ตัวอย่างการคำนวณหาความสูงของฝายแบบ ข้อที่ 1



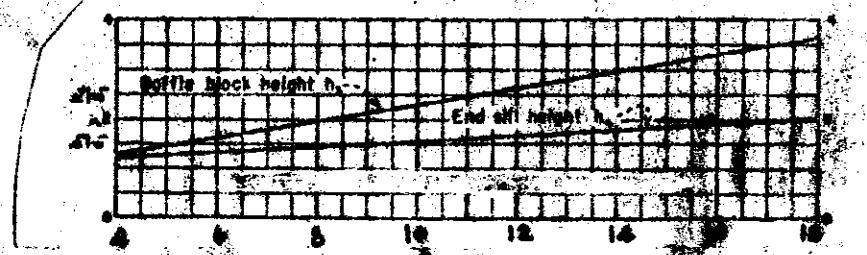
กราฟกำหนดความสูงของฝั่งทางเข้าคลอง และฝั่งด้านท้าย (ขยาย)



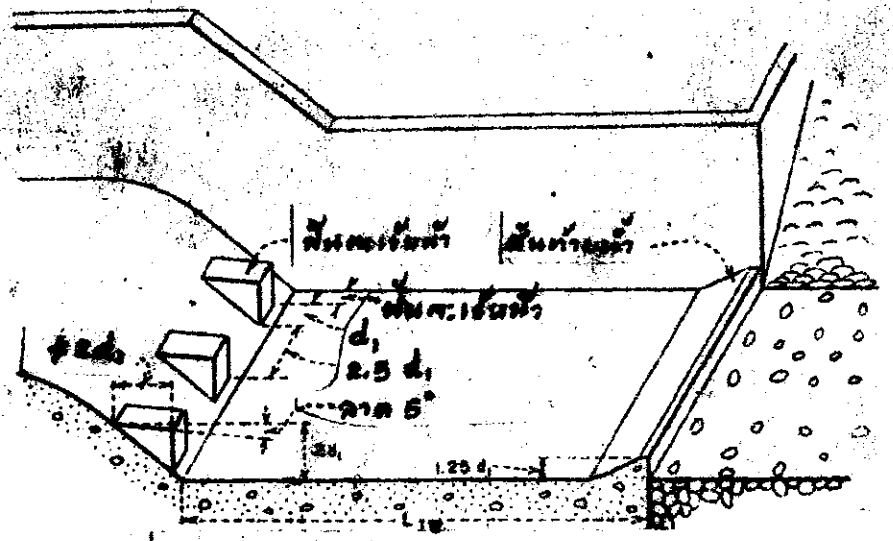
กราฟหาความลึกท้ายน้ำ



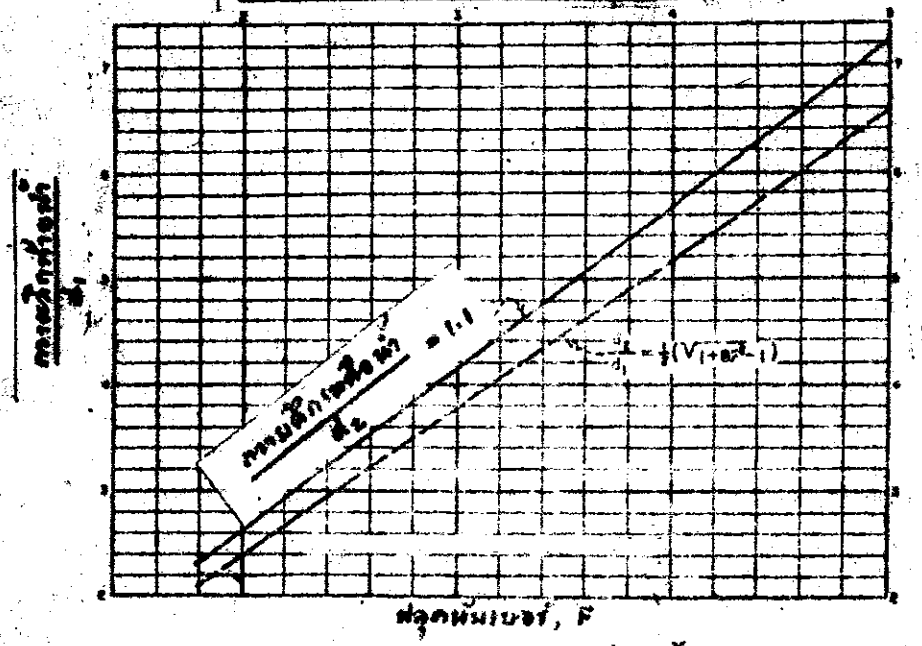
กราฟหาความยาวของกำแพง



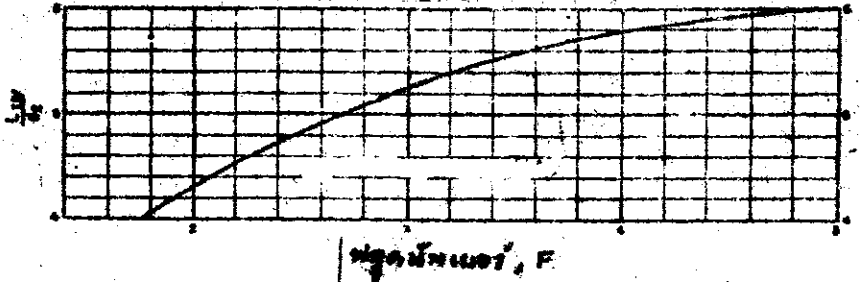
กราฟหาความสูงของแผงกระแทกและธรณีสิ้นสุด และ ขั้นท้ายน้ำ



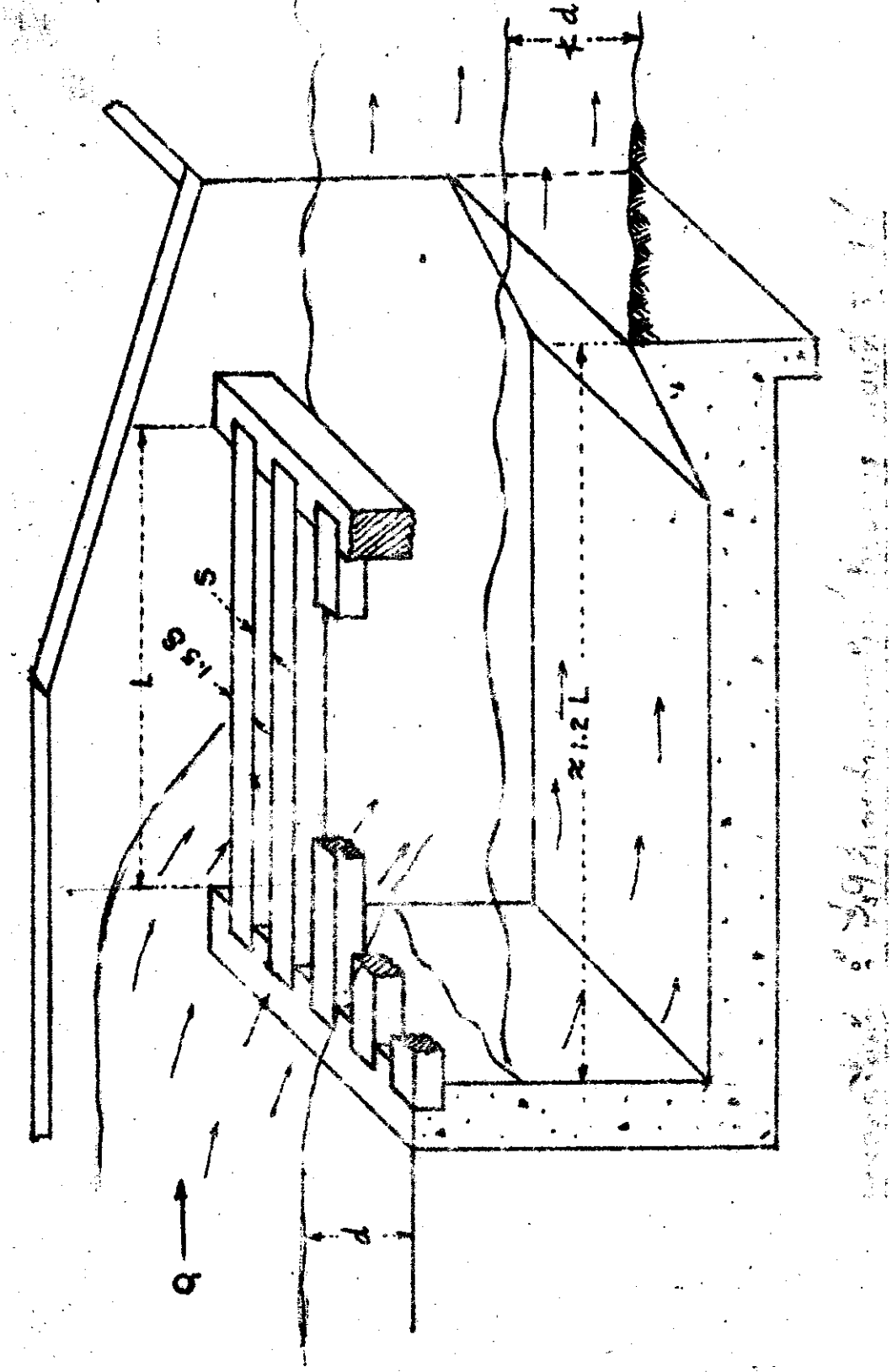
ส่วนลดพลังน้ำท้ายอาคาร แบบที่ IV



กราฟหาความลึกท้ายน้ำ



กราฟหาความยาวของตัวสะ


d
S
1.5 S
≈ 1.2 L
L
q

ในเมื่อ L = ความยาวของแผงวัดตามทิศทางการไหลของน้ำเป็นฟุต

Q = ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ผ่านอาคารเป็น (ฟุต)^3/วินาที

C = สัมประสิทธิ์ซึ่งจะต้องทดลองหาในบางกรณี

= 0.245 ถ้าหากว่าระยะห่างระหว่างผิวของแต่ละชี่ของแผงเท่ากับ $\frac{3}{4}$ ถึง 1 เท่าของความกว้างของชี่นั้น ๆ

S = ความกว้างของช่องว่างระหว่างชี่ของแผงเป็นฟุต

N = จำนวนช่องที่น้ำผ่านระหว่างชี่ของแผง

g = 32.2 ฟุต/(วินาที)^2

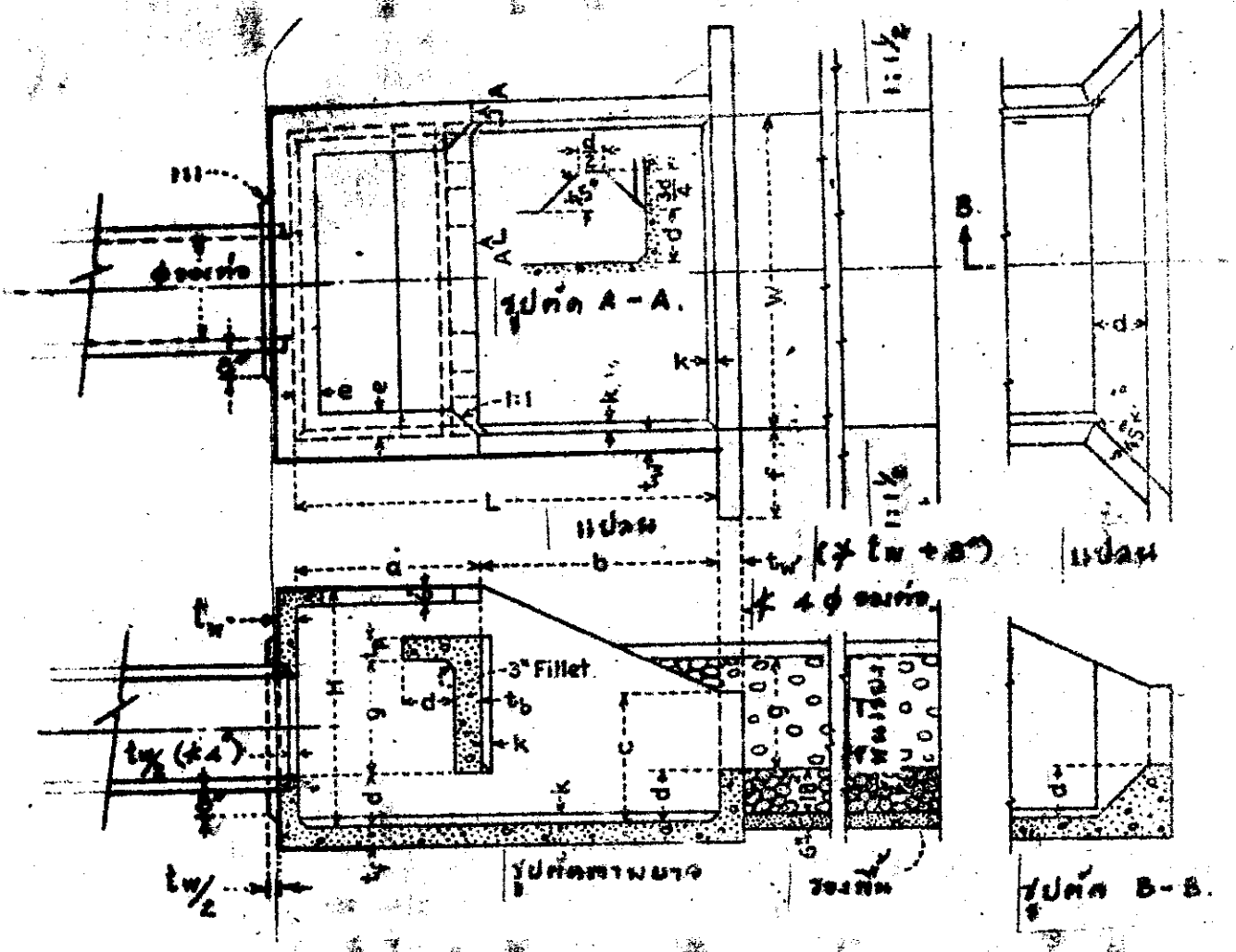
d = ความลึกของน้ำในคลองด้านเหนือน้ำเป็นฟุต

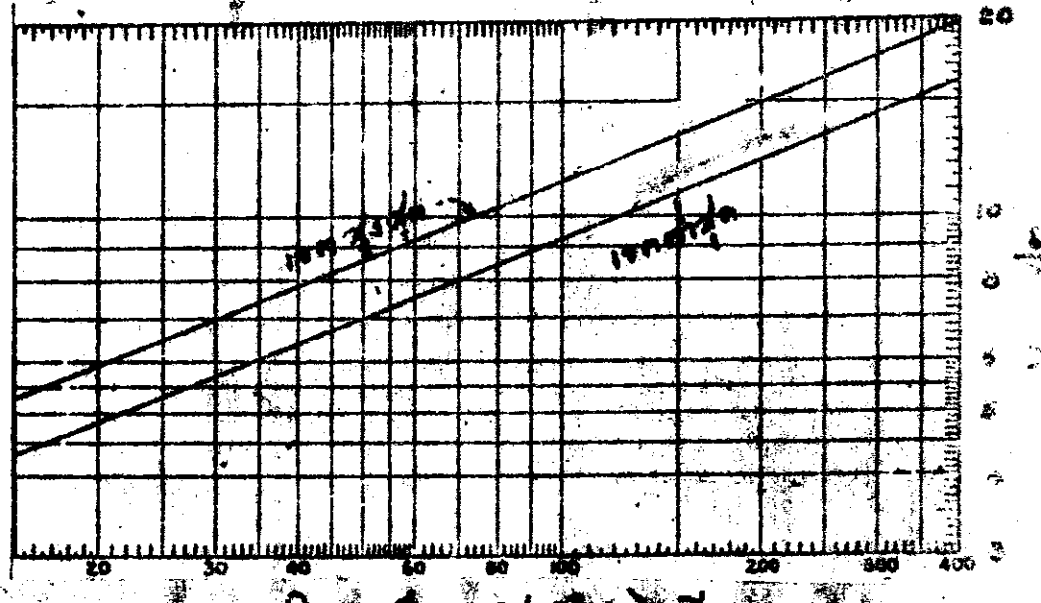
4.13.5 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ V เป็นแบบที่มีลักษณะเป็นพื้นเอียงท้ายทางทิ้งน้ำ (Spillway) ของเขื่อนที่สูงมาก และที่ระดับน้ำท้ายน้ำหนุนอยู่ค่อนข้างสูง พลังน้ำจะถูกทำลายไปโดยแท่งน้ำที่หนุนอยู่ด้านท้ายน้ำ เป็นแบบที่ไม่ค่อยนิยมทำกันนัก จึงไม่ขอกล่าวละเอียดในที่นี้

4.13.6 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ VI เป็นแบบที่อาศัยลดพลังน้ำโดยการกระแทกตัวระหว่างแท่งน้ำกับวัตถุแข็ง (ผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก) เหมาะที่จะใช้กับอาคารประเภทท่อ โดยมีเกณฑ์ว่าปริมาณน้ำที่ผ่านท่อแต่ละท่อ (ท่อหนึ่งท่อใช้อ่างหนึ่งอัน) ไม่เกิน 400 (ฟุต)^3/วินาที (11.3 ม.^{3}/วินาที) และความเร็วกระแสน้ำที่พุ่งสู่อ่างจะต้องไม่เกิน 30 ฟุต/วินาที (10 ม./วินาที) ส่วนกรณีที่ปริมาณน้ำเกินกว่าที่กำหนดให้นี้ก็ให้แยกอ่างเป็นหลาย ๆ อ่างวางเรียงติดต่อกันไป

อ่างแบบนี้ไม่ต้องการระดับน้ำด้านท้ายน้ำเป็นตัวช่วยแต่อย่างใดเลย แต่ถ้าความลึกของน้ำด้านท้ายน้ำมีค่าเท่ากับ d + $\frac{g}{2}$ (ค่า d กับ g ดูจากตารางกำหนดขนาดของอ่าง) จะทำให้การกัดเซาะแทบไม่เกิดขึ้นเลย นอกจากนี้ควรใช้หินเรียง (Riprap) เรียงต่อตัวอ่างออกไปโดยมีระดับเท่ากับสันด้านท้ายน้ำ อ่างแบบนี้มีชื่อเรียกว่า อ่างแบบกระแทก (Impact type basin or baffled basin)

การกำหนดสัดส่วนของอ่างจะกำหนดขึ้นจากปริมาณน้ำสูงสุดที่ผ่านตัวต่อ ตามตารางแบบท้ายรูปประกอบ


รูปตัด A - A.
1:1
1:1
1:1
L
แปลน
t_w (หรือ t_w + 3")
แปลน
4 ϕ ระบาย
3" Fillet
t_w
$t_w/2$
$t_w/2$ (หรือ 4")
รูปตัดตามยาว
รอยเทา
รูปตัด B - B.


20
10
8
6
4
3
20
30
40
60
80
100
200
300
400

ตารางกำหนดขนาดอ่างลดพลังน้ำท้ายอาคาร แบบที่ VI

ขนาดท่อ		พื้นที่หน้าตัดท่อ	ฟุต-นิ้ว										ฟุต					
ϕ'	ซม.	ตร.ฟุต	W	H	L	a	b	c	d	e	f	g	L_a	L_r	L_b	L_c	E	ความลึก
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
18	1.77	2.21	5-6	4-3	7-4	3-3	4-1	2-4	0-11	0-6	1-6	2-1	6	6½	6	6	3	4.0
24	3.14	38	6-9	5-3	9-0	3-11	5-1	2-10	1-2	0-6	2-0	2-6	6	6½	6	6	3	7.0
30	4.91	59	8-0	6-3	10-8	4-7	6-1	3-4	1-4	0-8	2-6	3-0	6	6½	7	7	3	8.5
36	7.07	85	9-3	7-3	12-4	5-3	7-1	3-10	1-7	0-8	3-0	3-6	7	7½	8	8	3	9.0
42	9.62	115	10-6	8-0	14-0	6-0	8-0	4-5	1-9	0-10	3-0	3-11	8	8½	9	8	4	9.5
48	12.57	151	11-9	9-0	15-8	6-9	8-11	4-11	2-0	0-10	3-0	4-5	9	9½	10	8	4	10.5
54	15.90	191	13-0	9-9	17-4	7-4	10-0	5-5	2-2	1-0	3-0	4-11	10	10½	10	8	4	12.0
60	19.63	236	14-3	10-9	19-0	8-0	11-0	5-11	2-5	1-0	3-0	5-4	11	11½	11	8	6	13.0
72	28.27	339	16-6	12-3	22-0	9-3	12-9	6-11	2-9	1-3	3-0	6-2	12	12½	12	8	6	14.0

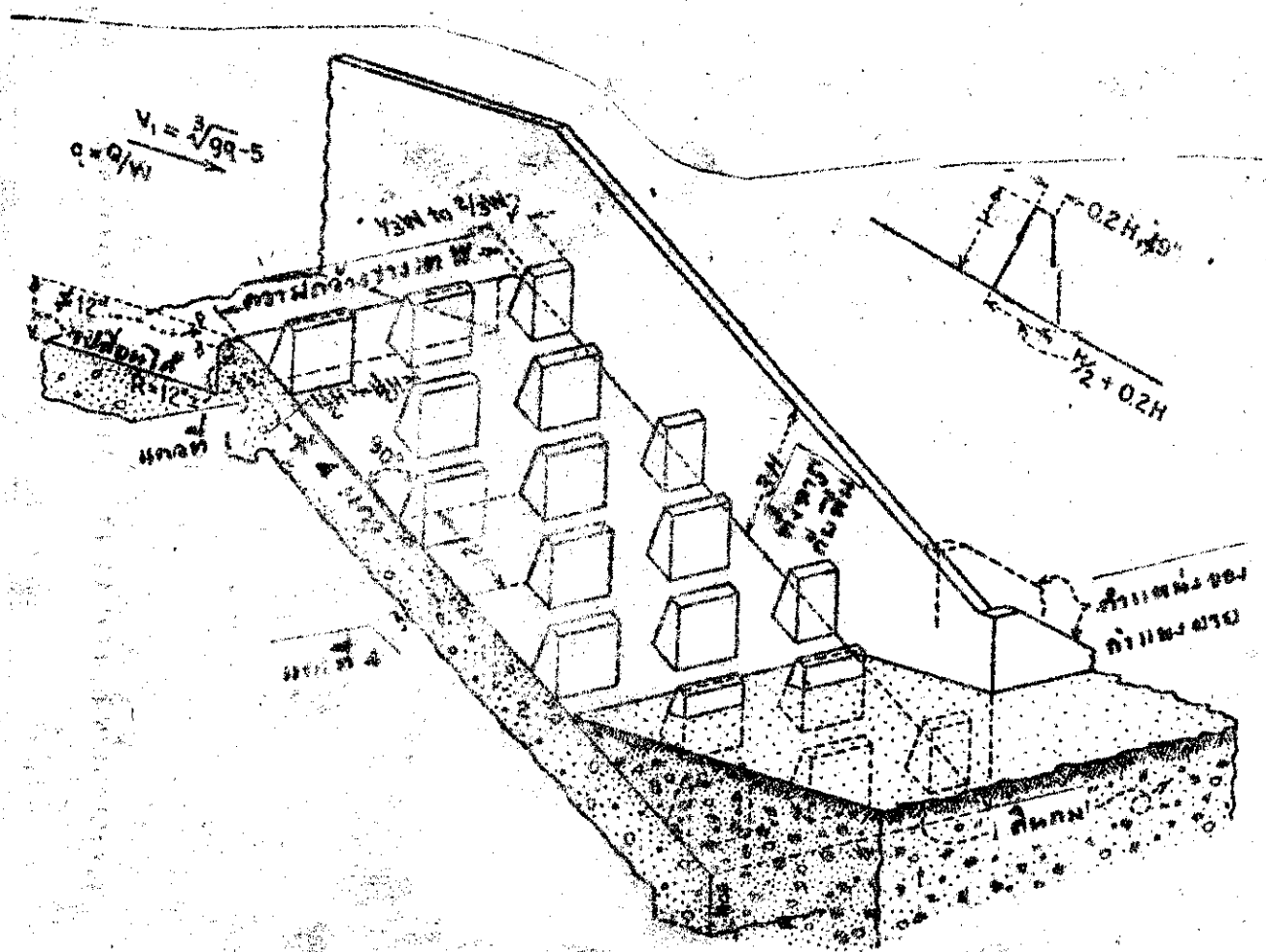
หมายเหตุ การกำหนดขนาดท่อในข้อกำหนดนี้ ตามเรือกระแสน้ำ 12 ฟุต/วินาที เมื่อน้ำไหลเต็มท่อ หรือ 24 ฟุต/วินาที เมื่อน้ำไหลครึ่งท่อ

4.13.7 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ VII เป็นแบบที่อาศัยหลักการลดพลังน้ำโดยอาศัยการเสียดสีระหว่างแท่งน้ำกับอากาศ โดยทำเป็นช่องน้ำโจน (Slotted and solid bucket) ให้น้ำที่ไหลผ่านลงมาพุ่งขึ้นสู่อากาศแล้วจึงตกกลับลงมาที่ผิวน้ำด้านท้ายน้ำ เป็นแบบที่เหมาะกับทางทิ้งน้ำ (Spillway) อาคารน้ำตก (Drop) และรางเทในลักษณะที่ระดับน้ำด้านท้ายน้ำต่ำกว่าสันที่น้ำข้าม (Crest flow is not submerged) และไม่จำกัดค่าฟรูดนัมเบอร์และความเร็ว V_1 ด้วย

4.13.8 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ VIII เป็นแบบที่ใช้กับท่อที่ผ่านน้ำความเร็วสูง เช่น ท่อผ่านน้ำขับเทอร์ไบน์ท้ายเขื่อน (Penstock and powerhouse) ซึ่งต้องการอ่างที่มีระยะสั้นและขนาดกระทัดรัด อ่างแบบนี้จะมีความยาวลดลงถึง 50 % ของอ่างลดพลังน้ำทั่ว ๆ ไป แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้กับอาคารในระบบส่งน้ำ จึงไม่ขอกล่าวละเอียดในที่นี้

4.13.9 อ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารแบบที่ IX เป็นแบบที่ความจริงแล้วไม่ใช่ตัวอ่างลดพลังน้ำ แต่เป็นการลดความเร็วของกระแสน้ำในขณะที่น้ำไหลผ่านพื้นเอียงด้วยฟันตะเข้ที่ติดตั้งไว้ในลักษณะสลับฟันปลา (Staggered baffled apron) จนกระทั่งเมื่อน้ำไหลลงสู่พื้นล่างด้านท้ายน้ำแล้วความเร็วของกระแสน้ำอ่อนลงมากจนไม่เกิดการกัดเซาะขึ้นที่ท้ายน้ำ จึงไม่จำเป็นต้องมีตัวอ่าง ข้อจำกัดของอ่างแบบนี้คือ ปริมาณน้ำต่อความกว้าง 1 ฟุตจะต้องไม่เกิน 60 (ฟุต)^3/วินาที/ฟุต และอ่างนี้จะทำหน้าที่ลดพลังน้ำได้ดีที่สุดเมื่อความเร็วกระแสน้ำตอนเริ่มผ่านเข้ามีค่าเท่ากับ $\sqrt[3]{g \cdot q} = 5$ เมื่อ $g = 32.2$ ฟุต/(วินาที)^2 และ q เท่ากับปริมาณน้ำเป็น (ฟุต)^3/วินาที/ฟุต

กล่าวโดยสรุปสำหรับอ่างลดพลังน้ำท้ายอาคารทั้ง 9 แบบนี้จะเห็นว่าแต่ละแบบเหมาะสำหรับอาคารชลประทานแต่ละประเภทและแต่ละขนาด และที่ใช้กันอยู่เสมอสำหรับงานออกแบบอาคารในระบบส่งน้ำนั้นคือ แบบที่ I, II, III, IV, VI และแบบที่ IX



ช่วงลดพลังน้ำท้ายอาคาร แบบที่ ๔

$$\therefore \quad \frac{V_o^2}{2g} = 0$$

$$A_1 = 1 \times d_1 = d_1 \quad \text{ม.}^2$$

$$\therefore \quad V_1 = \frac{11.863}{d_1} \quad \text{ม./วินาที}$$

แทนค่าได้ $12 + 3 = \left\{\left(\frac{11.863}{d_1}\right)^2 \times \left(\frac{1}{2 \times 9.81}\right)\right\} + d_1$

$$294.3\, d_1^2 = 140.731 + 19.62\, d_1^3$$

$$d_1^3 - 15 d_1^2 + 7.1728 = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(K)}$$

ตารางหาค่า d_1 จากสมการ K

d_1	d_1^2	d_1^3	$-15\, d_1^2$	7.1728	K	หมายเหตุ
0.70	0.49	0.343	-7.35	↑	0.1658	
0.71	0.5041	0.3579	-7.5615		-0.0308	
0.709	0.50268	0.3564	-7.5402	7.1728	-0.011	
0.708	0.50126	0.35489	-7.51896	↓	0.00873	←ใช้ค่านี้

$$\therefore \quad d_1 = 0.708 \quad \text{ม.}$$

$$V_1 = \frac{11.863}{0.708} = 16.756 \quad \text{ม./วินาที}$$

$$d_2 = -\frac{d_1}{2} + \sqrt{\frac{d_1^2}{4} + \frac{2V_1^2 \cdot d_1}{g}}$$

$$d_2 = -\frac{0.708}{2} + \sqrt{\frac{0.501}{4} + \frac{2x280.764x0.708}{9.81}}$$

$$= -\frac{0.708}{2} + \sqrt{40.65143}$$

$$= 6.022 \quad \text{ม.}$$

$$F = \frac{V_1}{\sqrt{g.d_1}}$$

$$= \frac{16.756}{\sqrt{9.81 \times 0.708}} = 6.358 > 4.5$$

V_1 = 16.756 ม./วินาที อยู่ระหว่าง 50 – 60 ฟุต/วินาที

Q = 11.863 $ม.^3$/วินาที/ม. ≯ 200 $(ฟุต)^3$/วินาที/ฟุต

ดังนั้นใช้อ่างลดพลังน้ำท้ายฝายแบบที่ III

อ่านกราฟจากค่า F = 6.358 จะได้

$$\frac{h_3}{d_1} = 1.70; \quad h_3 = 1.2036 \approx 1.20 \quad \text{ม.}$$

$$\frac{h_4}{d_1} = 1.30; \quad h_4 = 0.9204 \approx 0.95 \quad \text{ม.}$$

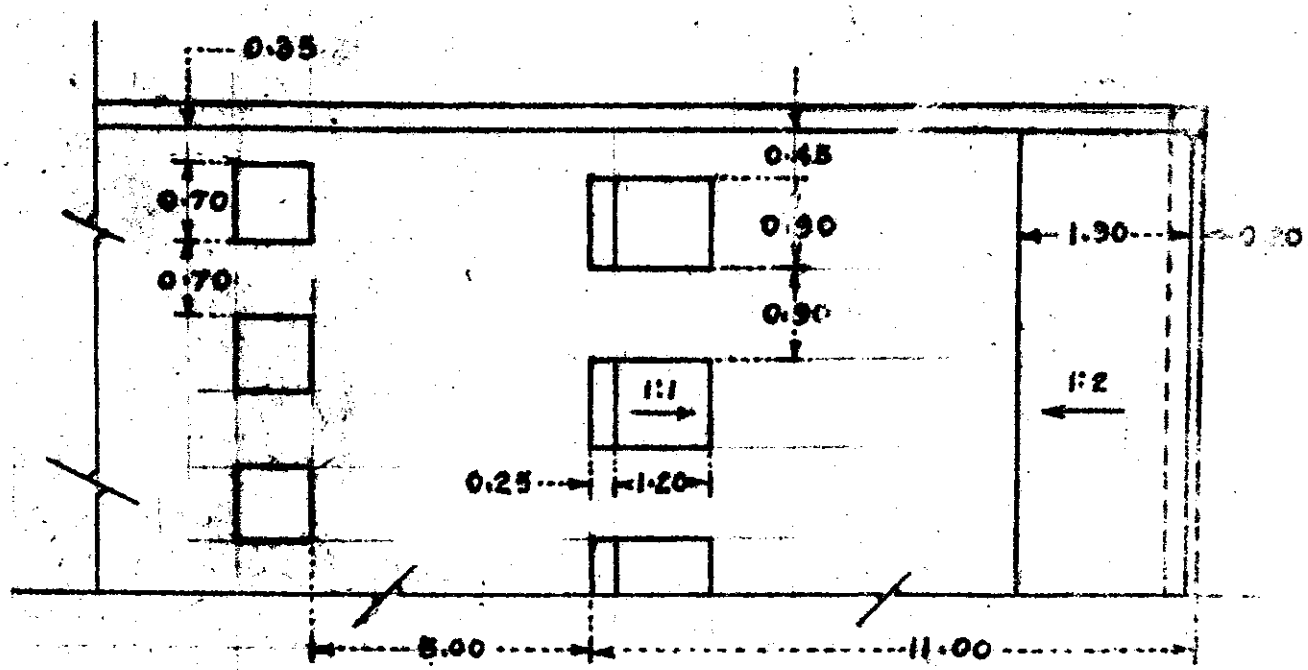
$$\frac{L\ III}{d_2} = 2.50; \quad L\ III = 15.0.55 \approx 16.00 \quad \text{ม.}$$

$0.2\ h_3$ = 0.24 ≃ 0.25 ม.

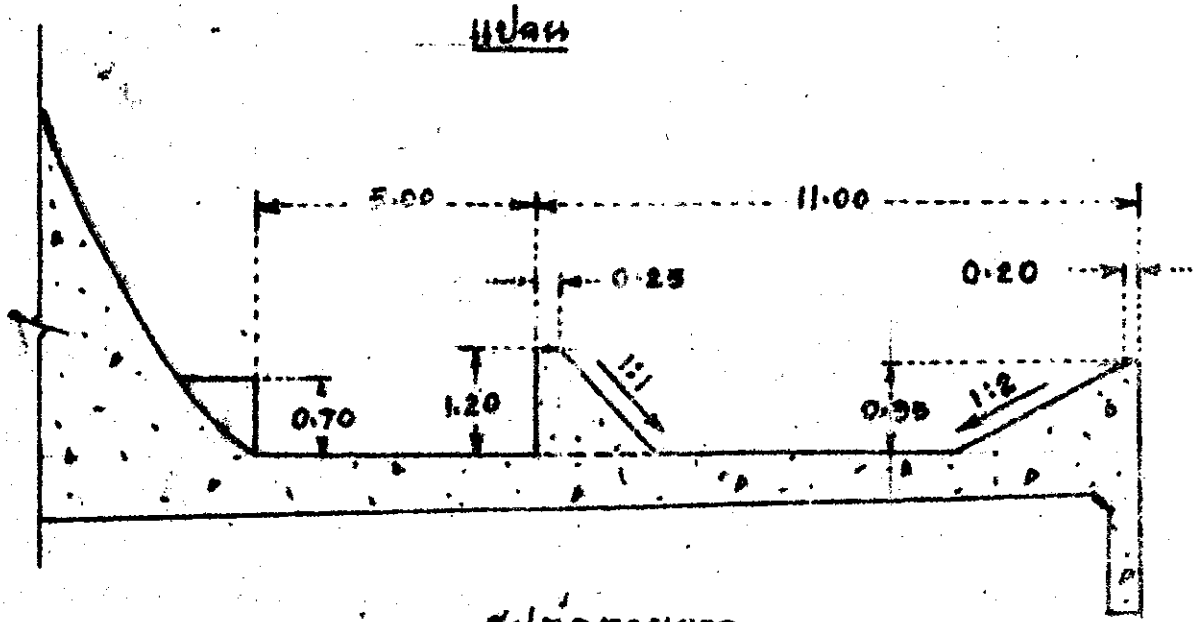
$0.75h_3$ = 0.90 ม.

$0.8\ d_2$ = 4.8176 ≃ 5.00 ม.

(ดูรูปประกอบ)



แปลน



รูปตัดตามยาว

รูปประกอบตัวอย่าง

บทที่ 5

สพานน้ำ รางน้ำ หรือริน (Flume)

สพานน้ำ รางน้ำ หรือรินนี้ เป็นอาคารนำน้ำ (Conveyance Structure) ที่ทำหน้าที่ต่อเชื่อมคลองส่งน้ำสายเดียวกันในเมื่อแนวคลองส่งน้ำวางผ่านสภาพภูมิประเทศที่ไม่อาจขุดคลองผ่านไปได้ หรืออาจขุดคลองผ่านได้แต่อาจทำได้ด้วยความยากลำบาก หรือใช้ค่าลงทุนที่สูงกว่า การสร้างสพานน้ำ หรือรางน้ำ หรือสร้างเป็นอาคารชนิดอื่น

5.1 สภาพภูมิประเทศต่าง ๆ ที่ควรพิจารณาสร้างสพานน้ำหรือรางน้ำอาจแยกออกได้ดังนี้

5.1.1 แนวคลองส่งน้ำตัดผ่านทางน้ำธรรมชาติในลักษณะที่ระดับก้นคลองส่งน้ำสูงกว่าระดับน้ำนอง (Flood) ในทางน้ำธรรมชาติมากพอที่ท้องสพานน้ำไม่ไปกีดขวางการไหลของน้ำในทางน้ำธรรมชาตินั้น ก็สามารถสร้างสพานน้ำได้

5.1.2 แนวคลองส่งน้ำตัดผ่านเชิงเขาหรือเชิงเนิน ซึ่งจะมีปัญหาทั้งในการเปิดหน้าดินอย่างกว้างขวางเพื่อขุดคลองผ่านหรือปัญหาการระบายน้ำฝนที่ตกและไหลจากบนเขาหรือบนเนินมาขังอยู่ที่คันคลองด้านติดเขาหรือเนินอาจเป็นเหตุที่ทำให้คันคลองทรุดและขาดได้ หรือปัญหาการระเบิดหินให้เป็นรูปคลองซึ่งทำได้ยากมาก ก็ควรพิจารณาสร้างรางน้ำจะทำได้ง่ายและลงทุนต่ำกว่า

5.1.3 กรณีที่ราคาที่ดินสูงมาก การขุดคลองจะต้องกันเขตคลองไว้ให้เพียงพอ ซึ่งจะกินพื้นที่กว้างมาก ถ้าเลี่ยงมาสร้างเป็นรางน้ำจะต้องการเขตคลองน้อยกว่ามาก ก็น่าที่จะพิจารณาสร้างรางน้ำดีกว่า

5.1.4 แนวคลองวางผ่านพื้นที่ลุ่มกว้างใหญ่ที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ หรือถ้าจะเปลี่ยนแนวคลองก็จะต้องเพิ่มความยาวของคลองส่งน้ำอีกมากมายก็น่าที่จะพิจารณาสร้างสพานน้ำ

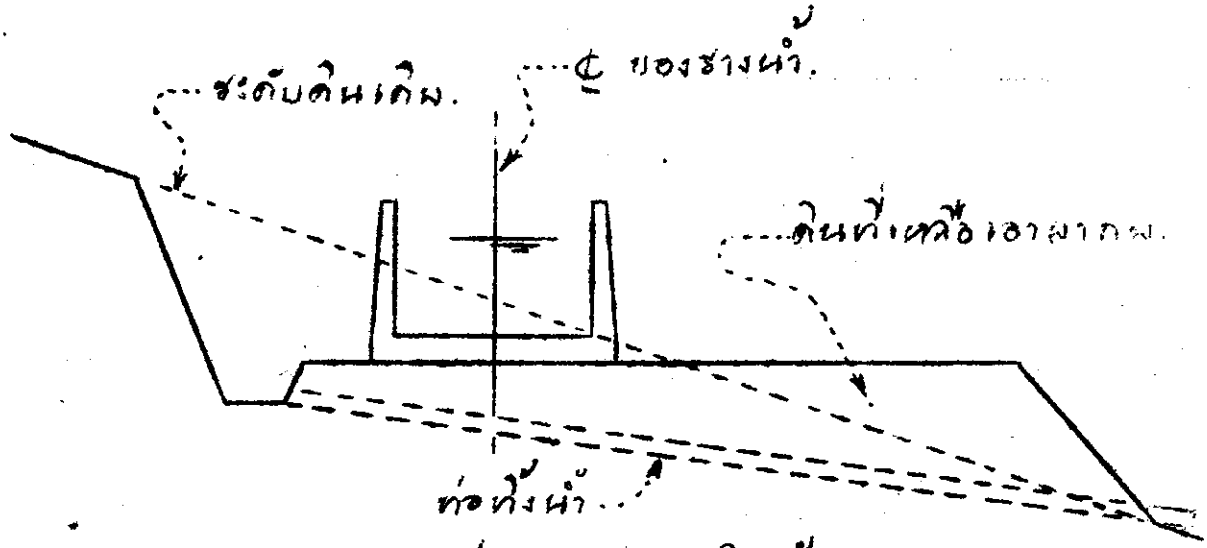
5.1.5 แนวคลองส่งน้ำที่วางผ่านพื้นที่สูง (ไม่สูงมากนัก) ที่เป็นบริเวณกว้างใหญ่ และถ้าเปลี่ยนแนวคลองส่งน้ำก็อาจต้องใช้ค่าลงทุนขุดคลองแพงกว่าสร้างสพานน้ำ เนื่องจากต้องขุดคลองยาวมากขึ้น และยังจะทำให้ระดับน้ำในคลองลดต่ำลงไปมากด้วย ก็ควรจะสร้างรางน้ำเช่นกัน

5.2 ชนิดของสพานน้ำหรือรางน้ำที่ใช้ในงานชลประทาน

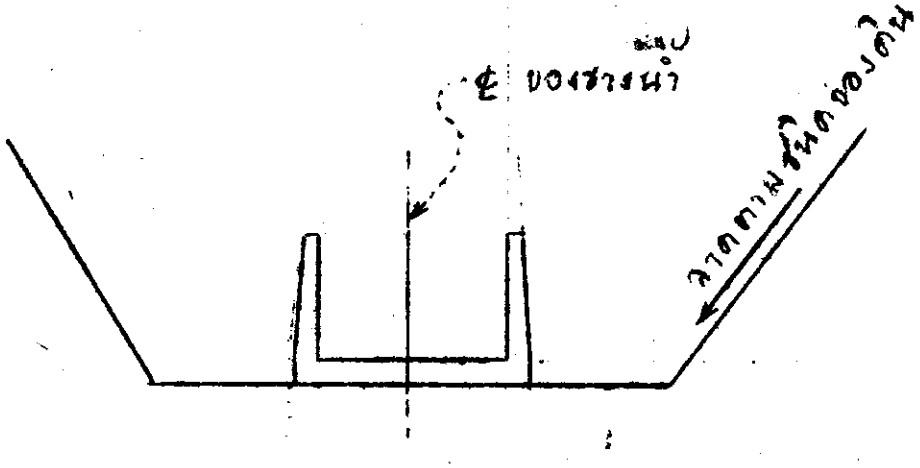
สพานน้ำหรือรางน้ำที่ใช้ในงานชลประทานนั้นมักนิยมออกแบบให้มีรูปตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดให้เป็นรูปตัดที่มีคุณสมบัติทางชลศาสตร์ดีที่สุด (Good hydraulic property) เพื่อให้เป็นการประหยัดค่าลงทุน แต่ว่าได้แบ่งตามลักษณะการออกแบบและการก่อสร้างออกเป็น 2 ชนิดคือ รางน้ำ (Bench flume) และสพานน้ำ (Elevated flume) ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดของแต่ละชนิด ดังนี้

5.2.1 รางน้ำ (Bench flume) จะใช้สร้างเฉพาะในสภาพภูมิประเทศและจุดประสงค์ดังที่กล่าวไว้ในข้อ 5.1.2, 5.1.3 และ 5.1.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสภาพการดังกล่าว รางน้ำจะถูกวางอยู่บนผิวดินหรือพื้นหินทั้งสิ้น สิ่งรองรับพื้นรางน้ำจึงเป็นพื้นผิวดินหรือหินที่ราบเรียบ การออกแบบคำนวณและการก่อสร้างทำได้ง่ายและมีความมั่นคงแข็งแรงตามสภาพพื้นที่รองรับ ส่วนวัสดุที่ใช้สร้างรางน้ำนั้นในสมัยก่อนมีทั้งรางน้ำที่เป็นไม้สร้างให้มีรูปร่างหน้าตัดครึ่งวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้า บางทีก็เป็นหินก่อหรืออิฐก่อฉาบปูนก่อภายในและมีรูปหน้าตัดเช่นเดียวกับรางน้ำไม้ แต่ในปัจจุบันเนื่องจากไม้ หิน อิฐ ตลอดจนค่าแรงงานในการก่ออิฐหรือหินแพงมากจึงได้หันมาออกแบบเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือท่อคอนกรีตเสริมเหล็กฝังรอดไปใต้ผิวดิน และกำหนดให้น้ำไหลไม่เต็มท่อคล้ายการไหลของน้ำในคลองเปิด ทั้งนี้จุดประสงค์ที่สำคัญก็เพื่อลดค่าวัสดุก่อสร้าง ค่าแรงงาน และเพิ่มอายุการใช้งานนั่นเอง

5.2.1.1 การออกแบบทางชลศาสตร์ อาคารรางน้ำประกอบด้วยทางผ่านน้ำเข้า (Inlet transition) ตัวรางน้ำ (Bench flume) และทางผ่านน้ำออก (Outlet transition) การคำนวณน้ำที่จะรอดใต้พื้นรางน้ำ (Percolation) ไม่ต้องคำนึงถึง เราจะพิจารณาสัดส่วนของรูปตัดให้มีคุณสมบัติทางชลศาสตร์ให้ดีที่สุด (Good hydraulic property) และความเร็วของน้ำที่ไหลในรางน้ำก็กำหนดจากความเร็วสูงสุดที่ยอมให้น้ำไหลผ่านผิวคอนกรีตคือ ไม่เกิน 4.50 เมตร/วินาที แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ มักนิยมให้ใช้ความเร็วของน้ำในรางน้ำไม่เกิน 3.50 เมตร/วินาที ทั้งนี้เนื่องจากอาจจะต้องไปสิ้นเปลืองการก่อสร้างส่วนประกอบของอาคารเพิ่มเติมเพื่อป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายน้ำ (Downstream) ของรางน้ำนี้อีก ดังนั้นการคำนวณจึงขึ้นอยู่กับสัดส่วนและความลาดเท (Slope) ของพื้นรางน้ำเท่านั้น ซึ่งจะคำนวณได้จากสูตรของแมนนิ่ง (Manning's formula) ดังนี้



การวางรางน้ำ ตามสภาพในข้อ 4.1.2



การวางรางน้ำ ตามสภาพในข้อ 4.1.5

$$S = \frac{V^2 . n^2}{R^{4/3}}$$

หรือ $$S = \frac{Q^2 . n^2 . P^{1.333}}{A^{3.333}}$$

ในเมื่อ S = ส่วนลาดเทของผิวน้ำในรางน้ำ

V = ความเร็วของน้ำในรางน้ำ เป็น ม./วินาที

n = สัมประสิทธิ์ของความฝืดของผิวด้านในของรางน้ำ

R = รัศมีอุทกศาสตร์ เป็น ม.

$= \frac{A}{P}$

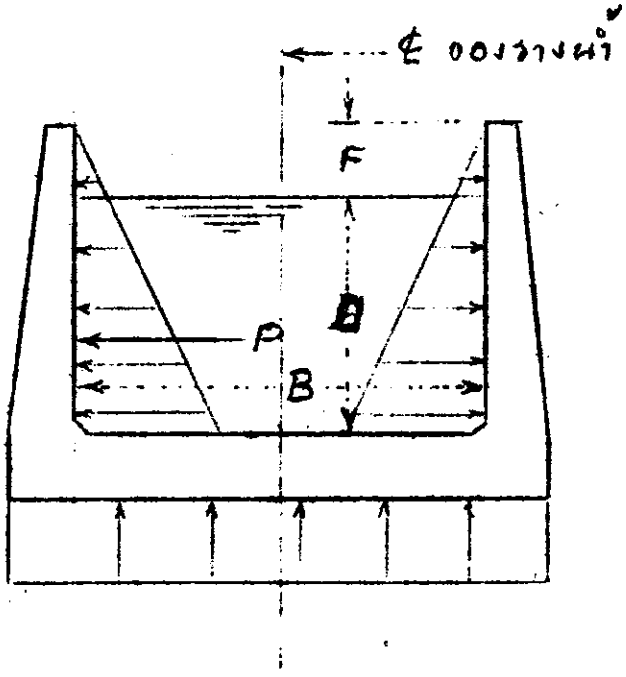
A = พื้นที่หน้าตัดของน้ำในรางน้ำ เป็น $ม.^2$

P = ความยาวเส้นขอบเปียก เป็น ม.

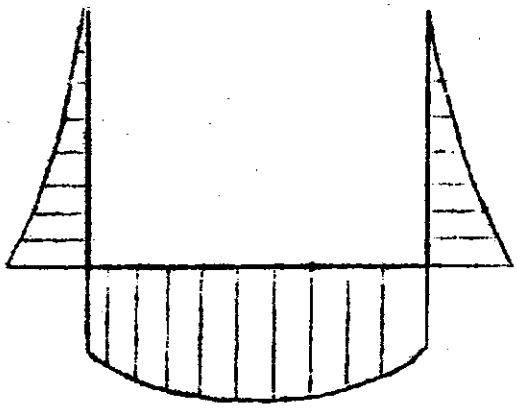
ส่วนระดับต่าง ของผิวน้ำด้านเหนือน้ำ (Upstream) และด้านท้ายน้ำ (Downstream) ของรางน้ำ จะหาได้จากผลรวมของ Loss ในทางผ่านน้ำเข้า ผลคูณระหว่างความยาวของรางน้ำกับส่วนลาดเทของผิวน้ำในรางน้ำที่คำนวณได้จากสูตรของแมนนิ่ง และ Loss ในทางผ่านน้ำออก

สำหรับส่วนเผื่อความลึกของน้ำ (Freeboard) ในรางน้ำนั้น ให้ใช้ส่วนเผื่อความลึกของน้ำเช่นเดียวกับคลองคาด (Lined canal)

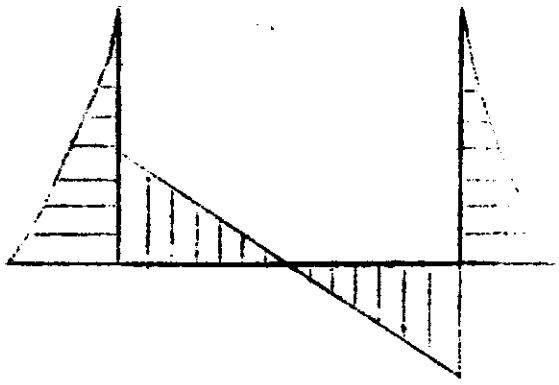
5.2.1.2 การออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากตามแนวที่สร้างรางน้ำผ่านนี้จะต้องเปิดหน้าดินให้กว้างพอสมควร ดังนั้นแรงดันดินด้านข้างรางน้ำจึงไม่มี มีแต่เพียงแรงดันของน้ำในรางน้ำโดยคิดว่าระดับน้ำเต็มถึงขอบด้านข้างของรางน้ำนั้น ส่วนแรงที่กระทำต่อพื้นรางน้ำมีค่าเท่ากับผลรวมของน้ำหนักด้านข้างทั้งสองของรางน้ำที่แผ่อยู่บนความกว้างของพื้นรางน้ำนั่นเอง (ดูรูป)



รูปแรงที่กระทำต่อรางน้ำ



M - diagram.



V - diagram.

ตัวอย่าง ให้ออกแบบรางน้ำเลาะเชิงเนินความยาว 500.00 ม. มีปริมาณน้ำผ่าน 15.45 ม.^{3}/วินาที ถ้าน้ำจำนวนที่กล่าวถึงนี้ไหลผ่านคลองกากมาด้วยความเร็ว 1.89 ม./วินาที และยอมให้เกิด Headloss ได้ไม่เกิน 1.65 ม.

วิธีทำ ปริมาณน้ำที่จะใช้คำนวณ $= 1.1 \times 15.45$

$= 16.995$

≈ 17 ม.^{3}/วินาที

สมมติให้ใช้ความเร็วของน้ำในรางน้ำ 3.25 ม./วินาที

$$\therefore \quad A = \frac{Q}{V}$$

$$= \frac{17}{3.25} = 5.23 \text{ ม.}^2$$

รูปร่างหน้าตัดที่ให้คุณสมบัติที่ดีทางชลศาสตร์ คือ

$$d = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{5.23}{2}} = 1.617 \text{ ม.}$$

$$b = \frac{5.23}{1.617} = 3.234 \text{ ม.}$$

$$\approx 3.25 \text{ ม.}$$

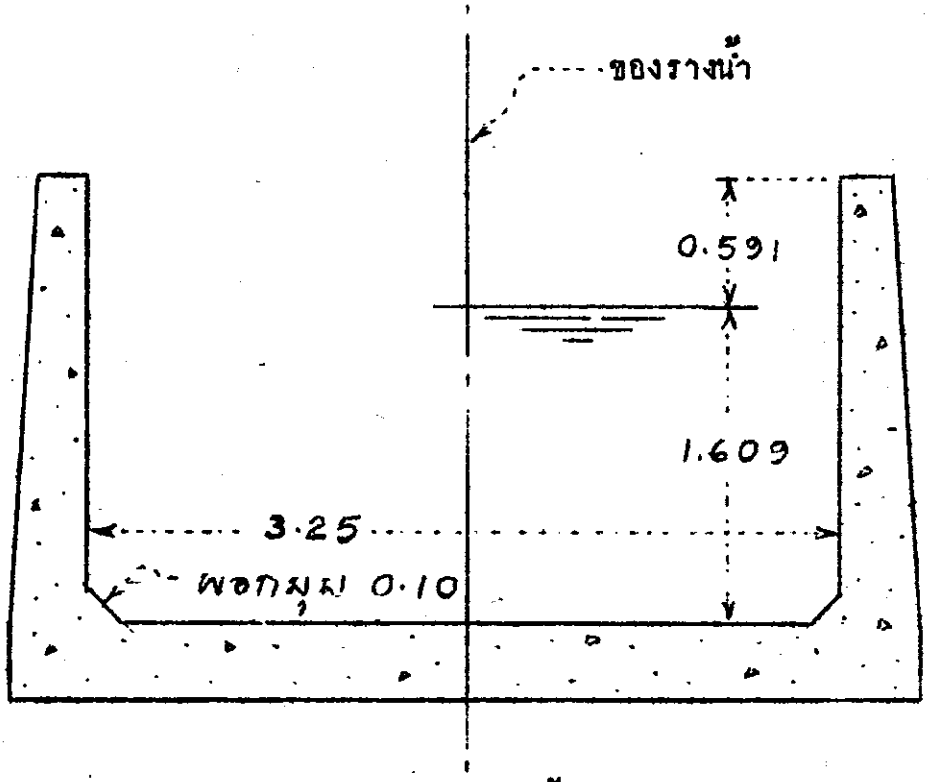
$$\therefore \quad d = \frac{5.23}{3.25} = 1.609 \text{ ม.}$$

ส่วนเผื่อความลึกตามเกณฑ์ของคลองกาก

จากตาราง เมื่อ $Q = 17$ ม.^{3}/วินาที, $F = 0.412$ ม.

จากกราฟ เมื่อ $Q = 17$ ม.^{3}/วินาที, $F = 0.487$ ม.

$\therefore$ ใช้ $F = 0.591$ ม.



รูปตัดสพานน้ำ

พื้นที่หน้าตัดจริง = (3.25 x 1.609) – (0.10 x 0.10)

= 5.22 ม.^{2}

ความเร็วน้ำในรางน้ำ = $\frac{17}{5.22}$ = 3.257 ม./วินาที

จาก $V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$

$n = 0.014$

$V = 3.257$ ม./วินาที

$A = 5.22$ ม.^{2}

$P = 3.25 + (2 \times 1.609) = 6.468$ ม.

$R = \frac{5.22}{6.468} = 0.807$ ม.

$R^{2/3} = 0.867$

$\therefore S = (\frac{3.257 \times 0.014}{0.867})^2 = 0.002766$

$= 1:362 \approx 1:350$

$\therefore$ Friction loss $= 500 \times \frac{1}{350} = 1.429$ ม.

ความเร็วของน้ำในคลอง 1.89 ม./วินาที

$$h_v = \frac{(3.257)^2 - (1.89)^2}{2 \times 9.81}$$

$$= 0.359 \text{ ม.}$$

Inlet transition loss $= 0.2 \times 0.359 = 0.072$ ม.

Outlet transition loss $= 0.3 \times 0.359 = 0.108$ ม.

$\therefore$ Loss ทั้งหมด $= 0.072 + 1.429 + 0.108$

$= 1.609$ ม.

< 1.65 ม. ใช้ได้

หาขนาดและเสริมเหล็กกำแพงข้าง

สมมุติกำแพงข้างและพื้น หนา 0.20 ม.

แรงดันน้ำต่อกำแพง $= 1,000 \times 2.20 = 2,200$ กก./ม.^{2}

$\therefore$ $V_{max.} = \frac{1}{2} \times 2,200 \times 2.20 = 2,420$ กก.

$M_{max.} = 2,420 \times \frac{2.30}{3} = 1,855$ กก.-ม.

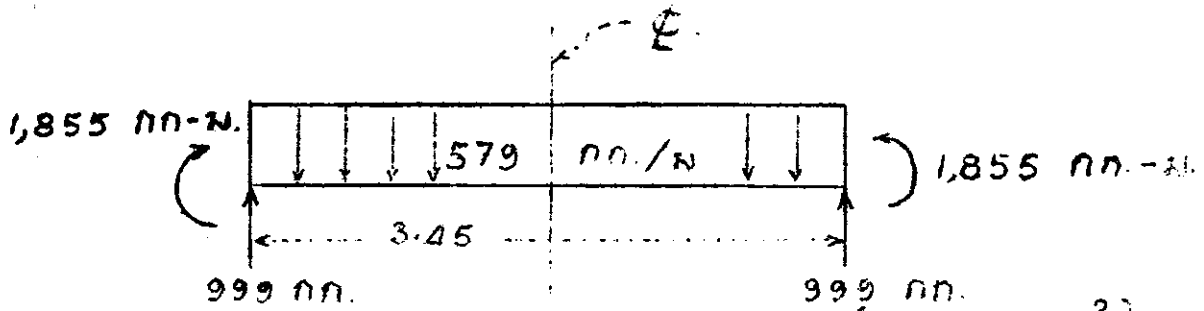
$d_M = \sqrt{\frac{1,855 \times 100}{13.7 \times 100}} = 11.64$ ซม.

$d_v = \frac{2,420}{100 \times 0.87 \times 5.2} = 5.35$ ซม.

$\therefore$ ใช้ d = 15 ซม., covering 5 ซม.

แรงดันพื้น $= \frac{2 \times 0.20 \times 2.20 \times 2,400}{3.65}$

$= 579$ กก.-ม.^{2}



$$M_{\text{℄}} = 1,855 + (999 \times \frac{3.45}{2}) - \left\{579 \times \frac{(1.725)^2}{2}\right\}$$

$$= 2,637 \quad \text{กก.-ม.}$$

$$V_{max.} = 999 \quad \text{กก.}$$

$$d_M = \sqrt{\frac{2,637 \times 100}{13.7 \times 100}} = 13.87 \quad \text{ซม.}$$

ใช้ d = 15 ซม., Covering = 5 ซม.

เหล็กเสริมรับอุณหภูมิ = $0.002 \times 20 \times 100 = 4.00$ $(\text{ซม.})^2$

ใช้ ϕ 9 มม. @ 0.15; $A_S = 4.24$ $(\text{ซม.})^2$, $\Sigma_o = 18.85$ ซม.

ต้องการหาช่วงความสูงของกำแพงข้างที่ใช้เหล็กรับอุณหภูมิเป็นเหล็กหลัก จึงสมมุติให้เป็นตำแหน่งที่ต่ำลงมา x

$$V_x = \frac{1}{2} \times 1,000\ x^2 = 500\ x^2 \quad \text{กก.}$$

$$M_x = 500\ x^2 \times \frac{x}{3} = \frac{500}{3}\ x^3 \quad \text{กก.-ม.}$$

จาก $A_S = \frac{M}{f_s.j.d}$

$$100 \times \frac{500}{3}\ x^3 = 4.24 \times 1,400 \times 0.87 \times 15$$

$$\therefore \quad x = 1.66 \quad \text{ม.}$$

และ $\Sigma_o = \frac{V}{u.j.d}$

$500x^2 = 18.85 \times 7.9 \times 0.87 \times 15$

$\therefore x = 1.97$

$\therefore$ ใช้ $x = 1.65$

$A_s = \frac{1,855 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 15} = 10.15 \text{ (ซม.)}^2$

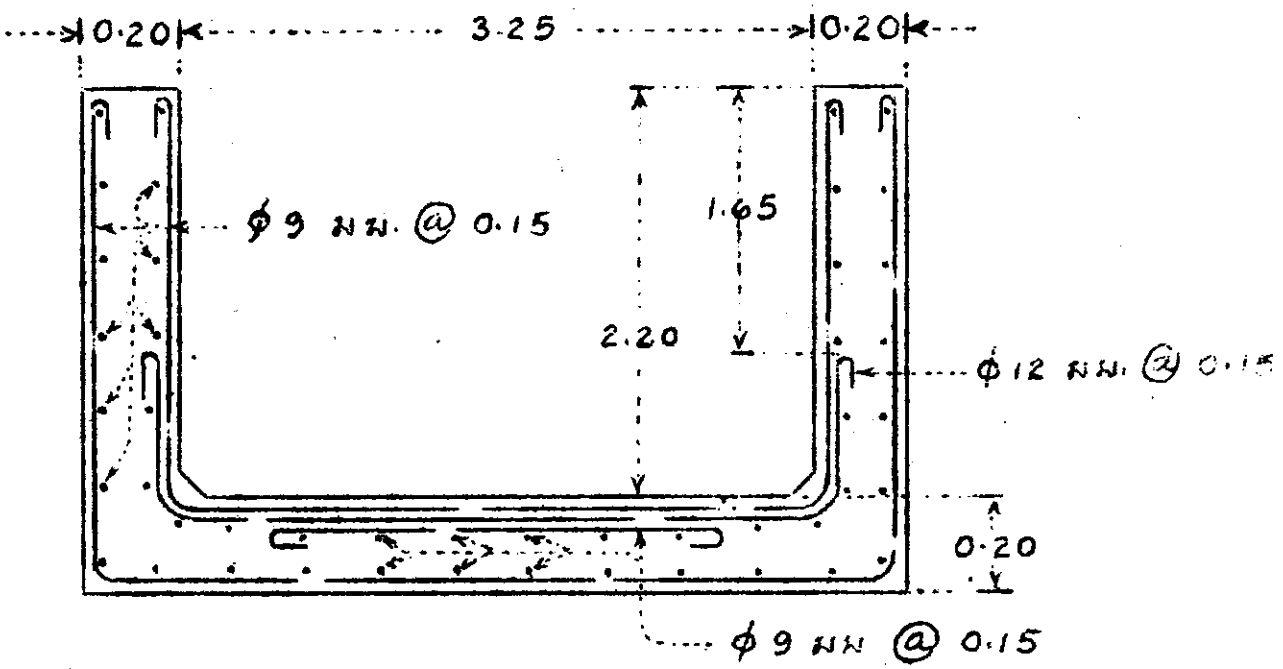
$\Sigma_o = \frac{2,420}{7.9 \times 0.87 \times 15} = 23.47 \text{ ซม.}$

$\therefore$ ใช้ { ø 9 มม. @ 0.15 / ø 12มม. @ 0.15 } $A_s = 11.78 \text{ (ซม.)}^2$, $\Sigma_o = 43.98$ ซม.

หาเหล็กเสริมที่กลางพื้น

$A_s = \frac{2,637 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 15} = 14.43 \text{ (ซม.)}^2$

ใช้ { ø 9 มม.@ 0.15 / ø 12 มม.@ 0.15 / ø 9 มม.@ 0.15 } $A_s = 16.02$ (ซม.)



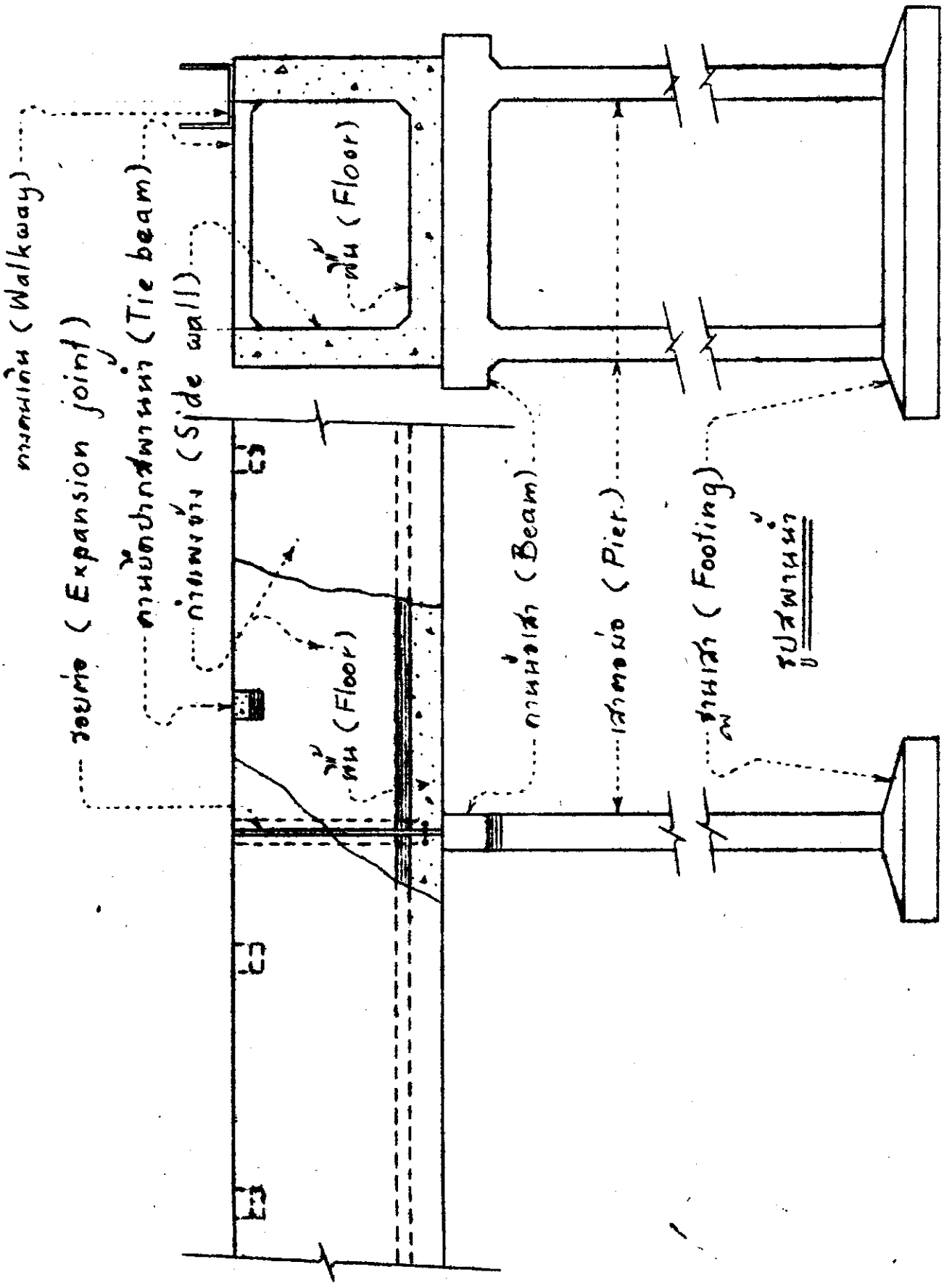
รูปตัดแสดงการเสริมเหล็กรางน้ำ

5.2.2 สพานน้ำ (Elevated flume) ใช้เฉพาะในภูมิประเทศในสภาพที่กล่าวไว้ในข้อ 5.1.1 และ 5.1.4 ซึ่งในสภาพดังกล่าวนี้สพานน้ำไม่อาจวางบนพื้นผิวดินได้ เพราะระดับดินที่สพานน้ำวางผ่านไปนั้นมีระดับต่ำกว่าท้องสพานน้ำ ดังนั้นสิ่งรองรับสพานน้ำจึงเป็นเสาหรือตอม่อ ซึ่งทำให้ลักษณะของสพานน้ำเหมือนกับสพานคนเดินทั่วไป แต่เป็นสพานที่ให้น้ำไหลผ่านเท่านั้นเอง

สำหรับลักษณะรูปร่างตลอดจนวัสดุที่ใช้ทำสพานน้ำก็คงเป็นเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในเรื่องของรางน้ำ และเสารองรับก็จะออกแบบเป็นเสา หรือตอม่อเช่นเดียวกับสพานคอนกรีตทั่วไปนั่นเอง และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศดังนั้นจึงมักนิยมทำรอยต่อ (Expansion Joint) ตรงแนวที่มีเสาหรือตอม่อรองรับ นอกจากนี้สิ่งที่แตกต่างจากรางน้ำก็คือตรงช่วงต่อระหว่างคลองกับสพานน้ำทั้งสองด้านเป็นแนวที่น้ำในคลองส่งน้ำจะรั่วซึมออกตรงรอยต่อระหว่างคลองกับทางผ่านน้ำ (Transition) ตรงทางเข้าและทางออกของสพานน้ำ ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องกำหนดระยะที่สพานน้ำวางทาบบนพื้นดินเดิมให้มีความยาวพอกับความยาวของการไหลของน้ำใต้อาคาร (Percolation path) ตามหลักการของ Lane's ด้วย

5.2.2.1 การออกแบบทางชลศาสตร์ อาคารสพานน้ำประกอบด้วยทางผ่านน้ำเข้า (Inlet transition) ตัวสพานน้ำ (Elevated flume) ทางผ่านน้ำออก (Outlet transition) เสาหรือตอม่อรองรับสพานน้ำ (Columns or piers) และทางเดินบนสพานน้ำ (Walk way) สำหรับส่วนสัดของตัวสพานน้ำนั้นใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับการออกแบบรางน้ำทุกประการ แต่ที่แตกต่างกันก็คือ การคำนวณเพื่อกำหนดระยะความยาวที่ตัวสพานน้ำ (Elevated flume) และทางผ่านน้ำ (Transitions) จะต้องวางอยู่บนพื้นดินเดิมให้มีความยาวพอเพียง โดยตรวจสอบกับค่า Weighted Creep Ratio ตามลักษณะดินในบริเวณนั้น

5.2.2.2 การออกแบบทางโครงสร้าง การออกแบบของสพานน้ำนี้แตกต่างจากการออกแบบรางน้ำโดยสิ้นเชิง สำหรับความสูงของกำแพงข้างต้องเพิ่มขึ้นอย่างน้อยเท่ากับความลึกของคานยึดปากสพานน้ำ ทั้งนี้เพื่อป้องกันน้ำในสพานน้ำไหลท่วมคานยึดปากสพานน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงทางด้านข้างขึ้นอีก หลักการกว้าง ๆ ก็คือ แรงดันของน้ำในสพานน้ำให้คิดเทียบเท่ากับผิวน้ำอยู่ที่ความลึกของน้ำรวมกับ Freeboard ส่วนการคำนวณออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ นั้นขอแยกกล่าวแต่ละส่วนดังนี้


ทางเดิน (Walkway)
รอยต่อ (Expansion joint)
คานยึดหัวเสา (Tie beam)
กำแพงกันดิน (Side wall)
พื้น (Floor)
พื้น (Floor)
คานรับพื้น (Beam)
เสาตอม่อ (Pier)
ฐานราก (Footing)
ฐานราก

5.2.2.2.1 กำแพงข้าง (Side wall) คิดความลึกของน้ำที่ดันกำแพงข้าง เท่ากับความลึกของน้ำในสพานน้ำรวมกับ Free board ช่วงความยาว (Span) คิดจาก ศูนย์กลางของคานยึดปากสพานน้ำ (Tie beam) ถึงศูนย์กลางความหนาของพื้น (Floor) ณ จุดที่ติดกับคานยึดปากสพานน้ำ ถือว่าเป็น Hinge Support และที่พื้นถือเป็น Fixed Support ค่าของโมเมนต์ (Moment) และแรงเฉือน (Shear) ที่เกิดขึ้นหาได้ดังนี้.-

$$w_1 = \gamma (d + F)$$

$$M_A = 0$$

$$R_A = \frac{w_1 \cdot l}{10}$$

$$M_B = -\frac{w_1 \cdot l^2}{15}$$

$$R_B = \frac{2w_1 \cdot l}{5}$$

$$M_C = +\frac{w_1 \cdot l^2}{15\ 5}$$

ในเมื่อ w_1 = แรงดันของน้ำที่พื้นสพานน้ำ เป็น กก./ม.^{2}

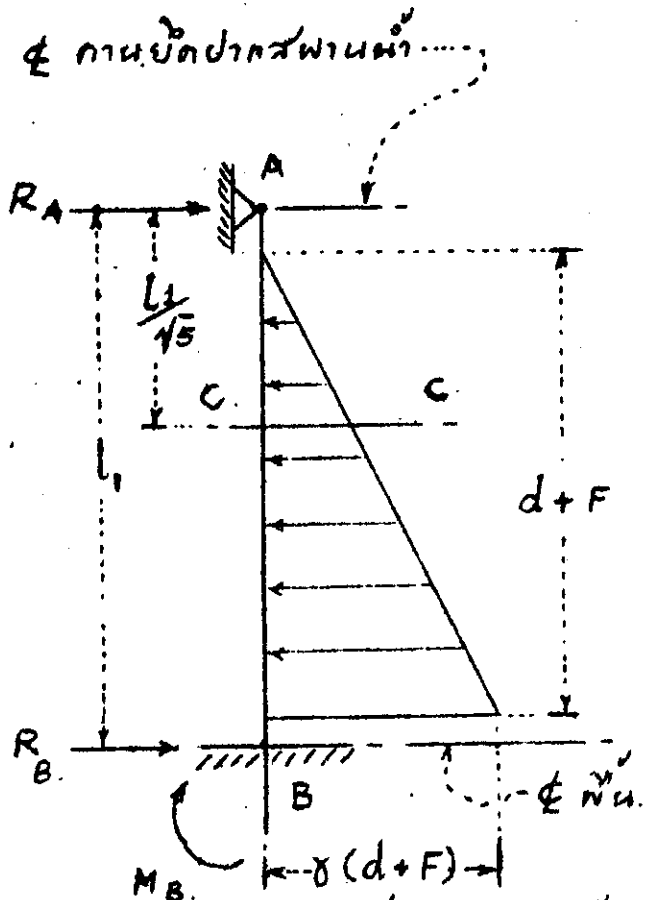
γ = น้ำหนักของน้ำ

= 1,000 กก./ม.^{3}

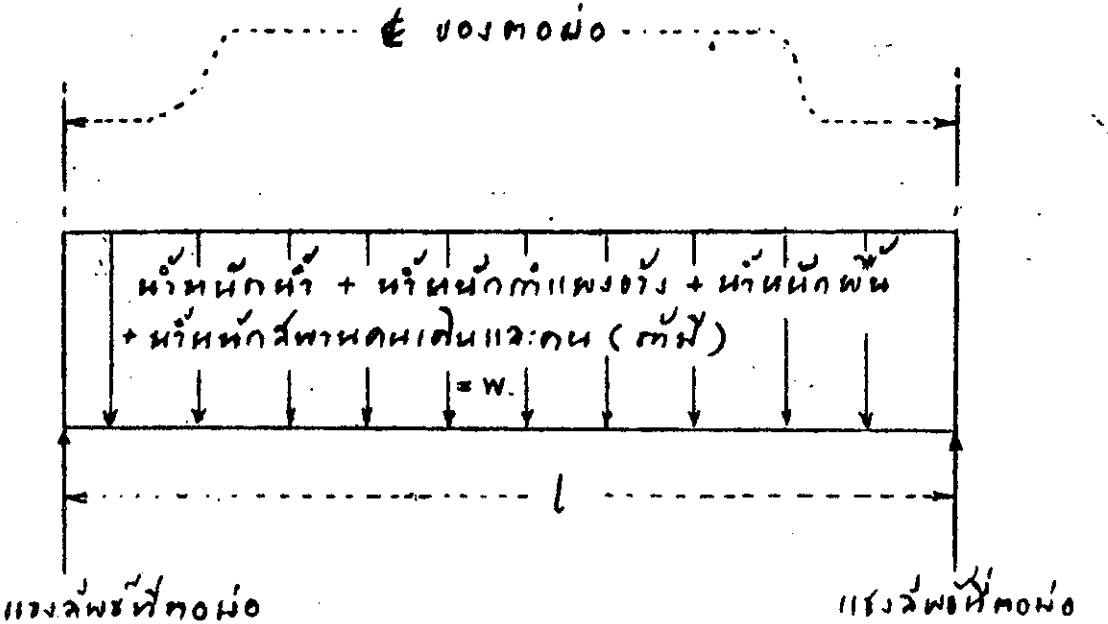
l = ช่วงความยาว (span) เป็น เมตร

สำหรับอีกด้านหนึ่งจะต้องออกแบบให้กำแพงข้างเป็นคานคู่รับน้ำหนักของพื้น (Floor) น้ำหนักของน้ำในสพานน้ำและน้ำหนักของตัวเอง โดยกำหนดให้เป็น Simple beam มีช่วงความยาว (Span) เท่ากับระยะระหว่างศูนย์กลางของตอม่อ (ดูรูป)

5.2.2.2.2 พื้น (Floor) การออกแบบให้คิดเป็น Partially fixed beam โดยมีช่วงความยาว (Span) เท่ากับระยะห่างศูนย์กลางของกำแพงข้าง รับน้ำหนักของน้ำในสพานน้ำและน้ำหนักของพื้นเอง โดยใช้สูตร



คิดแรงดันน้ำในสพานหน้า



คิดหาแรงน้ำหนักพื้นและน้ำ

รูปแสดงแรงที่กระทำต่อกำแพงข้าง

$$M_D = -\frac{w_1 l_1^2}{15} = M_B$$

$$M_E = +\frac{w \cdot l^2}{8} + \frac{w_1 \cdot l_1^2}{15}$$

$$V_D = \frac{wl}{2}$$

5.2.2.2.3 คานยึดปากสพานน้ำ (Tiedbeam) การออกแบบให้คิดเป็นชิ้นส่วนที่รับ Axial load ที่มีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{w_1 \cdot l_1}{10} \cdot S$$

ในเมื่อ T = Axial load เป็น กก.

w_1 = แรงดันของน้ำที่พื้นสพานน้ำ เป็น กก./ม.^{2}

l_1 = ระยะระหว่างศูนย์กลางของคานยึดปากสพานน้ำถึงศูนย์กลางความหนาของพื้น เป็น เมตร

S = ระยะระหว่างคานยึดปากสพานน้ำ เป็นเมตร

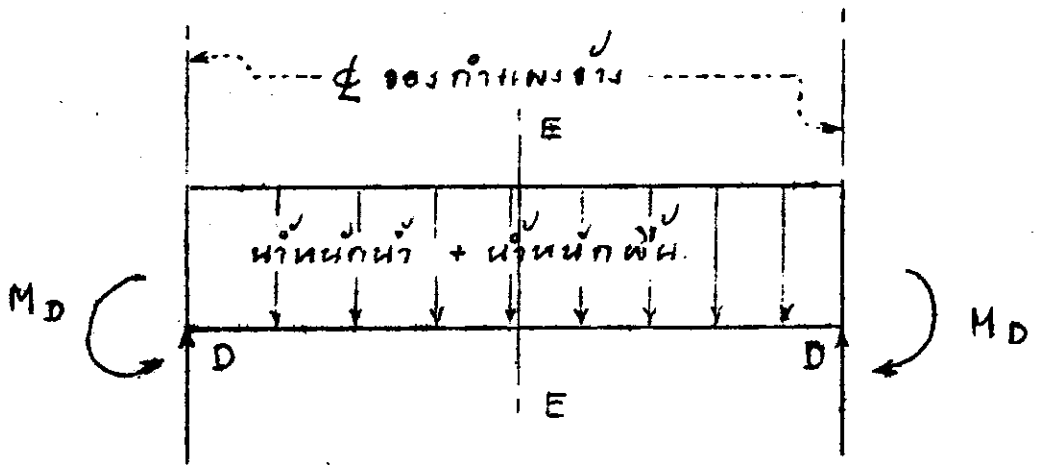
ส่วนแรงอีกแรงหนึ่งที่มาเกี่ยวข้องด้วยคือ แรงลมที่พัดผ่านบริเวณนั้น ซึ่งหาได้จากแรงลมที่กระทำต่อกำแพงช้างในช่วงความยาวระหว่างคานยึดปากสพานน้ำซึ่งสมมติเท่ากับ w มีหน่วยเป็น กก.

$$A_S = \frac{T + W}{f_s}$$

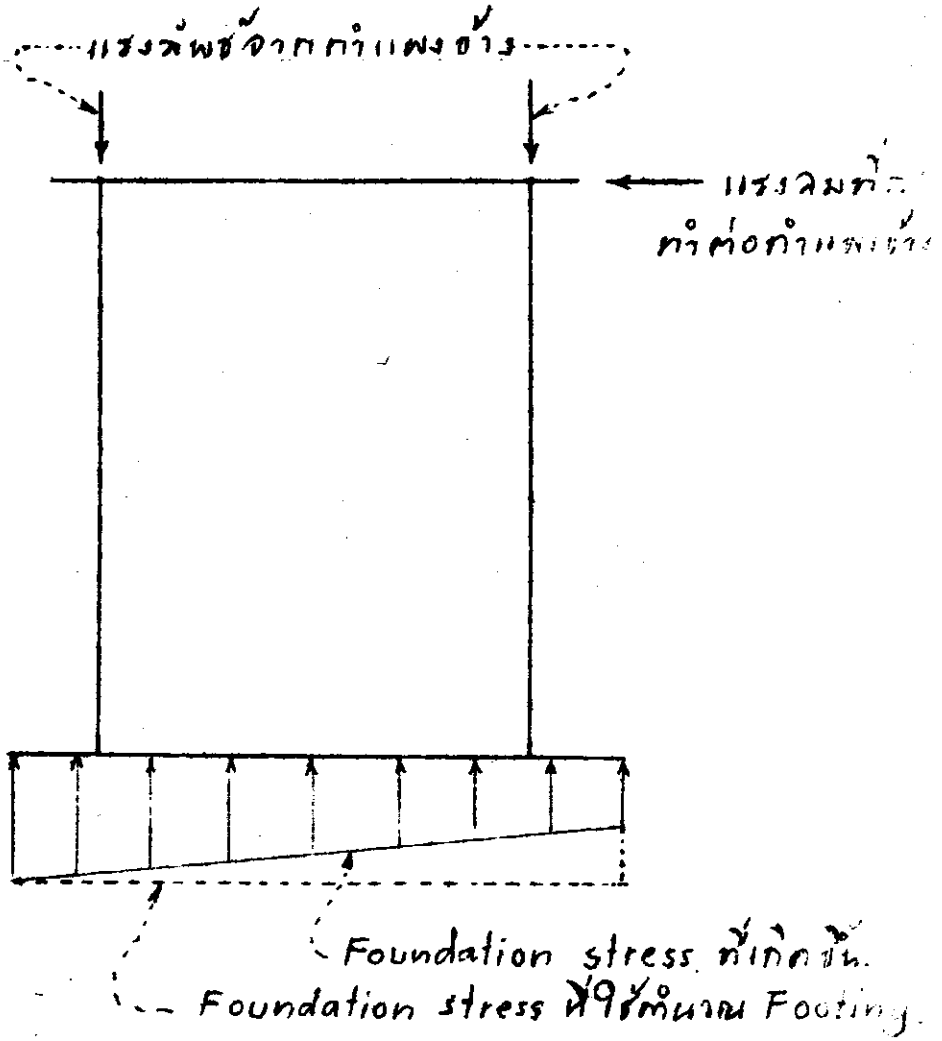
ในเมื่อ A_s = จำนวนเหล็กเสริม เป็น (ซม.)^2

f_s = Allowable tensile unit stress ของเหล็ก เป็น กก./(ซม.)^2

ในกรณีเหล็กเสริมใช้เกินกว่า 1 เส้น จะต้องใส่เหล็กปลอก (Stirrups) ด้วย



รูปแสดงแรงที่กระทำต่อพื้น



รูปแสดงแรงต่างๆ ที่เกิดกับเสาตอม่อและฐานตอม่อ

ถ้าต้องออกแบบให้มีสพานคนเดินวางบนคานยึดปากสพานน้ำจะต้องคิดน้ำหนักของสพานรวมกับน้ำหนักของคนบนสพาน (150 กก./ม.^{2}) กดบนคานยึดปากสพานน้ำ คิดเป็นน้ำหนักแผ่เท่ากับความกว้างของสพานคนเดินด้วย แล้วนำไปหาค่า f_c โดยใช้สูตร

$$f_c = \frac{P}{A} + \frac{2M}{j.k.b.d^2}$$

ค่า f_c ที่คำนวณได้จะต้องไม่เกิน $0.45\ f'_c$ จึงจะถือว่าพื้นที่หน้าตัดคานที่สมมติขึ้นนั้นใช้ได้

ส่วนเหล็กที่เสริมใช้ Temperature Steel และใช้ Covering 5 ซม.

5.2.2.2.4 เสาตอม่อ

(i) เริ่มแรกจะต้องตรวจสอบแรงกด (Bearing stress) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสระหว่างกำแพงข้างกับคานหัวเสาจากสูตร

$$\text{พื้นที่รับแรงกด} = \frac{\text{แรงลัพธ์ที่กำแพงข้างกดบนคานหัวเสา}}{0.25 f'_c}$$

(ii) สำหรับแรงที่กระทำต่อเสานั้นให้แรงลัพธ์ที่กำแพงข้างกดบนหัวเสากับน้ำหนักของเสาเองเป็น Axial load ส่วนแรงดันของลมที่กระทำต่อกำแพงข้างในช่วงตอม่อถึงตอม่อ ซึ่งกระทำที่ศูนย์กลางของคานหัวเสานั้นทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้นกับเสานั้น ๆ ต่อจากนั้นให้ออกแบบเสาในแบบของ Compression and bending member.

5.2.2.2.5 ฐานตอม่อ การออกแบบมักนิยมให้ฐานตอม่อเป็น Combined footing โดยมีน้ำหนักที่กดหัวเสา น้ำหนักของเสาเอง และน้ำหนักของฐานตอม่อเป็น Axial load ส่วนแรงดันของลมทำให้เกิด Bending ดังนั้นฐานตอม่อจึงกลายเป็นสิ่งรองรับ Eccentric load ค่าของ Foundation Stress จึงเกิดขึ้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู แต่ในการคำนวณนั้นให้คิด Foundation Stress เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความยาวของด้านเท่ากับค่า Foundation Stress ข้างที่สูงที่สุด (ดูรูป)

ตัวอย่าง ให้ออกแบบสพานน้ำข้ามพื้นที่ลุ่ม ความยาวประมาณ 500.00 ม. ที่มีความจุ 15.45 ม.^{3}/วินาที และยอมให้เกิด Headloss ได้ไม่เกิน 0.75 ม. ใช้ระยะระหว่างเสาตอม่อ 8.00 ม.

วิธีทำ

(i) การคำนวณด้านชลศาสตร์นั้นคงดำเนินการตามวิธีที่กล่าวไว้ในตัวอย่างการออกแบบรางน้ำข้างต้นทุกประการ จนกระทั่งได้ขนาดของสพานน้ำเป็น b = 3.25 ม. d = 1.609 ม. และ F = 0.591 ม.

ในตอนนี้ได้เผื่อความสูงของกำแพงข้างไว้อีก 0.30 ม. เพื่อเป็นส่วนของคานยึดปากสพานน้ำ ดังนั้นความลึกของตัวสพานน้ำจึงเป็น 2.50 ม.

(ii) ความยาวของสพานน้ำในช่วงที่ต้องให้วางอยู่บนพื้นดินเดิมจะกำหนดได้จากค่าสมมติพื้นผิวดินในที่ลุ่มต่ำจากระดับน้ำสูงสุดในคลองส่งน้ำ 6.00 ม. และลักษณะเนื้อดินเป็นทรายละเอียด

ทรายละเอียดใช้ C_w = 7.0

$\therefore$ Percolation path = 6.00 x 7 = 42.00 ม.

กำหนดให้มี Cutoff wall ลึก 1.25 ม. 1 แห่ง

$\therefore$ ความยาวของสพานน้ำและ Transition ที่จะต้องวางบนพื้นดินเดิมจะต้องยาว

= (42.00 − 2.50) x 3 = 118.5 ม.

120 ม.

(iii) การคำนวณด้านโครงสร้าง

สมมติให้ความหนาของกำแพงข้าง 0.20 ม.

ความหนาของพื้น 0.25 ม.

และขนาดของคานยึดปากสพานน้ำเป็น 0.15 x 0.20 ม.^{2}

(ก) คำนวณกำแพงข้าง

ความลึกของน้ำ 2.20 ม.

ช่วงความยาวคาน 2.55 ม.

$w = \gamma \cdot 1$

$= 1,000 \times 2.20 = 2,200$ กก./ม.^{2}

$V_A = \frac{2,200 \times 2.55}{10} = 561$ กก.

$V_B = \frac{2 \times 2,200 \times 2.55}{5} = 2,244$ กก.

$M_C = \frac{2,200 \times (2.55)^2}{15\sqrt{5}} = 427$ กก.-ม.

$M_B = \frac{2,200 \times (2.55)^2}{15} = 954$ กก.-ม.

$d_M = \sqrt{\frac{954}{13.7}} = 8.34$ ซม.

$d_V = \frac{2,244}{100 \times 0.87 \times 5.2} = 4.96$ ซม.

แต่เนื่องจากจะต้องออกแบบให้กำแพงช้างเป็นคานรับพื้นด้วย ซึ่งต้องเสริมเหล็กเป็นสองผิวจึงต้องให้กำแพงช้างหนาอย่างน้อย 0.20 ม.

จึงใช้ $d = 15$ ซม. Covering 5 ซม.

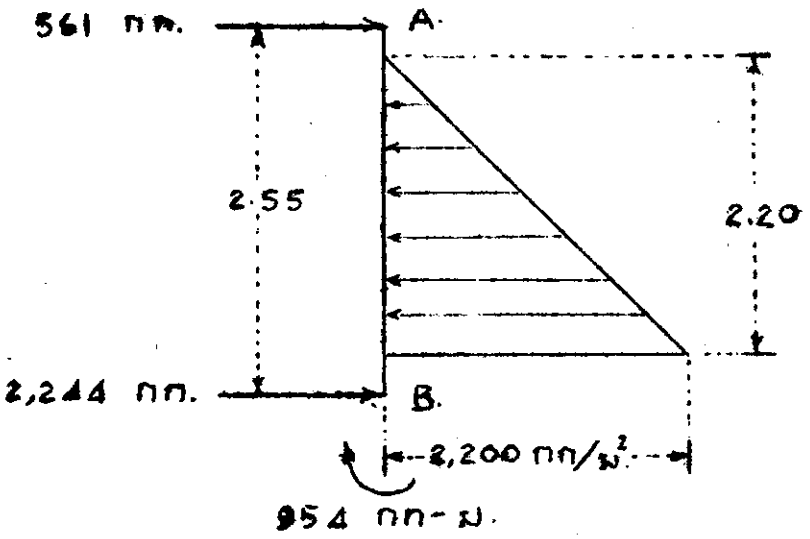
$A_{s_B} = \frac{954 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 15} = 5.22$ (ซม.)^2

$\Sigma_{o_B} = \frac{2,244}{7.9 \times 0.87 \times 15} = 21.77$ ซม.

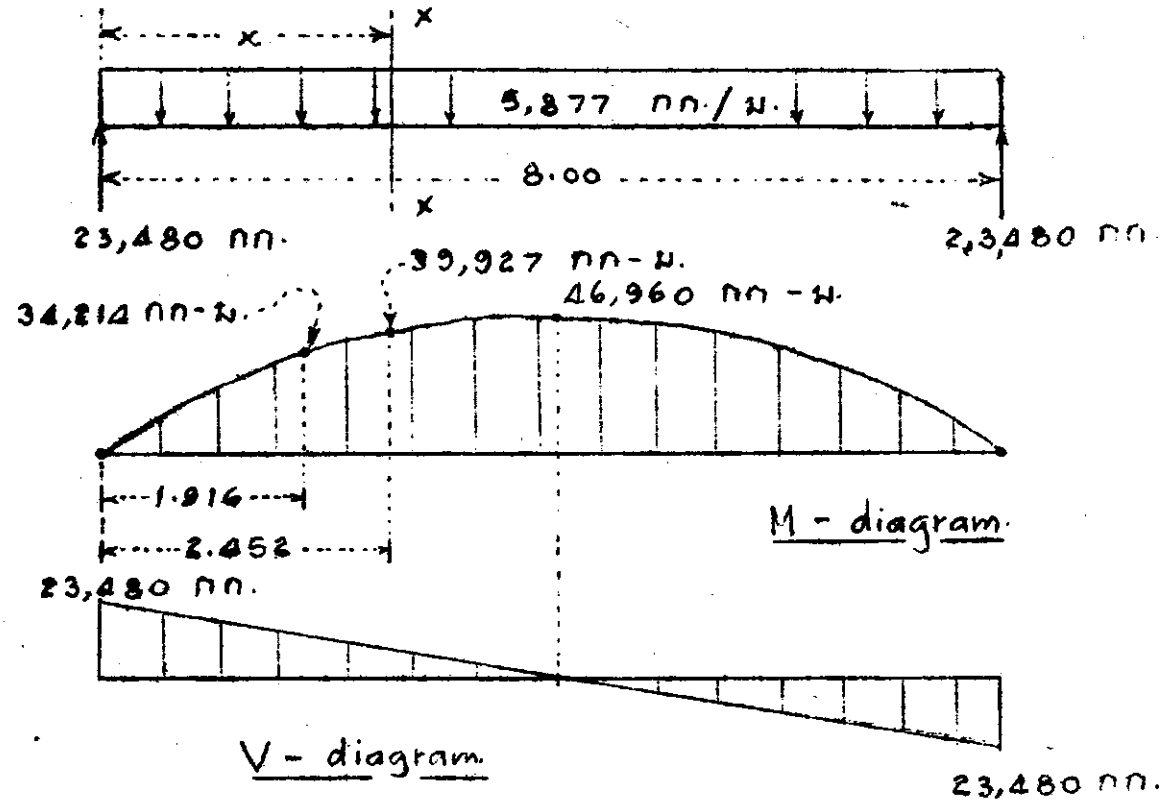
$\Sigma_{o_A} = \frac{561}{7.9 \times 0.87 \times 15} = 5.44$ ซม.

$A_{s_C} = \frac{427 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 15} = 2.34$ (ซม.)^2

เหล็กรับอุณหภูมิ $= 0.002 \times 2,000 = 4.00$ ซม.^{2}



รูปแสดงแรงที่เกิดกับกำแพงข้างเนื่องจากแรงดันน้ำ



รูปแสดงโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดกับกำแพงข้าง

ใส่เหล็กทางตั้งดังนี้

- ด้านติดน้ำ (ด้านใน)

ϕ 12 มม. @ 0.28; $A_s = 4.04$, $\Sigma_o = 13.46$ } $A_s = 6.31$ (ซม.)^2
ϕ 9 มม. @ 0.28; $A_s = 2.27$, $\Sigma_o = 10.10$ } $\Sigma_o = 23.56$ (ซม.)^2

- ด้านนอก

ϕ 12 มม. @ 0.28; $A_s = 4.04$ (ซม.)^2 $\Sigma_o = 13.46$ ซม.

เมื่อคิดกำแพงข้างรับพื้น

น้ำหนักน้ำ	$2,200 \times \frac{3.25}{2}$	$= 3,575$	กก./ม.
น้ำหนักพื้น	$0.25 \times \frac{3.25}{2} \times 2,400$	$= 975$	กก./ม.
น้ำหนักคาน	$0.20 \times 2.75 \times 2,400$	$= 1,320$	กก./ม.
	$\therefore w = 5,870$		กก./ม.

$M_{\text{℄}} = \frac{wl^2}{8} = \frac{5,870(8)^2}{8} = 46,960$ กก.-ม.

$V = \frac{wl}{2} = \frac{5,870 \times 8}{2} = 23,480$ กก.

$d_M = \sqrt{\frac{46,960 \times 100}{13.7 \times 20}} = 130.91$ ซม.

$d_V = \frac{23,480}{20 \times 0.87 \times 5.2} = 259.50$ ซม.

ใช้ $d = 265$ ซม.

$A_s = \frac{46,960 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 265} = 14.55$ (ซม.)^2

$\Sigma_o = \frac{23,480}{7.9 \times 0.87 \times 265} = 12.89$ ซม.

ใช้ 9-ϕ 15 มม.; $A_s = 15.90$ (ซม.)^2, $\Sigma_o = 37.70$ ซม.

ต้องการลดเหล็กเป็นระยะตามจำนวนดังนี้.-

$7 - \phi$ 15 มม., $A_s = 12.37$ $(ซม.)^2$

$6 - \phi$ 15 มม., $A_s = 10.60$ $(ซม.)^2$

$4 - \phi$ 15 มม., $A_s = 7.07$ $(ซม.)^2$

ถ้าใช้เหล็ก $12.37\ (ซม.)^2$

$$M = 12.37 \times 1,400 \times 0.87 \times 265 = 39,927 \text{ กก.-ม}$$

$$M_{x_1-x_1} = 23,480x_1 - 5,870\frac{x_1^2}{2} = 39,927$$

$$2.935x_1^2 - 23,480x_1 + 39,927 = 0$$

$$x_1^2 - 8x_1 + 13.604 = 0$$

$$x_1 = \frac{8 \pm \sqrt{64 - 54.416}}{2} = \frac{8 \pm 3.0958}{2} = 2.452 \text{ ม.}$$

ถ้าใช้เหล็ก $10.60\ (ซม.)^2$

$$M = 10.60 \times 1,400 \times 0.87 \times 265 = 34,214 \text{ กก.-ม}$$

$$M_{x_2-x_2} = 23,480x_2 - 5,870\frac{x_2^2}{2} = 34,214$$

$$x_2^2 - 8x_2 + 11.657 = 0$$

$$x_2 = \frac{8 \pm \sqrt{64 - 46.629}}{2} = \frac{8 \pm 4.168}{2} = 1.916 \text{ ม.}$$

ถ้าใช้เหล็ก $7.07\ (ซม.)^2$

$$M = 7.07 \times 1,400 \times 0.87 \times 265 = 22,820 \text{ กก.-ม.}$$

$$M_{x_3-x_3} = 23,480x_3 - 5,870\frac{x_3^2}{2} = 22,820$$

$$x_3^2 - 8x_3 + 7.775 = 0$$

$$x_3 = \frac{8 \pm \sqrt{64 - 31.1}}{2} = \frac{8 \pm 5.736}{2} = 1.132 \text{ ม.}$$

$$L = \frac{f_s \cdot d}{4 \cdot u} = \frac{1,400 \times 1.5}{4 \times 7.9} = 66.46 \text{ ซม.}$$

(ข) คำนวณพื้น

น้ำหนักพื้น = 0.25 x 2,400 = 600 กก./ม.^{2}

น้ำหนักน้ำ = 2,200 กก./ม.^{2}

$\therefore$ w = 2,800 กก./ม.

ความยาวช่วงสาม 3.45 ม.

$M^- = M_B$ = 954 กก.-ม.

$M^+ = \frac{w.l^2}{8} - M_B$ = 3,212 กก.-ม.

$V_{max.} = \frac{2,800 \times 3.45}{2}$ = 4,830 กก.

$d_M = \sqrt{\frac{3,212}{13.7}}$ = 15.31 ซม.

$d_V = \frac{4,830}{100 \times 0.87 \times 5.2}$ = 10.68 ซม.

ใช้ d = 20 ซม., Covering 5 ซม.

$A_s^- = \frac{954 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 20}$ = 3.92 (ซม.)^2

$A_s^+ = \frac{3,212 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 20}$ = 13.19 (ซม.)^2

$\Sigma_o = \frac{4,830}{7.9 \times 0.87 \times 20}$ = 35.14 ซม.

เหล็กรับอุณหภูมิ = 0.002 x 2,500 = 5.00 (ซม.)^2

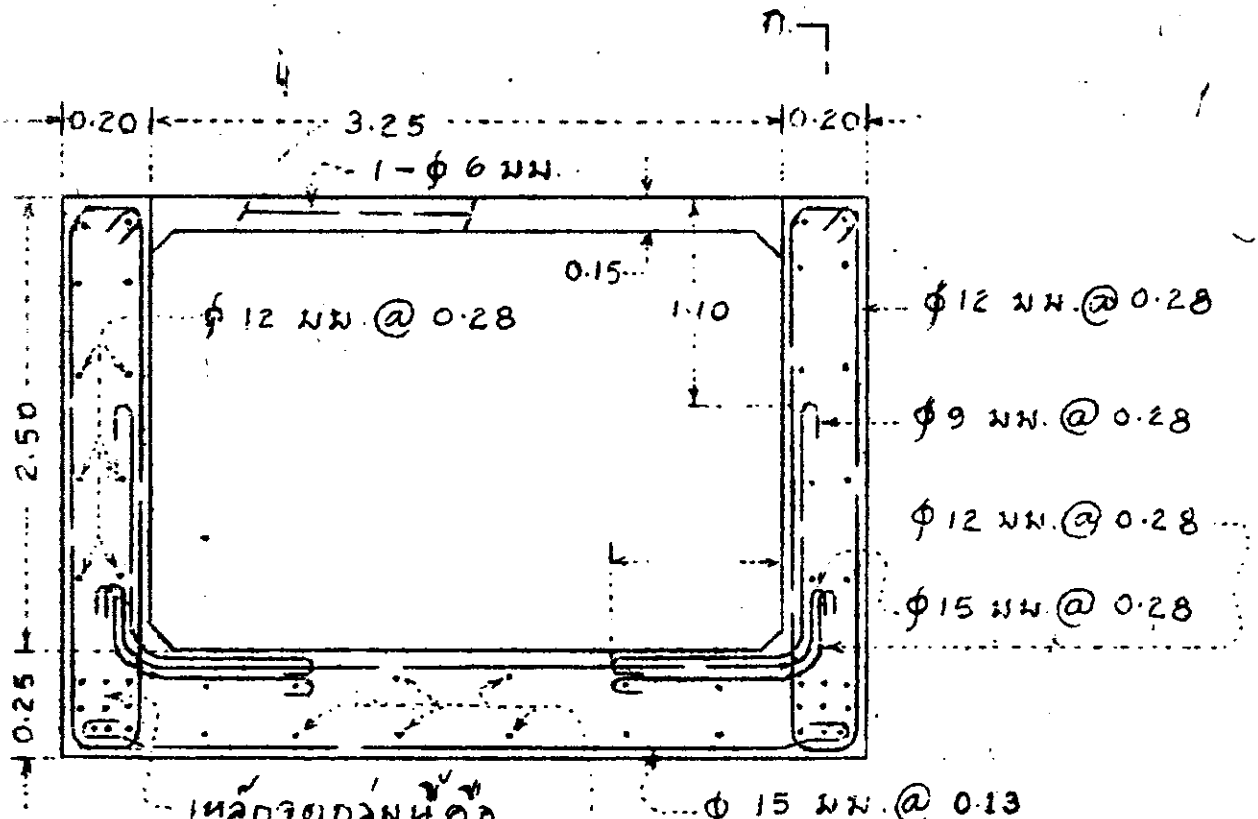
ใช้ ϕ 12 มม. @ 0.22; A_s = 5.14 (ซม.)^2, Σ_o = 17.14 ซม.

เหล็กด้านคิดน้ำ

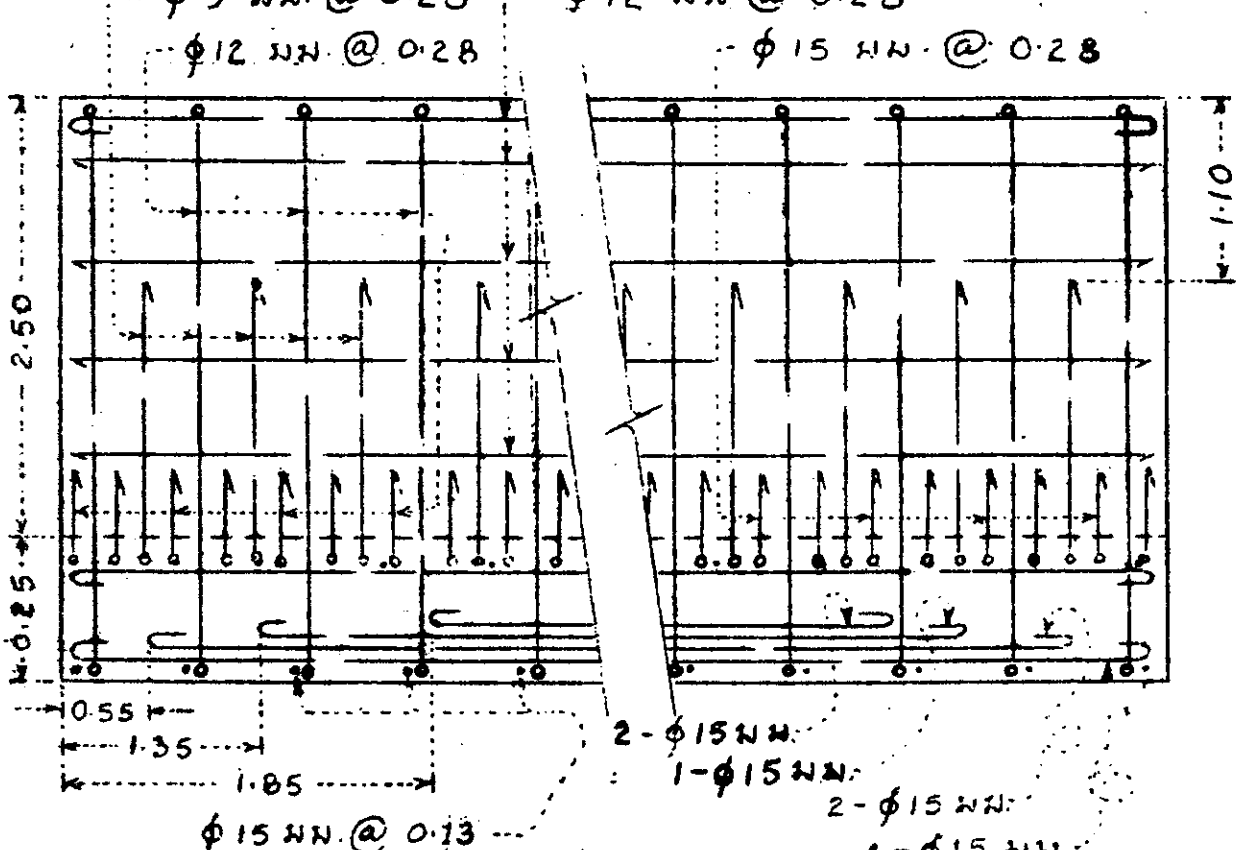
- ϕ 9 มม. @ 0.28; A_s = 2.27, Σ_o = 10.10
- ϕ 12 มม. @ 0.28; A_s = 4.04, Σ_o = 13.46
- ϕ 15 มม. @ 0.28; A_s = 6.31, Σ_o = 16.83

A_s = 12.62 (ซม.)^2, Σ_o = 40.39 ซม.

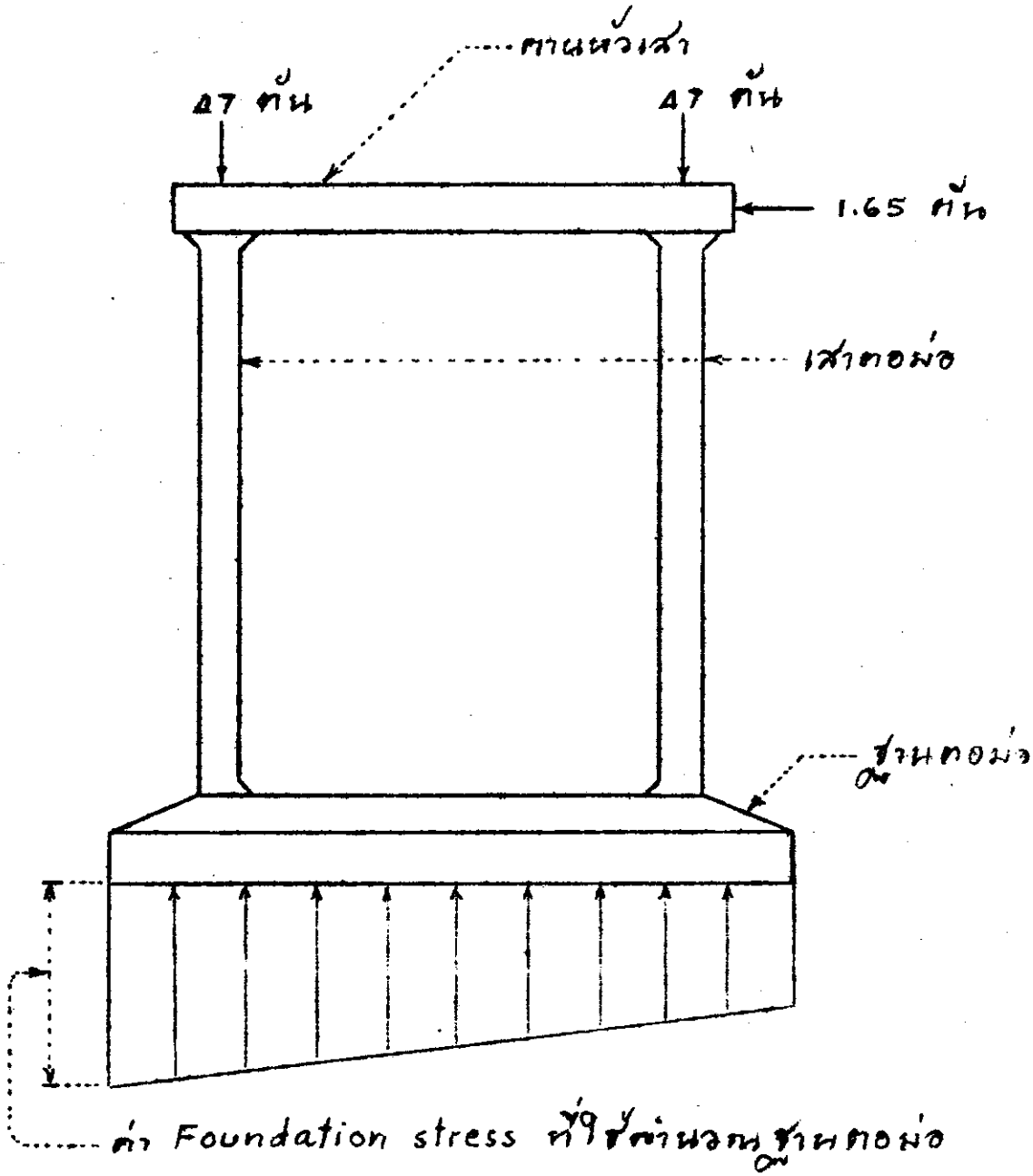
เหล็กด้านนอก ϕ 15 มม. @ 0.13; A_s = 13.51 (ซม.)^2, Σ_o = 36.25 ซม.



รูปตัดขวางของสพานน้ำ ก.-ก



รูปตัด ก - ก



รูปแสดงแรงที่ทำให้ใช้คำนวณ เสาตอม่อ และ ฐานตอม่อ

(ค) คำนวณคานยึดปากสพานน้ำ

กำหนดให้ใช้คานยึดปากสพานน้ำทุก ๆ ระยะ 3.00 ม.

พื้นที่รับแรงลม 3.00 x 2.75 = 8.25 ม.^{2}

ความสูงของสพานน้ำที่ข้ามพื้นที่ลุ่มนี้กำหนดเอาว่าสูงไม่เกิน 15 ม.

ดังนั้น จึงใช้แรงดันของลม 100 กก./ม.^{2}

∴ แรงดันลมที่กระทำต่อคานยึดปากสพานน้ำ 100 x 8.25

= 825 กก.

และแรงที่เกิดจากแรงดันของน้ำ = 561 กก.

∴ คานยึดปากสพานน้ำจึงต้องรับ Axial load 1,386 กก.

สมมติขนาดคานคือ 0.10 x 0.15 ม.^{2}

$w = 0.10 \times 0.15 \times 2,400 = 36$ กก./ม.

$\frac{wl^2}{8} = \frac{36 \times (3.45)^2}{8} = 54$ กก.-ม.

$f_c = 0.45 f'_c = 79$ กก./ซม.^{2}

$f'_c = \frac{P}{A} + \frac{2M}{j.k.b.d^2}$

$= \frac{1,386}{10 \times 15} + \frac{2 \times 5,400}{0.87 \times 0.40 \times 10 \times (10)^2}$

$= 9.24 + 31.04 = 40.28$ กก./ซม.^{2}

< 79 กก./ซม.^{2}

ดังนี้จึงใช้คานยึดปากสพานน้ำขนาด 0.10 x 0.15 ม.^{2}

ส่วนเหล็กรับอุณหภูมิคือ 0.002 x 10 x 15 = 0.3 (ซม.)^2

ใช้ 1 - ϕ 6 มม.

(ง) ขนาดความกว้างคานหัวเสาตอม่อ

เนื่องจากความกว้างกำแพงข้างคือ 0.20 ม.

ถ้าความกว้างคานหัวเสาเท่ากับ x

พื้นที่รับแรงกดก็คือ $20 \times \frac{x}{2}$

แรงลัพธ์ที่กำแพงข้างกดคานหัวเสาตอม่อ 23,480 กก.

$$\frac{23,480}{10x} = 0.25\, f'_c = 44$$

$$= 53.36 = 55 \text{ ซม.}$$

∴ ต้องใช้คานหัวเสาตอม่อกว้างอย่างน้อย 0.55

(จ) แรงที่กระทำต่อเสาตอม่อ

น้ำหนักกดที่หัวเสาแต่ละหัว $2 \times 23,480$ = 46,960 กก.

47 ตัน

แรงลม $2.75 \times 6.00 \times 100$ = 1,650 กก.

ส่วนน้ำหนักที่กดเสาแต่ละต้นให้เอาน้ำหนักของตัวเสาเอง รวมกับน้ำหนักครึ่งหนึ่งของกำแพงและเสา

ต่อจากนั้นก็ออกแบบเสาตอม่อ โดยหลักเกณฑ์ของ Combined bending and compression member และคำนวณฐานตอม่อเป็น Combined footing โดยคิด Foundation stress สูงสุดเป็นแรงที่ยากระทำตามมาตรฐานของ ACI - code.

บทที่ 6

ท่อเชื่อม (Syphon or Siphon)

ท่อเชื่อมเป็นอาคารตัดผ่าน (Cross Structure) ชนิดหนึ่งซึ่งสร้างเพื่อนำน้ำในคลองส่งน้ำลอดคลองธรรมชาติในเมื่อระดับน้ำสูงสุดในคลองส่งน้ำอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำนองสูงสุดของคลองหรือทางน้ำธรรมชาติและส่วนใหญ่ก็มักนิยมสร้างให้น้ำในคลองส่งน้ำลอดทางน้ำธรรมชาติ เพราะเราทราบปริมาณน้ำที่ผ่านท่อเชื่อมอย่างแน่นอน และไม่มีตะกอนไหลมาตกจมภายในท่อมากนัก นอกจากนี้ยังปราศจากกิ่งไม้หรือท่อนซุงที่จะไหลไปขวางท่อหรือทำอันตรายแก่ท่อได้ ส่วนกรณีที่จะกำหนดให้น้ำในทางน้ำธรรมชาติลอดคลองส่งน้ำนั้นจะใช้ต่อเมื่อระดับน้ำในคลองส่งน้ำสูงกว่าระดับน้ำนองสูงสุดในทางน้ำธรรมชาติ หรือปริมาณน้ำในทางน้ำธรรมชาตินี้น้อยกว่าปริมาณน้ำในคลองส่งน้ำ และสามารถป้องกันซุงหรือกิ่งไม้ที่ไหลมากับน้ำในทางน้ำธรรมชาตินี้ได้ หรือเราต้องใช้คลองส่งน้ำเป็นทางคมนาคมด้วยเท่านั้น

นอกจากนี้ยังมีท่อเชื่อมอีกชนิดหนึ่งซึ่งสร้างขึ้นในกรณีที่คลองส่งน้ำตัดผ่านเหวหรือลุ่มลึกมาก ๆ โดยไม่อาจเปลี่ยนแนวคลองหลบไปทางอื่นได้ ท่อเชื่อมที่ใช้ในกรณีนี้จะต้องออกแบบอาคารประกอบอื่น ๆ เพิ่มขึ้นจากท่อเชื่อมที่กล่าวไว้ข้างต้น และจะได้แสดงวิธีการออกแบบไว้ในตัวอย่างในภายหลัง

6.1 ท่อเชื่อมแบบคลองส่งน้ำลอดทางน้ำธรรมชาติหรือทางน้ำธรรมชาติลอดคลองส่งน้ำ

ส่วนประกอบที่สำคัญของท่อเชื่อมแบบนี้จะมีอาคารต่อเชื่อมด้านทางเข้า (Inlet transition) อาคารต่อเชื่อมด้านทางออก (Outlet transition) และตัวท่อ (Pipe or Conduit) สำหรับการออกแบบอาคารต่อเชื่อมด้านทางเข้าและด้านทางออกนั้นได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วจึงไม่ขอกล่าวในที่นี้ ส่วนตัวท่อนิยมออกแบบทั้งเป็นท่อกลม (Circular pipe) และท่อเหลี่ยมจตุรัส (Square pipe) จะเป็นแถวเดียวหรือหลายแถวก็ได้

6.1.1 การออกแบบทางชลศาสตร์ (Hydraulic design)

6.1.1.1 วิธีการในสมัยก่อนการคำนวณขนาดของตัวท่อนั้นก่อนอื่นจะต้องทราบปริมาณน้ำที่จะผ่านท่อ (Discharge) และระดับแตกต่างของผิวน้ำก่อนเข้าท่อและที่ท้ายท่อ (Headloss)

ส่วนความยาวของท่อนั้นคำนวณจากรูปตัดของทางน้ำที่ท่อจะลอดผ่านไปรวมกับส่วนเผื่อของถนนหรือคันคลองทั้งสองฝั่ง โดยเป็นความยาวตามแนวศูนย์กลางของท่อนั้น ๆ

สูตรที่ใช้คำนวณคือ

$$H = \left(1 + f_1 + f_2 \cdot \frac{L}{m}\right) \frac{V^2}{2g}$$

ในเมื่อ H = ระดับแตกต่างของผิวน้ำก่อนเข้าท่อและที่ท้ายท่อ (Headloss) เป็นเมตร

f_1 = สัมประสิทธิ์ของความฝืดตรงปากทางเข้าท่อ (Coefficient of friction at entrance)

= 0.080 สำหรับปากทางเข้ารูปกรวย (Bell-mouth entrance)

= 0.505 สำหรับปากทางเข้ารูปทรงกระบอก (Cylindrical entrance)

f_2 = สัมประสิทธิ์ของความฝืดที่ผิวท่อด้านใน (Coefficient of inner surface friction)

L = ความยาวตามแนวศูนย์กลางท่อ เป็นเมตร

m = ความลึกเฉลี่ยทางชลศาสตร์ (Hydraulic mean depth)

= $\frac{A}{P}$

v = อัตราเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ เป็นเมตร/วินาที

= $\frac{Q}{A}$

g = อัตราโน้มถ่วงของโลก (Gravitation)

= 9.81 เมตร/(วินาที)^2

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ เป็น (เมตร)^2

P = เส้นขอบเปียกของท่อ เป็นเมตร

Q = ปริมาณน้ำที่ผ่านท่อ เป็น (เมตร)^3/วินาที

สำหรับ f_2 นั้นหาได้จากสูตร

$$f_2 = a(1 + \frac{b}{3.28\ m})$$

โดยกำหนดค่า a และ b ให้ตามชนิดและลักษณะของท่อดังนี้.-

	a	b
– ท่อเหล็กเรียบ	0.00497	0.084
– ท่อเหล็กเป็นสนิม	0.00996	0.084
– ท่อคอนกรีตเรียบหรือท่อไม้ไสเรียบ	0.00316	0.100
– ท่อหินก่อเรียบ ท่ออิฐก่อ หรือท่อไม้กระดานธรรมดา	0.00401	0.230
– ท่อหินก่อหยาบ หรือหินเรียง	0.00507	0.820

ในการคำนวณออกแบบนั้น ถ้าได้ค่า H เกินกว่าที่กำหนดไว้จะต้องขยายขนาดท่อให้ใหญ่ขึ้น จนกว่าจะได้ค่า H ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้จึงจะใช้ได้

6.1.1.2 วิธีการสมัยปัจจุบัน การคำนวณออกแบบเพื่อกำหนดขนาดของท่อนั้น ก็ยังต้องเขียนรูป Profile ของท่อเช่นเดิมเพื่อหาความยาวเสียก่อน ต่อจากนั้นให้กำหนดความเร็วของน้ำที่ไหลในท่อ ซึ่งตามปกติความเร็วของน้ำที่ไหลบนผิวคอนกรีตยอมให้ถึง 4.5 เมตร/วินาที แต่เราจะใช้เพียงไม่เกิน 3.5 เมตร/วินาทีสำหรับปริมาณน้ำมาก ๆ และการควบคุมงานก่อสร้างดีๆ ในชั้นดี แต่ถ้าปริมาณน้ำไม่มากนักและไม่แน่ใจในการควบคุมงานก่อสร้างว่าจะดีพอก็อาจใช้ความเร็วของน้ำในท่อไม่เกิน 2.5 เมตร/วินาที เมื่อกำหนดความเร็วของน้ำได้แล้วนำไปหารปริมาณน้ำที่จะผ่านท่อก็จะได้เป็นขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ซึ่งเราก็จะสามารถกำหนดขนาด รูปร่าง และจำนวนแถวของท่อได้ตามที่เหมาะสม

ต่อจากนี้ก็นำไปหาค่า Headloss ต่าง ๆ ดังสูตรต่อไปนี้.-

6.1.1.2.1 Major loss เป็น Loss ที่ถือเป็นตัวการสำคัญและมีผลต่อการไหลของน้ำเป็นอย่างมาก ซึ่งเน้นหนักที่ Friction loss และมีสูตรที่ใช้คำนวณหลายสูตร เราอาจใช้ค่าที่คำนวณได้จากสูตรใดสูตรหนึ่ง หรือจะหาค่าเฉลี่ยของหลาย ๆ สูตรที่มีอยู่ก็ได้ ดังจะแสดงรูปของสูตรต่าง ๆ ดังนี้.-

<u>สูตรสโกเบ้</u> (Scobey's formula)

ถ้าเป็นท่อไม้ : $H_f = 0.419 \frac{V^{1.8}}{d^{1.17}}$

ถ้าเป็นท่อคอนกรีต : $Q = 0.00546\ C_s\ d^{2.625}\ H_f^{0.5}$

ในเมื่อ H_f = Friction loss เป็นฟุต/1,000 ฟุต

V = ความเร็วของน้ำในท่อ เป็นฟุต/วินาที

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ เป็นนิ้ว

Q = ปริมาณน้ำผ่านท่อ เป็น $(\text{ฟุต})^3/\text{วินาที}$

C_s = สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำ

= 0.267 ในกรณีที่ผิวท่อภายในไม่ได้ตบแต่งให้เรียบเท่าที่ควร

= 0.310 ในกรณีที่เป็นท่อสำเร็จที่เทในแบบไม้ที่ผิวไม่ได้เกลาหรือไสเรียบ

= 0.345 ในกรณีผสมคอนกรีตเทในที่ก่อสร้างและใช้แบบเหล็ก

= 0.370 ในกรณีเป็นคอนกรีตที่เทในแบบเหล็กและขัดผิวเรียบมาก

<u>สูตรดาร์ซีและเวจแบค</u> (Darcy-Weighbach formula)

$$H_f = \frac{f \cdot l \cdot V^2}{2g \cdot d}$$

ในเมื่อ H_f = Friction loss เป็นฟุต

l = ความยาวของท่อ เป็นฟุต

V = ความเร็วของน้ำในท่อ เป็นฟุต/วินาที

g = อัตราโน้มถ่วงของโลก

= 32.2 $\text{ฟุต}/(\text{วินาที})^2$

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ เป็นฟุต

f = สัมประสิทธิ์ของความฝืด

= $\frac{8g}{C^2}$ (ใช้ทั่วไป)

= $0.02 + \frac{0.02}{12d}$ (ใช้กับท่อเหล็กใหม่)

= $0.04 + \frac{0.04}{12d}$ (ใช้กับท่อเหล็กเก่า)

C = สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำในสูตรเชสสี้

= $\frac{V}{\sqrt{R.S}}$

R = รัศมีชลศาสตร์ เป็นฟุต

= $\frac{A}{P}$

A = พื้นที่หน้าตัดของการไหลของน้ำ เป็น $(\text{ฟุต})^2$

P = ความยาวเส้นรอบเปียกของการไหลของน้ำ เป็นฟุต

S = ส่วนลาดเทของทางน้ำ

อย่างไรก็ตามสำหรับค่า f นี้ ได้มีการทำไว้เป็นตารางแสดงไว้ในหนังสือ Hydraulics เขียนโดย George E.Russel หน้า 185 ดังนี้.-

<u>ตารางค่า f ในสูตรของ Darcy-Weighbach</u>

เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)	ความเร็วน้ำในท่อ (ฟุต/วินาที)					หมายเหตุ
	6	8	10	15	20	
48	0.0145	0.0140	0.0135	0.0125	0.0120	ถ้าต้องการใช้ค่าที่เกินจากตารางนี้ให้เขียนโค้งเพิ่มเติมขึ้นเอง
60	0.0140	0.0135	0.0130	0.0120	0.0115	
72	0.0135	0.0130	0.0125	0.0120	0.0115	
84	0.0130	0.0125	0.0120	0.0115	0.0110	
96	0.0125	0.0120	0.0120	0.0110	0.0105	

สูตรเชสซี่ (Chezy's formula)

$$H_f = \frac{4\ v^2}{C^2 .\ d} \cdot l$$

ในเมื่อ H_f, v, d และ l เหมือนกับที่กำหนดไว้ในสูตรดาร์ซี่และเวจแบคทุกประการ ส่วน C เป็นสัมประสิทธิ์ที่หาได้จากตารางต่อไปนี้.-

ตารางค่า C ในสูตรเชสซี่ (Chezy)

เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)	ความเร็วน้ำในท่อ (ฟุต/วินาที)					หมายเหตุ
	6	8	10	15	20	
48	134	136	138	144	147	ถ้าต้องการใช้ค่าที่เกินจากตารางนี้ให้เชียนโค้งเพิ่มเติมขึ้นเอง
60	136	138	141	147	150	
72	138	141	144	147	150	
84	141	144	147	150	153	
96	144	147	147	153	157	

สูตรสโคเดอร์ (Schoder's formula)

ได้ใช้สูตรสำหรับหา Friction loss ในท่อสภาพต่าง ๆ ดังนี้.-

- ท่อไม้ไสเรียบ

$$H_f = 0.0003\ \frac{l . v^{1.75}}{d^{1.25}}$$

- ท่อคอนกรีตผิวเรียบ

$$H_f = 0.00038\ \frac{l . v^{1.86}}{d^{1.25}}$$

- ท่อเหล็กผิวเรียบ

$$H_f = 0.0005\ \frac{l . v^{1.95}}{d^{1.25}}$$

- ท่อเหล็กถูกผุก

$$H_f = 0.00069 \frac{l.v^2}{d^{1.25}}$$

ในเมื่อ l = ความยาวท่อเป็น ฟุต

H_f = Friction loss เป็นฟุต

v = ความเร็วของน้ำในท่อ เป็นฟุต/วินาที

d = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อเป็น ฟุต

<u>สูตรของบาร์น</u> (Bayne's formula)

- ท่อไม้ผิวเรียบ

$$H_f = 0.000467 \frac{l.v^{1.707}}{d^{1.126}}$$

สูตรนี้ก่อนที่จะหาความเร็วของน้ำในท่อจะต้องเพิ่มปริมาณน้ำจากที่กำหนดให้ขึ้นอีก 8 %

- ท่อคอนกรีตขัดผิวภายในเรียบ

$$H_f = 0.00024 \frac{l.v^{2.066}}{d^{1.312}}$$

สูตรนี้ก่อนที่จะหาความเร็วของน้ำในท่อจะต้องเพิ่มปริมาณน้ำจากที่กำหนดให้ขึ้นอีก 6 %

ในเมื่อ l = ความยาวท่อ เป็นฟุต

v = ความเร็วของน้ำในท่อ เป็น ฟุต/วินาที

H_f = Friction loss เป็นฟุต

d = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ เป็นฟุต

<u>สูตรของลี</u> (Lea's formula)

$$H_f = K \cdot \frac{l.v^m}{d^{1.25}}$$

ในเมื่อค่า H_f, l, v และ d เหมือนสูตรของบาร์นทุกประการ แต่ถ้าเป็นท่อไม้ผิวเรียบ $K = 0.0005$, $m = 1.80$ และถ้าเป็นท่อคอนกรีต $K = 0.00045$, $m = 2.00$

<u>สูตรของอันวิน</u> (Unwin's formula)

$$H_f = \frac{l.V^m}{2g.d^n}$$

ในเมื่อ H_f, l, V และ d เหมือนสูตรของบาร์นทุกประการ ส่วนค่า K, m และ n นั้นมีค่าต่าง ๆ ตามวัสดุและสภาพของท่อดังนี้.-

	K	m	n
ท่อเหล็กขัดผิวเรียบ	0.0226	1.75	1.210
ท่อเหล็กอาบยางแอสฟัลส์	0.0254	1.85	1.127
ท่อเหล็กผิวเรียบอัดด้วยหมุดย้ำ	0.0260	1.87	1.390
ท่อเหล็กหล่อใหม่	0.0215	1.95	1.168
ท่อเหล็กหล่อผิวสอาด	0.0243	2.00	1.168
ท่อเหล็กหล่อผิวขรุขระ	0.0440	2.00	1.160

6.1.1.2.2 Minor loss เป็น Loss ซึ่งเกิดขึ้นเป็นค่าเล็กน้อยตามส่วนต่าง ๆ ดังนี้.-

Entrance loss เป็น Loss ที่เกิดขึ้นที่ปากท่อซึ่งมีสูตรดังนี้.-

$$h_{en} = 0.1\left[\frac{V_p^2 - V_{en.}^2}{2g}\right]$$

ในเมื่อ h_{en} = Entrance loss เป็นเมตร

V_p = ความเร็วของน้ำในท่อ เป็น เมตร/วินาที

V_{en} = ความเร็วของน้ำก่อนเข้าท่อ เป็น เมตร/วินาที

g = ความโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 เมตร/(วินาที)^2

Exit loss เป็น Loss ที่เกิดขึ้นที่ปลายท่อ ซึ่งมีสูตรดังนี้.-

$$h_{ex} = 0.25\left[\frac{V_p^2 - V_{ex}^2}{2g}\right]$$

ในเมื่อ h_{ex} = Exit loss เป็นเมตร

V_p = ความเร็วของน้ำในท่อเป็น เมตร/วินาที

V_{ex} = ความเร็วของน้ำขณะพ้นปลายท่อเป็น เมตร/วินาที

g = ความโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 เมตร/(วินาที)^2

Bend loss เป็น Loss ที่เกิดขึ้น ณ ส่วนโค้งงอของท่อแต่ละแห่ง ซึ่งมีสูตรดังนี้.-

$$h_b = 0.25\sqrt{\frac{\phi}{90}} \cdot \frac{V_p^2}{2g}$$

ในเมื่อ h_b = Bend loss เป็นเมตร

ϕ = มุมเบี่ยงเบนของท่อ เป็นองศา

V_p = ความเร็วน้ำในท่อเป็น เมตร/วินาที

g = ความโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 เมตร/(วินาที)^2

6.1.1.2.3 Losses in Transitions เป็น Losses ที่เกิดขึ้นทั้งใน Inlet transition และ Outlet transition ซึ่งได้กล่าวไว้ในเรื่องของ Transition แล้ว

เมื่อได้ค่าของ Losses ต่าง ๆ มาครบถ้วนแล้วก็รวมค่า Major loss, Minor Losses และ Losses in transitions ก็จะเป็นค่าระดับต่าง ๆ ของผิวน้ำของน้ำหน้าและท้ายท่อเชื่อมที่ต้องการ และถ้าค่าที่ได้สูงเกินกว่า Headloss ที่กำหนดไว้เดิม จะต้องเพิ่มขนาดท่อขึ้นจนกว่าจะได้ค่า Losses จากการคำนวณใกล้เคียงและไม่เกินค่า Headloss ที่กำหนดไว้

6.1.2 การออกแบบทางโครงสร้าง (Structural design)

การออกแบบด้านโครงสร้างนี้แยกการคิดออกเป็นส่วนของ Transitions และส่วนของตัวท่อ แต่ส่วนของ Transition จะไม่นำมากล่าวในที่นี้เพราะได้กล่าวไว้เฉพาะเรื่องในตอนต้นแล้ว ดังนั้นส่วนที่จะกล่าวในที่นี้จึงเป็นเฉพาะส่วนของตัวท่อเท่านั้น

เฉพาะตัวท่อนี้แยกคำนวณเป็น 2 ตอนดังนี้

6.1.2.1 คิดเมื่อมีแรงดันของน้ำเต็มท่อและพยายามที่จะระเบิดท่อออกด้วยแรงดึง (Tension) ภายในเนื้อท่อ ณ จุดของความลึกต่าง ๆ กัน

กำหนดให้ w = น้ำหนักของน้ำเป็น กก./(ม.)^3

d = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ เป็นเมตร

h = ระดับต่างของผิวน้ำหน้าท่อ กับจุดศูนย์กลางของท่อ ณ จุดนั้น ๆ เป็นเมตร

T = แรงดึงที่เกิดในเปลือกท่อ เป็น กก.

t = ความหนาของเปลือกท่อซึ่งมีเกณฑ์กำหนดให้ใช้ไม่น้อยกว่า 8 ซม. ทุก ๆ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 1 เมตร

จะได้ $T = \frac{1}{2} \cdot w \cdot h \cdot d$

ในการคำนวณค่า T นั้น ให้แบ่งค่า h ต่าง ๆ กันตามที่เหมาะสม แล้วนำไปหาจำนวนเหล็กเสริมจาก

$$A_s = \frac{T}{f_s}$$

ในเมื่อ A_s = จำนวนเหล็กที่ต้องเสริมเป็น (ซม.)^2

f_s = Allowable stress ของเหล็ก

= 1,070 − 14 h (เมตริก)

= 15,000 − 50 h (อังกฤษ)

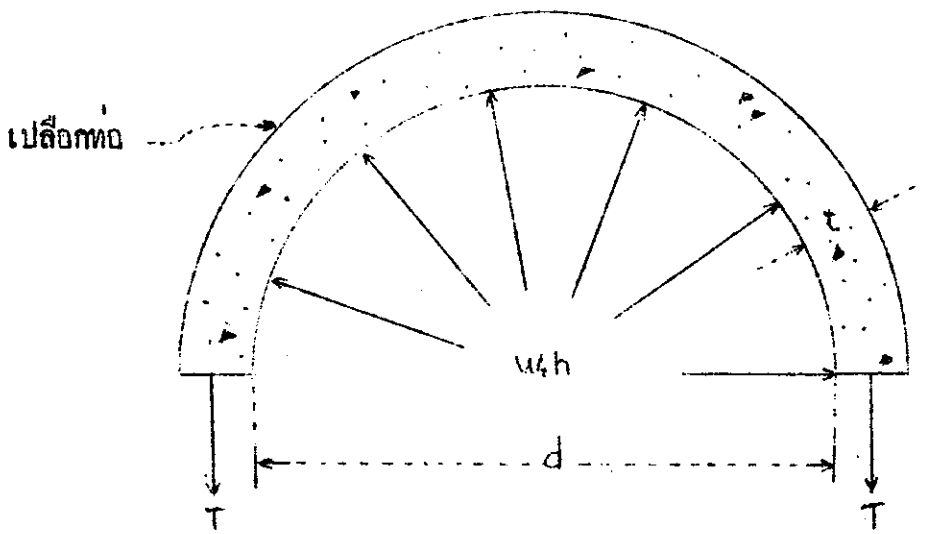
แล้วนำไปเลือกเหล็กจากตารางเหล็ก ซึ่งก็จะเป็นจำนวนของเหล็กจริง ๆ เท่ากับ A_s' ($A_s' \geq A_s$)

ต่อไปจึงคำนวณค่าของ Allowable f_c จาก

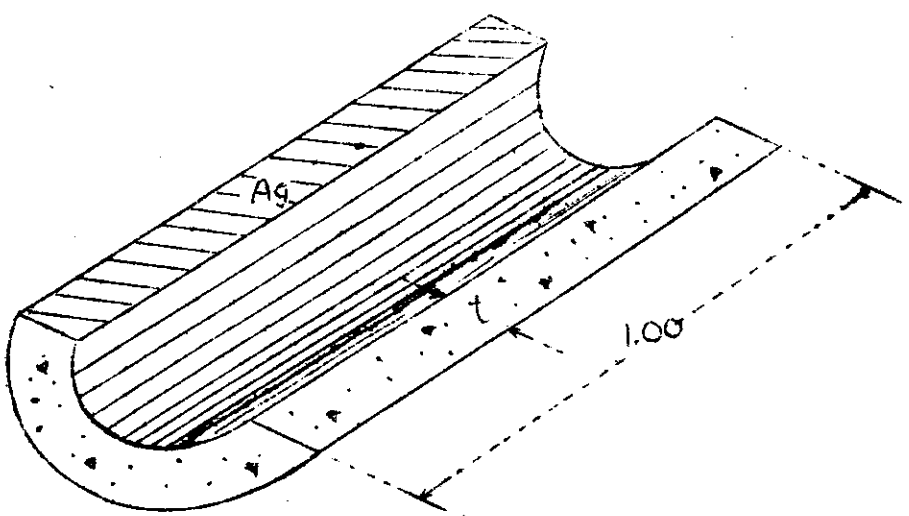
$$f_c = \frac{T}{A_g + (n-1)\, A_s'}$$

ในเมื่อ A_g = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตเปลือกท่อเป็น (ซม.)^2

ค่า f_c ที่คำนวณได้จะต้องไม่เกิน Allowable tensile stress ของคอนกรีต คือ $0.07 f_c'$ (จาก Specification Vol. IV, RID) ถ้า f_c ที่คำนวณได้นั้นมากกว่า $0.07 f_c'$ จะต้องเพิ่ม A_s' หรือ t หรือทั้งสองอย่างแล้วแต่จะสมควรและเหมาะสม

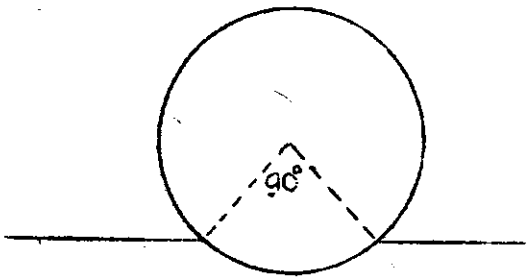


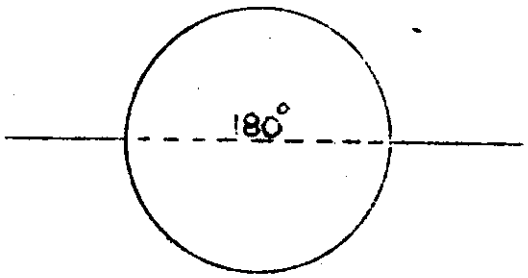
แรงดึง T ที่เกิดขึ้นจากแรงดันของน้ำในท่อ



รูปตัดท่อแสดงพื้นที่ Ag

6.1.2.2 คิดเมื่อมีทั้งแรงดันน้ำในท่อและมีแรงดันดินและน้ำหนักดินนอกท่อ ซึ่งแยกการคิดเป็น 2 กรณีคือ เมื่อภายในท่อมีน้ำไหลเต็มขณะเดียวกันไม่มีน้ำหนักดินกดทับข้างบน และเมื่อภายในไม่มีน้ำแต่มีดินทับบนหลังท่อ นอกจากนี้ค่าของแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นกับท่อยังแตกต่างไปตามลักษณะฐานรองรับท่ออีกด้วย ซึ่งลักษณะฐานรองรับท่อที่นิยมกันมี 2 แบบคือ แบบฐานรองรับ 90° และ 180° (ดูรูป)





<u>ฐานรองรับ 90°</u> <u>ฐานรองรับ 180°</u>

ถ้ากำหนดให้ : W_s = น้ำหนักของเปลือกท่อ เป็น ปอนด์/ฟุต

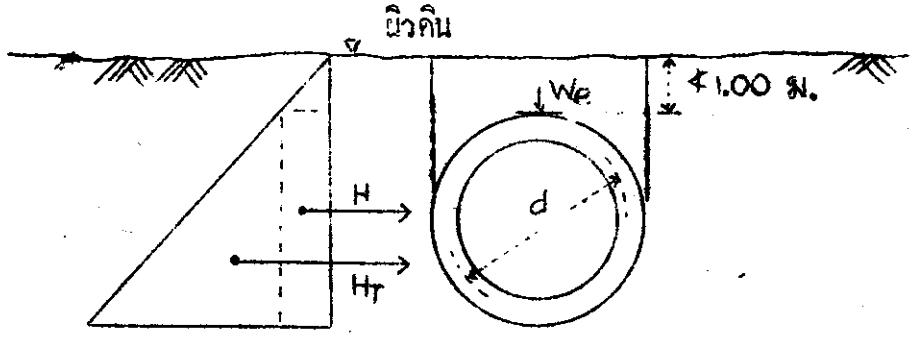
W_w = น้ำหนักของน้ำในท่อ เป็น ปอนด์/ฟุต

W_e = น้ำหนักดินที่กดทับบนหลังท่อ เป็น ปอนด์/ฟุต

d = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของท่อ เป็นฟุต

H = แรงดันดินด้านข้างท่อเฉพาะที่แบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็น ปอนด์/ฟุต

H_T = แรงดันดินด้านข้างท่อเฉพาะที่แบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมเป็น ปอนด์/ฟุต



ตารางคำนวณค่าแรงและโมเมนต์ที่เกิดในส่วนต่าง ๆ ของท่อ

หัวข้อ	แรงและน้ำหนัก		แรง			โมเมนต์		
			ด้านบน	ด้านข้าง	ด้านล่าง	ด้านบน	ด้านข้าง	ด้านล่าง
I	น้ำหนักของคอนกรีตเปลือกท่อ	ฐาน 180°	$-0.027\ W_s$	$+0.250\ W_s$	$+0.027\ W_s$	$+0.028 W_s d$	$-0.031 W_s d$	$+0.035 W_s d$
		ฐาน 90°	$-0.053\ W_s$	$+0.250\ W_s$	$+0.053\ W_s$	$+0.033 W_s d$	$-0.039 W_s d$	$+0.051 W_s d$
II	น้ำหนักของน้ำในท่อ	ฐาน 180°	$-0.186\ W_w$	$-0.068\ W_w$	$-0.451\ W_w$	$+0.028 W_w d$	$-0.031 W_w d$	$+0.035 W_w d$
		ฐาน 90°	$-0.212\ W_w$	$-0.068\ W_w$	$-0.424\ W_w$	$+0.033 W_w d$	$-0.039 W_w d$	$+0.051 W_w d$
III	น้ำหนักของดินทับหลังท่อ	ฐาน 180°	0	$+0.500\ W_e$	0	$+0.063 W_e d$	$-0.063 W_e d$	$+0.063 W_e d$
		ฐาน 90°	$-0.027\ W_e$	$+0.500\ W_e$	$+0.027\ W_e$	$+0.0685 W_e d$	$-0.070 W_e d$	$+0.0783 W_e d$
IV	แรงดันดินข้างท่อ		$+0.500\ H$	0	$+0.500\ H$	$-0.063\ H.d$	$+0.063\ H.d$	$-0.063\ H.d$
V	แรงดันดินข้างท่อ		$+0.313\ H_t$	0	$+0.687\ H_t$	$-0.052 H_t d$	$+0.063 H_t d$	$-0.073 H_t d$
VI	แรงดันของน้ำในท่อ, $P = w.h$		$-0.500\ P.d$	$-0.500\ P.d$	$-0.500\ P.d$	0	0	0

เครื่องหมาย + หมายถึงแรงที่เป็นแรงกด (Compression)
และโมเมนต์ที่เกิดแรงดึง (Tension) ที่ผิวในของเปลือกท่อ

เมื่อคำนวณตัวเลขตามตารางข้างหน้ามาครบถ้วนหมดแล้วให้หาค่าของแรงและค่าของโมเมนต์ โดยแยกเป็นด้านบน ด้านข้าง และด้านล่าง ทั้งสองกรณีคือ

กรณีที่ภายในท่อมีน้ำเต็มและไม่มีดินข้างนอกให้หาค่าได้จาก (I) + (II) + (VI)

กรณีที่ภายในท่อไม่มีน้ำ และมีดินรอบนอกท่อให้หาค่าได้จาก (I) + (III) + (IV) + (V)

ต่อจากนั้นจึงนำค่าของแรงและโมเมนต์ทั้งสองกรณี (ค่าไหนมากใช้ค่านั้น) โดยแยกออกทั้งด้านบน ด้านข้าง และด้านล่าง ไปคำนวณหาเหล็กเสริม โดยวิธี Transformed area จากสูตร

$$\text{Stress } f_c = \frac{N}{A_t} \pm \frac{M.C}{I_t}$$

$$= \frac{N}{A_g + (n-1)A_s} + \frac{M.C}{I_{N-A}}$$

จำนวนเหล็กที่ต้องเสริมเพิ่มเติมจากที่เสริมไว้เดิมตอนที่คิดเฉพาะแรงดันของน้ำในท่อนั้นหาได้จาก

$$A_{s_{req.}} = \frac{(\text{Stress } f_c - \text{Allowable } f_c)\ A_g + (n-1)\ A_s}{f_s}$$

ในเมื่อ $A_{s_{req.}}$ = จำนวนเหล็กที่ต้องเสริมเพิ่มเติม เป็น $(\text{ซม.})^2$

Stress f_c = Stress ที่หาได้จาก Transformed area เป็น กก./(ซม.)^2

Allowable f_c = 9.82 กก./(ซม.)^2

A_g = พื้นที่หน้าตัดเปลือกท่อที่ยาว 1.00 ม. เป็น $(\text{ซม.})^2$

n = ค่า n ที่ใช้ในวิชาออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก

A_s = จำนวนเหล็กที่เสริมไว้เดิมในแต่ละระดับ เป็น $(\text{ซม.})^2$

f_s = Working strength ของเหล็ก เป็น กก./(ซม.)^2

N = แรงที่ได้จากการคำนวณในตาราง เป็น กก.

M = โมเมนต์ที่ได้จากตารางเป็น กก. – ซม.

C = ระยะจาก Neutral axis ถึงผิวคอนกรีตด้านที่เกิดแรงดึง (Tension)

I_{N-A} = Moment of inertia ที่ย้ายมารอบแกน Neutral axis แล้ว เป็น $(\text{ซม.})^4$

ในการคำนวณให้ทำในทุก ๆ ระดับที่แรงดันของน้ำในท่อต่างกันตามที่เราได้แบ่งไว้ จะเป็นผลการคำนวณที่ละเอียดและประหยัดเหล็กเสริมคอนกรีตดีที่สุด แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ นั้นบางครั้งอาจนำค่าของแรงและโมเมนต์ที่สูงที่สุดมาคิดเพียงครั้งเดียวแล้วเสริมเหล็กส่วนที่ต้องเพิ่มเฉพาะช่วงที่คำนวณค่า Allowable f_c ออกมาเกิน 9.82 กก./(ซม.)^2 ก็ใช้ได้ นอกจากนี้เหล็กส่วนที่ต้องเสริมเพิ่มนี้ถ้ามีจำนวนมากเราอาจใช้เหล็กแผ่น (Steel Plate) เสริมแทนเหล็กเส้นก็ได้เช่นกัน

6.2 <u>ท่อเชื่อมแบบที่ต้องสร้างให้วางไปในก้นเหวหรือที่ที่มีระดับต่ำมาก</u>

ท่อเชื่อมชนิดนี้นอกจากจะมีส่วนประกอบทุกอย่างเช่นเดียวกับท่อเชื่อมแบบแรกแล้วยังอาจจะต้องมีอาคารประกอบอย่างอื่นเข้ามาร่วมด้วยคือ ทางทิ้งน้ำเพื่อระบายน้ำออกจากท่อเชื่อม (Blow-off structure) ประกอบกับช่องที่ลงไปทำงาน (Manhole) ช่องระบายทราย (Sand ducts) เพิ่มขึ้นมาอีกจึงใคร่กล่าวเพิ่มเติมไว้ด้วย เป็นแต่ละอย่างไปดังนี้.-

6.2.1 ทางทิ้งน้ำ (Blow-off) เนื่องจากในช่วงเวลาที่หยุดการส่งน้ำ หรือต้องการทำความสอาดหรือซ่อมบำรุงท่อเชื่อม จำเป็นต้องระบายน้ำออกจากตัวท่อให้หมด จำเป็นต้องสร้างทางทิ้งน้ำไว้ ณ ส่วนที่มีระดับต่ำสุดของตัวท่อ โดยการต่อท่อขนาดเล็กเข้ากับตัวท่อใหญ่ มี Gate valve ติดตั้งไว้ที่ท่อเล็กเพื่อ เปิด – ปิดน้ำที่จะระบายออก ซึ่งก็จะต้องสร้าง Manhole ครอบ Gate valve เพื่อเป็นทางลงไป เปิด – ปิด Gate valve นั้น ส่วนการกำหนดขนาดของท่อเล็กนี้จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ต้องการระบายน้ำออกจากท่อใหญ่ให้หมดนั่นเอง ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$t = \frac{2A_s}{C.A.\sqrt{2g}}\left[\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}\right]$$

ในเมื่อ t = ระยะเวลาที่ต้องการระบายน้ำออก เป็นวินาที

A_s = พื้นที่ผิวน้ำที่ขังอยู่ในขอบเขตที่ต้องระบายออก เป็น ม.^{2}

C = สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำที่จะไหลผ่านท่อของทางทิ้งน้ำ

= 0.65

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อทางทิ้งน้ำ เป็น ม.^{2}

g = ความโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 ม./(วินาที)^2

h_1 = ความสูงของผิวน้ำจากศูนย์กลางของท่อทางทิ้งน้ำก่อนระบายน้ำ เป็นเมตร

h_2 = ความสูงของผิวน้ำจากศูนย์กลางของท่อทางทิ้งน้ำหลังการระบายน้ำ เป็นเมตร

ตามปกตินิยมระบายน้ำให้แล้วเสร็จภายในเวลา 30 นาทีถึง 1 ชั่วโมง

ส่วนตัว Manhole นั้นมักนิยมสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 1.00 x 1.00 ม.^{2} ถึง 1.50 x 1.50 ม.^{2} การคำนวณด้านโครงสร้างนั้นคิดเป็น Box section โดยมีแรงดันของดินโดยรอบเป็นแรงที่มากระทำต่อ Manhole โดยคิดลดเหล็กเสริมและความหนาขึ้นมาเป็นระยะ ๆ และเหล็กเสริมตามแนวดิ่งเป็น Temperature steel

6.2.2 ช่องระบายทราย (Sand ducts) มักนิยมทำเป็นช่องเล็ก ๆ ไว้ที่พื้นด้านหน้าก่อนที่น้ำจะเข้าท่อเชื่อม แล้วทำช่องดังกล่าวต่อเนื่องเป็นแนวยาว นำน้ำปนทะกอน กรวดและทรายไปทิ้งลงสู่ก้นเหวหรือร่องน้ำธรรมชาติ สูตรที่ใช้คำนวณคือ

$$Q = C.A\sqrt{2g.h}$$

ในเมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ยอมทิ้งผ่านช่องระบายทราย เป็น ม.^{3}/วินาที

C = สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำ

= 0.65

A = พื้นที่หน้าตัดรวมของช่องระบายทราย เป็น ม.^{2}

g = ความโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 ม./(วินาที)^2

h = ความลึกของน้ำเหนือศูนย์กลางของช่องระบายทราย เป็น เมตร

<u>ตัวอย่าง</u> คลองส่งน้ำสายหนึ่งมีแนวตัดผ่านหุบเนินกว้าง 200 เมตร ลึก 30 เมตร คลองนี้เป็นคลองดินที่ออกแบบอย่างสมัยใหม่ที่นิยมใช้ใน USBR มีความจุ 15.45 ม.^{3}/วินาที ความเร็วของน้ำในคลองไม่เกิน 1.00 ม./วินาที จำเป็นต้องสร้างท่อเชื่อม (Syphon) ผ่านหุบเนินนี้ โดยกำหนดให้มี Headloss ไม่เกิน 0.90 ม. และการระบายน้ำออกจากท่อจะต้องใช้เวลาไม่เกิน 35 นาที

<u>วิธีทำ</u>

(1) <u>ออกแบบขนาดคลอง</u>

ปริมาณน้ำ 15.45 ม.^{3}/วินาที

ความเร็วกระแสน้ำไม่เกิน 1.00 ม./วินาที

$\therefore$ พื้นที่หน้าตัดคลองโดยประมาณ $\frac{15.45}{1.00}$

$= 15.45$ ม.^{2}

คลองสมัยใหม่ ใช้ $d = \frac{1}{2}\sqrt{A}$

$= \frac{1}{2}\sqrt{15.45}$

$= 1.965$ ม.

กำหนดให้ลาดตลิ่งคลอง $1 : 1\frac{1}{2}$

$\therefore A = \frac{d}{2}(2b + 3d)$

$15.45 = \frac{1.965}{2}\{2b + (3 \times 1.965)\}$

$30.90 = 3.93b + 11.584$

$b = 4.915$ ม.

$\therefore$ จึงใช้ $b = 5.00$ ม.

$A = b.d + 1.5d^2$

$15.45 = 5d + 1.5d^2$

หรือ $1.5d^2 + 5d - 15.45 = 0$

$$d = \frac{-5 \pm \sqrt{(5)^2 - 4(1.5)(-15.45)}}{2(1.5)}$$

$$= 1.949, \ -5.283$$

$\therefore$ ใช้ $d = 1.95$ ม.

$$A = 0.975\ (10 + 5.85)$$

$$= 15.454 \ \text{ม.}^2$$

$$V = 0.999 < 1.00 \ \text{ม./วินาที} \quad \text{ใช้ได้}$$

(ii) <u>การกำหนดขนาดตัวท่อ</u>

ปริมาณน้ำที่กำหนดให้ = 15.45 ม.^{3}/วินาที

ปริมาณน้ำที่ใช้ออกแบบ = 1.10×15.45

= $16.995 \approx 17$ ม.^{3}/วินาที

กำหนดให้ใช้ความเร็วของน้ำในท่อไม่เกิน 3.25 ม./วินาที

$\therefore$ พื้นที่หน้าตัดท่อ = $\frac{17}{3.25} = 5.231$ ม.^{2}

$\therefore \quad \frac{\pi}{4} D^2 = 5.231$

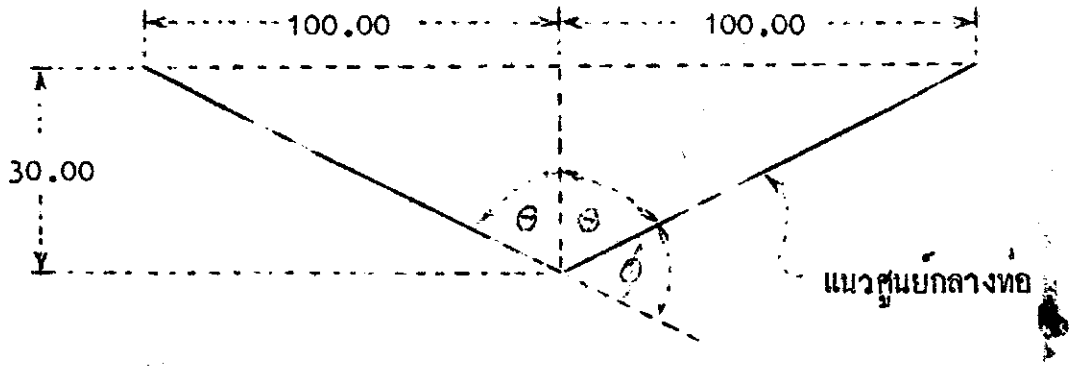
$D = 2.581$

ดังนั้น จึงใช้ท่อกลม ขนาด ϕ 2.60 ม. เป็นท่อเชื่อม

พื้นที่หน้าตัดท่อ = $\frac{\pi}{4}(2.60)^2 = 5.309$ ม.^{2}

ความเร็วน้ำในท่อ = $\frac{17}{5.309} = 3.202$ ม./วินาที

(iii) หา Losses ที่เกิดขึ้นทั้งหมด



ความยาวท่อโดยประมาณ $= 2\sqrt{(30)^2 + (100)^2}$

$= 208.806$ ม.

$\theta = \tan^{-1}\left[\left(\frac{100}{30}\right)\right]$

$= 73.30°$

$\therefore \quad \phi = 180° - (2 \times 73.30°)$

$= 33.4°$

หา Friction loss;

. ในที่นี้จะหาโดย Scobey's formula ในลักษณะที่เป็นการผสมคอนกรีตเทในที่กลางอากาศ ซึ่ง $C_s = 0.345$

$$Q = 0.00546\ C_s\ d^{2.625}\ H_f^{0.5}$$

ในเมื่อ $Q = 17$ ม.^{3}/วินาที

$= 17 \times (3.281)^3 = 600.44$ (ฟุต)^3/วินาที

$d = 2.60$ ม.

$= 2.60 \times (3.281) \times (12) = 102.37$ นิ้ว

$$\therefore \quad 600.44 = 0.00546 \times 0.345 \times (102.37)^{2.625} \quad H_f^{0.5}$$

$$H_f = 2.841 \text{ ฟุต/1,000 ฟุต}$$

$$= \frac{2.841 \times 208.806 \times 3.281}{1,000} = 1.946 \text{ ฟุต}$$

$$= \frac{1.946}{3.281} = 0.593 \text{ ม.}$$

หา Entrance loss;

กำหนดให้น้ำไหลผ่านช่อง □ ฝืนผ้าที่กว้าง 3.00 ม. ก่อนเข้าท่อ

พื้นที่หน้าตัด $3.00 \times 2.80 = 8.40$ ม.^{2}

$\therefore$ ความเร็วน้ำก่อนเข้าท่อ $\frac{17}{8.40} = 2.024$ ม./วินาที

$$H_{en} = 0.1 \left[\frac{v_p^2 - v_{en}^2}{2g} \right]$$

$$= 0.1 \left[\frac{(3.202)^2 - (2.024)^2}{2 \times 9.81} \right]$$

$$= 0.031 \text{ ม.}$$

หา Exit loss;

กำหนดให้ทางออกมีสภาพเช่นเดียวกับทางเข้าท่อ

$\therefore$ ความเร็วน้ำที่ออกจากท่อจึงเท่ากับ 2.024 ม./วินาที

$$H_{ex} = 0.25 \left[\frac{v_p^2 - v_{ex}^2}{2g} \right]$$

$$= 0.25 \left[\frac{(3.202)^2 - (2.024)^2}{2 \times 9.81} \right]$$

$$= 0.078 \text{ ม.}$$

หา Bend loss;

$$H_b = 0.25 \sqrt{\frac{\phi}{90}} \cdot \frac{v_p^2}{2g}$$

$$= 0.25 \sqrt{\frac{33.4}{90}} \quad \frac{(3.202)^2}{2 \times 9.81}$$

$$= 0.080 \text{ ม.}$$

หา Inlet transition loss;

ความเร็วของน้ำในคลอง $= \frac{17}{15.454} = 1.10$ ม./วินาที

(อันนี้เป็นความเร็วของน้ำตอนที่เข้าสู่ Transition จึงคำนวณจาก Q = 17 ม.^{3}/วินาที ความเร็วจึงเกิน 1.00 ม./วินาที)

ความเร็วน้ำก่อนเข้าสู่หน้าตัด □ ผืนผ้า เมื่อก่อนจะเข้าท่อ

$$= 2.024 \text{ ม./วินาที}$$

$$H_{ti} = 0.20 \left[\frac{(2.024)^2 - (1.10)^2}{2 \times 9.81}\right]$$

$$= 0.029 \text{ ม.}$$

หา Outlet transition loss;

$$H_{to} = 0.30 \left[\frac{(2.024)^2 - (1.10)^2}{2 \times 9.81}\right]$$

$$= 0.044 \text{ ม.}$$

หา Losses ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในอาคารท่อเชื่อมนี้

$$\text{Headloss} = 0.593 + 0.031 + 0.078 + 0.080 + 0.029 + 0.044$$

$$= 0.855 \text{ ม.}$$

$$< 0.90 \text{ ม.} \quad \text{จึงใช้ได้}$$

เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ 2.60 ม.

∴ ความหนาเปลือกท่อน้อยที่สุด $8 \times 2.60 \times \frac{1}{100}$

$= 0.208$ ม.

∴ ใช้ความหนาของเปลือกท่อ 0.25 ม.

(iv) <u>หาเหล็กเสริมรับแรงดันของน้ำในท่อในระดับต่าง ๆ</u>

เนื่องจากความลึกของหุบเขิน 30.00 ม.

แบ่งช่วงความลึกเป็น 6 ช่วง ๆ ละ 5.00 ม.

จาก $T = \frac{1}{2}$ w.h.d.

ดังนั้นแรงดันของน้ำในท่อในแต่ละความลึกจะได้ดังนี้.-

$T_{(5)} = \frac{1}{2} \times 1,000 \times 5 \times 2.60 = 6,500$ Kg.

$T_{(10)} = 2.T_{(5)} = 13,000$ "

$T_{(15)} = 3.T_{(5)} = 19,500$ "

$T_{(20)} = 4.T_{(5)} = 26,000$ "

$T_{(25)} = 5.T_{(5)} = 32,500$ "

$T_{(30)} = 6.T_{(5)} = 39,000$ "

จาก Allowable $f_s = 1,070 - 14\ h$

ดังนั้นค่า Allowable resisting pressure f_s ในแต่ละความลึกจะมีค่าดังนี้.-

$f_{s(5)} = 1,070 - (14 \times 5) = 1,000$ Kg./cm.^{2}

$f_{s(10)} = 1,070 - (14 \times 10) = 930$ "

$f_{s(15)} = 1,070 - (14 \times 15) = 860$ "

$f_{s(20)} = 1,070 - (14 \times 20) = 790$ "

$f_{s(25)} = 1,070 - (14 \times 25) = 720$ "

$f_{s(30)} = 1,070 - (14 \times 30) = 650$ "

นำค่า T และ f_s ที่คำนวณได้นี้ไปใส่ตาราง เพื่อคำนวณเหล็กเสริมเพื่อรับแรงดันของน้ำ (Hydro-static pressure) และตรวจสอบค่า Allowable f_c.

ตารางหาเหล็กเสริมรับแรงดันของน้ำในท่อและตรวจสอบ Stress ในคอนกรีต

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Head h. (m.)	T (Kg.)	$f_s = 1,070 - 14h$ (Kg./cm.^{2})	A_s req. $= 1/f_s$ (cm.^{2})	Reinforced Steel	Asused (cm.^{2})	$(n-1)A_s$ (cm.^{2})	Ag (cm.^{2})	(7)+(8)	$f_c = T/(9)$ (Kg./cm.^{2})
5	6,500	1,000	6.50	Ø 9 mm. @ 0.18 Ø 9 mm. @ 0.18	7.06	77.66	2,500	2,577.66	2.52
10	13,000	930	13.98	Ø 12 mm. @ 0.16 Ø 12 mm. @ 0.16	14.14	155.54	2,500	2,655.54	4.90
15	19,500	860	22.67	Ø 15 mm. @ 0.15 Ø 15 mm. @ 0.15	23.56	259.16	2,500	2,759.16	7.07
20	26,000	790	32.91	Ø 15 mm. @ 0.10 Ø 15 mm. @ 0.10	35.34	388.74	2,500	2,888.74	9.00
25	32,500	720	45.14	Ø 19 mm. @ 0.12 Ø 19 mm. @ 0.12	47.26	519.26	2,500	3,019.26	10.76
30	39,000	650	60.00	Ø 19 mm. @ 0.09 Ø 19 mm. @ 0.09	63.00	693.00	2,500	3,193.00	12.21

$0.0\not{0}\ f'_c = 0.07 \times 175 = 12.25$ กก.(ซม.)^2

∴ ค่า f_c ในช่อง (10) ในทุกระดับความลึกมีค่าไม่เกิน $0.07\ f'_c$ จึงถือว่าขนาดความหนาเปลือกท่อและขนาดเหล็กเสริมใช้ได้แล้ว

(v) <u>หาเหล็กเสริมรับแรงทั้งหมดที่เกิดกับท่อ</u>

สมมติให้มีดินทับหลังท่อ 1.00 ม.

มุมทรงตัวของดิน 30°

เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ 2.60 ม.

ความหนาเปลือกท่อ 0.25 ม.

∴ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 2.85 ม.

และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 3.10 ม.

น.น. เปลือกท่อ/ความยาว 1 ฟุต

$$W_s = \pi (2.85 \times 3.281) \times (0.25 \times 3.281) \times 150$$

$$= 3,614 \quad \text{ปอนด์/ฟุต}$$

น.น. ของน้ำในท่อ/ความยาว 1 ฟุต

$$W_w = \pi (1.30 \times 3.281)^2 \times 62.4$$

$$= 3,566 \quad \text{ปอนด์/ฟุต}$$

น.น. ดินที่ทับหลังท่อหนา 1.00 ม./ความยาว 1 ฟุต

$$W_e = \left\{ (1.00 + 1.55) \times 3.281 \times 3.281 \times 3.10 \times 120 \right\} - \left\{ \frac{\pi}{2} \times (1.55 \times 3.281)^2 \times 120 \right\}$$

$$= 5,337 \quad \text{ปอนด์/ฟุต}$$

แรงดันดินด้านข้างแบ่งเป็นรูป □ ผืนผ้า

$$H = \frac{1}{3} \times 120 \times 3.281 \times 3.10 \times 3.281$$

$$= 1,335 \quad \text{ปอนด์/ฟุต}$$

แรงดันดินด้านข้างแบ่งเป็นรูป ◺ มุมฉาก

$$H_t = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{3} \times 120 \times 3.281 (4.10 - 1.00) \right\} \times 3.10 \times 3.281$$

$$= 2,069 \quad \text{ปอนด์/ฟุต}$$

แรงดันน้ำภายในท่อที่ความลึก 30 ม.

$$P = 62.4 \times 30 \times 3.281$$

$$= 6,142 \quad \text{ปอนด์/ฟุต}$$

ตารางคำนวณค่าของแรงและโมเมนต์ที่เกิดในส่วนต่าง ๆ ของท่อ

(รูนรองรับ 180°, คิดที่ความลึก 30.00 ม.)

หัวข้อ	แรงและน้ำหนัก	แรง			โมเมนต์			หมายเหตุ
		บน	ข้าง	ล่าง	บน	ข้าง	ล่าง	
I	นน.คอนกรีตเปลือกท่อ	(-98) -146	(+904) +1,326	(+98) +146	(+946) +423	(-1,048) -469	(+1,183) +528	– ตัวเลขในวงเล็บเป็นปอนด์และฟุตปอนด์ – ตัวเลขนอกวงเล็บเป็น กก.และ กก.-ม.
II	นน.น้ำในท่อ	(-663) -971	(-242) -354	(-1,608) -2,356	(+934) +417	(-1,034) -463	(+1,167) +522	
III	นน.ดินทับหลังท่อ	-	(+2,669) +3,909	-	(+3,144) +1,404	(-3,144) -1,404	(+3,144) +1,404	
IV	แรงดันดินข้างท่อรูป □	(+668) +978	-	(+668) +978	(-786) -351	(+786) +351	(-786) -351	
V	แรงดันดินข้างท่อรูป ◺	(+648) +948	-	(+1,421) +2,080	(-1,006) -449	(+1,219) +545	(-1,412) -630	
VI	แรงดันน้ำในท่อ	(-28,717) -42,062	(-28,717) -42,062	(-28,717) -42,062	-	-	-	
กรณี (1) ไม่มีดินทับแต่มีน้ำเต็มท่อ		-43,179	-41,091	-44,272	+840	-932	+1,050	
กรณี (2) มีดินทับเต็มในท่อไม่มีน้ำ		+1,780	+5,235	+3,204	+1,027	-978	+951	

สรุปว่าด้านบนของท่อ	เกิดแรงดึง	- 43,179	กก.
	โมเมนต์	+ 1,027	กก.- ม.
ด้านข้างของท่อ	เกิดแรงดึง	- 41,091	กก.
	โมเมนต์	- 978	กก.- ม.
ด้านล่างของท่อ	เกิดแรงดึง	- 44,272	กก.
	โมเมนต์	+ 1,050	กก.- ม.

ในกรณีที่ค่าของแรงและโมเมนต์ทั้งด้านบน ด้านข้างและด้านล่างต่างกันมากจะต้องแยกคิดเหล็กเสริมเพิ่มเป็นแต่ละด้านไป สำหรับตัวอย่างนี้ค่าของแรงและโมเมนต์ในแต่ละด้านไม่ต่างกันมากนักจึงคำนวณเหล็กจากค่าสูงสุดคือ แรงดึง 44,272 กก. และโมเมนต์ 1,050 กก.- ม.

<u>การหาเหล็กเสริมเพิ่มโดยวิธี Transformed area</u>

สมมุติให้ Neutral axis อยู่สูงกว่าแนวศูนย์กลางเหล็กเสริมเป็นระยะ x ซม.

ศูนย์กลางเหล็กเสริมอยู่ห่างจากผิวคอนกรีต 8 ซม.

เหล็กที่เสริมไว้เดิม (ดูเพียงผิวเดียว) คือ ϕ 25 mm.@ 0.15

$$A_s = 32.72 \quad (\text{ซม.})^2$$

กำหนดแกนหมุนของโมเมนต์อยู่ที่แนว AB

$$\therefore \quad (b.d \times 12.50) + \left\{ (n-1)A_s \times 17 \right\} = \left\{ b.d + (n-1)A_s \right\} (17 - x)$$

$$(100 \times 25 \times 12.50) + (11 \times 32.72 \times 17) = \left\{ (100 \times 25) + (11 \times 32.72) \right\} (17 - x)$$

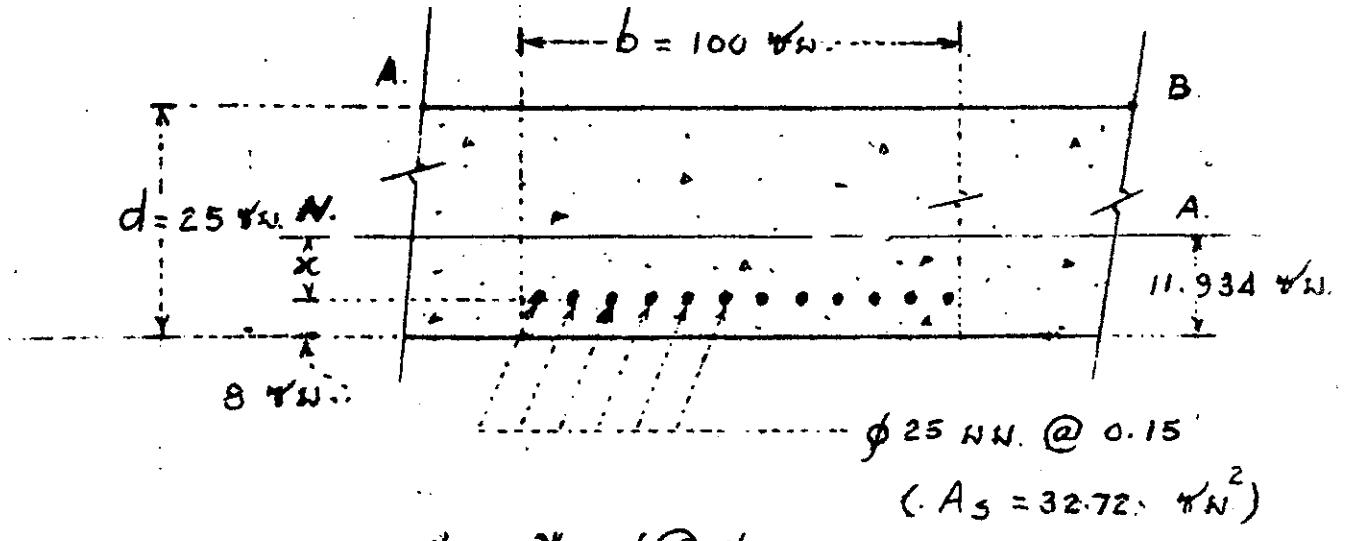
$$x = 3.934 \text{ ซม.}$$

$\therefore$ Neutral axis ห่างจากผิวด้านติดเหล็ก 11.934 ซม.

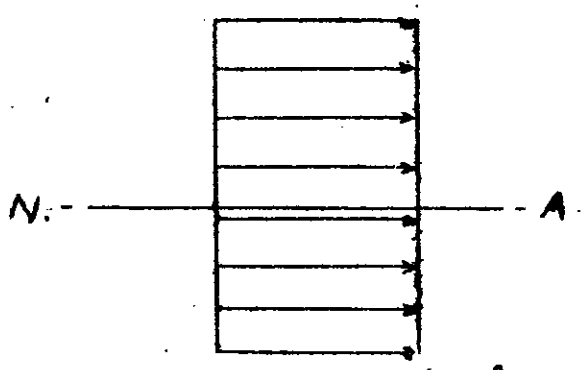
ซึ่งจะห่างจากกึ่งกลางความหนาของเปลือกท่อ 0.566 ซม.

$$I_{N-A} = I_o + C^2 . A$$

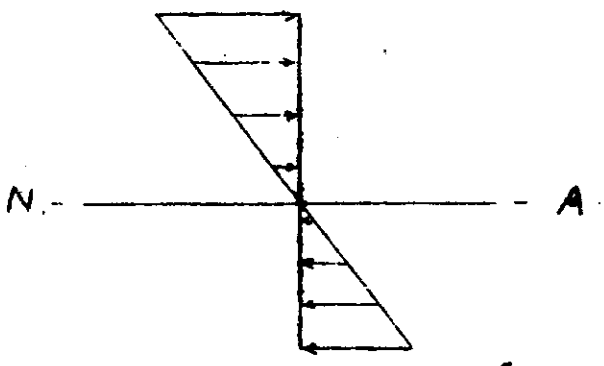
$\therefore$ สำหรับคอนกรีต $I_{N-A_{(c)}} = \frac{1}{12} b.d^3 + C^2 . b.d$



รูปหน้าตัดเปลี่ยนท่อใช้ Transformed Area



ไดอาแกรมของแรงกด



ไดอาแกรมของแรงเฉือนภาย
ในแผ่น

รูปแสดงการคำนวณเสริมเหล็กท่อโดย Transformed Area

$$I_{N-A_{(c)}} = \frac{1}{12} \times 100(25)^3 + (0.566)^2 \times 2,500$$

$$= 131,009 \quad (\text{ซม.})^4$$

สำหรับเหล็กเสริมนั้นใช้ ϕ 25 mm.@ 0.15

∴ ในช่วง 1.00 ม. มีเหล็ก 6 เส้น

สำหรับเหล็ก $I_{N-A_{(s)}} = \frac{1}{64} \pi d^4 \times 6 + c^2 . A_t$

$$= \left\{ \frac{1}{64} \pi \times (2.5)^4 \times 6 \right\} + \left\{ (3.934)^2 \times 11 \times 32.72 \right\}$$

$$= 5,582 \quad (\text{ซม.})^4$$

∴ $I_{N-A} = 136,591 \quad (\text{ซม.})^4$

$$f_c = \frac{N}{A_t} + \frac{M.C}{I_{N-A}}$$

$$= \frac{44,272}{2,500 + (11 \times 32.72)} + \frac{105,000 \times 11.934}{136,591}$$

$$= 15.480 + 9.174$$

กองกลีตรับแรงดึง $0.07 f'_c$

$$= 12.25 \quad \text{กก./(ซม.)}^2$$

∴ เหล็กเสริมเพิ่มขึ้นแรงเค้น $15.480 + (9.174 - 12.25) = 12.404$ กก/(ซม

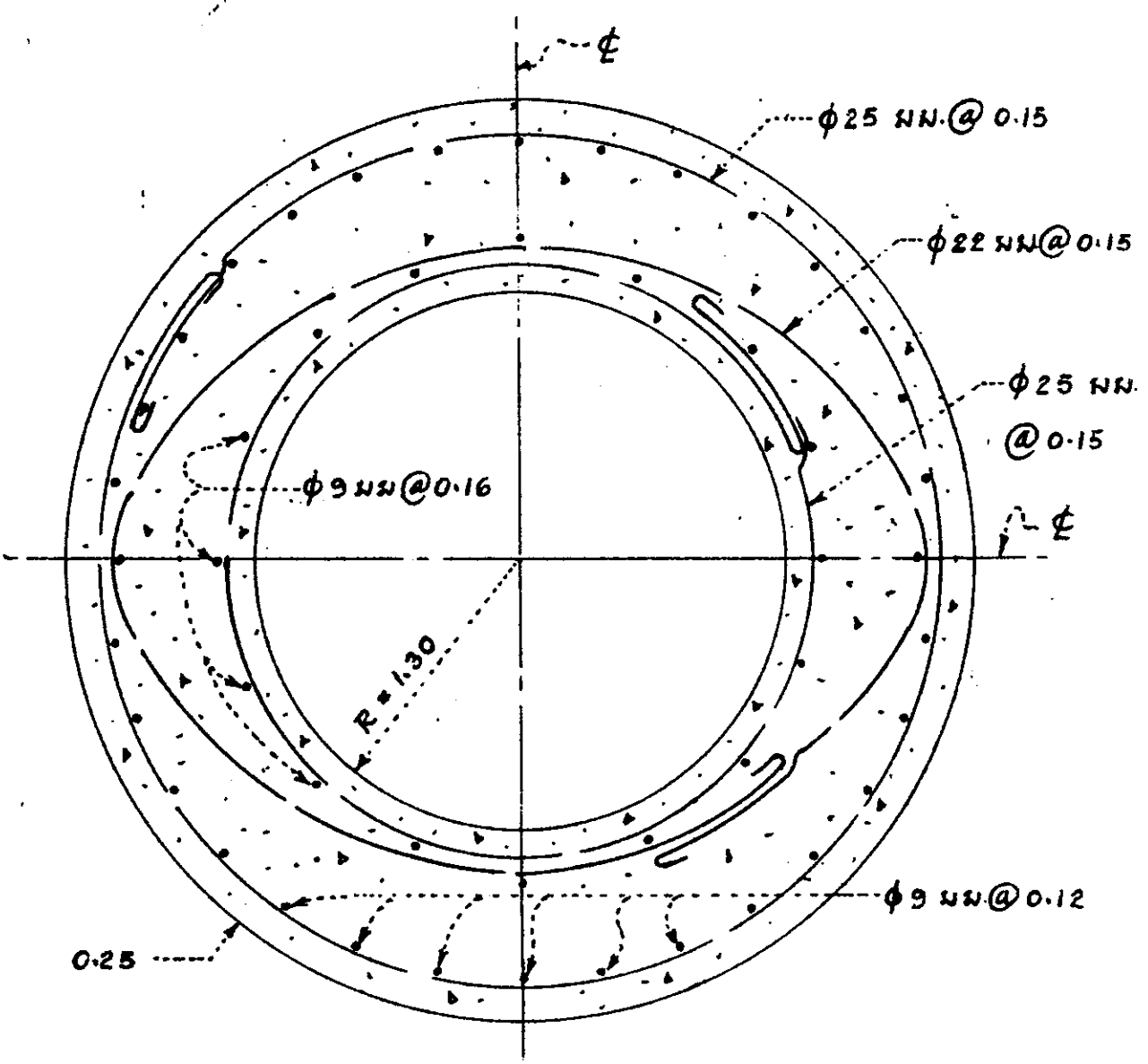
เหล็กรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 0.002 Ag.

แสดงความหนาของหล่อ 0.25 ม.

∴ เหล็กรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ $= 25 \times 100 \times 0.002$

$$= 5.00 \quad (\text{ซม.})^2$$

ใช้ ϕ 9 มม. @ 0.12, $A_s = 5.30 \quad (\text{ซม.})^2$



<u>รูปตัดแสดงการเสริมเหล็กหัวท่อ</u> (ความลึก 25 - 30 ม.)

พื้นที่เหล็กที่ต้องเสริมเพิ่มคือ $\frac{12.404\{b.d + (n-1)A_s\}}{f_s}$

$= \frac{12.404\{(25\times100) + (11\times32.72)\}}{1,400}$

$= 25.339$ $(ซม.)^2$

ใช้ ϕ 22 มม. @ 0.15 ; $A_s = 25.34$ $(ซม.)^2$

∴ ที่ความลึก 25 - 30 ม. ใช้เหล็ก ϕ 22 มม.@ 0.15 สลับกับ ϕ 25 มม@ 0.15

ระยะห่างระหว่างเหล็ก 0.075 ม. > 2.5 ϕ จึงใช้ได้

ส่วนเหล็กที่เสริมในแนวขนานกับความยาวท่อนั้น ผิวนอกใช้ ϕ 9 มม.@ 0.12
ผิวในใช้ ϕ 9 มม.@ 0.16

(ดูรูปแสดงการเสริมเหล็กในตัวท่อ)

(vi) <u>ออกแบบทางทิ้งน้ำ</u> (Blow-off)

ทางทิ้งน้ำอันนี้ให้ท่อเหล็กอาบสังกะสีต่อเข้ากับจุดต่ำจุดของท่อเชื่อม (Syphon) มี Gatevalve สำหรับเปิดระบายน้ำออกจากท่อเชื่อม

สมมุติใช้ท่อขนาด ϕ 12"

จาก $$t = \frac{2 A_s}{C.A \sqrt{2g}} \left[\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2} \right]$$

เมื่อ t = ระยะเวลาที่ใช้ในการระบายน้ำ เป็นวินาที

A_s = พื้นที่ผิวน้ำ หาได้ดังนี้

มุม θ ได้หาไว้เดิมแล้ว เท่ากับ 73.30°

เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อเชื่อม = 2.60 ม.

$\therefore$ ความยาวแกนสั้นของรูปวงรีผิวน้ำ = 2.60 ม.

และความยาวแกนยาวของรูปวงรีผิวน้ำ $= \frac{8.666}{\sin.73.3°}$

$= 9.048$ ม.

พื้นที่รูปวงรี $= \pi ab$

$= \pi \times \frac{9.048}{2} \times \frac{2.60}{2} = 18.476$ ม.^{2}

$\therefore A_s = 2 \times 18.476 = 36.952$ ม.^{2}

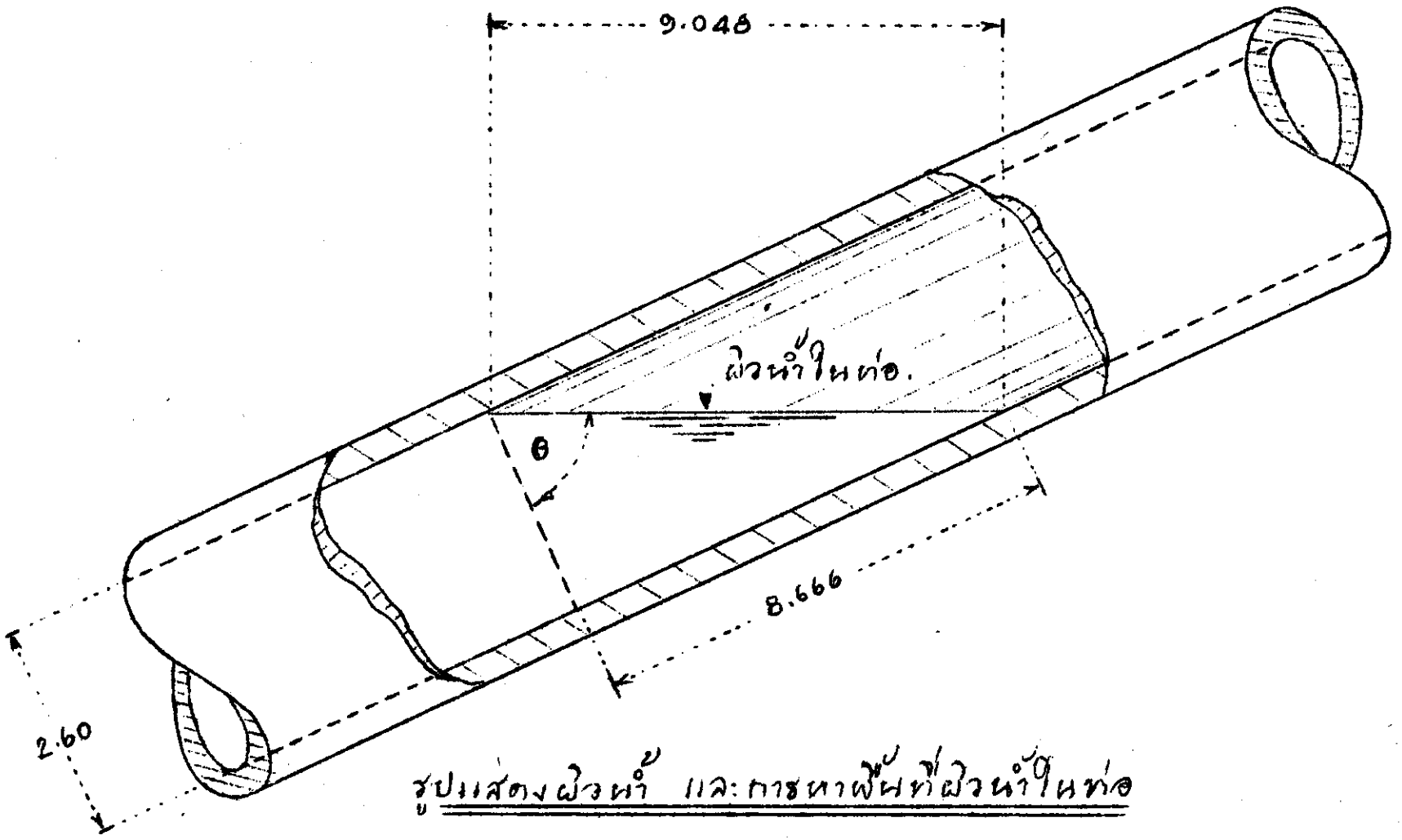
$C = 0.65$

$A = \frac{\pi}{4} (0.30)^2 = 0.0706$ ม.^{2}

$g = 9.81$ ม./(วินาที)^2

$h_1 = 30$ ม.

$h_2 = 0$



รูปแสดงผิวน้ำ และการหาพื้นที่ผิวน้ำในท่อ

$$t = \frac{2 \times 30.952}{0.65 \times 0.0706 \sqrt{19.62}} \cdot \sqrt{30}$$

$= 1,992$ วินาที

$= 33.19$ นาที

$= 35$ นาที ใช้ได้

(vii) <u>ออกแบบช่องให้คนลงไปปิด-เปิดน้ำ</u> (Manhole)

สมมติให้ความลึกของน้ำสูงสุดที่ไหลในหุบเนินในฤดูฝน เป็น 0.90 ม.

ส่วนเผื่อ Freeboard ใช้ 1.00 ม.

∴ ความสูงของ Manhole $= 2.60 + 0.50 + 0.90 + 1.00 + 1.00$

$= 6.00$ ม.

กำหนดขนาดของ Manhole 1.50×1.50 ม.^{2}

สมมติขนาดความหนาเปลือก Manhole 0.25 ม.

ความหนากัน Manhole 0.25 ม.

ไม่มี Surcharge

คำนวณกำแพงข้างสี่ด้าน

แรงดันน้ำที่กัน Manhole $= 1,000 \times 6.00 = 6,000$ กก./ม.^{2}

แรงดันดินที่กัน Manhole $= \frac{1}{3}(2,150 - 1,000)4.10 = 1,572$ กก./ม.^{2}

∴ $w_4 = 6,572$ กก./ม.^{2}

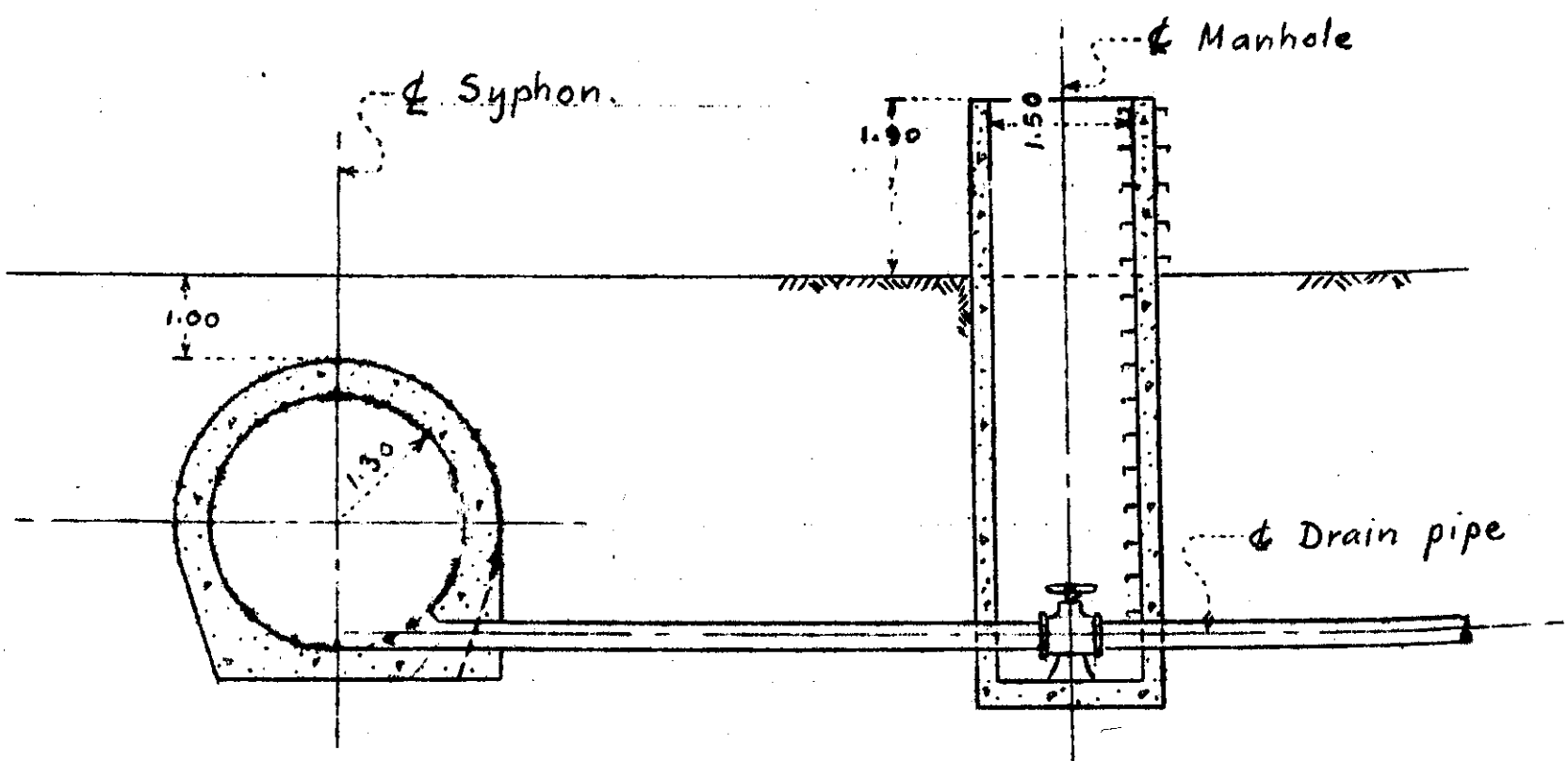
$M_{4\,max.} = \frac{1}{10} \times 6,572 \times (1.75)^2 = 2,013$ กก.-ม.

$V_{4\,max.} = \frac{1}{2} \times 6,572 \times 1.75 = 5,751$ กก.

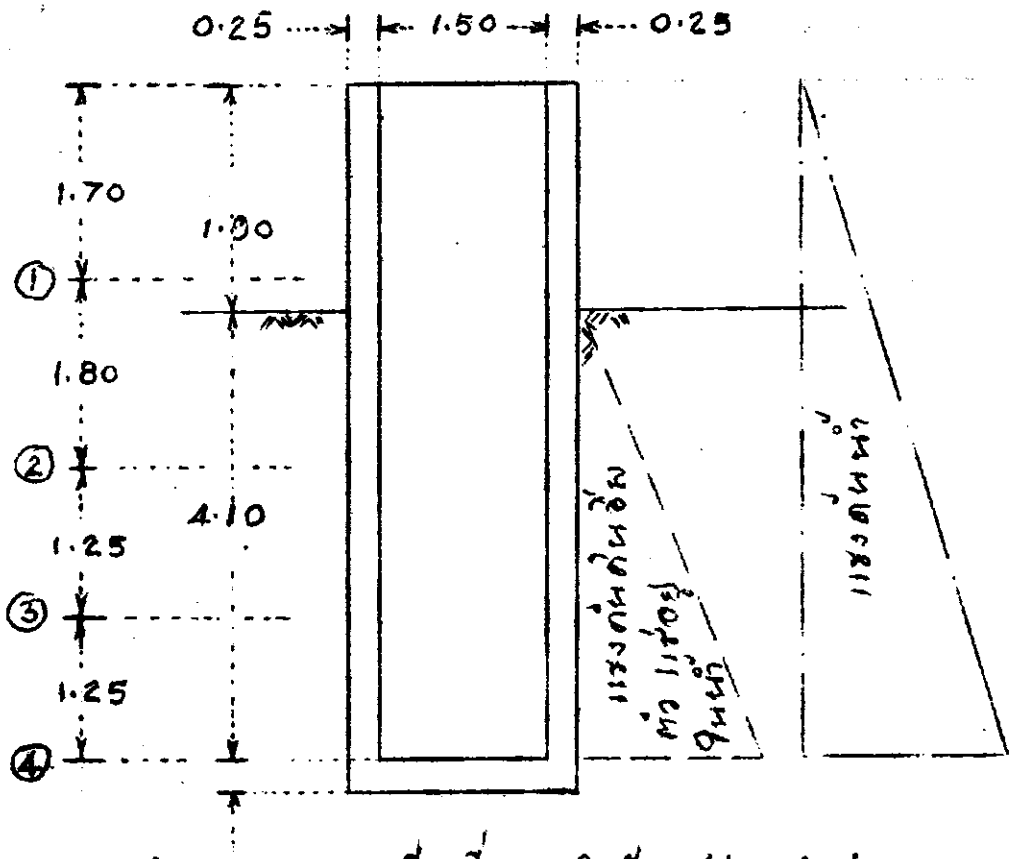
$d_M = \sqrt{\frac{201,300}{13.1 \times 100}} = 12.12$ ซม.

$d_V = \frac{5,751}{100 \times 0.87 \times 5.2} = 12.71$ ซม.

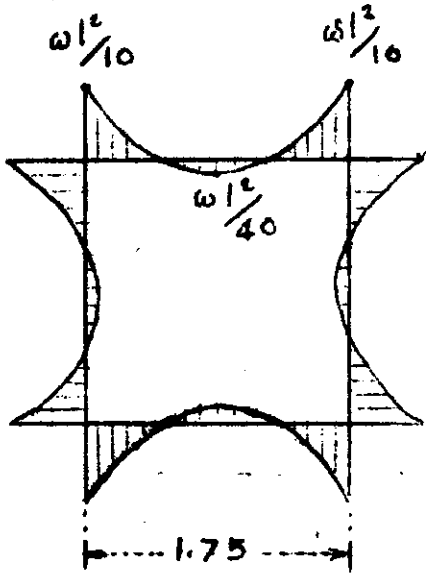
ใช้ d = 17 ซม., Covering = 8 ซม.



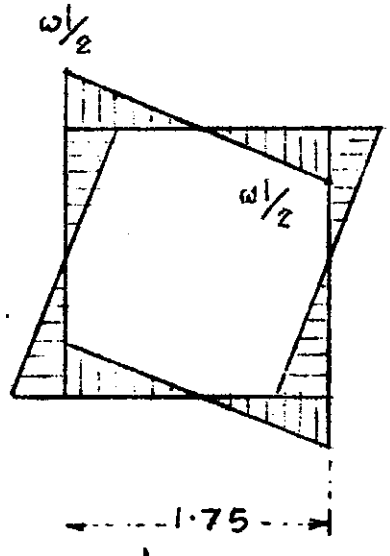
รูปแสดงลักษณะการติดตั้ง ทางเข้าท่อเชื่อมและ Manhole.



แรงดันที่กระทำกับ Manhole:



M - diagram



V - diagram

เหล็กรับอุณหภูมิ = $0.002 \times 25 \times 100$ = 5 $(ซม.)^2$

ใช้ ϕ 9 มม. @ 0.12 = 5.30 $(ซม.)^2$

ξ_o = 15.71 ซม.

สมมติให้ที่ความลึกจากผิวดินเป็นระยะ x นั้น เหล็กเสริมเท่ากับเหล็กรับอุณหภูมิ 5.30 $(ซม.)^2$ พอดี

แรงดันดิน = $\frac{1}{3} \times 1,150 \times x$ = 383 กก./ม.^{2}

แรงดันน้ำ = $1,000(1.90 + x)$ กก./ม.^{2}

$\therefore w_1 = 2,283 + 1,000x$ กก./ม.^{2}

$M_{1\,max} = \frac{1}{10}(2,283 + 1,000x)(1.75)^2$

$= (699 + 306x)$

$V_{1\,max} = \frac{1}{2}(2,283 + 1,000x)(1.75)$

$= (1,998 + 875x)$

$A_s = \frac{69,900 + 30,600x}{1,400 \times 0.87 \times 17}$ = 5.30

$\therefore x = 1.30$ ม.

$\xi_o = \frac{1,998 + 875}{7.9 \times 0.87 \times 17}$ = 15.71

$\therefore x = -0.19$ ซม.

$\therefore$ เหล็กเสริมรับอุณหภูมิใช้เป็นเหล็กหลักได้ถึงระดับต่ำจากปาก Manhole ได้เพียง 1.70 ม.

ที่ระดับ (2).

แรงดันน้ำ = $1,000 \times 3.50$ = 3,500 กก./ม.^{2}

แรงดันดิน = $\frac{1}{3} \times 1,150 \times 1.60$ = 613 กก./ม.^{2}

$\therefore w_2 = 4,113$ กก./ม.^{2}

$M_{2\,max.} = \frac{1}{10} \times 4,113 \times (1.75)^2 = 1,360$ กก.- ม.

$V_{2\,max.} = \frac{1}{2} \times 4,113 \times 1.75 = 3,599$ กก.

$A_s = \frac{1,360 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 17} = 6.57$ (ซม.)^2

$\Sigma_o = \frac{3,599}{7.9 \times 0.87 \times 17} = 30.80$ ซม.

ใช้ ϕ 12 มม. @ 0.12; $A_s = 9.42$ (ซม.)^2; $\Sigma_o = 31.42$ ซม.

ที่ระดับ (3)

แรงดันน้ำ $= 1,000 \times 4.75 = 4,750$ กก./ม.^{2}

แรงดันดิน $= \frac{1}{3} \times 1,150 \times 2.85 = 1,093$ กก./ม.^{2}

$\therefore w_3 = 5,843$ กก./ม.^{2}

$M_{3\,max.} = \frac{1}{10} \times 5,843 \times (1.75)^2 = 1,789$ กก.- ม.

$V_{3\,max.} = \frac{1}{2} \times 5,843 \times 1.75 = 5,113$ กก.

$A_s = \frac{1,789 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 17} = 8.64$ (ซม.)^2

$\Sigma_o = \frac{5,113}{7.9 \times 0.87 \times 17} = 43.76$ ซม.

ใช้ ϕ 12 มม. @ 0.08; $A_s = 14.14$ (ซม.)^2; $\Sigma_o = 47.12$ ซม.

ที่ระดับ (4)

$A_s = \frac{2,013 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 17} = 9.72$ (ซม.)^2

$o = \frac{5,751}{7.9 \times 0.87 \times 17} = 49.22$ ซม.

ใช้ ϕ 19 มม. @ 0.12; $A_s = 23.63$ (ซม.)^2; $\Sigma_o = 49.74$ ซม.

** สำหรับเหล็กรับโมเมนต์บวกน้อยกว่า Temp. Steel ทั้งสิ้น

การเสริมเหล็กพื้น

น้ำหนักตันพื้น $\frac{4 \times 1.75 \times 0.25 \times 6.00 \times 2,400}{4}$

$= 6,300$ กก./ม.^{2}

$M^- = \frac{1}{10} \times 6,300 \times (1.75)^2 = 1,929$ กก.- ม.

$M^+ = 483$ กก.- ม.

$V = \frac{1}{2} \times 6,300 \times 1.75 = 5,513$ กก.

$d_M = \sqrt{\frac{1,929 \times 100}{13.7 \times 100}} = 11.87$ ซม.

$d_V = \frac{5,513}{109 \times 0.87 \times 5.2} = 12.18$ ซม.

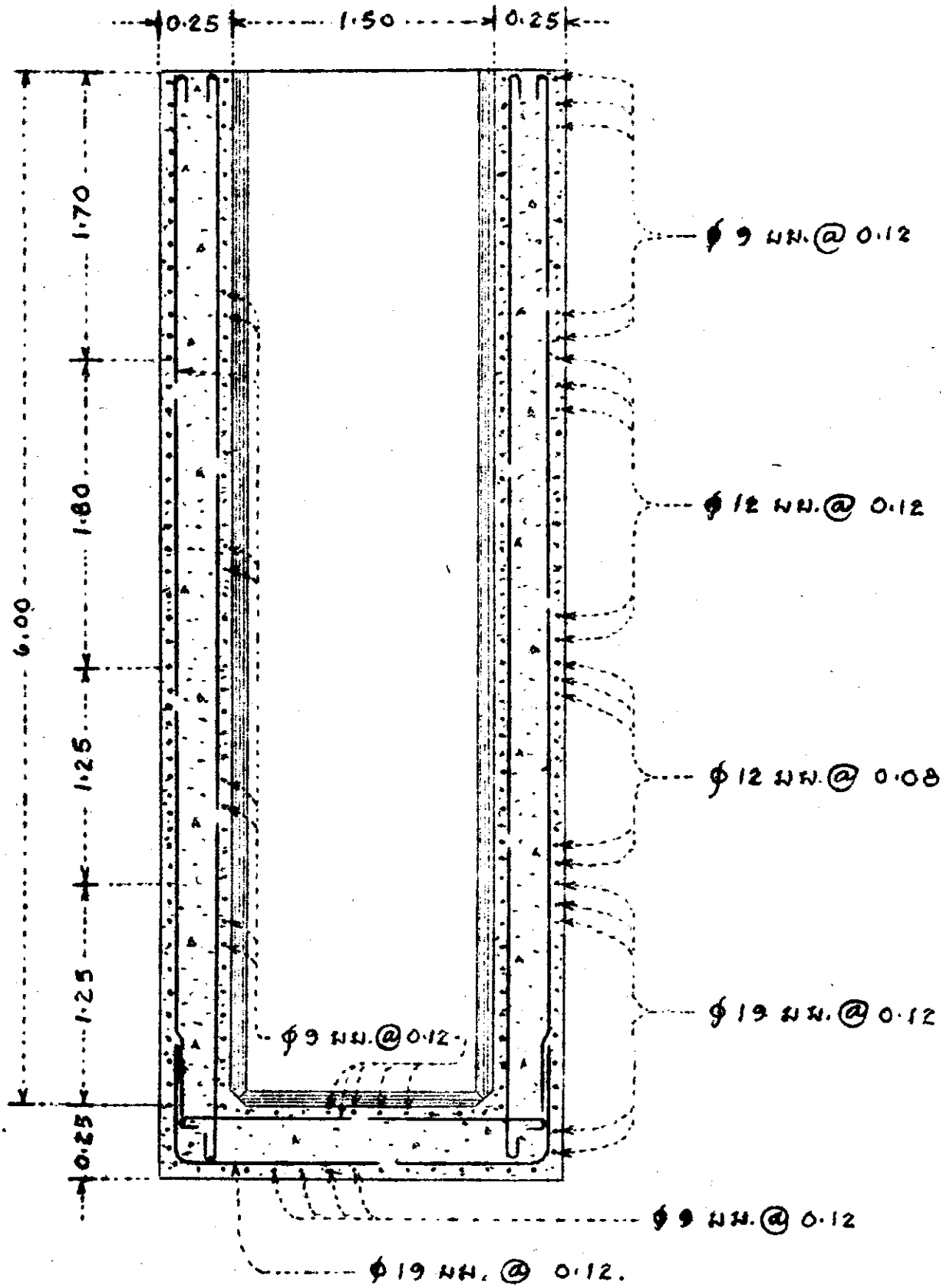
ใช้ $d = 17$ ซม., Cevering $= 8$ ซม.

$A_s^- = \frac{1,929 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 17} = 9.32$ (ซม.)^2

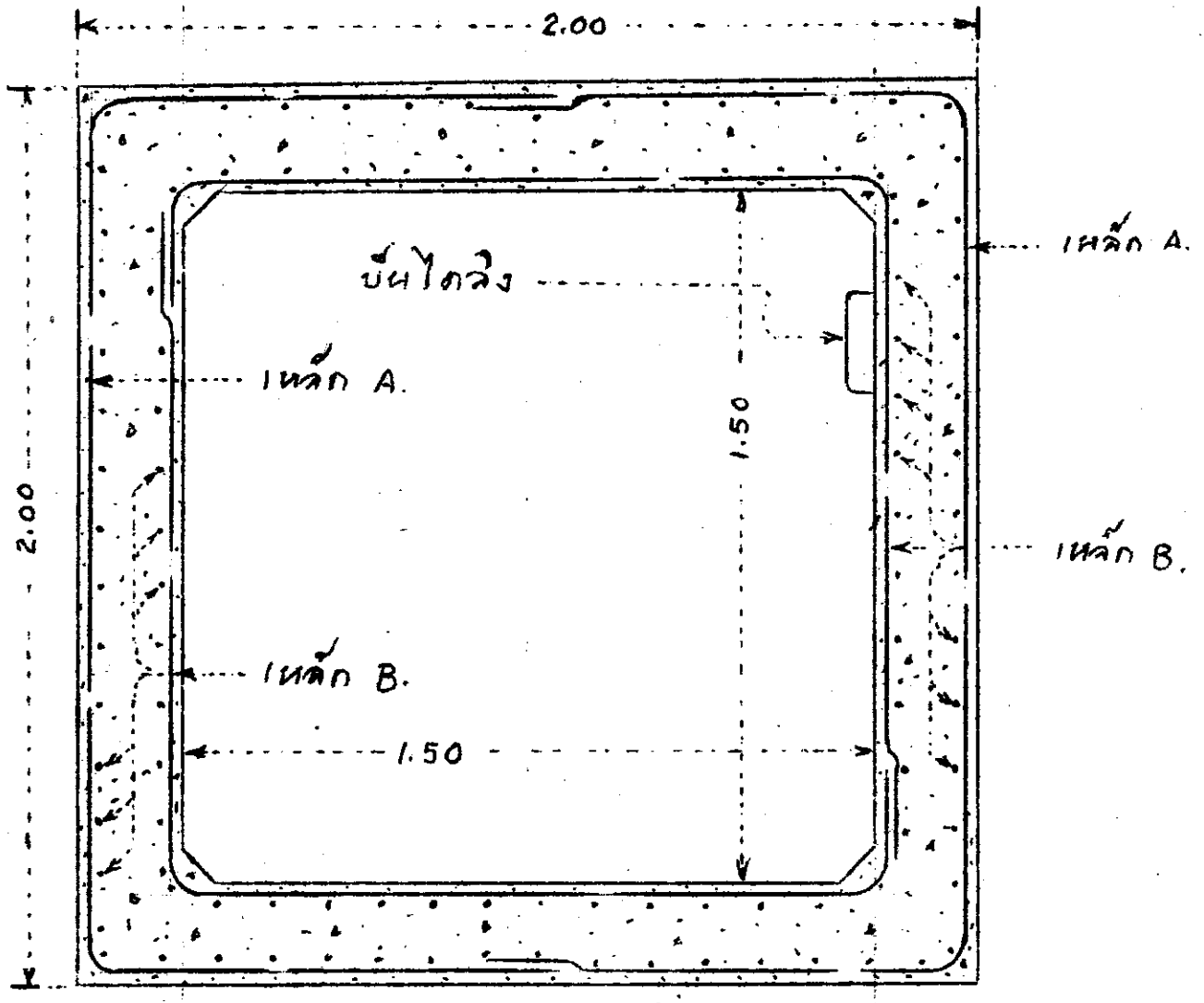
$A_s^+ = \frac{483 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 17} = 2.33 < 5$ (ซม.)^2

$\leq_n = \frac{5,513}{7.9 \times 0.87 \times 17} = 47.18$ ซม.

ใช้ ø 19 มม. @ 0.12; $A_s = 23.63$ (ซม.)^2; $\leq_o = 49.24$ ซม.



รูปแสดงการเสริมเหล็ก Manhole



รูปตัดของ Manhole.

ขนาดของเหล็ก A.

ช่วง 0 ม. – 1.70 ม. จากขอบบน		ϕ 9 มม. @ 0.12
" 1.70 ม. – 3.50 ม.	"	ϕ 12 มม. @ 0.12
" 3.50 ม. – 4.75 ม.	"	ϕ 12 มม. @ 0.08
" 4.75 ม. – 6.00 ม.	"	ϕ 19 มม. @ 0.12

ขนาดของเหล็ก B. วางขั้น ϕ 9 มม. @ 0.12 ทั้งหมด.

บทที่ 7

ท่อลอด (Culvert)

ท่อลอดเป็นอาคารตัดผ่าน (Cross structure) อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสภาพคล้ายกับท่อเชื่อม (Syphon) ส่วนที่แตกต่างกันนั้นอยู่ที่ระดับต่างของตัวท่อที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุดต่างกันไม่มาก หรือบางครั้งตัวท่อของท่อลอดอาจวางในแนวระดับเลยก็มี อีกประการหนึ่งนั้นการไหลของน้ำที่ผ่านท่อลอดอาจจะไหลในลักษณะที่เต็มท่อหรือไม่เต็มท่อก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของปริมาณน้ำที่จะไหลผ่านท่อ ดังนั้นแรงดันของน้ำภายในท่อจึงไม่มีความสำคัญในการคำนวณออกแบบความแข็งแรงของตัวท่อนัก ในการคำนวณออกแบบจึงมักนิยมใช้ท่อหล่อสำเร็จ (Precast concrete pipe) มาวางแล้วยารอยต่อด้วยปูนก่อ (Mortar) เว้นเสียแต่ขนาดของท่อที่ใหญ่มาก ๆ จึงใช้การหล่อท่อ ณ ที่ก่อสร้าง (Cast in place) ข้อแตกต่างประการสุดท้ายระหว่างท่อเชื่อมกับท่อลอดก็คือมีโอกาสน้อยมากที่จะออกแบบท่อลอดให้น้ำในคลองส่งน้ำลอดทางน้ำธรรมชาติ หรือให้น้ำในทางน้ำธรรมชาติลอดคลองส่งน้ำ แต่มักจะเป็นในลักษณะที่ออกแบบให้ท่อลอดนำน้ำในทางน้ำธรรมชาติข้ามน้ำในคลองส่งน้ำลอดทางเกวียน ถนน หรือทางรถไฟ หรือจะพูดให้ง่ายลงไปอีกก็คือแทนที่จะสร้างสพานข้ามคลองส่งน้ำหรือทางน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีราคาแพงกว่า และมักต้องยกระดับของสพานให้สูงพ้นระดับผิวน้ำ ก็เลี่ยงมาสร้างท่อลอดนั่นเอง ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่ง ในขณะที่น้ำไหลผ่านอาคารดังกล่าว จะเกิดแรงดูด (Suction) ขึ้นในท่อเชื่อม แต่ในท่อลอดจะไม่มีแรงดูดเกิดขึ้นภายในตัวท่อเลย

7.1 ส่วนประกอบของท่อลอด

ส่วนประกอบสำคัญของท่อลอดคล้ายคลึงกับของท่อเชื่อมนั่นเองคือ ช่วงต่อเชื่อมด้านทางเข้า (Inlet transition) ตัวท่อ (Pipe or conduit) และช่วงต่อเชื่อมด้านทางออก (Outlet transition) สำหรับการออกแบบท่อลอดชนิดที่ลอดคลองส่งน้ำหรือทางน้ำธรรมชาตินั้น จะพยายามเปิดขนาดท่อให้เล็กและความเร็วของการไหลของน้ำในท่อค่อนข้างสูง (ใช้เกณฑ์ไม่เกิน 2.50 ม./วินาที) ในลักษณะนี้จะให้ความสำคัญในการออกแบบอาคารต่อเชื่อมด้านทางเข้าและด้านทางออกเช่นเดียวกับที่ใช้กับท่อเชื่อม แต่ถ้าเป็นท่อลอดชนิด

ลอดทางเกวียน ถนน หรือทางรถไฟ มักนิยมกำหนดความกว้างของตัวท่อใกล้เคียงกับความกว้างของทางน้ำธรรมชาติ หรือคลองส่งน้ำ แล้วแต่กรณี ดังนั้นความเร็วของกระแสน้ำที่ไหลผ่านท่อจึงสูงกว่าความเร็วของน้ำในคลองไม่มากนัก จึงสามารถกำหนดมุมผายของช่วงต่อเชื่อม (Transition) ได้กว้างกว่าที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ก็ได้ ทั้งนี้เพื่อความประหยัดเป็นจุดสำคัญ

7.2 การคำนวณออกแบบ

7.2.1 การออกแบบทางชลศาสตร์ (Hydraulic design) ค่า Headloss ที่กำหนดให้ใช้กับท่อลอดมักให้ไว้ไม่เกิน 0.20 ม. เพราะท่อลอดมักมีความยาวไม่มาก และความเร็วของการไหลของน้ำในท่อก็ไม่สูงกว่าความเร็วของน้ำในคลองมากนัก ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

7.2.1.1 การหาค่า Headloss

ค่าของ Headloss ก็ใช้สูตรการหาเช่นเดียวกับที่ใช้ในท่อเชื่อม คือ Headloss เนื่องจาก ช่วงต่อเชื่อม Headloss ที่ปากทางเข้าและทางออกของท่อ และ Friction loss ในท่อ กับ Headloss เนื่องจากการโค้งงอของท่อ (ถ้ามีการงอท่อ) ผลรวมของ Headloss ทั้งหมดนี้จะต้องใกล้เคียงและไม่เกินค่า Headloss ที่กำหนดไว้ในแบบคลอง

7.2.1.2 การตรวจสอบแรงลอยตัวของท่อ (Buoyance force) กรณีนี้ให้หาน้ำหนักของตัวท่อที่จะต้านทานแรงลอยตัวในขณะที่ในท่อไม่มีน้ำ ไม่มีดินทับหลังท่อ และคิดน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็กที่จมน้ำด้วย ซึ่งถ้าน้ำหนักของท่อไม่พออาจต้องใส่คีนเป็ด เพื่อช่วยยึดตัวท่ออีกด้วย (กรณีเช่นนี้ในท่อลอดทั่ว ๆ ไปไม่ต้องตรวจสอบก็ได้ เว้นแต่กรณีที่คิดว่าจะมีการซ่อมท่อในขณะที่มีน้ำเต็มทั้งด้านหน้าและหลังท่อเท่านั้น)

7.2.1.3 ตรวจสอบความยาวของการไหลของน้ำเลาะข้างใต้และด้านข้างของตัวอาคาร (Percolation path) เนื่องจากท่อลอดมีความยาวไม่มาก ดังนั้นแม้ว่าระดับต่างของระดับน้ำด้านหน้าและด้านท้ายท่อลอดจะมีไม่มากก็ตาม (กรณีที่ใช้ท่อลอดนี้เป็นอาคารอัดน้ำด้วย ค่า Percolation จะมีความสำคัญมาก) แต่การไหลของน้ำที่เลาะด้านข้างและด้านใต้อาคารก็อาจมีผลที่จะพัดพาเมล็ดดินออกไปได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบค่า Weighted creep ratio (C_w) ตามตัวเลขและวิธีการที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ด้วย และในกรณีที่ความยาว

ของท่อลอดไม่พอก็อาจต้องใส่คอลล่าร์ (Collars) เป็นระยะ ๆ ตามท่อ เพื่อเพิ่มความยาวของการไหลของน้ำคั่งกล่าวด้วย

7.2.2 การออกแบบโครงสร้าง (Structural design) ท่อที่ใช้เป็นส่วนประกอบของท่อลอดนั้นมีทั้งที่เป็นไม้ (สมัยนี้ไม่ใช้แล้ว) ท่อเหล็ก (มีใช้น้อย) ท่อแอสเบสตอสซิเมนต์ (Asbestos-cement pipe) ท่อคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จ (Precast concrete pipe) และท่อคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Cast in-place) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับราคางานวัสดุที่หาได้ ความสะดวกในการก่อสร้าง และขนาดของท่อเอง ส่วนรูปร่างของท่อมีทั้งท่อกลม ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าและท่อสี่เหลี่ยมจตุรัส ซึ่งท่อกลมที่มีขนาดไม่ใหญ่มักก็มักนิยมใช้ท่อเหล็กหรือท่อคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จ ส่วนท่อกลมขนาดใหญ่หรือท่อสี่เหลี่ยมจตุรัสมักนิยมใช้ท่อคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ และในกรณีที่ระดับของผิวจราจรหรือทางตัดผ่านที่ท่อลอดไปนั้นถูกบังคับไม่ให้ยกสูงขึ้น ก็จะเปลี่ยนจากท่อสี่เหลี่ยมจตุรัสเป็นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นการใช้ท่อคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่แล้วก็มักไม่นิยมออกแบบเป็นท่อกลม เพราะตั้งแบบยาก และค่าแรงจะอยู่ในเกณฑ์สูงด้วย ดังนั้นในที่นี้จะพูดถึงท่อที่เป็นท่อคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจตุรัสลอดถนนเท่านั้น

เกณฑ์การออกแบบนั้นพอจะแยกออกเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้.-

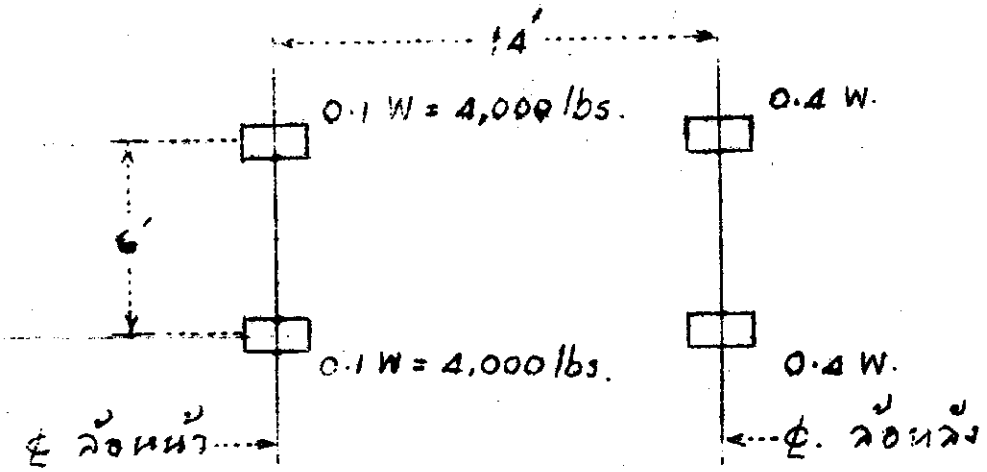
(i) ความลึกของดินทับหลังท่อจะต้องไม่น้อยกว่า 2 ฟุต

(ii) รถที่วิ่งข้ามท่อใช้หลักเกณฑ์ของ ASSHO standard (ดูรูปประกอบน้ำหนักของล้อรถ สำหรับถนน H20-44 และแรงกดเนื่องจากน้ำหนักของรถบรรทุกนั้น ให้คิดจากน้ำหนักกดของล้อหลังทั้งคู่แผ่ออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีความยาวของด้าน 1.75 เท่าของความลึก และมีเกณฑ์เพิ่มเติมดังนี้

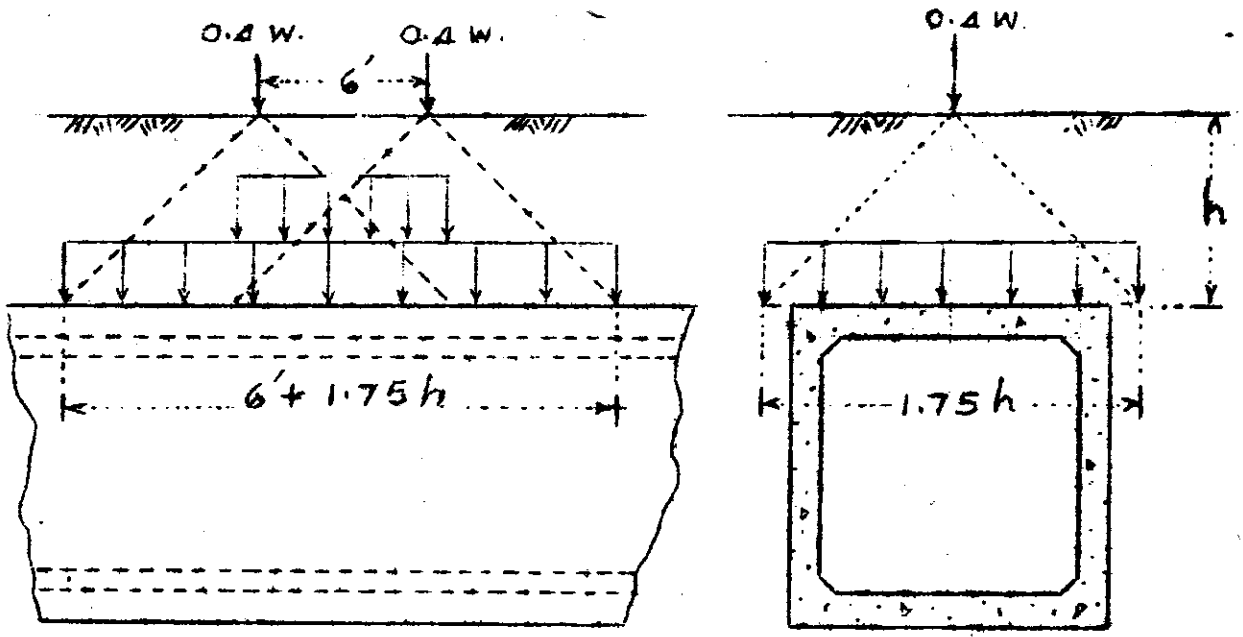
– ความหนาของดินทับหลังท่อไม่เกิน 2 ฟุต ให้คิดน้ำหนักกดของล้อรถโดยตรงสู่ผิวท่อ โดยไม่ต้องแผ่เป็นมุม 45°

– ความหนาของดินทับหลังท่อที่เกิน 10 ฟุตไม่ต้องคิดน้ำหนักกดจากล้อรถเลย

– ความหนาของดินทับหลังท่อที่ไม่เกิน 3 ฟุต ต้องเพิ่มแรงกระแทก (Impact) เนื่องจากรถที่ข้ามหลังท่ออีกดังนี้



แปลนแสดงน้ำหนักแต่ละล้อของรถ สำหรับถนน H 20-44.



รูปตามยาว

รูปตัดขวาง

รูปแสดงการแผ่น้ำหนักกดของล้อรถบนท่อลอด.

ความหนาของดินทับหลังท่อ (ฟุต – นิ้ว)			แรงกระแทก (% ของน้ำหนักกด)
0 – 0	ถึง	1 – 0	30
1 – 1	"	2 – 0	20
2 – 1	"	2 – 11	10
ตั้งแต่ 3 – 0 ขึ้นไป			0

(iii) คิดเฉพาะกรณีที่ในท่อไม่มีน้ำเลยแต่มีดินทับหลังท่อด้วยความหนาตามที่เป็นจริง

(iv) ในกรณีที่ใช้ท่อแถวเดียวไม่พออาจจะใช้ท่อคู่ ท่อสามแถวหรือมากกว่านั้นได้ แต่มีเกณฑ์กว้าง ๆ ว่า พยายามให้หน้ากว้างของท่อใกล้เคียงกับขนาดความกว้างของคลองที่ต่อเชื่อมกับท่อนี้จะให้ผลดีทางด้านชลศาสตร์ด้วย ส่วนในด้านโครงสร้างนั้นให้ใช้หลักการวิเคราะห์โครงสร้างหาโมเมนต์และแรงเฉือนออกมาและหาเหล็กเสริมตามหลักเกณฑ์ทางการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป

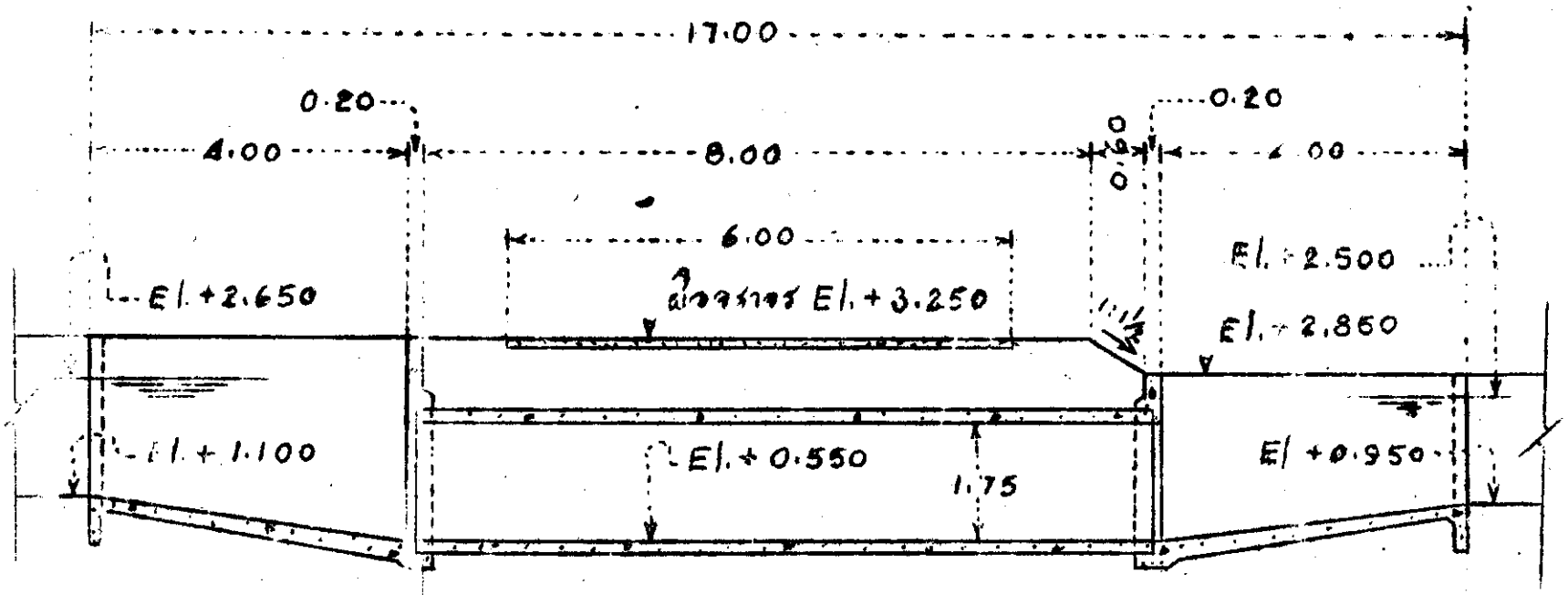
(v) การออกแบบ ช่วงต่อเชื่อมทางเข้าและทางออกคงอาศัยหลักการและวิธีการดังกล่าวไว้ในบทที่ 4

ตัวอย่าง ให้ออกแบบท่อลอดถนน (ผิวจราจรกว้าง 6.00 ม. ของคลองส่งน้ำที่มีความจุ 6.00 ม.^{3}/วินาที ก้นคลองกว้าง 1.50 ม. น้ำลึก 1.55 ม. ซึ่งเป็นคลองดาดด้วยคอนกรีต มีลาดตลิ่ง 1:1$\frac{1}{2}$ ดินบริเวณนั้นเป็นทรายหยาบมีมุมทรงตัว 30° และรับน้ำหนักได้ 14 ตัน/ม.^{2} โดยยอมให้ Headloss เกิดขึ้นไม่เกิน 0.15 ม.

วิธีทำ

(i) หาขนาดท่อ

ปริมาณน้ำที่กำหนดให้			6.00	ม.^{3}/วินาที
ปริมาณน้ำที่ใช้คำนวณ	1.1 x 6.00	=	6.60	ม.^{3}/วินาที
ความเร็วน้ำในท่อสูงสุดที่ยอมให้ใช้			2.50	ม./วินาที
∴ พื้นที่หน้าตัดท่อลอด	$\frac{6.60}{2.50}$	=	2.64	ม.^{2}



รูปตัดตามยาวของท่อลอด.

ใช้ท่อขนาด ⌀ 1.75 x 1.75 และพอกมุม 0.10 ม.

∴ พื้นที่หน้าตัดท่อจริง ๆ $(1.75 \times 1.75) - (2 \times 0.10 \times 0.10) = 3.0425$ ม.^{2}

ความเร็วของน้ำในท่อ $\frac{6.60}{3.0425} = 2.17$ ม./วินาที

พื้นที่หน้าตัดคลอง $1.55 \left\{ 1.50 + (1.50 \times 1.55) \right\} = 5.929$ ม.^{2}

ความเร็วน้ำในคลอง $\frac{6.00}{5.929} = 1.003$ ม./วินาที

จากรูป ความยาวตัวท่อ 9.00 ม.

(ii) <u>หาความยาวช่วงท่อเชื่อม</u> (Transition)

เนื่องจากปริมาณน้ำเพียง 6.00 ม.^{3}/วินาที ถือว่าเป็นอาคารที่เล็กมาก ดังนั้นจึงใช้มุมผายเพียง 30° ทั้งทางเข้าและทางออก

ความกว้างผิวน้ำตรงช่วงที่ติดตัวท่อ		2.05	ม.
ความกว้างผิวน้ำที่คลอง		6.15	ม.
∴ ผิวน้ำมีความกว้างแตกต่างกัน	$\frac{1}{2}(6.15 - 2.05)$	= 2.05	ม.
∴ ความยาว Transition	$\frac{2.05}{\tan 30°}$	= 3.551	ม.
ใช้ Broken-back Type		4.00	ม.

(iii) <u>หาค่า Loss ในช่วงต่าง ๆ</u>

- Friction loss

$$h_f = \frac{n^2 . V^2 . L}{R^{1.333}}$$

$$= \frac{(0.014)^2 \times (2.17)^2 \times 9.000}{(\frac{3.0425}{7.166})^{1.333}}$$

$$= \frac{0.000196 \times 4.7089 \times 9.000}{0.31912}$$

$$= 0.0260 \text{ ม.}$$

- Inlet transition loss

พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าท่อ $2.05 \times 2.05 = 4.2025$ ม.^{2}

∴ ความเร็วน้ำหน้าท่อ $\frac{6.60}{4.2025} = 1.570$ ม./วินาที

$$H_{T_i} = 0.30 \times \frac{(1.570)^2 - (1.003)^2}{2 \times 9.81}$$

$$= \frac{0.30(2.465 - 1.006)}{19.62} = 0.0223 \text{ ม.}$$

- Outlet transition loss

พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าท้ายท่อ $2.05 \times 1.90 = 3.895$ ม.^{2}

∴ ความเร็วน้ำท้ายท่อ $\frac{6.60}{3.895} = 1.694$ ม./วินาที

$$H_{T_o} = 0.50 \times \frac{(1.694)^2 - (1.003)^2}{2 \times 9.81}$$

$$= \frac{0.50(2.870 - 1.006)}{19.62} = 0.048 \text{ ม.}$$

- Entrance loss

$$H_{en.} = 0.10 \times \frac{(2.17)^2 - (1.570)^2}{2 \times 9.81}$$

$$= \frac{0.10(4.7089 - 2.465)}{19.62} = 0.0114 \text{ ม.}$$

- Exit loss

$$H_{ex.} = 0.25 \times \frac{(2.17)^2 - (2.043)^2}{2 \times 9.81}$$

$$= \frac{0.25(4.7089 - 4.174)}{19.62} = 0.0068 \text{ ม.}$$

∴ Headloss ทั้งหมด $0.0260 + 0.0223 + 0.048 + 0.0114 + 0.0068$

$= 0.114$ ม. ≈ 0.15 ม. ใช้ได้

(iv) ตรวจสอบกา Weighted creep ratio

ความยาวของทางเดินน้ำใต้อาคาร $\frac{8.00 + 9.625}{3} + 2.00 + 0.80 + 0.70$

$\therefore$ L = 9.375 ม.

H = 2.650 − 0.950 = 1.70 ม.

$C_w = \frac{2.375}{1.70} = 5.515$

> 5.00 ใช้ได้

(C_w สำหรับทรายหยาบ เท่ากับ 5.00)

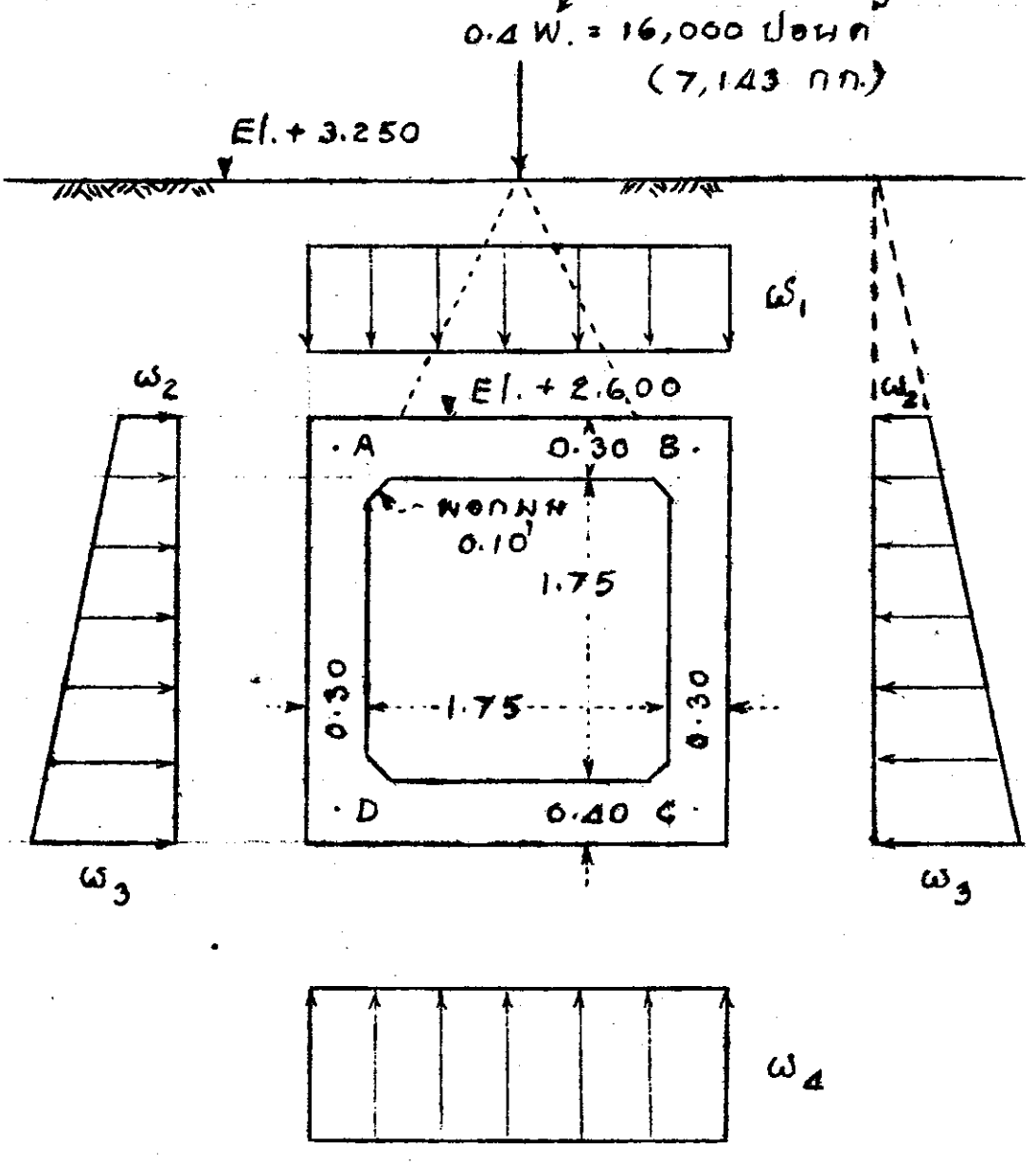
(v) หาแรงต่าง ๆ ที่เกิดกับตัวท่อ

สมมติความหนาของเปลือกท่อ ตลอดจนน้ำหนักล้อรถที่กดบนหลังท่อเป็นไปดังรูป

น้ำหนักดินทับหลังท่อ	0.65 x 1,900	=	1,235	กก./ม.^{2}
น้ำหนักเปลือกท่อตอนบน	0.30 x 2,400	=	720	กก./ม.^{2}
น้ำหนักกดของล้อรถ	$\frac{7,143}{(1.75 \times 0.65)^2}$	=	5,521	กก./ม.^{2}
แรกกระแทกของล้อรถ 10 %		=	552	กก./ม.^{2}
$\therefore$	w_1 = 8,028			
	$w_2 = \frac{1}{3} \times 1,900 \times 0.65$	=	412	กก./ม.^{2}
	$w_3 = \frac{1}{3} \times 1,900 \times 3.10$	=	1,963	กก./ม.^{2}
น้ำหนักเปลือกท่อด้านข้าง	$\frac{2 \times 1.75 \times 0.30 \times 2,400}{2.35}$	=	1,072	กก./ม.^{2}
$\therefore\therefore$	$w_4 = 1,072 + 8,028$	=	9,100	กก./ม.^{2}
น้ำหนักเปลือกท่อพื้นล่าง	0.40 x 2,400	=	960	กก./ม.^{2}
น้ำหนักน้ำในท่อ	$= \frac{(1.75)^2 \times 1,000}{2.35}$	=	1,303	กก./ม.^{2}
$\therefore$ น้ำหนักกดพื้นดิน	= 9,100 + 960 + 1,303	=	11,363	กก./ม.^{2}

< 14 ตัน/ม.^{2} ใช้ได้

แรงกดของล้อรถยนต์ (ล้อหลัง) ในความลึกของดินทับหลังท่อ 0.65 ม. ขึ้น พื้นที่ที่แผ่ในระยะห่างของล้อ 6 ขึ้น ไม่ซ้อนกันจึงคิดเพียงล้อเดียว



รูปตัดขวางของท่อ แสดงแรงที่มากระทำ

– Stiffness ratio; $K = \frac{4EI}{L}$

ช่วงคาน	:	AB	BC	CD	DA
ค่า K	:	$\frac{4EI}{2.05}$	$\frac{4EI}{2.10}$	$\frac{(\frac{0.40}{0.30})^3 I}{2.05}$	$\frac{4EI}{2.10}$
อัตราส่วน K	:	1.951	1.905	4.625	1.905

– ค่าโมเมนต์ที่จุดต่าง ๆ

$M_{FAB} = M_{FBA} = \frac{1}{12} \times 8,028(2.05)^2 = 2,811$ กก.– ม.

$M_{FCD} = M_{FDC} = \frac{1}{12} \times 9,100(2.05)^2 = 3,187$ กก.– ม.

$M_{FAD} = M_{FBC} = \left\{ \frac{1}{12} \times 412 \times (2.10)^2 \right\} + \left\{ \frac{1}{30} \times 1,963 \times (2.10)^2 \right\}$

$= 151.41 + 288.56 = 440$ กก.– ม.

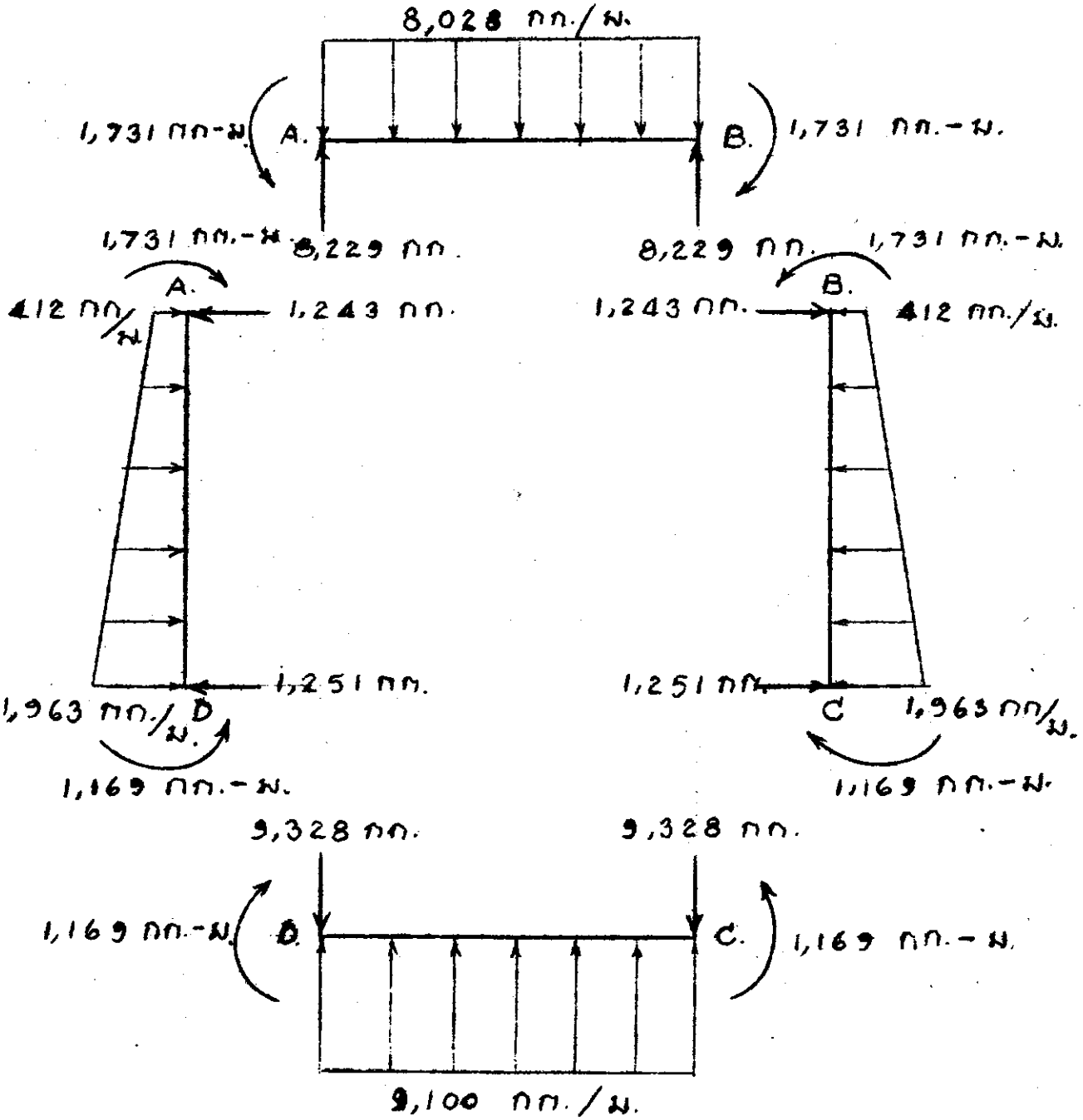
$M_{FDA} = M_{FCB} = \left\{ \frac{1}{12} \times 412 \times (2.10)^2 \right\} + \left\{ \frac{1}{20} \times 1,963 \times (2.10)^2 \right\}$

$= 151.41 + 432.84 = 584$ กก.– ม.

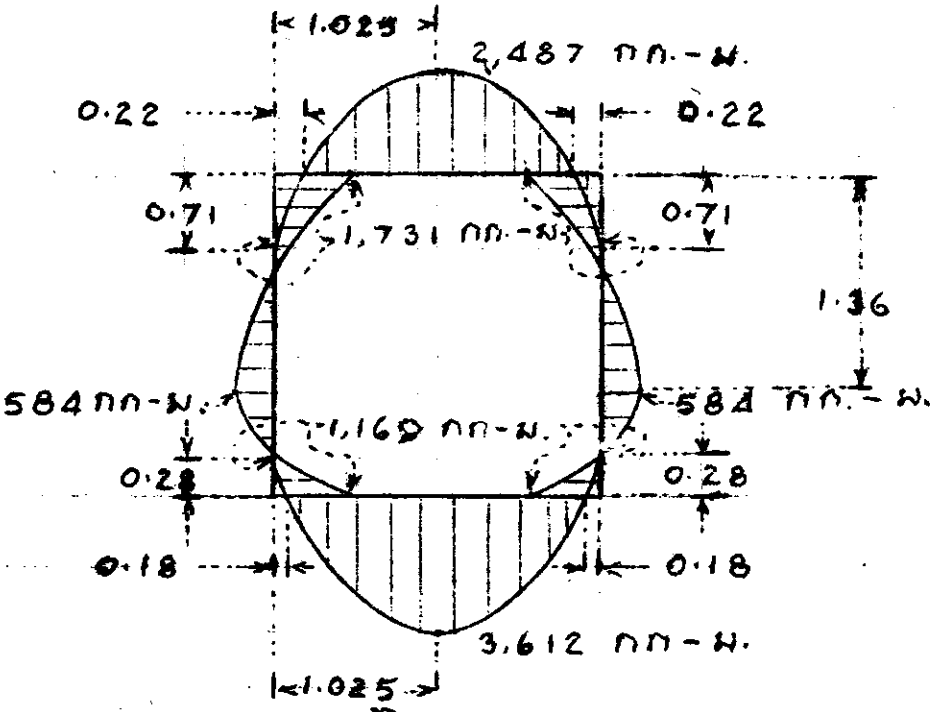
นำตัวเลขไปกำนวณตามตารางกระจายโมเมนต์ แล้วจึงนำผลที่ได้ไปเขียนไดอาแกรมของแรงและโมเมนต์ในช่วงตอนต่าง ๆ (Freebody diagram) ไดอาแกรมของโมเมนต์ (Bending moment diagram) และไดอาแกรมของแรงเฉือน (Shearing force diagram) ดังแสดงไว้ในรูป

ตารางกระจายโมเมนต์

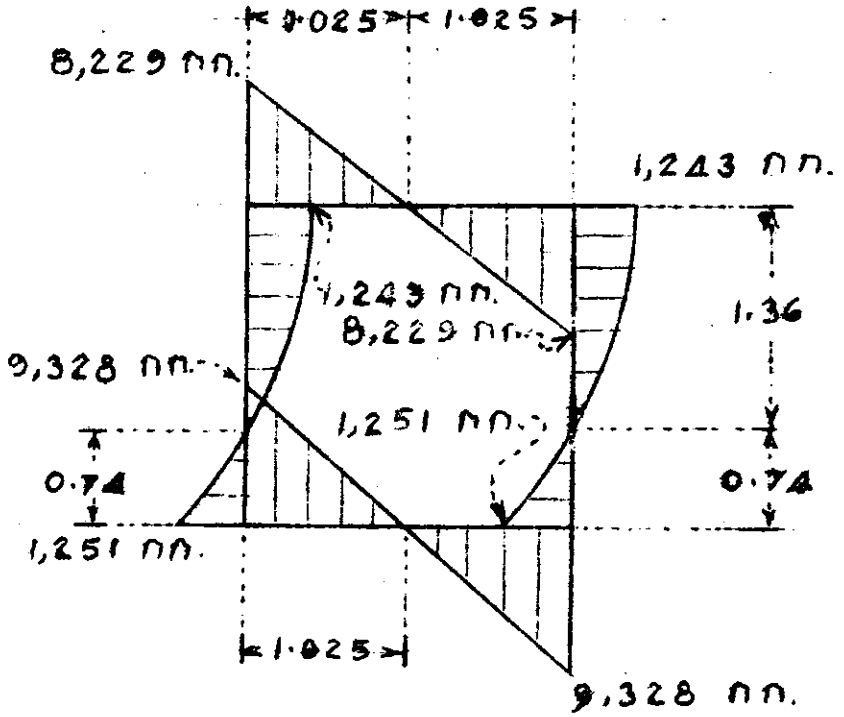
จุด (Joints)		A		B		C		D	
ช่วงคาน (Members)		AD	AB	BA	BC	CB	CD	DC	DA
ค่า K		1.905	1.951	1.951	1.905	1.905	4.625	4.625	1.905
วงจร (Cycles)	ค่า DF	0.494	0.506	0.506	0.494	0.292	0.708	0.708	0.292
1	โมเมนต์	- 440	+ 2,811	- 2,811	+ 440	- 584	+ 3,187	- 3,187	+ 584
	สมดุลย์	- 1,171	- 1,200	+ 1,200	+ 1,171	- 760	- 1,843	+ 1,843	+ 760
2	ถ่ายทอด	+ 380	+ 600	- 600	- 380	+ 586	+ 922	- 922	- 586
	สมดุลย์	- 484	- 496	+ 496	+ 484	- 440	- 1,068	+ 1,068	+ 440
3	ถ่ายทอด	+ 220	+ 248	- 248	- 220	+ 242	+ 534	- 534	- 242
	สมดุลย์	- 231	- 237	+ 237	+ 231	- 227	- 549	+ 549	+ 227
4	ถ่ายทอด	+ 113	+ 118	- 118	- 113	+ 115	+ 274	- 274	- 115
	สมดุลย์	- 114	- 117	+ 117	+ 114	- 114	- 275	+ 275	+ 114
5	ถ่ายทอด	+ 57	+ 59	- 59	+ 57	+ 57	+ 138	- 138	- 57
	สมดุลย์	- 57	- 59	+ 59	+ 57	- 41	- 154	+ 154	+ 41
6	ถ่ายทอด	+ 20	+ 29	- 29	- 20	+ 28	+ 77	- 77	- 28
	สมดุลย์	- 24	- 25	+ 25	+ 24	- 31	- 74	+ 74	+ 31
ค่าโมเมนต์รวม		- 1,731	+ 1,731	- 1,731	+ 1,731	- 1,169	+ 1,169	- 1,169	+ 1,169
ตรวจสอบ									
การเปลี่ยนแปลง		- 1,291	- 1,080	+ 1,081	+ 1,291	- 585	- 2,018	+ 2,018	+ 585
- ½ ค่าที่เปลี่ยน		- 292	- 540	+ 540	+ 292	- 645	- 1,009	+ 1,009	+ 645
ผลรวม		- 1,583	- 1,620	+ 1,621	+ 1,583	- 1,230	- 3,027	+ 3,027	+ 1,230
θ = ผลรวม/-K		+ 831	+ 830	- 831	- 831	+ 646	+ 654	- 654	- 646



รูปแสดงแรงและโมเมนต์ที่เกิดแก่ส่วนต่าง ๆ (F.B.D.)



ไดอาแกรมของโมเมนต์ (B.M.D.)



ไดอาแกรมของแรงเฉือน (S.F.D.)

(vi) ตรวจสอบความหนาของท่อ

$$d_M = \sqrt{\frac{2,487}{13.7}} = 13.47 \text{ ซม.}$$

$$d_V = \frac{8,229}{100 \times 0.87 \times 5.2} = 18.19 \text{ ซม.}$$

ใช้ d = 25 ซม. และ Covering 5 ซม.

$$d_M = \sqrt{\frac{3,612}{13.7}} = 16.24 \text{ ซม.}$$

$$d_V = \frac{9,328}{100 \times 0.87 \times 5.2} = 20.62 \text{ ซม.}$$

ใช้ d = 32 ซม. และ Covering 8 ซม.

(vii) หาเหล็กเสริมในท่อ

– เหล็กเสริมรับอุณหภูมิ

ผิวนอกสำหรับความหนาคอนกรีต 0.30

$A_{S_T} = 0.002 \times 30 \times 100 = 6.00$ ซม.^{2}

ใช้ ϕ 15 มม. @ 0.28; $A_s = 6.31$ ซม.^{2} $\leq_o = 16.83$ ซม.

ผิวนอกสำหรับความหนาคอนกรีต 0.40

$A_{S_T} = 0.002 \times 40 \times 100 = 8.00$ ซม.^{2}

ใช้ ϕ 15 มม. @ 0.22; $A_s = 8.03$ ซม.^{2} $\leq_o = 21.42$ ซม.

ผิวในสำหรับความหนาคอนกรีต 0.30

$A_{S_T} = 0.0015 \times 30 \times 100 = 4.50$ ซม.^{2}

ใช้ ϕ 12 มม. @ 0.25; $A_s = 4.52$ ซม.^{2} $\leq_o = 15.08$ ซม.

ผิวในสำหรับความหนาคอนกรีต 0.40

$A_{S_T} = 0.0015 \times 40 \times 100 = 6.00$ ซม.^{2}

ใช้ ϕ 15 มม. @ 0.23; $A_s = 6.31$ ซม. $\leq_o = 16.83$ ซม.

- เหล็กเสริมรับแรงเฉือนและโมเมนต์

ช่วง AB;

$$A_{s\,\text{ต้น}} = \frac{2,487 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 25} = 8.167 \text{ ซม.}^2$$

ใช้ ø 12 มม. @ 0.125; $A_s = 9.04$ ซม.^{2} $\Sigma_o = 30.16$ ซม.

$$A_{s\,sup} = \frac{1,731 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 25} = 5.685 \text{ ซม.}^2$$

$$\Sigma_o = \frac{8,229}{7.9 \times 0.87 \times 25} = 47.892 \text{ ซม.}$$

ใช้ ø 15 มม. @ 0.28 } $A_s = 18.93$ ซม.^{2}
ø 15 มม. @ 0.14 } $\Sigma_o = 50.49$ ซม.

ช่วง CD;

$$A_{s\,\text{ต้น}} = \frac{3,612 \times 100}{1.400 \times 0.87 \times 32} = 9.267 \text{ ซม.}^2$$

ใช้ ø 15 มม. @ 0.28 } $A_s = 10.35$ ซม.^{2}
ø 12 มม. @ 0.28 } $\Sigma_o = 30.27$ ซม.

$$A_{s\,sup} = \frac{1,169 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 32} = 2.999 \text{ ซม.}^2$$

$$\Sigma_o = \frac{9,328}{7.9 \times 0.87 \times 32} = 42.412 \text{ ซม.}$$

ใช้ ø 15 มม. @ 0.22 } $A_s = 16.06$ ซม.^{2}
ø 15 มม. @ 0.22 } $\Sigma_o = 42.84$ ซม.

ช่วง AD, BC

$$A_{s\,sup} = \frac{1,731 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 25} = 5.685 \text{ ซม.}^2$$

$$\Sigma_o = \frac{1,243}{7.9 \times 0.87 \times 25} = 7.234 \text{ ซม.}$$

$$A_{s\,sup} = \frac{1,169 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 25} = 3.839 \text{ ซม.}^2$$

$$\Sigma_o = \frac{1,251}{7.9 \times 0.87 \times 25} = 7.281 \text{ ซม.}$$

$$A_{s\,\text{ต้น}} = \frac{584 \times 100}{1,400 \times 0.87 \times 25} = 1.918 \text{ ซม.}^2$$

ใช้เหล็กรับอุณหภูมิได้ทั้งหมด

(viii) หาระยะการยื่นเหล็กของเหล็กเสริม

ช่วง AB;

$$f'_s = \frac{1,731 \times 100}{13.93 \times 0.87 \times 25} = 420 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$L = \frac{420 \times 1.5}{4 \times 7.9} = 19.94 \text{ ซม.}$$

∴ ควรหยุดเหล็กห่างขอบท่อด้านนอก 19.94 + 15

$$= 34.94 \text{ ซม.}$$

$$\approx 0.35 \text{ ม.}$$

ช่วง CD;

$$f_s = \frac{1,169 \times 100}{16.06 \times 0.87 \times 32} = 261 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$L = \frac{261 \times 1.5}{4 \times 7.9} = 12.39 \text{ ซม.}$$

∴ ควรหยุดเหล็กห่างขอบท่อด้านนอก 12.39 + 15

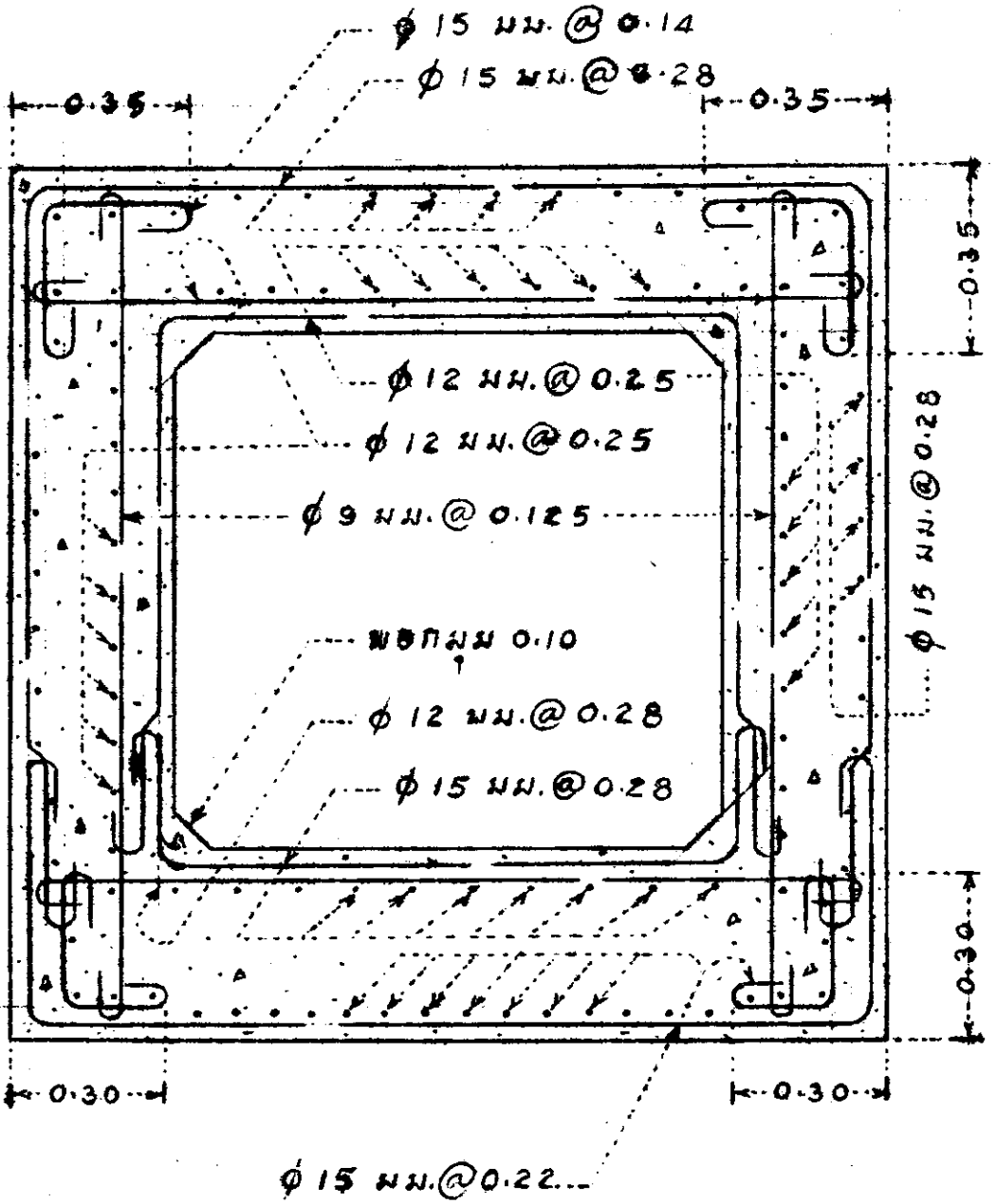
$$= 27.39 \text{ ซม.}$$

$$\approx 0.30 \text{ ม.}$$

(ix) กำแพงหน้าท่อ

สำหรับกำแพงหน้าท่อทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำให้คิดเป็นคาน Fixed beam ที่มี Support อยู่ที่กำแพงด้านข้างและมีแรงดันดินที่ทับหลังท่อเป็นแรงดัน โดยไม่มีน้ำดันด้านนอกท่อ

(x) สรุป การออกแบบท่อลอด (Culvert) นี้ สามารถนำไปใช้ออกแบบท่อระบายปากคลองส่งน้ำ (Canal turnout) อาคารรับน้ำ (Inlet structure) และอาคารทิ้งน้ำ (Outlet structure) ได้ เป็นแต่เพียงว่าอาคารดังกล่าวมักไม่ต้องออกแบบด้านโครงสร้างสำหรับตัวท่อเพราะมักนิยมใช้ท่อมาตรฐานที่หล่อสำเร็จ (Precast concrete pipe) จึงมีความจำเป็นในการออกแบบเฉพาะกำแพงหน้าที่และ ช่วงต่อเชื่อมทั้งด้านเข้าและทางออก (Inlet and outlet transitions) เท่านั้น



รูปตัดก่อแสดงการเสริมเหล็ก.

บทที่ 8

ประตูระบายปากคลองส่งน้ำ (Head regulator)

ประตูระบายปากคลองส่งน้ำนับว่าเป็นอาคารชลประทานที่สำคัญที่สุดในบรรดาอาคารชลประทานทุกชนิด เพราะเป็นอาคารที่มีหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำที่จะส่งผ่านเข้าในคลองส่งน้ำแต่ละสาย แต่คนทั่วไปมักเข้าใจว่าอาคารชลประทานที่สำคัญที่สุดของโครงการชลประทาน คือ อาคารที่หัวงาน (Headworks) เช่น เขื่อนระบายน้ำ (Diversion dam or barrage) หรือฝาย (Weir) ซึ่งมีหน้าที่เพียงยกระดับน้ำที่หัวงานให้สูงพอที่จะส่งเข้าคลองส่งน้ำเท่านั้น และเราก็ยังมีวิธีการอื่นที่จะยกระดับน้ำที่หัวงานได้ตามที่เราต้องการโดยไม่ต้องอาศัย เขื่อนระบายน้ำหรือฝายเลยก็ได้ แต่การที่เราจะส่งน้ำเข้าคลองส่งน้ำโดยไม่ต้องมีประตูระบายปากคลองส่งน้ำนั้นถือว่าผิดหลักการชลประทานอย่างยิ่ง เพราะนอกจากจะไม่อาจควบคุมปริมาณที่จะส่งผ่านเข้าคลองชลประทานได้แล้ว ยังอาจทำให้คลองส่งน้ำและอาคารในคลองส่งน้ำเสียหายเนื่องจากมีปริมาณน้ำผ่านเข้าคลองส่งน้ำเกินความจุของคลอง หรือปริมาณน้ำที่ผ่านเข้าคลองส่งน้ำมีเกินความต้องการของผู้ใช้น้ำ ก็จะทำให้น้ำไปท่วมพื้นที่เพาะปลูกได้ด้วย

การออกแบบประตูระบายปากคลองส่งน้ำนั้นทำได้เป็น 2 รูปแบบคือ เป็นแบบที่มีตอม่อและบานบังคับน้ำ เช่นเดียวกับเขื่อนระบายน้ำ ซึ่งเรียกว่าประตูระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ ส่วนอีกแบบหนึ่งนั้นมีลักษณะเป็นท่อมีบานบังคับน้ำที่หน้าท่อซึ่งเรียกว่าท่อระบายปากคลองส่งน้ำ และท่อระบายปากคลองส่งน้ำนี้ ถ้าใช้บังคับน้ำที่ปากคลองซอยหรือปากคลองแยกซอยก็แยกเรียกว่า Canal head regulater หรือ Head gate หรือ Canal turnout

8.1 ประตูระบายปากคลองส่งน้ำแบบที่มีตอม่อและบานบังคับน้ำ

ประตูระบายปากคลองส่งน้ำชนิดนี้ออกแบบได้เป็น 2 แบบ แบบแรกนั้นตอม่อเปิดตลอดความสูง ใช้ในกรณีที่ระดับน้ำหน้าประตูไม่ค่อยสูงมากนัก ซึ่งสามารถกำหนดความสูงของบานบังคับน้ำให้สูงพ้นระดับน้ำหน้าประตูได้ โดยมีความสูงพอสมควร ส่วนอีกแบบหนึ่งระดับน้ำหน้าประตูสูงมาก ถ้าออกแบบให้ตอม่อเปิดตลอดความสูงจะต้องออกแบบบานบังคับน้ำให้สูงพ้นระดับน้ำ จะมีความสูงของบานมากเกินไป จึงกำหนดให้มีแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กปิดกั้นตอนบนของตอม่อ (Diaphram wall) โดยให้ช่องที่น้ำจะลอดผ่านไปมีพื้นที่พอกับปริมาณน้ำสูงสุดที่จะส่งเข้า

คลองส่งน้ำ ซึ่งทำให้สามารถลดความสูงของบานบังคับน้ำลงได้ คือสูงเท่ากับช่องที่ให้น้ำผ่าน

สำหรับบานบังคับน้ำนั้น ที่ใช้ทั้งแบบที่เป็นไม้กั้นน้ำ (Stop logs) แผงกั้นน้ำ (Stop planks) บานเหล็กตรง (Vertical gate) และบานโค้ง (Radial gate) แต่เนื่องจากความไม่สะดวกในการปิด – เปิด และต้องทำโครงยกสูงมาก ในปัจจุบันจึงมักนิยมใช้บานโค้งเสียเป็นส่วนมาก จึงจะขอกล่าวเน้นหนักในเรื่องการออกแบบประตูระบายปากคลองชนิดใช้บานบังคับน้ำเป็นบานโค้ง

8.1.1 <u>การออกแบบทางชลศาสตร์</u>

กรณีที่บานบังคับน้ำเป็นไม้กั้นน้ำหรือแผงกั้นน้ำและเปิดบานไม่หมดให้ใช้สูตรคำนวณปริมาณน้ำแบบ Sharp-crested weir ถ้าเปิดบานออกหมดใช้สูตร Submerged flow through weir

กรณีที่บานบังคับน้ำเป็นบานเหล็กตรง ถ้ายกบานไม่พ้นระดับน้ำให้ใช้สูตร Submerged orifice และถ้ายกบานพ้นระดับน้ำใช้สูตร Submerged flow through weir

ส่วนกรณีที่บานบังคับน้ำเป็นบานโค้ง ถ้ายกบานไม่พ้นระดับน้ำใช้สูตรดังนี้.–

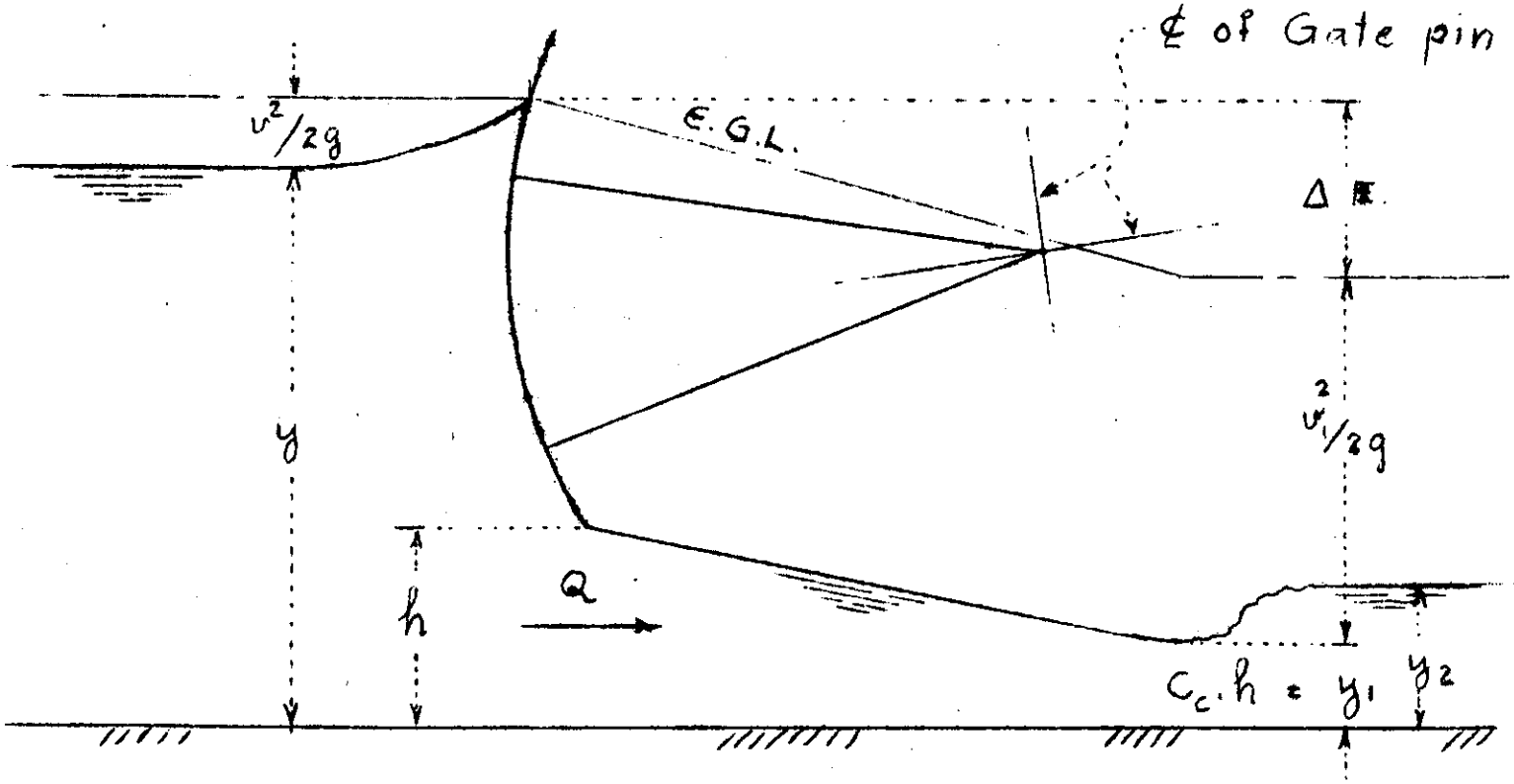
$$Q = C_d . L . h \sqrt{2g(y + \alpha \frac{v^2}{2g}}$$

ในเมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ผ่านใต้บานบังคับน้ำเป็น $ม.^3$/วินาที

C_d = สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปลักษณะและสภาพของประตูระบาย เช่น ความเอียงของหน้าบานบังคับน้ำ รัศมีความโค้งของบาน ความสูงแกนหมุนของบาน ความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (ดูหนังสือ Open Channel Flow ของ Ven Te Chow) และทั่ว ๆ ไปนิยมใช้ 0.60

L = ความกว้างของช่วงที่น้ำผ่านจริง เป็นเมตร

h = ความสูงขอบล่างของบานบังคับน้ำที่ยกขึ้นจากธรณีประตู (Gate seat) เป็นเมตร



รูปตัดตามยาวแสดงการไหลของน้ำลอดบานบังคับน้ำ

y = ความลึกของน้ำที่จะผลักให้น้ำลอดผ่านบานบังคับน้ำ เป็นเมตร ในกรณีที่น้ำลอดผ่านบานในลักษณะ Free flow (ระดับผิวน้ำด้านท้ายน้ำต่ำกว่าขอบล่างของบาน) y จะมีค่าเท่ากับระดับต่างของผิวน้ำด้านเหนือน้ำกับธรณีประตู ถ้าเป็นการไหลในลักษณะ Submerged flow(ระดับผิวน้ำด้านท้ายน้ำสูงกว่าขอบล่างของบาน) y จะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ

v = ความเร็วของกระแสน้ำก่อนลอดบานบังคับน้ำ เป็น เมตร/วินาที

g = อัตราโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 ม./(วินาที)^2

สำหรับ L นี้ หาได้จากสูตรดังนี้

$L = L' - 2(N.K_p + K_a) H_e$

ใช้กับประตูระบายขนาดใหญ่

$L = L' - 0.01\, n \,.\, H_e$

ใช้กับประตูระบายขนาดเล็ก

ในเมื่อ L' = ผลรวมของความกว้างระหว่างตอม่อทั้งหมด เป็นเมตร

N = จำนวนตอม่อ

n = จำนวนมุมที่น้ำวิ่งไปกระทบ

H_e = ความลึกของน้ำที่ผลักให้น้ำลอดบานบังคับน้ำ เป็นเมตร

K_p = สัมประสิทธิ์ของตอม่อกลาง (ดูตาราง)

K_a = สัมประสิทธิ์ของตอม่อริม (ดูตาราง)

<u>สภาพของตอม่อกลาง (Pier)</u>	K_p
หัวตอม่อเป็นสี่เหลี่ยมและมนมุมด้วย รัศมีประมาณ 0.1 ของความหนาตอม่อ	0.02
หัวตอม่อกลมมนตามโค้งของวงกลม	0.01
หัวตอม่อเป็นหัวแหลมคม	0

สภาพของตอม่อริม (Abutment)	K_a
หัวตอม่อริมเป็นเหลี่ยมต่อกับกำแพงหน้าประตูที่ทำมุมฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ	0.20
หัวตอม่อริมเป็นเหลี่ยมแต่ลบมุมเป็นโค้งของวงกลมรัศมี $\leq 0.15\ H_e$ และ $\geq 0.50\ H_e$ ต่อกับกำแพงทำมุมฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ	0.10
หัวตอม่อริมกลมมนด้วยรัศมีความโค้ง $> 0.5\ H_e$ และต่อกับกำแพงที่ทำมุมกับทิศทางกันไหลของน้ำ $> 45^\circ$	0

สำหรับสูตรหาปริมาณน้ำลอดผ่านบานบังคับน้ำนั้นในทางปฏิบัติถือว่า $\alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$ มีค่าน้อยเกินไปจึงใช้สูตรเพียง

$$Q = C_d . L . h \sqrt{2g \cdot Y}$$

ส่วนลำดับขั้นตอนในการคำนวณออกแบบทำได้ดังนี้

(i) ระดับน้ำหน้าประตูระบายปากคลองเราทราบได้จากระดับสันฝาย (ในกรณีที่อาคารทดน้ำเป็นฝาย) หรือระดับเก็บกัก (Retention level) สำหรับอาคารทดน้ำเป็นเขื่อนทดน้ำ

(ii) ค่า Headloss กำหนดจากระดับต่างของน้ำหน้าประตูระบายปากคลอง กับระดับน้ำสูงสุดในคลองส่งน้ำสายนั้น ๆ

(iii) สร้างโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของน้ำในคลองส่งน้ำกับปริมาณน้ำ (Rating Curve) ซึ่งจะคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดของคลองส่งน้ำที่ความลึกต่าง ๆ โค้งที่ได้จะเป็นโค้งเดียวกับที่ใช้กำหนดระดับน้ำท้ายประตูระบายปากคลองที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ

(iv) กำหนดจำนวนตอม่อและระยะห่างระหว่างตอม่อ ซึ่งมีขนาดมาตรฐานคือ 3.00, 4.00, 5.00, 6.00 และ 12.50 ม. และตามปกติจะนิยมกำหนดขนาดความกว้างของประตูระบายปากคลองส่งน้ำให้ใกล้เคียงกับความกว้างของคลองส่งน้ำให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

(v) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q และ h จากสูตรคำนวณปริมาณน้ำลอดผ่านบานบังคับน้ำ ตั้งแต่ปริมาณน้ำต่ำสุดจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำสูงสุดที่คลองส่งน้ำสายนั้นจะรับได้แล้วไปเขียนกราฟ (Graph)

(vi) หาค่าสัมประสิทธิ์ C_c จากสูตร

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \cdot \frac{h}{y}}}$$

(vii) หาค่า y_1 สำหรับค่าต่าง ๆ ของปริมาณน้ำที่ลอดผ่านบานบังคับน้ำ จากสูตร

$$y_1 = C_c \cdot h$$

(viii) หาค่า y_2 จากค่า y_1 ต่าง ๆ โดยสูตร

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} \pm \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2v_1^2 \cdot d_1}{g}}$$

(ix) เอาค่า y_2 ที่ปริมาณน้ำผ่านคลองสูงสุดไปลบออกจากระดับผิวน้ำสูงสุดในคลองส่งน้ำ จะได้ระดับพื้นท้ายน้ำของประตูระบายปากคลอง

(x) หาค่า Froude's Number เพื่อเลือกแบบของอ่างพักน้ำ (Stilling basin) ที่เหมาะสม ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

(xi) กำหนดขนาดของ ช่วงต่อเชื่อมทั้งทางเข้าและทางออก (Inlet and Outlet transition) ตามที่ได้ไว้ข้างต้น

8.1.2 <u>การออกแบบทางโครงสร้าง</u>

การดำเนินการคำนวณด้านโครงสร้างและความคงทนของประตูระบายปากคลองส่งน้ำชนิดนี้ ให้ทำเป็นขั้น ๆ ดังนี้.-

(i) เขียนรูปตัดตามยาวของประตูระบายปากคลองส่งน้ำจากผลการออกแบบทางชลศาสตร์

(ii) ตรวจสอบความยาวของทางเดินของน้ำใต้อาคาร (Percolation path) จากค่า Weighted creep ratio, C_w ถ้าความยาวไม่พออาจต้องตอกเข็มพืด เพิ่มความยาวพื้นทึบ (Impervious floor) ด้านหน้าประตูระบายปากคลอง หรือเพิ่มความยาวของกำแพงปีก (Wing wall) แล้วแต่กรณี ทั้งนี้ให้ตรวจสอบในกรณีที่ระดับน้ำด้านหน้าประตูระบายปากคลองเป็นระดับน้ำนองสูงสุด (Maximum flood) และน้ำในคลองส่งน้ำแห้ง

(iii) หาค่าแรงดันของน้ำใต้พื้นอาคาร (Uplift pressure) ไว้ทุก ๆ จุดจากผลการตรวจสอบในข้อ (ii)

(iv) แยกส่วนของตอม่อ พื้นตอม่อ และส่วนประกอบ ออกมาคำนวณเพื่อตรวจสอบในด้านความคงทนต่อการพลิกหงายของตอม่อ (Overturning) และการเลื่อนไถล (Sliding) โดยใช้สูตรดังนี้

<u>ด้านการพลิกหงาย</u> (Overturning) จะต้องหาทั้งสองกรณีคือ กรณีที่ทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำแห้ง กับกรณีที่ด้านเหนือน้ำมีน้ำเท่ากับระดับน้ำนองสูงสุด และด้านท้ายน้ำแห้ง และใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$\Sigma M_{)} \times F.S. \leq \Sigma M_{(}$$

$$x = \frac{\Sigma M}{\Sigma W}$$

$$e = \frac{b}{2} - x$$

$$e \not> \frac{b}{6}$$

ในเมื่อ $\Sigma M_{)}$ = โมเมนต์ตามเข็มนาฬิการอบจุดหมุนที่ท้ายสุดของพื้นตอม่อ (Toe)

$\Sigma M_{(}$ = โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิการอบจุดหมุนที่ท้ายสุดของพื้นตอม่อ (Toe)

F.S. = อัตราความปลอดภัย (Factor of Safety)

= 1.5 ถึง 2.5

x = ระยะที่แนวของแรงรวมห่างจากจุดหมุน

ΣM = ผลรวมของโมเมนต์ทั้งหมดรอบจุดหมุน

ΣW = ผลรวมของแรงในแนวกิ่งทั้งหมด

e = ความเยื้องเยน (Eccentricity)

b = ความยาวของพื้นตอม่อวัดตามแนวการไหลของน้ำ

<u>หาแรงกระทำใต้พื้นตอม่อ</u> (Foundation stress) หา 2 กรณีเช่นกัน

$$P = \frac{\Sigma W}{b} \pm \frac{6(\Sigma W.e)}{b^2}$$

(สูตรนี้ใช้ในกรณีที่คิดความกว้างพื้นตอม่อ 1 หน่วยความยาว)

ในเมื่อ P = แรงกระทำใต้พื้นตอม่อต่อหน่วยพื้นที่

<u>ด้านการเลื่อนไถล</u> (Sliding) หาเฉพาะกรณีที่ด้านเหนือน้ำมีระดับเท่าระดับน้ำนองสูงสุดและด้านท้ายน้ำแห้ง และมีสูตรคำนวณและตรวจสอบดังนี้

$$C.\Sigma W \geq (F.S.) \times \Sigma H$$

ในเมื่อ C = สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (มีค่าแสดงไว้ในบทที่ 2 แล้ว)

F.S. $\geq$ อัตราความปลอดภัย (Factor of Safety)

= 1.5 ถึง 2.0

W = ผลรวมของแรงในแนวราบทั้งหมด

ในกรณีที่แรงต้านการเลื่อนไถลไม่พอให้ใส่กำแพงล่าง (Key wall) ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง และให้คิดแรงดันตอบรับของดินเป็น Passive pressure และคำนวณกำแพงล่างเป็นคานยื่น (Cantilever beam) ด้วย

(v) การคำนวณแรงต่าง ๆ เพื่อออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก

<u>ด้านอาการต่อเชื่อมทั้งทางเข้าและทางออก</u> ได้กล่าวไว้ในเรื่องของช่วงต่อเชื่อมทั้งทางเข้าและทางออก (Inlet and Outlet transitions) ในบทที่ 4 แล้ว ——จึงไม่ขอกล่าวซ้ำในที่นี้

ส่วนของตอม่อและพื้นตอม่อ

ตัวตอม่อริม (Abutment) ให้คิดแรงดันดินเต็มที่ตามความสูงของตอม่อรวมกับน้ำหนักส่วนเผื่อ (Surcharge) เทียบเท่ากับความสูงของดินแห้งไม่น้อยกว่า 2 ฟุต อยู่ด้านนอก ส่วนด้านในน้ำแห้ง ส่วนจะคำนวณเป็นคานยื่น (Cantilever beam) หรือบัทเตรส (Buttress) หรือเคาน์เตอร์ฟอร์ท (Counterfort) ก็ต้องพิจารณาจากราคาก่อสร้างความสะดวกในการก่อสร้างหรือความเหมาะสม

สำหรับตอม่อกลาง (Pier) ให้คิดเป็นคานยื่น (Cantilever beam) ที่รับแรงดันของน้ำเต็มที่ถึงสันบานบังคับน้ำเพียงด้านเดียว เมื่อคำนวณเหล็กเสริมออกมาแล้วให้เสริมเหล็กเท่ากันกับที่คำนวณได้ทั้งสองด้าน

ส่วนพื้นตอม่อนั้นให้คำนวณเป็นคานต่อเนื่อง (Continuous beam) โดยมีตอม่อเป็นฐานรองรับ (Support) และมีค่าของแรงกระทำใต้พื้นตอม่อ (Foundation Stress) หักออกด้วยน้ำหนักของพื้นตอม่อเอง เป็นน้ำหนักแผ่ที่พื้นตอม่อนั้น

ส่วนของพื้นด้านท้ายน้ำ (Downstream apron) จะต้องกำหนดความหนาของพื้นให้มีน้ำหนักพอที่จะต้านทานแรงดันของน้ำใต้พื้นอาคาร (Uplift pressure) ได้โดยคิดอัตราความปลอดภัย (Factor of safety) เท่ากับ 1.3

ถ้าประตูระบายปากคลองส่งน้ำประกอบด้วยอ่างพักน้ำ (Stilling basin)ชนิดที่มีฟันตะเข้ (Chute block, floor block and end sill) การกิดแรงที่กระทำต่อฟันตะเข้ให้ใช้สูตร

$$F = 2\,W \cdot A \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right)$$

ในเมื่อ F = แรงที่กระทำต่อฟันตะเข้ เป็นปอนด์

W = น้ำหนักของน้ำ

= 62.4 ปอนด์/(ฟุต)^3

A = พื้นที่ของฟันตะเข้ที่รับแรง F เป็น (ฟุต)^2

เพื่อความเข้าใจในการคำนวณออกแบบประตูระบายปากคลองส่งน้ำแบบนี้ จึงจะแสดงตัวอย่างโดยทำแต่ละขั้นตอนดังนี้.-

<u>ตัวอย่าง</u> ให้ออกแบบประตูระบายปากคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาของโครงการชลประทานเหมืองฝายแห่งหนึ่งที่มีระดับสันฝายอยู่ที่ + 12.500 รทก. และฤดูน้ำนองระดับน้ำเหนือสันฝายจะเป็น + 12.850 รทก. ถ้าคลองส่งน้ำสายนี้มีความจุ 58.5 ม.^{3}/วินาที ขนาดคลองที่ กม. 0 + 000 คือ ความกว้างก้นคลอง 7.75 ม. น้ำลึก 3.50 ม. ลาดตลิ่ง 1:2 และลาดก้นคลอง 1:10,000 ใช้ n = 0.015 ก้นคลองอยู่ที่ระดับ + 8.800 รทก. พื้นด้านหน้าฝายอยู่ที่ระดับ + 8.000 รทก. ดินใต้ฐานรากเป็นดินปนทรายปานกลาง รับน้ำหนักได้ 11 ตัน/ม.^{2}

<u>วิธีทำ</u>

ความจุของคลอง = 58.5 ม.^{3}/วินาที

$\therefore$ ปริมาณน้ำที่ใช้ออกแบบ ปตร. คือ = 1.1 x 58.5

= 64.35 ม.^{3}/วินาที

(i) <u>หา Rating Curve ของคลองส่งน้ำ</u>

จาก $Q = \frac{A.R^{2/3}.S^{1/2}}{n}$

$A = 7.75\ d + 2d^2$

$P = 7.75 + 4.472\ d$

$\frac{S^{1/2}}{n} = \frac{1}{1.5}$

$\therefore Q = \frac{7.75\ d + 2\ d^2}{1.5} \cdot \left\{\frac{7.75d + 2d^2}{7.75 + 4.472d}\right\}^{2/3}$

ถ้า d = 3.675

$Q = \frac{28.481 + 27.011}{1.5}\left\{\frac{55.492}{24.1846}\right\}$

$= \frac{55.492 \times 14.549}{1.5 \times 8.363}$

$= 64.359 \approx 64.35$ ม.^{3}/วินาที – ใช้ได้

ตารางหาความสัมพันธ์ของความลึกกับปริมาณน้ำในคลองส่งน้ำ

b	d	A	P	$R=\frac{A}{P}$	n	S:S	S	$V=\frac{R^{2/3}S^{1/2}}{n}$	Q	Rem.
7.75	3.675	55.5	24.2	2.29	0.015	1:2	1:10,000	1.16	64.35	
	3.50	51.6	23.4	2.21				1.14	58.50	
	2.80	37.4	20.3	1.84				1.00	37.40	
	2.10	25.1	17.1	1.46				0.86	21.60	
	1.40	14.8	14.0	1.05				0.71	10.30	
	0.70	6.4	10.9	0.59				0.47	3.00	

(ii) หา Rating Curve ของบานระบาย

จาก $Q = C_d.L.h\sqrt{2g.Y}$

หรือ $h = \frac{Q}{C_d.L\sqrt{2g.Y}}$

สมมติให้ใช้ ปตร. ขนาดกว้าง 5.00 ม. 3 ช่อง โดยที่ตอม่อตัวกลางเป็นหัวแหลมคม และกำแพงของ Inlet transition ทำมุมกับทิศทางการไหลของน้ำไม่เกิน 45° จึงไม่มีผลต่อความกว้างของช่องทางไหลของน้ำผ่าน ปตร.

นั่นคือ $L = 3 \times 5.00 = 15.00$ ม.

และใช้ค่า $C_d = 0.60$

ถ้าสมมติให้พื้นตอม่ออยู่ที่ระดับ +8.800 รทก. และถ้าน้ำไหลผ่านบานเป็น Free flow

ที่ Q = 3.0 ม.^{3}/วินาที;

$$h = \frac{3}{0.6 \times 15\sqrt{19.62 \times 3.70}} = 0.039 \text{ ม.} < 0.70 \text{ ม.}$$

∴ น้ำไหลเป็น Submerged flow

ที่ Q = 64.35 ม.^{3}/วินาที;

$$h = \frac{64.35}{0.6 \times 15\sqrt{19.62 \times 3.70}} = 0.839 \text{ ม.} < 3.675 \text{ ม.}$$

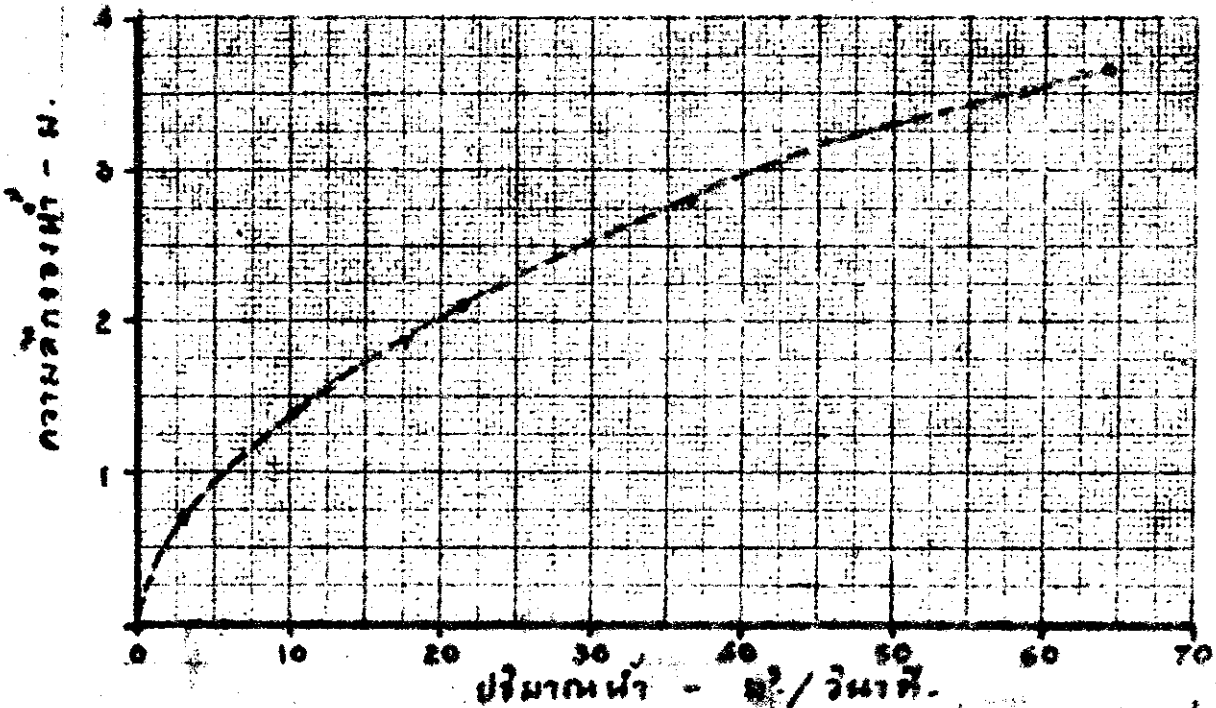
∴ น้ำไหลเป็น Submerged flow

ดังนั้นแสดงว่าน้ำจะไหลผ่านบานระบายในลักษณะ Submerged flow โดยตลอด จึงต้องใช้ค่า y เท่ากับผลต่างของระดับเหนือและท้าย ปตร.

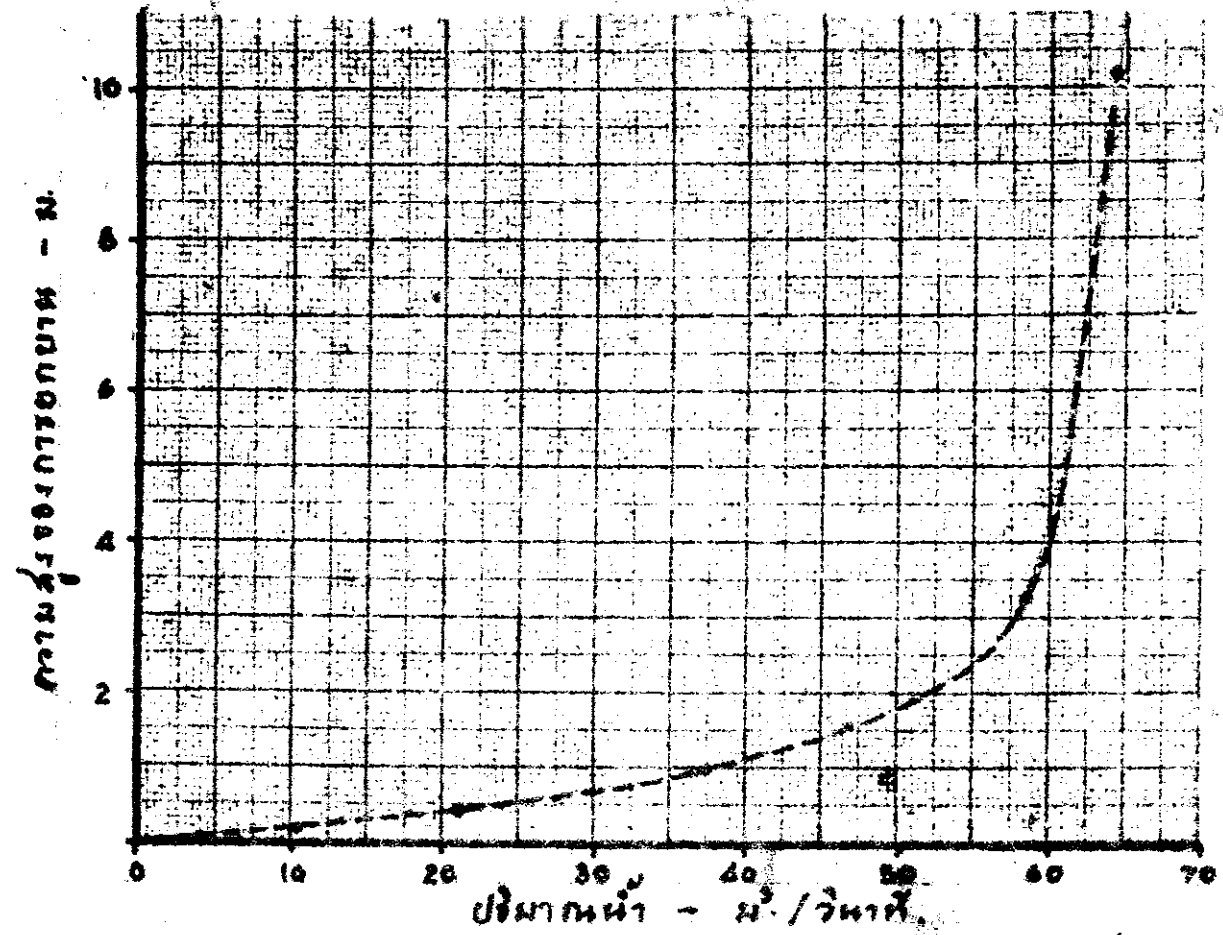
ตารางหาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำกับความสูงของการยกบานระบาย

ระดับสันฝาย	ระดับน้ำในคลอง	y	L	Q	C_d	$h = \frac{Q}{C_d\sqrt{2gy}}$	หมายเหตุ
↕ +12.500 รทก.	+12.475	0.025	↕ 15.00	64.35	↕ 0.60	10.209*	*ถ้าจะส่งน้ำให้ได้ 64.35 ม.^{3}/วินาที ควรยกระดับสันฝายเสียใหม่
	+12.300	0.20		58.50		3.281	
	+11.600	0.90		37.40		0.989	
	+10.900	1.60		21.60		0.428	
	+10.200	2.30		10.30		0.170	
	+ 9.500	3.00		3.00		0.043	

เนื่องจากจะส่งน้ำให้ได้ 64.35 ม.^{3}/วินาที นั้น จะต้องยกบานสูงถึง 10.209 ม. ซึ่งจะทำให้ราคา ปตร. สูงเกินไป ดังนั้นถ้าต้องการส่งน้ำขนาดนี้จริง ๆ ก็ควรยกระดับสันฝายสูงขึ้นอีกเล็กน้อย



โค้งแสดงความสัมพันธ์ของความลึกกับปริมาณน้ำในทางระบายน้ำ



โค้งแสดงความสัมพันธ์ของความสูงของการยกบานกับปริมาณน้ำผ่าน ปตร.

ดังนั้นในการกำหนดความสูงของบานที่จะยกให้ผ่านน้ำสูงสุดเข้าคลองส่งน้ำได้ จึงใช้เพียง h = 3.30 ม. ก็พอ และเพื่อลดความสูงของบานระบายเราจึงกำหนดให้มี Diaphragm wall ติดไว้ที่ระดับ +12.100 รทก. ด้วย

(iii) <u>หาค่า y_1, y_2 และระดับพื้นท้ายน้ำ</u>

จาก $$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \cdot \frac{h}{y}}}$$

$$C_c^2 = C_d^2(1 + C_c \cdot \frac{h}{y}) = C_d^2 + C_d^2 \cdot \frac{h}{y} \cdot C_c$$

$$C_c^2 - C_d^2 \cdot \frac{h}{y} \cdot C_c - C_d^2 = 0$$

y = 0.20, h = 3.281;

$$C_c^2 - (0.6)^2 \cdot \frac{3.281}{0.20} C_c - (0.6)^2 = 0$$

$$C_c^2 - 5.9058\, C_c - 0.36 = 0$$

$$C_c = \frac{5.9058 \pm \sqrt{34.878 + 1.44}}{2}$$

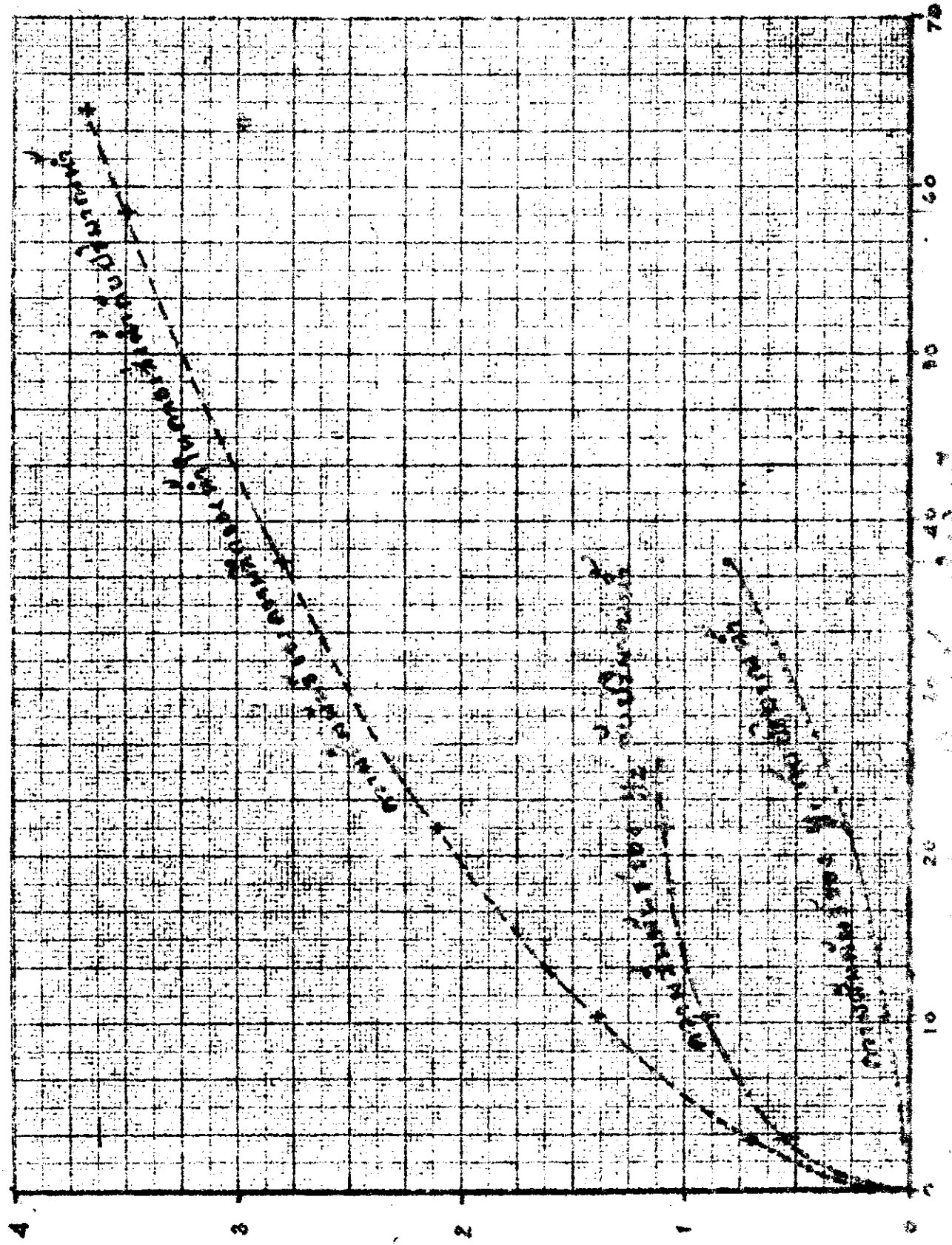
$$= \frac{5.9058 \pm 6.026}{2}$$

$$= 5.966, -0.06$$

$$y_1 = C_c \cdot h$$

$$= 5.966 \times 3.281 = 19.57 \text{ ม.}$$

$$F = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$$



ความลึกของน้ำเป็น -- ม.

$$v_1 = \frac{58.50}{15 \times 19.57} = 0.199 \quad \text{ม./วินาที}$$

$$F = \frac{0.199}{\sqrt{9.81 \times 19.57}} = 0.014$$

ให้คำเนินตามวิธีข้างต้นนี้สำหรับค่า y และ h ต่าง ๆ. แล้วนำมาเขียนในตารางดังนี้

y	h	C_c	y_1	v_1	F	y_2	ความลึกของน้ำในคลอง,d
0.025	10.209	-	-	-	-	-	3.675
0.20	3.281	5.966	19.57	0.199	0.014	-	3.50
0.90	0.989	0.83	0.821	3.037	0.791	-	2.80
1.60	0.428	0.65	0.278	5.180	3.137	1.102	2.10
2.30	0.170	0.613	0.104	6.603	6.538	0.911	1.40
3.00	0.043	0.603	0.026	7.692	15.232	0.547	0.70

ในการกำหนดระดับพื้นท้ายน้ำนั้น ตามหลักจะต้องกำหนดให้ระดับน้ำที่ y_2 อยู่เสมอหรือต่ำกว่าระดับน้ำในคลองส่งน้ำเล็กน้อย (อยู่สูงกว่าไม่ได้เด็ดขาด) ในทุกกรณีของปริมาณน้ำที่ผ่าน ปตร. ซึ่งจากตัวเลขในตารางจะเห็นว่าควรยกพื้นท้ายน้ำขึ้น 0.998, 0.489, และ 0.153 ม. ตามลำดับ ซึ่งตัวเลขที่ควรใช้ก็คือ 0.153 ม. ซึ่งเป็นตัวเลขเล็กน้อย ดังนั้นจึงใช้ระดับพื้นท้ายน้ำเท่ากับระดับธรณีประตู คือ + 8.800

(iv) <u>กำหนดขนาดของส่วนต่าง ๆ</u> (Dimensions of various parts)

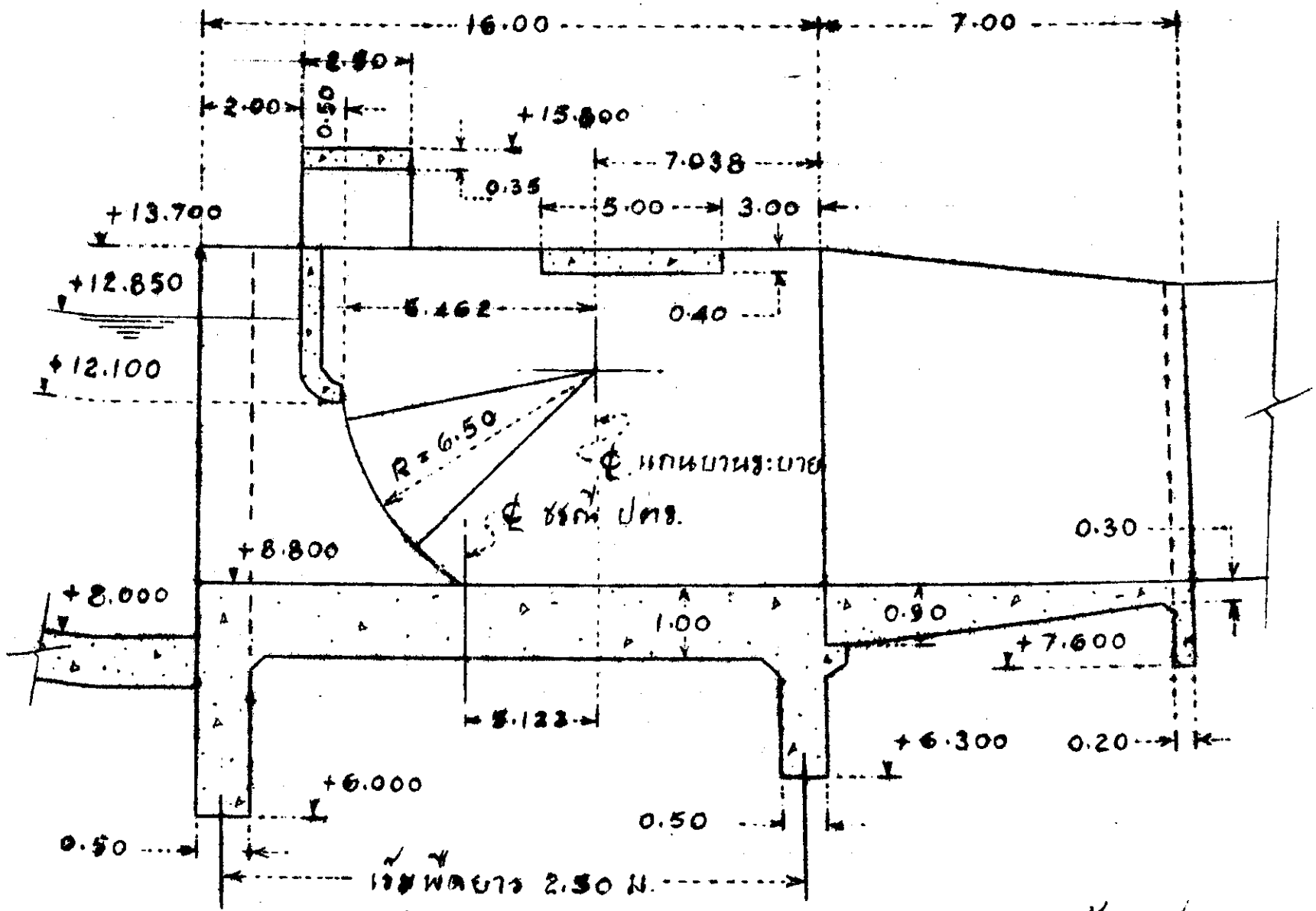
ฤดูน้ำนองระดับน้ำเหนือฝาย + 12.850

$$\therefore D = 12.850 - 8.800 = 4.05 \text{ ม.}$$

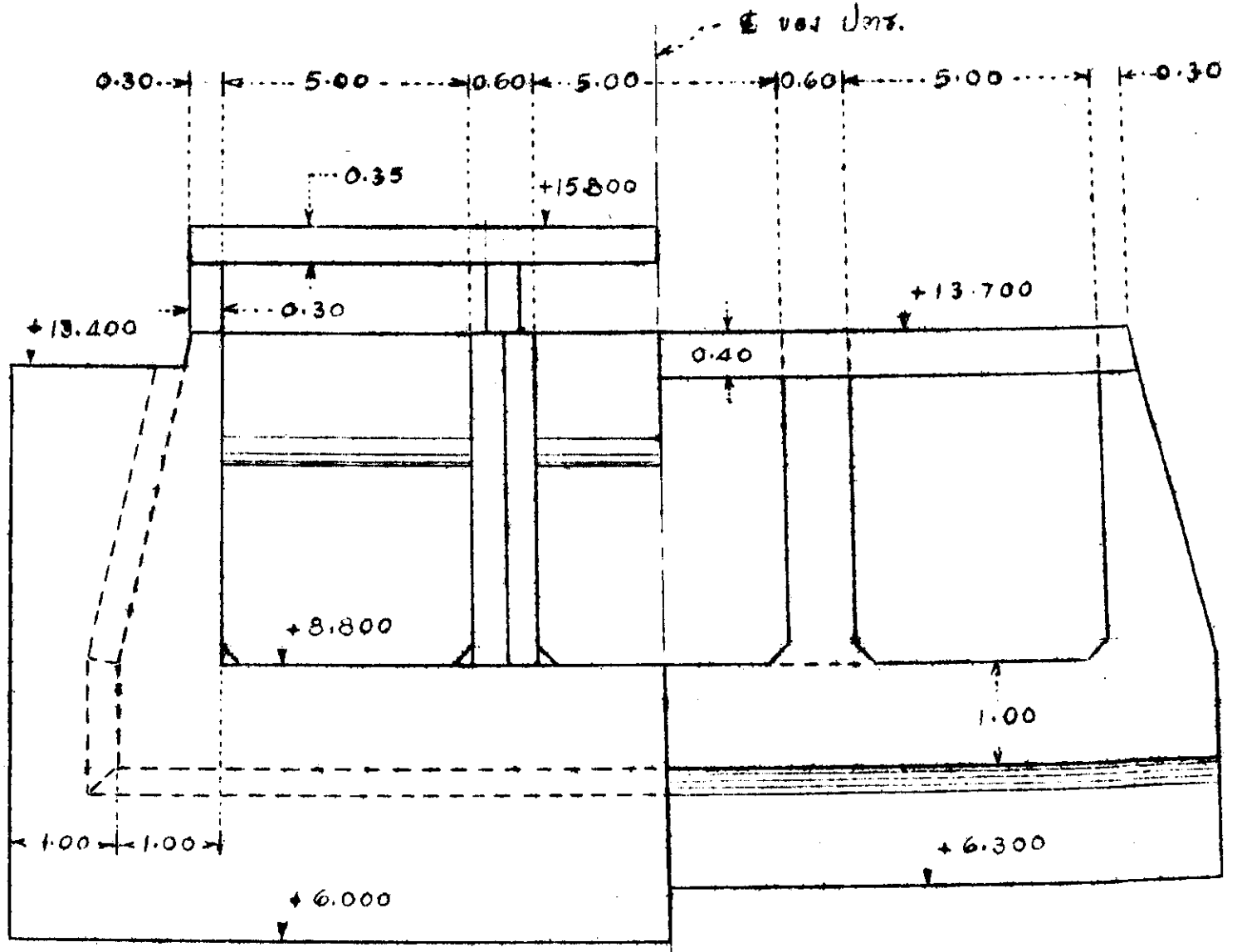
$$F_p = 0.20 + 0.15 D \text{ (min.)}$$

$$= 0.20 \times (0.15 \times 4.05) = 0.8075 \text{ ม.}$$

$$\approx 0.85 \text{ ม.}$$



รูปตัดตามยาวของประตูระบายปากคลองส่งน้ำ (ฝั่งเหนือน้ำ)



รูปตัดขวาง ประตูระบายปากคลองฝั่งเหนือ (ไม่ได้แสดงเข็มพืด)

∴ ระดับหลังตอม่อเป็น + 13.700 รทก.

ใช้ตอม่อกลางหนา 0.60 ม.

ตอม่อริมใช้ข้างล่างหนา 1.00 ม. ข้างบนหนา 0.30 ม.

พื้นตอม่อใช้หนา 1.00 ม.

ความยาวตอม่อใช้ 16.00 ม.

บานโค้งรัศมี 6.50 ม.

Diaphragm wall หนา 0.25 ม.

ความยาวช่วงก่อเชื่อมด้านท้ายน้ำ 7.00 ม.

สพานเครื่องกว้านบานระบายกว้าง 2.50 ม. หนา 0.35 ม.

สพานรถข้าม กว้าง 5.00 ม. หนาเฉลี่ย 0.40 ม.

(v) <u>ตรวจสอบความมั่นคง</u> (Stability)

– <u>น้ำลอดใต้พื้นและเลาะด้านข้างอาคาร</u> (Percolation)

$$L = \frac{23}{3} + 2 + 1.8 + 1.5 + 1.6 + 0.9 + 1.20 + 5 + 5 = 26.67 \text{ ม.}$$

$$H = 12.85 - 8.80 = 4.05 \text{ ม.}$$

$$C_w = \frac{26.67}{4.05} = 6.585 > 6.0 \quad \text{ใช้ได้}$$

แรงดันน้ำใต้พื้นตอม่อที่จุดเหนือน้ำ $= 4.05 - \dfrac{2 + 5 + 2.8 + \frac{0.5}{3}}{6.585}$

$= 2.54$ ตัน/ม.^{2}

แรงดันน้ำใต้พื้นตอม่อที่จุดท้ายน้ำ $= 4.05 - \dfrac{\frac{16}{3} + 2 + 5 + 1.8 + 1}{6.585}$

$= 1.75$ ตัน/ม.^{2}

กรณีน้ำไหลเฉาะด้านข้าง ปตร.

$H = 4.05$ ม.

$L = 23.00$ ม.

$C_w = \frac{23.00}{4.05} = 5.679 < 6.00$ ใช้ไม่ได้

ต้องใส่กำแพงปีกยื่นออกไปข้างละ 1.00 ม. หนา 0.30 ม.

$C_w = \frac{25.00}{4.05} = 6.173 > 6.00$ ใช้ได้

- <u>การพลิกหงายของตอม่อ</u> (Overturning)

การตรวจสอบการพลิกหงาย (Overturning) จะต้องตรวจสอบเป็น 2 กรณี คือ เมื่อสร้างเสร็จใหม่ ๆ ยังไม่ปล่อยน้ำผ่าน และเมื่อให้น้ำผ่านแล้ว แต่เป็นวณะที่ระดับน้ำด้านหน้า ปตร.เป็นระดับเมื่อฤดูน้ำนอง และด้านท้าย ปตร.น้ำแห้ง โดยคิดว่าจุดหมุนของโมเมนต์อยู่ที่ใต้พื้นตอม่อด้านท้ายน้ำโดยคิดว่าไม่มี Key wall

สำหรับบานระบายขนาด 5.00 x 3.50 ม.^{2} น้ำหนักประมาณ 3 ตัน ซึ่งต้องใช้เครื่องกว้านขนาด 4 ตัน ซึ่งเป็นน้ำหนักห้องเกียร์ 945 กก. และน้ำหนักล้อม้วนลวดยกบานตัวละ 460 กก.

ส่วนเผื่อของการพลิกหงายของตอม่อ $\frac{766}{277}$

$= 2.765 > 2.0$ ใช้ได้

- <u>การเลื่อนตัวของตอม่อ</u> (Sliding)

ดินใต้ ปตร. เป็นดินปนทรายปานกลาง $C = 0.4$

จากตารางหาแรงและโมเมนต์เราคำนวณหาได้ว่า

$\leftarrow W \downarrow = 51$ ตัน

$\leftarrow F \rightarrow = 12$ ตัน

$\therefore$ ส่วนเผื่อของการเลื่อนตัว $\frac{0.4 \times 51}{12}$

$= 1.7 > 1.5$ ใช้ได้

ตารางหาค่าของแรงและโมเมนต์ในกรณีที่สร้างเสร็จใหม่ ๆ ไม่มีน้ำผ่าน

ที่	รายการของแรง	แรง (ตัน)	แขนของโมเมนต์ (ม.)	ค่าโมเมนต์ (ตัน-ม.) ↓	ค่าโมเมนต์ (ตัน-ม.) ↘	ชื่อชิ้นส่วน
1	16x18.2x1x2.4	699	8.00	5,592	-	พื้นตอม่อ
2	2x16x4.9x0.6x2.4	226	8.00	1,806	-	ตอม่อกลาง
3	2x½x4.9x(1+0.3)x16x2.4	245	8.00	1,960	-	ตอม่อริม
4	(2.5x0.35x16.8x2.4)+(4x2.5x1.75x0.35 x2.4)	50	12.75	638	-	สพานรับเครื่องกว้าน
5	5x0.4x15x2.4	72	5.50	396	-	สพานรถเดิน
6	0.25x1.6x15x2.4	14	13.875	194	-	ผนังกอนกรีตกันน้ำ
7	3 x 3	9	12.161	109	-	บานระบาย
8	3(0.460 + 0.945 + 0.460)	6	12.75	77	-	เครื่องกว้าน
		1,321		10,772		

$$e = \frac{b}{2} - \frac{\Sigma M}{\Sigma W} = \frac{16}{2} - \frac{10,772}{1,321} = -0.154 \text{ ม.} < \frac{b}{6} \quad \text{ใช้ได้}$$

$$\Sigma W = \frac{1,321}{18.2} = 72.58 \text{ ตัน/ม.}$$

$$P = \frac{72.58}{16} \pm \frac{6 \times 72.58 \times 0.154}{(16)^2} = 4.536 \pm 0.262$$

$$= 4.798, \quad 4.274 \quad \text{ตัน/ม.}^2$$

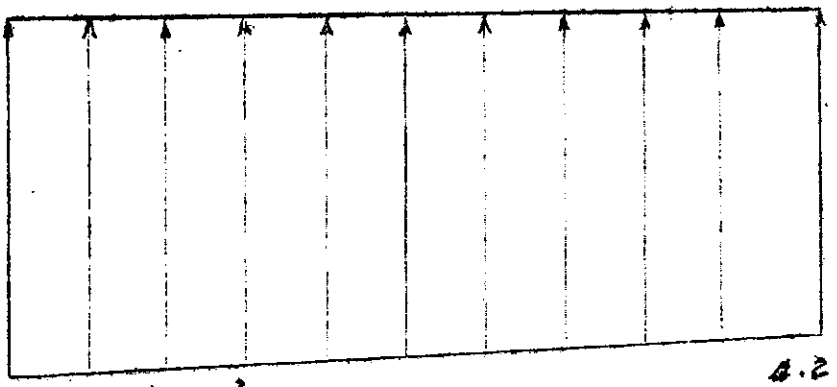
ตารางหาค่าของแรงและโมเมนต์ในกรณีที่หน้า ปตร. มีน้ำเต็ม ท้าย ปตร. น้ำแห้ง

ที่	รายการของแรง	แรง (ตัน)	แขนของโมเมนต์ (ม.)	ค่าโมเมนต์ (ตัน-ม.) ↙	ค่าโมเมนต์ (ตัน-ม.) ↘	ชื่อชิ้นส่วน
1	เอาตัวเลขข้างหน้ามาเฉลี่ยเป็นค่าต่อเมตร	73 ↓	-	592	-	ยกมาจากตารางข้างหน้า
2	$(4.05 \times 2 \times 1) + (\frac{1}{2} \times 3.3 \times 2.339 \times 1)$	12 ↓	14.468	174	-	น้ำหนักน้ำหน้า ปตร.
3	$\frac{1}{2} \times 1 \times (4.85)^2$	12 →	1.817	-	22	แรงดันน้ำหน้า ปตร.
4	$\frac{1}{2} \times 16 \times (2.54 + 1.75)$	34 ↑	7.509	-	255	แรงดันน้ำใต้พื้น
	รวม	51 ↓		766	277	
		12 →		↙ 489		

$$e = \frac{16}{2} - \frac{489}{51} = -1.588 < \frac{b}{6} \quad \text{ใช้ได้}$$

$$P = \frac{51}{16} \pm \frac{6 \times 51 \times 1.588}{(16)^2} = 3.188 \pm 1.898$$

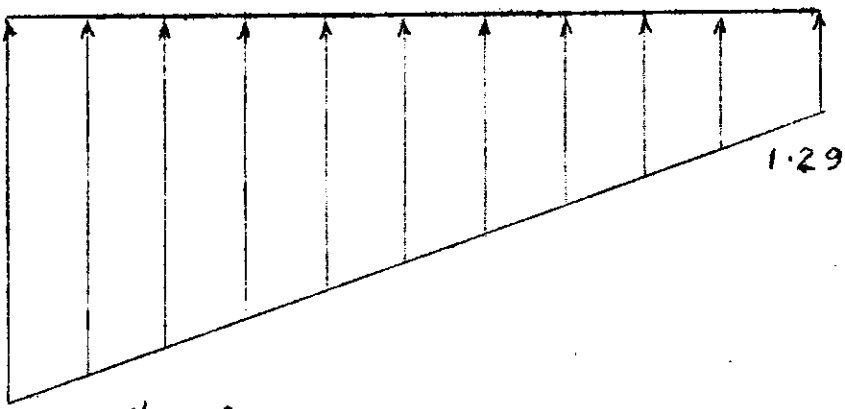
$$= 5.086, \quad 1.290 \quad \text{ตัน/ม.}^2$$



4.798 ตัน/ม.²

4.274 ตัน/ม.²

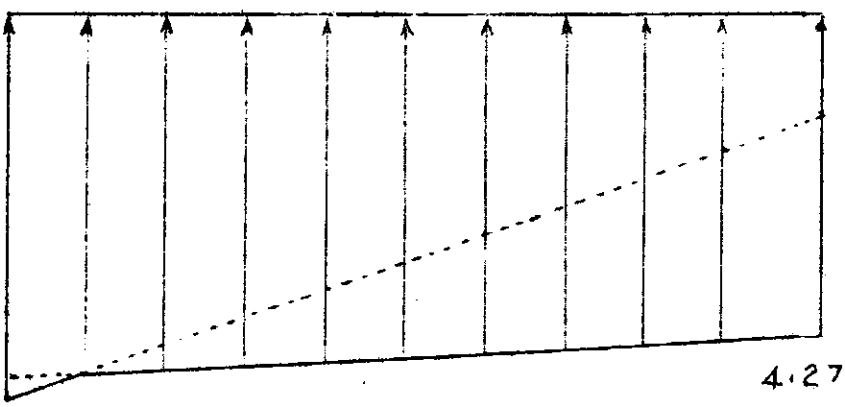
แรงดันดินใต้ฐานตอม่อ กรณีที่ยังไม่มีน้ำผ่าน



5.086 ตัน/ม.²

1.290 ตัน/ม.²

แรงดันดินใต้ฐานตอม่อ กรณีข้างหน้าน้ำเต็ม ท้ายน้ำแห้ง



5.086 ตัน/ม.²

4.274 ตัน/ม.²

แรงดันดินใต้ฐานตอม่อ รวมทั้งสองกรณี

- การรับน้ำหนักของดิน (Bearing)

จากไดอาแกรมแสดงแรงดันของดินใต้พื้นตอม่อ จะเห็นว่าดินรับแรงกดจากพื้นตอม่อ 5.086 ตัน/ม.^{2} แต่ดินสามารถรับน้ำหนักกดได้ถึง 11 ตัน/ม.^{2}

∴ ส่วนเผื่อของการรับน้ำหนักของดิน $\frac{11}{2.163}$

$= 2.163$ จึงใช้ได้

(vi) อาคารประกอบด้านท้ายน้ำ

- อ่างพักน้ำท้าย ปตร. (Stilling basin)

เนื่องจากเมื่อส่งน้ำผ่าน ปตร. ด้วยปริมาณสูงสุด คือ 64.35 ม.^{3}/วินาที นั้น $F < 1$ จึงไม่เกิด Hydraulic jump ดังนั้น ปตร. แห่งนี้ไม่ต้องการอ่างรับน้ำ

- ช่วงต่อเชื่อมด้านท้ายน้ำ (Outlet transition)

ความกว้างก้นคลอง	7.75	ม.
ความลึกน้ำในคลอง	3.675	ม.
ลาดตลิ่ง	1:2	
ความกว้างผิวน้ำในคลอง	22.45	ม.
ความกว้างทางน้ำท้าย ปตร.	15.00 + (2 x 0.60)	
	$= 16.20$	ม.

ใช้มุมผายใช้ 25°

∴ ความยาวของ transition $= \frac{3.125}{\tan 25^\circ}$

$= 6.70$ ม.

< 7.00 ม. ใช้ได้

- ความหนาของพื้นท้ายน้ำ (Downstream apron)

หาแรงดันน้ำ (Uplift pressure) ของจุดเริ่มต้นของพื้นท้ายน้ำดังนี้.-

$L = \frac{16}{3} + 2 + 1.8 + 1.5 + 2.5 + 10 = 23.133$ ม.

$C_w = 6.585$

$\therefore$ แรงดันของน้ำที่ลดลง $\frac{23.133}{6.585}$ = 3.513 ม.

$\therefore$ แรงดันน้ำที่จุดเริ่มต้นของพื้นท้ายน้ำ 4.05 − 3.513

= 0.537 ม.

ใช้ส่วนเผื่อ (Factor of safety) 1.3

จึงคิดเป็นแรงดัน 1.3 x 0.537 = 0.698 ม.

$\therefore$ ความหนาของพื้นควรเป็น $\frac{0.698}{(2.4 - 1.0)}$ = 0.499 ม.

ดังนั้นอาจจะลดความหนาของพื้นท้ายน้ำที่จุดเริ่มต้นเหลือเพียง 0.50 ม. ก็พอที่จะต้านแรงดันของน้ำได้

หาแรงดันน้ำ (Uplift pressure) ของจุดท้ายของพื้นท้ายน้ำได้ดังนี้.-

$L = 26.67 - \left\{ 1.2 + 0.9 + \frac{0.20}{3} + 0.30 \right\}$ = 26.203 ม.

แรงดันของน้ำที่ลดลง $\frac{26.203}{6.585}$ = 3.979 ม.

แรงดันน้ำที่จุดท้ายของพื้นท้ายน้ำ 4.05 − 3.979

= 0.071 ม.

$\therefore$ ความหนาของพื้นควรเป็น $\frac{0.07 \times 1.3}{(2.4 - 1.0)}$ = 0.066 ม.

< 0.30 ใช้ได้

ดังนั้น ความหนาของพื้นท้ายน้ำจึงเปลี่ยนเป็น 0.50 ม. เรียวไปหา 0.20 ม. (ความจริง 0.07 ม. ก็พอ แต่เพราะเราต้องเสริมเหล็ก 2 นิ้ว จึงต้องใช้ความหนา 0.20 ม.)

- <u>หินเรียงท้ายน้ำ</u> (Downstream riprap)

y_2 = 1.102 ม. Q = 21.6 $ม.^3$/วินาที

$\therefore$ $v_2 = \frac{21.6}{(4 \times 1.102) + 7.75}$ = 1.777 ม./วินาที

$v_b = 2.57 \sqrt{d}$

$d = \frac{(1.777 \times 3.281)^2}{(2.57)^2}$ = 5.147 นิ้ว

= 0.131 ม. 0.15 ม.

ดังนั้นควรใช้หินเรียงท้ายน้ำขนาดไม่เล็กกว่า 0.15 ม. จำนวน 60 % คละกับหินที่มีขนาดเล็กกว่าอีก 40 %

(vii) <u>คำนวณออกแบบโครงสร้าง</u> (Structural design)

– <u>ตอม่อกลาง</u> (Intemediate pier)

การคำนวณตอม่อกลางให้คิดเป็นคานยื่น (Cantilever beam) ที่รับแรงดันน้ำเต็มที่ถึงระดับ +12.850 เพียงด้านเดียว โดยคิดเหล็กหลัก (Main steel) เป็นเหล็กตามแนวตั้ง ส่วนเหล็กรับอุณหภูมิ (Temperature steel) เป็นเหล็กตามแนวนอน และควรลดเหล็กเป็นระยะ ๆ ตามความสูงของตอม่อ ดังกล่าวไว้ในบทที่ 4

– <u>ตอม่อริม</u> (Abutment)

ให้คำนวณเป็นคานยื่น (Cantilever beam) แบบเดียวกับกำแพงกันดิน (Retaining wall) ทั่วไป หรืออาจจะคำนวณให้เป็น Counterfort หรือ Buttress ก็ได้ โดยคิดว่ามีดินอิ่มตัว (Saturated earth) ดันด้านหลังตอม่อ พร้อมกับ Surcharge ส่วนด้านหน้าไม่มีน้ำ

– <u>พื้นตอม่อ</u> (Pier floor)

การคำนวณให้ตัดพื้นตอม่อเป็นแนวยาวตามขวางทางไหลของน้ำ โดยมีความกว้างตามแนวการไหลของน้ำเท่ากับ 1.00 ม. และให้พื้นตอม่อเปรียบเหมือนคานต่อเนื่อง (Continuous beam) และตอม่อทุกตัวทำหน้าที่เป็นฐานรองรับ (Supports) ส่วนค่าของน้ำหนักที่กดบนคาน (พื้นตอม่อ) จะเท่ากับค่าของแรงดันดินใต้พื้นตอม่อหักออกด้วยน้ำหนักของพื้นตอม่อเอง

ในกรณีที่ค่าแรงดันดินใต้พื้นตอม่อมีค่าแตกต่างกันมากจะต้องแยกคำนวณพื้นตอม่อเป็นช่วง ๆ ตามขนาดความแตกต่างของแรงดันดินใต้พื้นตอม่อ เมื่อลดเหล็กเสริมเป็นระยะ ๆ ด้วย

– <u>สพานเครื่องกว้านบานระบาย</u> (Operating platform)

ให้คิดว่าสพานเครื่องกว้านบานระบายเป็น Simple beam วางแต่ละช่วงบนหลังตอม่อ น้ำหนักที่กระทำบนสพานนี้คือน้ำหนักตัวสพานเอง น้ำหนักเครื่องกว้าน (Hoist and drum) กับน้ำหนักของบานระบาย (Gate) รวมกับความฝืดระหว่างบานระบายกับตอม่อตกเป็นจุด (Point loads) ตรงจุดที่ตั้งล้อม้วนลวดสลิง (Drum)

- สพานรถเดิน (Service Bridge)

คิดเป็น Simple beam และใช้หลักในการคำนวณสพานทางหลวง (Highway bridge) ทั่วไปนั่นเอง

- ผนังคอนกรีตกั้นน้ำ (Diaphragm wall)

ให้คำนวณเป็น Fixed beam โดยมีตอม่อเป็นสิ่งรองรับ (supports) และแรงดันน้ำหน้า ปตร. เฉพาะส่วนที่อยู่ระดับเดียวกับผนังคอนกรีตกั้นน้ำเป็นแรงที่กระทำ

- แท่นรองรับแกนหมุนบานระบาย (Gate pin bearing support)

ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้ว จึงไม่กล่าวซ้ำในที่นี้

- ช่วงต่อเชื่อมทางออก (Outlet transition)

เนื่องจากความกว้างของพื้นท้ายน้ำ (Downstream apron) ถึง 16.20 ม. จึงควรแยกส่วนของลาดตลิ่ง (Side slope) และพื้น (Apron) ออกจากกัน แล้วดำเนินการคำนวณ ดังกล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้ว

8.2 ท่อระบายปากคลองส่งน้ำ

ในกรณีปริมาณน้ำที่จะส่งผ่านเข้าคลองส่งน้ำมีไม่มากนัก หรือเป็นประตูระบายปากคลองซอยหรือคลองแยกซอย หรือกรณีที่ต้องการลดต่ำลงสุดก่อสร้างสพานรถเดิน (Service bridge) เราอาจออกแบบประตูระบายปากคลองส่งน้ำให้เป็นลักษณะของท่อซึ่งเปลี่ยนชื่อเรียกว่า ท่อระบายปากคลองส่งน้ำ และนิยมออกแบบเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดหนึ่งนั้นมีลักษณะเป็นท่อรับน้ำตลอดทั้งอาคารเช่นเดียวกับท่อลอด (Culvert) แต่มีบานบังคับน้ำติดตั้งไว้ที่ปากท่อตอนเหนือน้ำ (นิยมใช้บานเลื่อนแบบ Slide gate) และใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับท่อลอดทุกประการ ส่วนอีกชนิดหนึ่งทางด้านเหนือน้ำจะออกแบบให้มีตอม่อและบานระบายเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในข้อ 8.1 ส่วนทางด้านท้ายน้ำจะเป็นท่อรับน้ำที่ผ่านบานระบายไปอีกทีหนึ่ง การออกแบบตอม่อและบานระบายคงปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในตัวอย่างนี้ ส่วนตัวท่อนั้นให้มีขนาดใหญ่พอที่จะผ่านปริมาณน้ำสูงสุดที่จะส่งเข้าคลองส่งน้ำได้ถือว่าใช้ได้ การตรวจสอบความคงทนถาวร (Stability) นั้นให้นำเอาความยาวของส่วนที่เป็นท่อมารวมกับส่วนที่เป็นตอม่อด้วย ดังนั้นจึงทำให้ความยาวของตอม่อสั้นลงได้มาก ทำให้ออกแบบได้ประหยัดขึ้น

บทที่ 9

อาคารน้ำตก (Drop Structure)

อาคารน้ำตกเป็นอาคารที่สร้างในระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำในกรณีที่พื้นผิวดินตามแนวคลองลดระดับลงอย่างรวดเร็วหรือกระทันหัน โดยที่ไม่มีทางหลีกเลี่ยงเปลี่ยนแนวไปทางอื่น หรือถ้าหากเปลี่ยนแนวคลองไปทางอื่นแล้วอาจทำให้คลองมีความยาวเพิ่มขึ้นมากจนทำให้ค่าขุดคลองแพงมากกว่าการสร้างอาคารน้ำตก ส่วนอีกกรณีหนึ่งนั้นอาจจะเป็นด้วยส่วนลาดเท (Slope) ของพื้นผิวดินตามแนวคลองชันกว่าส่วนลาดเทของคลองส่งน้ำที่ให้ความเร็วของกระแสน้ำที่เหมาะสมและไม่กัดเซาะ (ถ้าเป็นคลองดิน) หรือถ้าจะทำเป็นคลองคาดก็อาจจะแพงกว่าทำเป็นคลองดินที่มีอาคารน้ำตกเป็นระยะ ๆ แล้ว ก็นิยมขุดคลองดินตามส่วนลาดเทที่เหมาะสม (ดูการกำหนดความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในคลองดินในบทที่ 3) เมื่อวางแนวคลองต่อไปเรื่อย ๆ จึงจะมีลักษณะคลองเป็นคลองลอย จึงสร้างอาคารน้ำตกเสียทีหนึ่งเป็นระยะ ๆ ไป

อาคารน้ำตกที่นิยมใช้กันอยู่นั้นแบ่งตามลักษณะรูปร่างได้ 3 ชนิด ดังนี้

ก. อาคารน้ำตกแบบกำแพงตั้ง (Vertical drop)

ข. อาคารน้ำตกแบบรางเท (Inclined drop or chute drop)

ค. อาคารน้ำตกแบบท่อ (Pipe drop)

ซึ่งอาคารน้ำตกทั้ง 3 ชนิดนี้ตามปกติเมื่อสร้างขึ้นแล้ว และเพื่อให้ได้ประโยชน์เพิ่มขึ้นมาอีกจึงมักออกแบบให้ทำหน้าที่อัดน้ำด้วย โดยอาจเพิ่มช่องสำหรับใส่ไม้อัดน้ำ (Stop logs) เข้าไปที่หน้าอาคารน้ำตกด้วย ดังนั้นบางครั้งจึงรวมเรียกว่าอาคารน้ำตกชนิดอัดน้ำ (Check drop)

9.1 <u>อาคารน้ำตกแบบกำแพงตั้ง</u> (Vertical drop) ใช้ในกรณีที่ระดับต่างของผิวน้ำด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำไม่มากนัก และต้องการออกแบบให้อ่างรับน้ำ (Basin) ทางด้านท้ายน้ำสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ค่าก่อสร้างต่ำ สำหรับหลักเกณฑ์ในการกำหนดขนาดของอาคารน้ำตกที่กรมชลประทานสหรัฐได้ไว้มีดังนี้

9.1.1 ระดับต่างของผิวน้ำสูงสุดระหว่างด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำจะต้องไม่เกิน 3 ฟุต ในเมื่อปริมาณน้ำผ่านสูงสุดไม่เกิน 70 (ฟุต)^3/วินาที และไม่เกิน 1.5 ฟุต ในเมื่อปริมาณน้ำสูงสุดเกิน 70 (ฟุต)^3/วินาที เว้นแต่จะได้ออกแบบให้พื้นด้านท้ายน้ำแข็งแรงเป็นพิเศษ สำหรับในคลองดาดคอนกรีตนั้นอาจยอมให้ระดับต่างของผิวน้ำได้ถึง 6 ฟุต

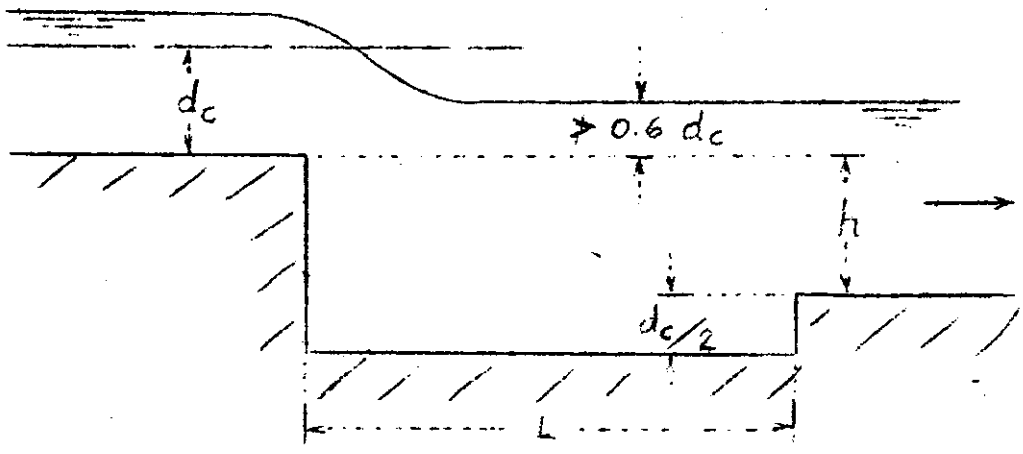
9.1.2 ควรมีส่วนประกอบให้ทำหน้าที่เป็นอาคารอัดน้ำ (Check structure) ที่อาคารน้ำตกนี้เสมอ เพื่อป้องกันการเกิดส่วนลดของระดับน้ำ (Drawdown) ทางด้านเหนือน้ำ

9.1.3 ระดับผิวน้ำด้านท้ายน้ำไม่ควรสูงกว่าพื้นคลองด้านเหนือน้ำเกินกว่า 0.6 เท่าของความลึกวิกฤต (Critical depth) เพื่อให้เกิดการพุ่งตัวของแท่งน้ำโดยไม่เกิดคลื่นท้ายน้ำโดยไม่จำเป็น (ดูรูปข้างล่างนี้)

9.1.4 ความยาวของอ่างรับน้ำ (Basin) ด้านท้ายน้ำจะหาได้จาก

$$L = \left\{ 2.5 + 1.1 \frac{d_c}{h} + 0.7\left(\frac{d_c}{h} \right)^3 \right\} \sqrt{h.d_c}$$

โดยที่สัดส่วนในค่าต่าง ๆ มีหน่วยเป็นฟุต โดยดูจากรูปข้างล่างนี้ด้วย



รูปแสดงสัดส่วนของอ่างรับน้ำของอาคารน้ำตก

9.1.5 ขนาดรูระบายอากาศเพื่อปรับความดันอากาศใต้แท่งน้ำที่พุ่งจากอาคารน้ำตกที่เหมาะสมนั้น จะต้องมีขนาดเพียงพอที่จะปรับความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศให้เท่ากับความกันบรรยากาศ มิฉะนั้นจะเกิดผลดังนี้

- ปริมาณการไหลของน้ำที่ผ่านอาคารน้ำตกที่ระดับเดียวกันจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา
- จะเกิดการกระชือตัวของแท่งน้ำที่ผ่านอาคารน้ำตกตลอดเวลา ทำให้ยุ่งยากในการกำหนดตำแหน่งและขนาดอ่างรับน้ำ

สำหรับขนาดของรูระบายอากาศจะหาได้จากสูตร

$$\frac{A}{L} = 5.3 \times 10^{-4} \frac{H_e^{3.64}}{P^{1.64}}$$

ในเมื่อ A = ขนาดพื้นที่หน้าตัดรูระบายอากาศ เป็น $(\text{นิ้ว})^2$

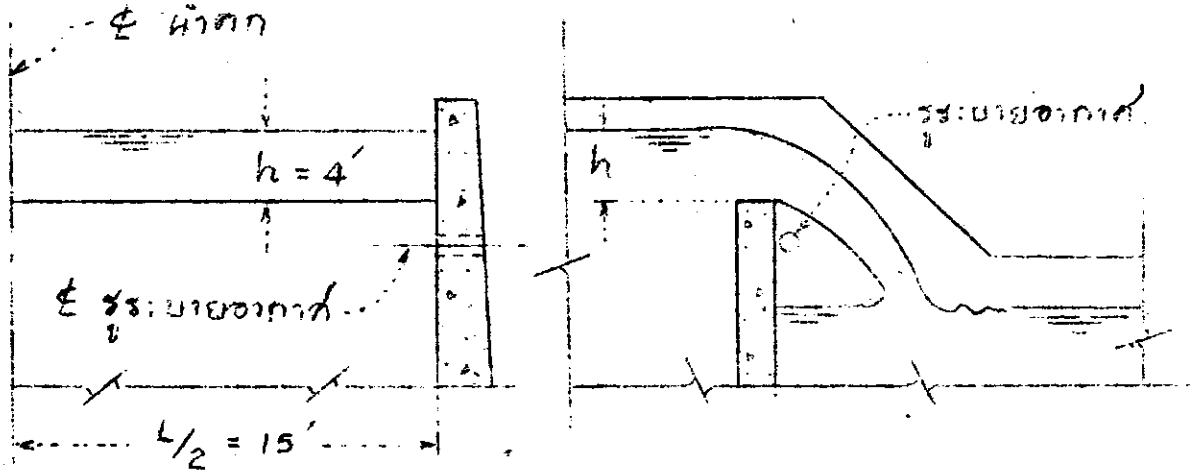
L = ความยาวของสันน้ำตก เป็น ฟุต

H_e = พลังน้ำจำเพาะ (Specific energy) ที่ทำให้เกิดการไหลผ่านอาคารน้ำตกเทียบความสูงแท่งน้ำ เป็น ฟุต

P = ความดันแตกต่างที่เกิดขึ้น เทียบเป็นความสูงแท่งน้ำ เป็น ฟุต

อย่างไรก็ตามขนาดของรูระบายอากาศที่ใช้ก็ไม่ควรมีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 6" ด้วย

<u>ตัวอย่าง</u> ให้หาขนาดของรูระบายอากาศแต่ละข้างของน้ำตกโดยกำหนดให้ความยาวของสันน้ำตก 30' และความลึกของน้ำเหนือน้ำตก 4' ในเมื่อความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.2'



<u>รูปตัดด้านหน้า</u> <u>รูปตัดด้านข้าง</u>

วิธีทำ

$H_e = h = 4'$

$L = 30'$

และ $P = 0.2$

จาก $\frac{A}{L} = 5.3 \times 10^{-4} \times \frac{H_e^{3.64}}{P^{1.64}}$

$= \frac{30 \times 5.3 \times (4)^{3.64}}{(10)^4 \times (0.2)^{1.64}}$

$= 34.610 \quad (\text{นิ้ว})^2$

แต่ต้องการติดตั้งรูระบายอากาศออกสองข้าง

แต่ละข้างจะมีพื้นที่ของรู $17.305 \quad (\text{นิ้ว})^2$

$\frac{\pi}{4} d^2 = 17.305$

$\therefore d = \sqrt{\frac{4 \times 17.305}{\pi}} = 4.694"$

แต่ขนาดรูที่ยอมให้ใช้ไม่ควรเล็กกว่า ϕ 6"

$\therefore$ ใช้รูระบายอากาศขนาด ϕ 6"

9.1.6 ปริมาณน้ำผ่านน้ำตกจะหาได้จากสูตร

$$Q = C.L. \left(H + \frac{V_a^2}{2g}\right)^{3/2}$$

ในเมื่อระดับน้ำด้านท้ายน้ำอยู่ต่ำกว่าสันน้ำตก (Free flow) และ

Q = ปริมาณน้ำที่ผ่านน้ำตกเป็น $(\text{ฟุต})^3/\text{วินาที}$

L = ความยาวของสันน้ำตกเป็น ฟุต

H = ความลึกของน้ำเหนือสันน้ำตกเป็น ฟุต

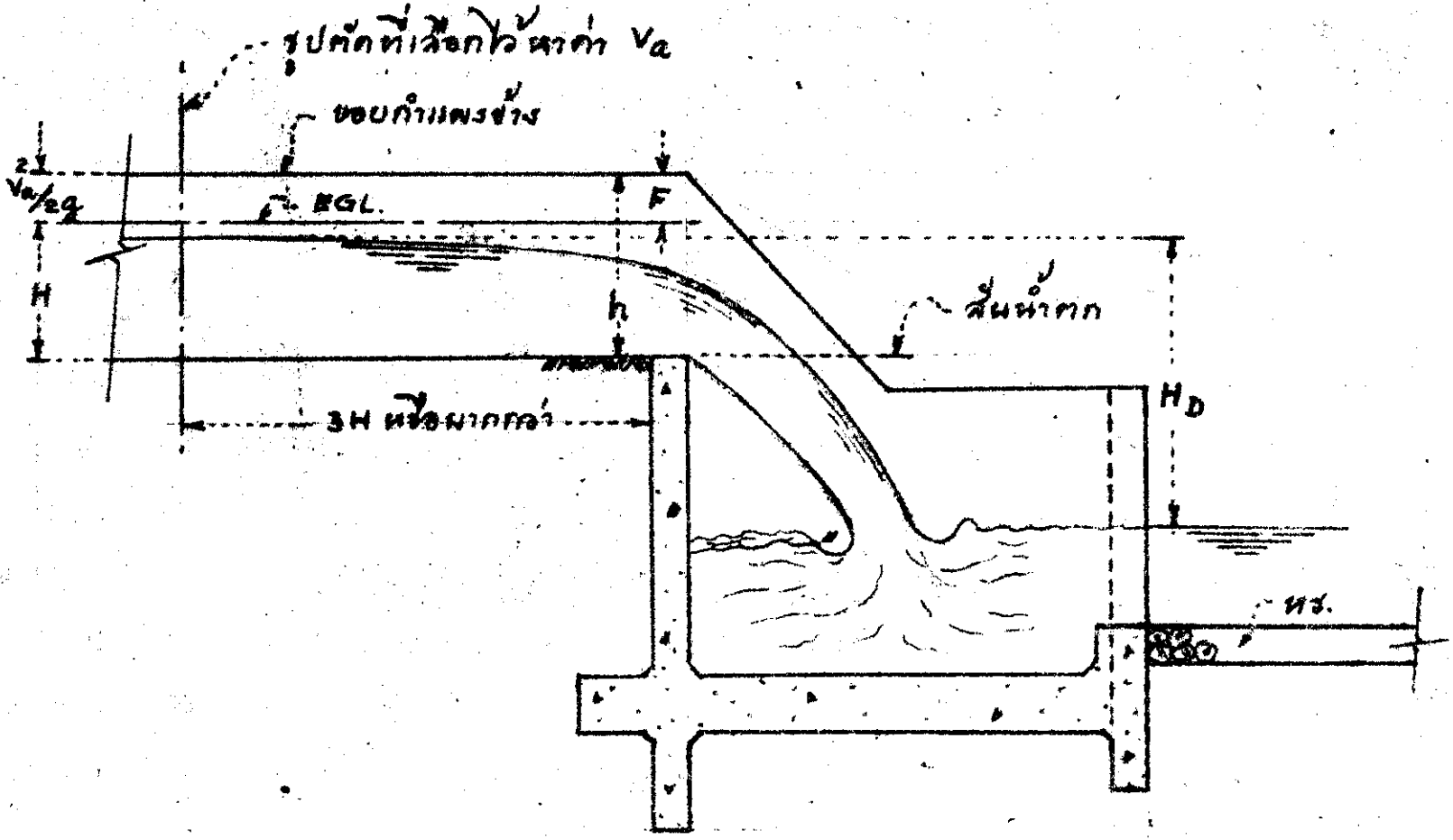
V_a = ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยด้านเหนือน้ำเป็น ฟุต/วินาที

g = ความโน้มถ่วงของโลก

= 32.2 $\text{ฟุต}/(\text{วินาที})^2$

C = สัมประสิทธิ์ของการไหล

= 3.1



รูปตัดตามยาวของน้ำตกแบบกำแพงดั่ง แสดงสัญญลักษณ์ที่ใช้ในสูตร

ส่วนระยะที่จะหาค่า H และ V_a นั้น มีเกณฑ์กำหนดดังนี้.-

9.1.6.1 ควรเป็นรูปตัดที่ห่างจากสันน้ำตกไปทางเหนือน้ำประมาณ 3H เพื่อจะได้พ้นอิทธิพลของ Drop-down curve

9.1.6.2 รูปตัดดังกล่าวจะต้องไม่ห่างจากสันน้ำตกมากเกินไปนัก เพราะจะทำให้ความต่างของระดับน้ำระหว่างรูปตัดนี้กับตรงสันน้ำตกมีค่ามากเกินไป ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนได้

9.1.6.3 รูปตัดที่เลือกไว้นี้จะต้องไม่อยู่ใกล้กับสิ่งรบกวนการไหลของน้ำ (Disturb) ใด ๆ ทั้งสิ้น

9.1.6.4 ความเร็ว V_a นี้จะหาได้จากปริมาณน้ำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของรูปตัดที่เลือกไว้แล้วนี้

9.1.7 ส่วนเผื่อความลึกด้านเหนือน้ำ (Upstream freeboard) จะหาได้จากสูตร

$$F = h - (H + \frac{V_a^2}{2g})$$

ในเมื่อ F = ส่วนเผื่อความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำเป็นฟุต

H, h, V_a และ g ดูได้จากรูป

9.1.8 การกำหนดความยาวของสันน้ำตกและความสูงของกำแพงข้างด้านเหนือน้ำ จะใช้ความสัมพันธ์จากสูตร

$$L = \frac{Q(1.10 + 0.01\ H_D)}{C.h^{3/2}}$$

ในเมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ผ่านน้ำตกเป็น $(\text{ฟุต})^3/\text{วินาที}$

H_D = ระดับน้ำที่ต่างกันระหว่างด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำเป็นฟุต

C = สัมประสิทธิ์ของการไหล

= 3.1

L และ h ดูจากรูป ส่วนการกำหนดว่าจะใช้ขนาดใดนั้นให้พิจารณาจากราคางานที่ต่ำที่สุด

ตัวอย่าง ถ้าปริมาณน้ำผ่านน้ำตกที่ลดระดับน้ำ 8' เท่ากับ 340 (ฟุต)^3/วินาที ให้หาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสันน้ำตกและความสูงของกำแพงข้างด้านเหนือน้ำ และถ้าใช้ความสูงของกำแพงข้างด้านเหนือน้ำ 4' เป็นการกำหนดที่ให้ราคางานต่ำที่สุดให้หาส่วนเผื่อความลึกของกำแพงข้างด้านเหนือน้ำด้วย

วิธีทำ

$$\text{จาก} \quad L = \frac{Q(1.10 + 0.01\, H_D)}{3.1\,(H^{3/2})}$$

$$= \frac{340\{1.10 + (0.01 \times 8)\}}{3.1\,(h^{3/2})}$$

$$= \frac{129.419}{h^{3/2}}$$

ตารางแสดงความสัมพันธ์ของ L กับ h

h (ฟุต)	$h^{3/2}$	$\frac{129.419}{h^{3/2}}$	หมายเหตุ
3	5.196	24.91	
3.5	6.548	19.76	
4	8.000	16.18	ใช้ค่านี้ตามโจทย์
4.5	9.546	13.56	
5	11.180	11.58	
5.5	12.899	10.03	

แต่ เมื่อ h = 4' นั้น ให้ราคางานต่ำที่สุด ซึ่ง L = 16.18'

$$H + \frac{V_a^2}{2g} = \left(\frac{Q}{C.L}\right)^{2/3}$$

$$= \left(\frac{340}{3.1 \times 16.18}\right)^{2/3}$$

$$= 3.58 \quad \text{ฟุต}$$

$$F = h - (H + \frac{V_a^2}{2g})$$

$$= 4 - 3.58$$

$$= 0.42'$$

∴ ใช้ส่วนเผื่อความลึก 0.45'

9.1.9 การตรวจสอบความมั่นคงของน้ำตก (Stability) มีหัวข้อที่จะตรวจสอบดังนี้

9.1.9.1 ความมั่นคงต่อการพลิกหงาย (Overturning) ให้คำนวณโดยยังไม่คิดกำแพงล่าง (Keywall) และใช้ส่วนเผื่อความปลอดภัย (Factor of safety) 1.5

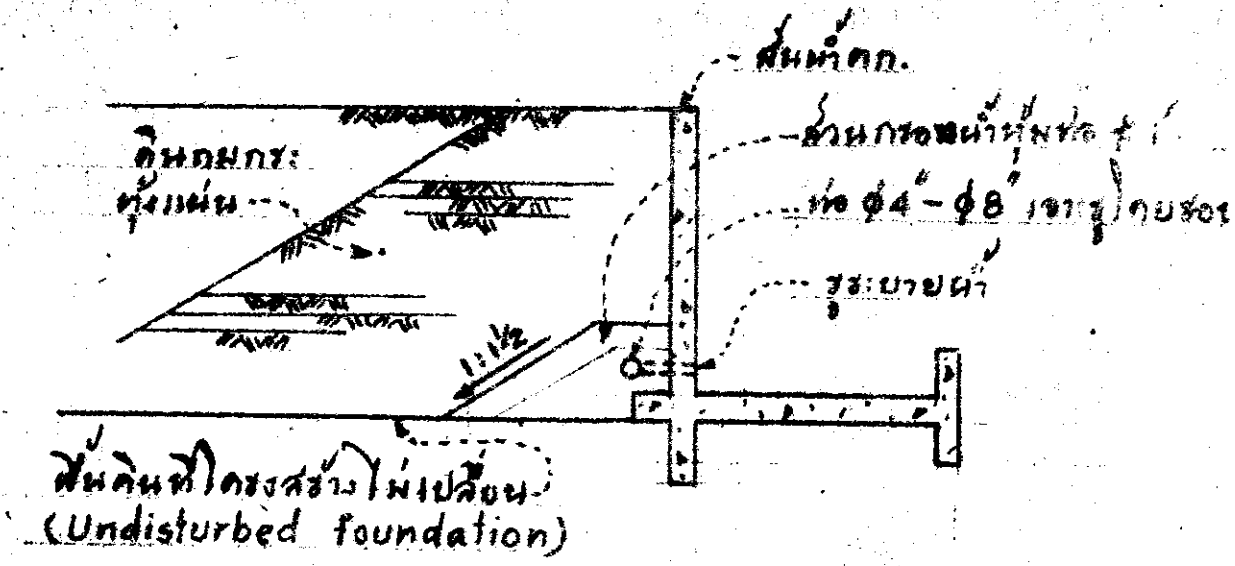
9.1.9.2 ความมั่นคงต่อการเลื่อนตัว (Sliding) คำนวณโดยยังไม่คิดกำแพงล่าง (Keywall) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์ C ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 แต่ถ้าเกิดการเลื่อนตัวขึ้นให้คำนวณกำแพงล่างเป็นคานยื่น (Cantilever beam) รับแรงดันของดิน (Passive Pressure) เพื่อต้านการเลื่อนตัวนั้นโดยใช้ส่วนเผื่อความปลอดภัย (Factor of safety) 1.5

9.1.9.3 ความมั่นคงต่อการลอยตัว (Floating) น้ำหนักของตัวอาคารจะต้องมากพอที่จะต้านแรงดันน้ำใต้พื้น (Uplift pressure) โดยคิดส่วนเผื่อความปลอดภัย (Factor of safety) 1.3 และหากจำเป็นแล้วอาจจะต้องติดตั้งรูระบายน้ำ (Weep hole) เพื่อลดแรงดันน้ำใต้พื้นนี้ด้วย

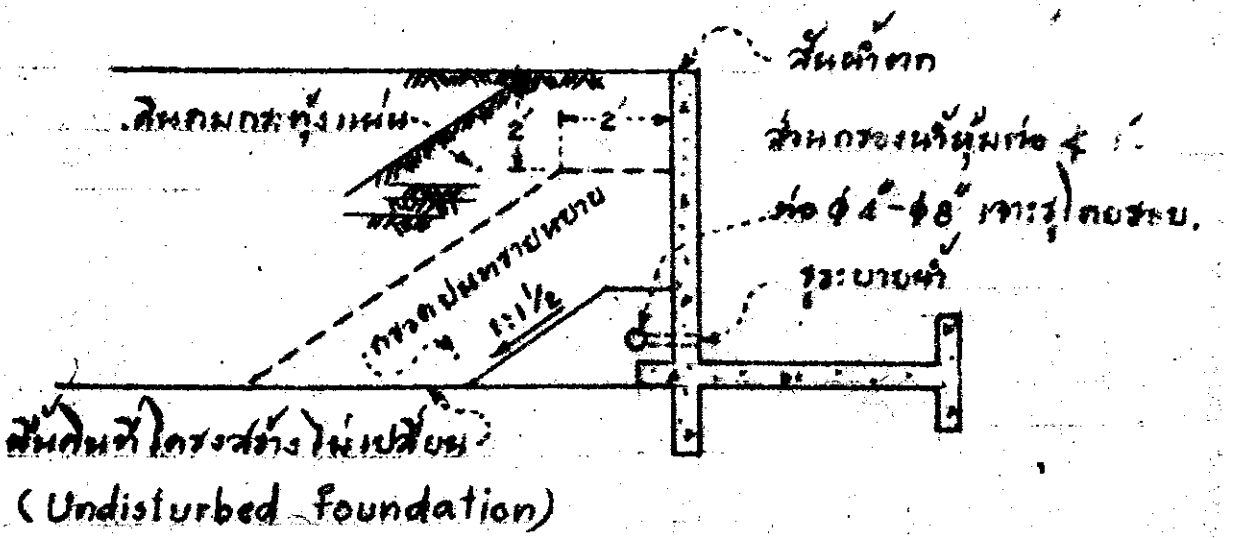
9.1.9.4 ความมั่นคงต่อน้ำไหลลอดใต้พื้น (Piping) คำนวณโดยอาศัยหลักเกณฑ์ของเลนส์ (Lane's) ด้วยค่าของอัตราส่วน (Weighted creep ratio) ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2

9.1.9.5 ความมั่นคงต่อการกัดเซาะท้ายน้ำ (Undermining) ควรกำหนดความลึกของกำแพงล่าง (Keywall) ให้ลึกพอตามเกณฑ์ที่ได้ไว้ในบทที่ 4 และกำหนดทั้งขนาดและความยาวของส่วนป้องกันท้ายน้ำ (Downstream protection) ให้เหมาะสมดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้ว

ทั้งนี้จะต้องคำนวณและตรวจสอบทั้งกรณีที่ยังไม่มีน้ำผ่าน กรณีที่ด้านเหนือน้ำมีน้ำอยู่ที่ระดับสันน้ำตกท้ายน้ำแห้ง และกรณีที่น้ำไหลผ่านเต็มที่



ลักษณะการระบายน้ำจากดินที่กำแพงหน้า ชนิดที่ดินระบายน้ำง่าย



ลักษณะการระบายน้ำจากดินที่กำแพงหน้า ชนิดที่ดินระบายน้ำยาก

9.1.10 การคำนวณโครงสร้าง (Structural design) แยกคำนวณเป็นส่วน ๆ ดังนี้

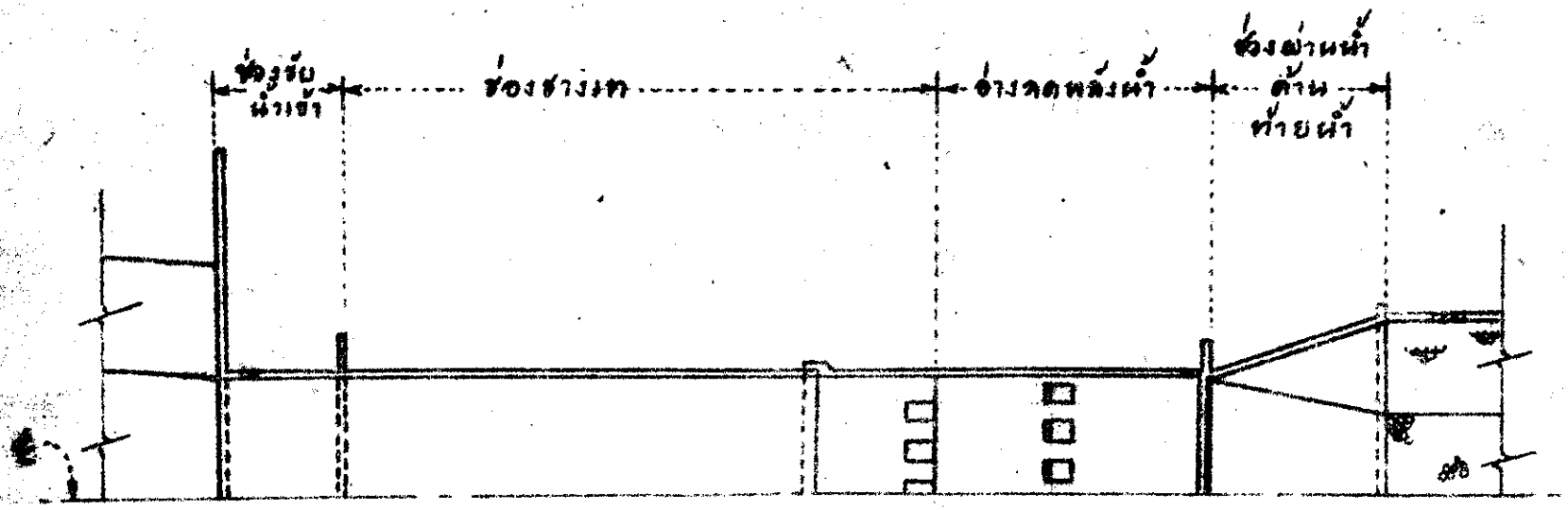
9.1.10.1 กำแพงข้างหรือลาดข้าง (Side wall or Side Slope) ให้คำนวณเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในเรื่องของช่วงผ่านน้ำ (Transition) ในบทที่ 4

9.1.10.2 กำแพงหน้า (Head wall) ถ้าความกว้างของน้ำตกไม่มากนัก อาจคำนวณให้กำแพงหน้าเป็นคานยึด (Fixed beam) โดยมีกำแพงข้างเป็นฐานรองรับ (Supports) แต่ถ้าน้ำตกกว้างมากเมื่อเทียบกับความสูง ให้คำนวณกำแพงหน้าเป็นคานยื่น (Cantilever beam) โดยมีพื้นเป็นฐานรองรับ (Support)

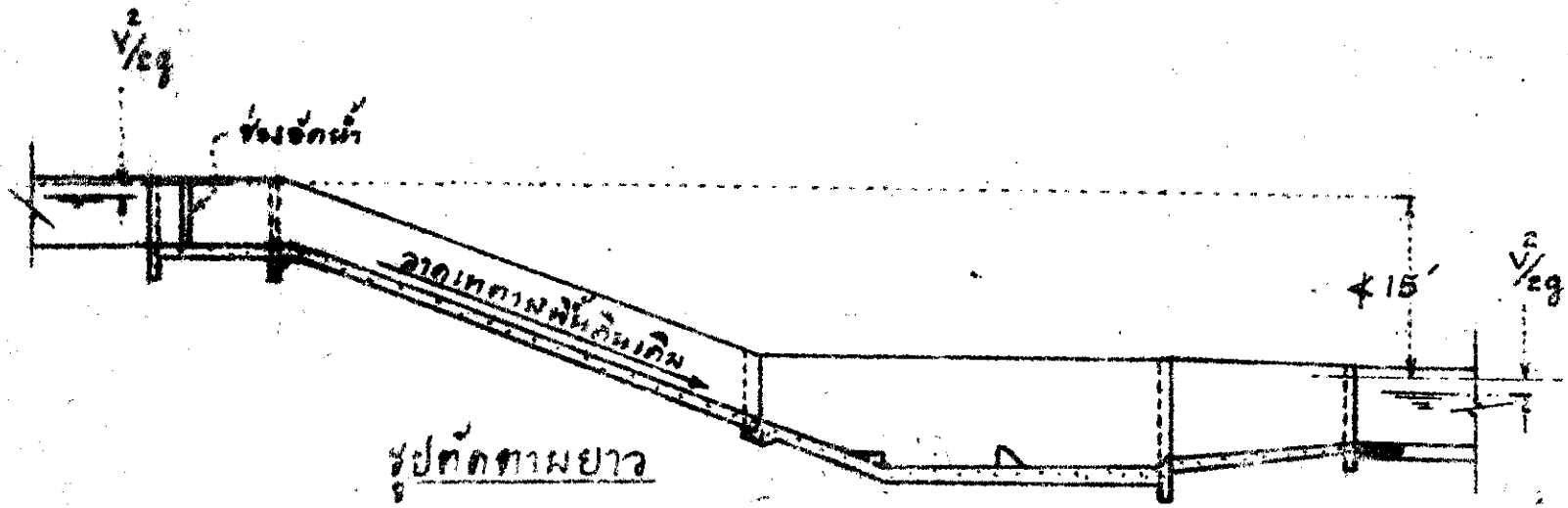
9.2 <u>อาคารน้ำตกแบบรางเท</u> (Inclined drop or chute drop) ในกรณีที่ต้องลดระดับน้ำในคลองส่งน้ำลงมาก ๆ และมีปริมาณน้ำผ่านสูงจนไม่อยู่ในเกณฑ์ที่จะสร้างเป็นอาคารน้ำตกแบบกำแพงตั้งได้ จำเป็นต้องออกแบบให้เป็นอาคารน้ำตกแบบรางเท หรือออกแบบรางเท (Chute) เสียเลย ซึ่งแน่นอนว่าค่าก่อสร้างจะต้องสูงเป็นเงาตามตัว และถ้าการไหลของน้ำที่ผ่านตัวอาคารในลักษณะที่เส้นพลังน้ำ (Energy gradeline) ลดลงไม่เกิน 15′ เราจะเรียกอาคารนั้นว่าอาคารน้ำตกแบบรางเท (Inclined drop or chute drop) แต่ถ้าเส้นพลังน้ำลดลงเกิน 15′ เราจะเรียกอาคารนั้นว่ารางเท (Chute) ทั้งอาคารน้ำตกแบบรางเทและรางเทนี้มักนิยมออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เว้นเสียแต่ปริมาณน้ำที่ผ่านไม่มากนักจึงจะออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู และจะนิยมออกแบบให้อาคารทั้งหมดจมอยู่ในดินตัดทั้งหมด (Thoroughly cut)

ช่วงตอนหรือส่วนประกอบที่สำคัญของอาคารน้ำตกแบบรางเทแยกออกได้ดังนี้

9.2.1 ช่วงรับน้ำเข้า (Inlet structure) เป็นปากทางที่รับน้ำเข้าสู่อาคาร ซึ่งอาจจะออกแบบเป็นช่วงต่อเชื่อมด้านเหนือน้ำ(Inlet transition) ก็ได้ แต่ถ้าต้องการให้อาคารน้ำตกนี้ทำหน้าที่อัดน้ำ (Check) ด้วย เพื่อรักษาระดับน้ำในคลองส่งน้ำตอนเหนือน้ำของน้ำตก มักนิยมทำช่วงรับน้ำเข้าให้มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความกว้างเท่ากับตัวร่องรางเท (Chute channel) แล้วมีบานบังคับน้ำ (Gate) หรือไม้อัดน้ำ (Stop log) เป็นตัวอัดน้ำอีกทีหนึ่ง แต่ถ้าอาคารดังกล่าวเป็นรางเท (Chute) อาจจำเป็นต้องให้ช่วงรับน้ำเข้า (Inlet structure) นี้มีส่วนลาดเท (Slope) เข้าไปหาร่องรางเท (Chute channel) ด้วย เพื่อให้การไหลของน้ำเข้าสู่ร่องรางเทเป็นไปโดยราบเรียบที่สุดนั่นเอง



แปลนครึ่งซีก



รูปตัดตามยาว

รูปแสดงส่วนต่างๆของน้ำตกแบบรางเท

9.2.2 ร่องรางเท (Chute channel) เป็นส่วนที่ทอดยาวไปตามส่วนลาดเทเฉลี่ย (Average slope) ของพื้นดินเดิม และวางเป็นแนวเส้นตรงเสมอ เมื่อได้ส่วนลาดเทดังกล่าวแล้ว จึงคำนวณหาความลึกในช่วงต่าง ๆ ตลอดความยาวของร่องรางเท โดยใช้สูตรดังนี้

$$L = \frac{(\frac{V_m^2 - V_n^2}{2g}) + (d_m - d_n)}{S_b - Se_{ave,}}$$

ในเมื่อ L = ความยาวตามแนวราบของร่องรางเทในช่วงที่คำนวณอยู่เป็นเมตร

V_m, V_n = ความเร็วกระแสน้ำที่รูปตัดหัว–ท้ายของช่วงความยาว L เป็น ม./วินาที

d_m, V_n = ความลึกน้ำที่รูปตัดหัว–ท้ายของช่วงความยาว L เป็นเมตร

g = อัตราโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 ม./(วินาที)^2

S_b = ส่วนลาดเทของพื้นร่องรางเท

$Se_{ave.}$ = ส่วนลาดเทเฉลี่ยของเส้นพลังน้ำ

$$= \frac{n^2 . V_{ave.}^2}{R_{ave.}^{1.333}}$$

n = สัมประสิทธิ์ของความขรุขระของร่องรางเท

= 0.014 ในกรณีเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$V_{ave.} = \frac{Q}{A_{ave.}}$$

$$R_{ave.} = \frac{A_{ave.}}{P_{ave.}}$$

Q = ปริมาณน้ำที่ผ่านน้ำตกเป็น ม.^{3}/วินาที

$A_{ave.}$ = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยระหว่างหัว–ท้ายของช่วงความยาว L เป็น ม.^{2}

$P_{ave.}$ = ความยาวเส้นขอบเปียกเฉลี่ยระหว่างหัว–ท้ายของช่วงความยาว L เป็นเมตร

และการคำนวณนั้นให้ถือว่าความลึกของน้ำที่จุดเริ่มต้นของร่องรางเทเท่ากับความลึกวิกฤต (Critical depth) ส่วนช่วงปลายล่างสุดของร่องรางเทจะเปลี่ยนส่วนลาดเทให้ชันขึ้นกว่าตอนต้นร่องรางเท โดยให้มีส่วนลาดเทระหว่าง 1:1 $\frac{1}{2}$ ถึง 1:3 (นิยมใช้ 1:2)

9.2.3 โค้งต่อร่องรางเท (Trajectory) ในกรณีที่เป็นรางเท (Chute) จำเป็นต้องออกแบบช่วงต่อของร่องรางเทตรงที่มีส่วนลาดเทเปลี่ยนแปลงให้เป็นโค้ง โดยใช้สมการของโค้งต่อร่องรางเท (Trajectory) ดังนี้

$$Y = X \tan \theta_o + \frac{(\tan \theta_L - \tan \theta_o)X^2}{2L_t}$$

ในเมื่อ X = ระยะต่าง ๆ ตามแนวราบของโค้งต่อร่องรางเท โดยวัดจากจุดเริ่มต้นของโค้งร่องต่อรางเท

Y = ระยะต่าง ๆ ตามแนวลึงของโค้งต่อร่องรางเทที่ค่า X ต่าง ๆ

L_t = ความยาวตามแนวราบทั้งหมดของโค้งต่อร่องรางเท

θ_o = มุมเอียงของจุดเริ่มโค้งของร่องรางเทที่ทำกับแนวราบ

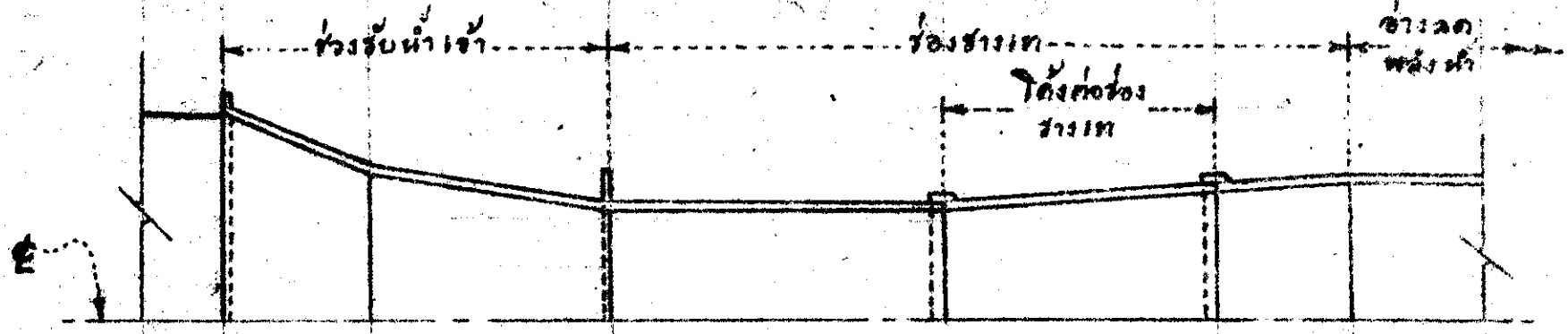
θ_L = มุมเอียงของจุดสุดโค้งของร่องรางเทที่ทำกับแนวราบ

สำหรับส่วนเผื่อความลึกของร่องรางเท (Freeboard of chute channel) เพื่อใช้กำหนดความสูงของกำแพงข้างของร่องรางเทได้กำหนดค่าต่ำสุดไว้ดังนี้

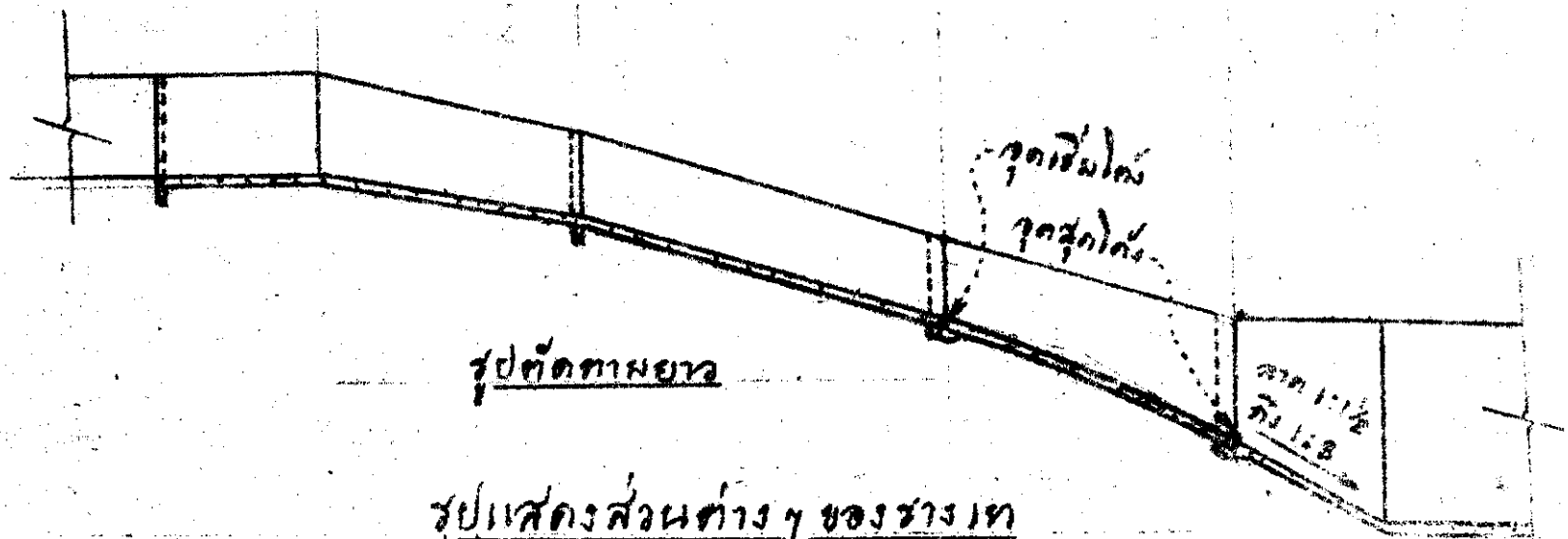
ปริมาณน้ำเป็น $(ฟุต)^3$/วินาที	ส่วนเผื่อความลึกเป็นนิ้ว
ไม่เกิน 100	12
101 – 500	15
501 – 1,000	18
เกินกว่า 1,000	24

9.2.4 อ่างลดพลังน้ำ (Stilling basin) เป็นช่วงต่อจากปลายสุดของร่องรางเท ใช้การคำนวณดังกล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้ว

9.2.5 ช่วงต่อเชื่อมด้านท้ายน้ำ (Outlet transition) เป็นช่วงต่อจากอ่างลดพลังน้ำเพื่อนำน้ำเข้าสู่คลองส่งน้ำในช่วงต่อไป การคำนวณได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้ว



แปลนครึ่งซีก



รูปตัดตามยาว

รูปแสดงส่วนต่างๆ ของรางเท

<u>ตัวอย่าง</u> ในการออกแบบอาคารน้ำตกแบบรางเทแห่งหนึ่งซึ่งมีน้ำผ่าน 15.45 ม.^{3}/วินาที ถ้าช่วงที่เป็นร่องรางเทนั้นมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีระดับดินต่างกัน 30 ม. โดยมีความยาวตามแนวราบ 95.148 ม. และความกว้างของร่องรางเท 4.30 ม. จงเขียนรูปตัดตามยาวแสดงเส้นผิวน้ำในร่องรางเทและบอกความลึกของน้ำเมื่อเริ่มเข้าสู่อ่างลดพลังน้ำด้วย

<u>วิธีทำ</u> (1) <u>หาความลึกปกติ</u>

ส่วนลาดเทของพื้นร่องรางเท $= \frac{30}{95.148}$

และถ้าน้ำไหลด้วยความลึกปกติ (Normal depth) จะได้

$$S_e = \frac{30}{95.148}$$

จาก $V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S_e^{1/2}$

ถ้ากำหนดให้การไหลด้วยความลึกปกติ $= Y_o$

$$A = 4.30\ Y_o$$

$$P = 4.30 + 2y_o$$

$$R = \frac{4.30y_o}{4.30 + 2y_o}$$

$$S_e^{1/2} = 0.562$$

$$Q = 1.1 \times 15.45 = 16.995$$

$$= 17 \text{ ม.}^3\text{/วินาที}$$

$$V = \frac{17}{4.30y_o} \text{ ม./วินาที}$$

แทนสูตร $\frac{17}{4.30y_o} = \frac{0.562}{0.014} \times \left(\frac{4.30y_o}{4.30 + 2y_o}\right)^{2/3}$

$$\left(\frac{4.30y_o}{4.30 + 2y_o}\right)^{0.667} - \frac{0.0985}{y_o} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(K)}$$

ถ้า $y_o = 0.26$ ม.

$$(K) = \left(\frac{4.30 \times 0.26}{4.30 + 0.52}\right)^{0.667} - \frac{0.0985}{0.26} = -0.00152$$

ถ้า $y_o = 0.262$ ม.

$$(K) = \left(\frac{4.30 \times 0.262}{4.30 + 0.524}\right)^{0.667} - \frac{0.0985}{0.262} = 0.00310$$

ถ้า $y_o = 0.261$ ม.

$$(K) = \left(\frac{4.30 \times 0.261}{4.30 + 0.522}\right)^{0.667} - \frac{0.0985}{0.261} = 0.00080$$

∴ การไหลด้วยความลึกปกติ $y_o = 0.261$ ม.

(2) <u>หาความลึกวิกฤต</u>

$$y_c = \sqrt[3]{q^2/g}$$

$$q = \frac{17}{4.30} = 3.953 \text{ ม.}^3/\text{วินาที/ม.}$$

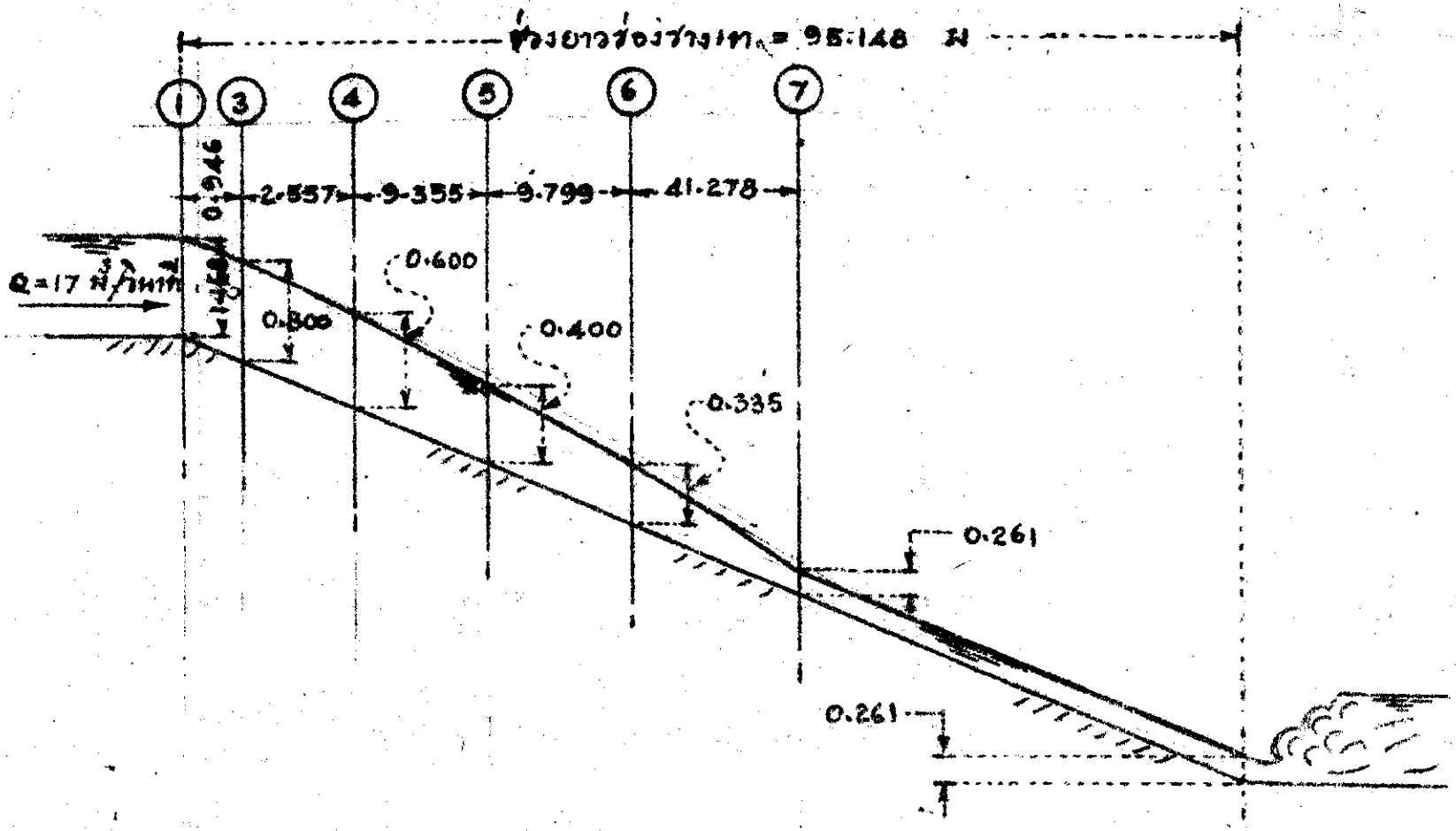
$$y_c = \sqrt[3]{\frac{(3.953)^2}{9.81}} = 1.168 \text{ ม.}$$

(3) <u>หาความยาวตามแนวราบที่ความลึกต่าง ๆ</u> โดยแบ่งจุดต่าง ๆ ด้วยความลึก 1.168, 1.00, 0.80, 0.60, 0.40, 0.335 และ 0.261 ม. ตามลำดับ โดยเขียนเป็นตารางดังนี้.-

ตารางหาช่วงความยาวในแต่ละช่วงความลึกในร่องรางเท

รูปตัดที่	b (ม.)	d (ม.)	A ($ม.^2$)	P (ม.)	Q ($ม.^3$/วินาที)	V (ม./วินาที)	$A_{ave.}$ ($ม.^2$)	$P_{ave.}$ (ม.)	$R_{ave.}$ (ม.)	$V_{ave.}$ (ม./วินาที)	n	$Se_{ave.}$	S_b	$S_b - Se_{ave}$	$V_m^2/2g - V_n^2/2g$	$d_m - d_n$	L (ม.)
1	4.30	1.168	5.022	6.636	17	3.385					0.014		0.315				
							4.661	6.468	0.721	3.647		0.00403		0.31097	0.212	-0.168	0.141
2		1.000	4.300	6.300		3.953											
							3.870	6.100	0.634	4.393		0.00694		0.30806	0.448	-0.200	0.805
3		0.800	3.440	5.900		4.942											
							3.010	5.700	0.528	5.648		0.01464		0.30036	0.968	-0.200	2.557
4		0.600	2.580	5.500		6.589											
							2.150	5.300	0.406	7.907		0.04071		0.27429	2.766	-0.200	9.355
5		0.400	1.720	5.100		9.884											
							1.581	5.035	0.314	10.753		0.10590		0.20910	2.114	-0.065	9.799
6		0.335	1.441	4.970		11.797											
							1.282	4.896	0.262	13.261		0.20516		0.10984	4.608	-0.074	41.278
7		0.261	1.122	4.822		15.152											

รวมความยาวตามแนวราบตั้งแต่ปากร่องรางเทจนถึงจุดที่เป็นความลึกปกติ 63.935



รูปตัดตามยาวของร่องน้ำเทแสดงระดับน้ำที่จุดต่าง ๆ

จากตัวอย่างนี้จะเห็นว่าร่องรางเท (Chute channel) นั้นยาวมาก จนกระทั่งเกิดการไหลด้วยความลึกปกติ (Normal depth) ในร่องรางเท ดังนั้นความลึกของน้ำตรงปลายร่องรางเท y_1 จึงมีค่าเท่ากับความลึกปกตินั้นเอง และถ้าหากความต่างของเส้นพลังน้ำ (Energy gradeline) จะได้มาเกิน 15' ดังนั้นอาคารนี้จึงเรียกว่ารางเท (Chute) ซึ่งไม่ใช่อาคารน้ำตกแบบรางเท (Chute drop) แต่โดยหน้าที่ของมันแล้วก็คงเหมือนกัน

สำหรับในกรณีที่เป็นอาคารน้ำตกแบบรางเท (Chute drop) ตัวร่องรางเทจะสั้นกว่านี้ และความลึกของการไหลจะลดลงไม่ถึงความลึกปกติ น้ำก็จะวิ่งสุดร่องรางเทเสียก่อน จำเป็นต้องคำนวณความลึกต่าง ๆ จนกระทั่งผลรวมของ L ในช่องสุดท้ายของตารางเท่ากับความยาวตามแนวราบของร่องรางเทแล้ว ความลึกสุดท้ายของการคำนวณจะแสดงค่า y_1 ที่ปลายสุดของร่องรางเทนั่นเอง

ในด้านความมั่นคงของตัวอาคารน้ำตกแบบนี้จะต้องตรวจสอบค่าต่าง ๆ ตามหัวข้อต่อไปนี้

ก. ความมั่นคงต่อน้ำไหลลอดใต้พื้น (Piping) โดยอาศัยหลักเกณฑ์ของเลนส์ (Lane's ratio)

ข. ความมั่นคงต่อการลอยตัว (Floating) โดยที่น้ำหนักของตัวอาคารแต่ละช่วงตอนจะต้องมากพอที่จะต้านแรงดันน้ำใต้พื้น (Uplift pressure) ได้ และหากน้ำหนักตัวอาคารไม่พอให้เพิ่มตีนเป็ดที่พื้นเพื่อให้ดินกดทับช่วยอีกทีหนึ่ง

ค. ความมั่นคงต่อการเลื่อนตัว (Sliding) ทั้งนี้จะต้องคิดแรงดันของน้ำที่จะดันให้ตัวอาคารเลื่อนตัว กับน้ำหนักของตัวอาคารเองที่จะไถลลงเนื่องจากความลาดเทของตัวรางเทด้วย และอาจต้องเพิ่มกำแพงล่าง (Cutoff wall) ด้วย ถ้าจำเป็น

ง. ด้านคำนวณโครงสร้าง (Structural design) ที่ตัวรางเทนั้นให้คำนวณเช่นเดียวกับรางน้ำ (Bench flume) แต่คิดเป็นกรณีที่ภายในรางเทน้ำแห้งมีแรงดันดินภายนอกเต็มที่และภายในมีน้ำเต็มแต่ภายนอกไม่มีดินเลย

จ. ส่วนเผื่อความปลอดภัย (Factor of safety) ในกรณีต่าง ๆ ให้คิดเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในบทต้น ๆ แล้ว

9.3 <u>อาคารน้ำตกแบบท่อ</u> (Pipe drop) เป็นอาคารน้ำตกที่มีปริมาณน้ำผ่านไม่มากนัก และลักษณะการไหลของน้ำผ่านท่อก็จะเป็นเช่นเดียวกับการไหลในอาคารน้ำตกแบบรางเท แต่เราจะกำหนดให้เกิด Hydraulic jump ขึ้นที่ตอนล่างของท่อ ทำให้สามารถลดค่าลงลดพลังน้ำ (Stilling basin) ไปได้ ราคาของอาคารชนิดนี้จึงต่ำกว่าราคาอาคารน้ำตกแบบรางเท การคำนวณอาศัยหลักการสมดุลย์ของแรงดันกับโมเมนตัม (Pressure and momentum) ระหว่างก่อนและหลังเกิด Jump

จากรูปจะมีสมการที่นำมาใช้คำนวณได้ดังนี้

เมื่อ P_1 และ P_2 เป็นแรงดันก่อนและหลังเกิด Jump

M_1 และ M_2 เป็นโมเมนตัมก่อนและหลังเกิด Jump

จะได้ $$P_1 + M_1 = P_2 + M_2$$

หรือ $$A_1 \bar{Y}_1 + \frac{Q \cdot V_1}{g} = A_2 \bar{Y}_2 + \frac{Q \cdot V_2}{g}$$

$$\frac{Q(V_1 - V_2)}{g} + A_1 \bar{Y}_1 = A_2 \bar{Y}_2$$

ให้ $$\triangle V = V_1 - V_2$$

และจากรูป $$\bar{Y}_2 = h_2 - \frac{D}{2}$$

$$\frac{Q \cdot \triangle V}{g} + A_1 \bar{Y}_1 = A_2 (h_2 - \frac{D}{2})$$

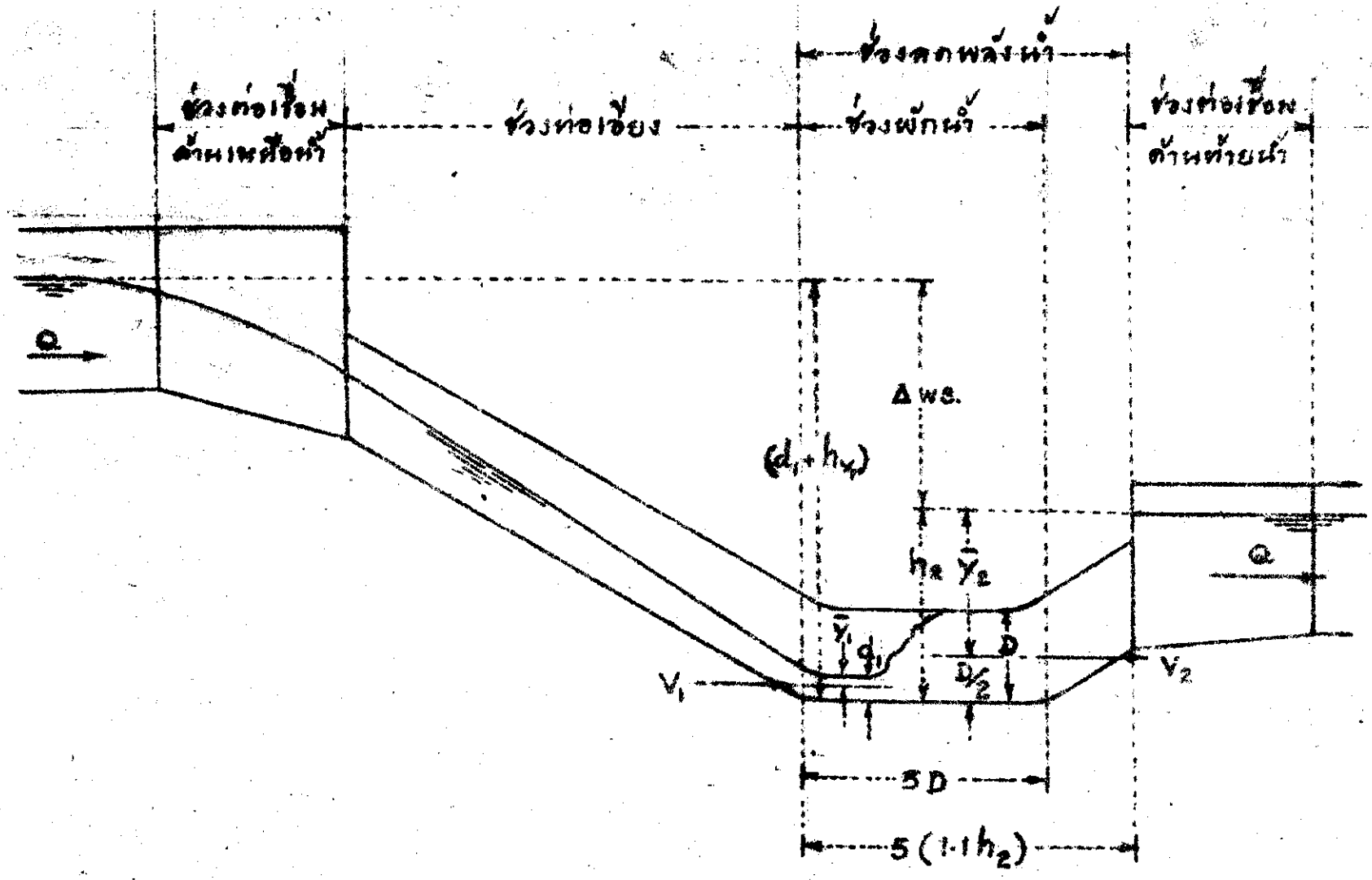
$$\frac{Q \cdot \triangle V}{g} + A_1 \bar{Y}_1 + \frac{A_2 D}{2} = A_2 \cdot h_2$$

$$\therefore h_2 = \frac{Q \cdot \triangle V}{A_2 \cdot g} + \frac{A_1 \bar{Y}_1}{A_2} + \frac{D}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots$$

และจากรูปเช่นกัน $$\triangle w.s = d_1 + h_{v_1} - h_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots$$

ในเมื่อ $\triangle w.s$ = ผลต่างของระดับน้ำด้านเหนือและท้ายน้ำ

$$h_{v_1} = \frac{V_1^2}{2g}$$



รูปตัดตามยาวแสดงส่วนต่างๆ ของอาคารน้ำตกแบบท่อ

<u>ตัวอย่าง</u> ในการคำนวณออกแบบอาคารน้ำตกแบบท่อแห่งหนึ่ง มีปริมาณน้ำผ่าน 2.50 ม.^{3}/วินาที และระดับต่างของน้ำด้านเหนือและท้ายอาคารเท่ากับ 2.00 ม. ต้องการให้ความเร็วของน้ำที่ผ่านท่อไม่เกิน 1.50 ม./วินาที

<u>วิธีทำ</u>

$$Q = 2.50 \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$$

$$V \not> 1.50 \quad \text{ม./วินาที}$$

$$\therefore A = \frac{2.50}{1.50} = 1.667 \quad \text{ม.}^2$$

$$\frac{\pi}{4} D^2 = 1.667$$

$$D = 1.457 \quad \text{ม.}$$

$\therefore$ ใช้ท่อขนาด ϕ 1.50 ม.

ต่อไปจะคำนวณค่าต่าง ๆ ใส่ลงในตาราง โดยสมมติค่า d_1/D ด้วยค่าต่าง ๆ แล้วคำนวณหาระดับต่างผิวน้ำด้านเหนือและท้ายน้ำตก $\Delta w.s$ ให้เท่ากับ 2.00 ม. ตามที่กำหนด โดยใช้สูตร

$$h_2 = \frac{Q.\Delta V}{A_2 \cdot g} + \frac{A_1 \bar{Y}_1}{A_2} + \frac{D}{2}$$

$$\Delta V = V_1 - V_2$$

$$\Delta w.s = d_1 + h_{v_1} - h_2$$

$$h_{v_1} = \frac{V_1^2}{2g}$$

ตารางคำนวณเพื่อหาค่า d_1 และ h_2 โดยเทียบค่า Δws.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d_1/D	d_1	A_1/D^2	A_1	V_1	h_{v_1}	$\bar{Y}_1$	ΔV	$\frac{Q.\Delta V}{A_2 \cdot g}$	$\frac{A_1 Y_1}{A_2}$	D/2	h_2	$d_1+h_{v_1}$	Δws.
0.40	0.600	0.2934	0.660	3.79	0.73	0.25	2.37	0.343	0.0935	↑	1.1865	1.33	0.1435
0.15	0.225	0.0739	0.1665	15.00	11.50	0.0915	13.58	1.960	0.0086	.....	2.718	11.725	9.01
0.25	0.375	0.1535	0.345	7.25	2.68	0.1545	5.83	0.840	0.0300		1.620	3.055	1.435
0.22	0.330	0.1281	0.288	8.67	3.83	0.135	7.25	1.050	0.0220	0.75	1.822	3.938	2.338
0.225	0.338	0.1323	0.298	8.40	3.60	0.138	6.98	1.005	0.0235	.....	1.778	3.738	2.160
0.23	0.345	0.1365	0.307	8.15	3.38	0.1465	6.73	0.972	0.0244	↓	1.746	3.723	1.979

• เป็นค่าที่ใช้ได้เพราะใกล้เคียง 2.00 ม.

วิธีคิดในตารางการคำนวณ

ขอยกตัวอย่างที่มาของตัวเลขในบรรทัดแรกในแต่ละช่อง ดังนี้.-

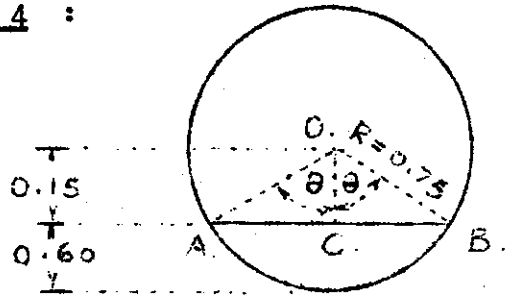
ช่องที่ 1 : สมมุติค่า d_1/D = 0.40

ช่องที่ 2 : เนื่องจากเราสมมุติค่า D = 1.50 ม.

$\therefore$ d_1 = 1.50 x 0.40 = 0.60 ม.

สำหรับช่องที่ 3 นั้น เราไม่ต้องมีก็ได้ แต่เนื่องจากในการคำนวณนี้ได้ใช้ตาราง d_1/D กับ A_1/D^2 เพื่อช่วยให้หาค่า A_1 เร็วขึ้น แต่เราก็อาจหาค่า A_1 ได้โดยตรงจากช่องต่อไปนี้

ช่องที่ 4 :



วงกลมคือเส้นรอบวงภายในท่อ

AB คือผิวน้ำในท่อที่มีความลึก d_1 = 0.60 ม.

● คือจุดศูนย์กลางท่อ

$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{0.15}{0.75}\right) = 78.463^\circ$

$2\theta = 156.926^\circ$

AC = 0.75 sin (78.463°) = 0.7348

$\triangle$ OAB = 0.7348 x 0.15 = 0.11 ม.^{2}

$\bigtriangleup$OAB = $\frac{\pi}{4}(1.5)^2 \times \frac{156.926}{360}$ = 0.77 ม.^{2}

$\therefore$ A_1 = พื้นที่ $\smile$

= 0.77 - 0.11 = 0.66 ม.^{2}

ช่องที่ 5 : $V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{2.5}{0.66}$ = 3.79 ม./วินาที

ช่องที่ 6 :

$$h_{v_1} = \frac{v_1^2}{2g}$$

$$= \frac{(3.79)^2}{19.62} = 0.73 \text{ ม.}$$

ช่องที่ 7 : คือตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของแท่งน้ำ (ณ จุดที่ลึก d_1) ที่ต่ำจากผิวน้ำ ซึ่งจะหาได้จากท้ายเล่มของหนังสือฟิสิกส์ทั่ว ๆ ไป ซึ่งในที่นี้ได้ $\bar{Y}_1 = 0.25$ ม.

ช่องที่ 8 :

$$A_2 = \frac{\pi}{4}(1.5)^2 = 1.7671 \text{ ม.}^2$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

$$= \frac{2.5}{1.7671} = 1.42 \text{ ม./วินาที}$$

$$\Delta v = v_1 - v_2$$

$$= 3.79 - 1.42 = 2.37 \text{ ม./วินาที}$$

ช่องที่ 9 :

$$\frac{Q \cdot \Delta v}{A_2 \cdot g} = \frac{2.5 \times 2.37}{1.767 \times 9.81} = 0.343$$

ช่องที่ 10:

$$\frac{A_1}{A_2} \cdot \bar{Y}_1 = \frac{0.66}{1.7671} \times 0.25 = 0.935 \text{ ม.}$$

ช่องที่ 11:

$$D/2 = 0.75 \text{ ม.}$$

ช่องที่ 12 :

$$h_2 = \frac{Q.\triangle V}{A_2 \cdot g} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \bar{Y} + \frac{D}{2}$$

h_2 = ช่องที่ 9 + ช่องที่ 10 + ช่องที่ 11

= 0.343 + 0.0935 + 0.75

= 1.1865 ม.

ช่องที่ 13 :

$d_1 + h_{v_1}$ = ช่องที่ 2 + ช่องที่ 6

= 0.60 + 0.73

= 1.33 ม.

ช่องที่ 14 :

$\triangle$W.S. = H_L

= $d_1 + h_{v_1} - h_2$

= ช่องที่ 2 + ช่องที่ 6 - ช่องที่ 12

= 0.60 + 0.73 - 1.1865

= 0.1435 ม.

ในการคำนวณนี้ปรากฏว่าระดับน้ำจะน้อยกว่าความเป็นจริงไป จึงมักกำหนดให้มีส่วนเผื่อความปลอดภัย 10 % ดังนั้นระดับพื้นท่อตอนท้ายสุดซึ่งจะทำหน้าที่ลดพลังน้ำจึงเท่ากับระดับน้ำด้านท้ายน้ำลบด้วย 1.1 h_2 เสมอ

บทที่ 10

ท่อส่งน้ำเข้านา (Farm Turnouts)

ท่อส่งน้ำเข้านานี้นับว่าเป็นอาคารชลประทานในระบบส่งน้ำที่เล็กที่สุด และถือว่าเป็นอาคารที่สำคัญเพียงเท่าประตูระบายปากคลองส่งน้ำที่เดียว เพราะจะสามารถควบคุมปริมาณน้ำที่ส่งเข้าสู่พื้นที่ใช้น้ำโดยผ่านคูน้ำ (Farm ditch) ซึ่งตามหลักแล้วจะสร้างท่อส่งน้ำเข้านาเฉพาะของฝั่งของคลองซอยและคลองแยกซอยเท่านั้น เพราะไม่นิยมส่งน้ำโดยตรงออกจากคลองส่งน้ำสายใหญ่ (Main canal) และคลองส่งน้ำสายรอง (Submain canal)

10.1 หลักเกณฑ์ในการคำนวณออกแบบมีดังนี้.-

10.1.1 ถ้าสภาพภูมิประเทศไม่บังคับจนเกินไปมักนิยมสร้างท่อส่งน้ำเข้านา 1 แห่งต่อแฉลงน้ำ 1 แฉก เพื่อให้การควบคุมการส่งน้ำและการแพร่กระจายของน้ำ (Distribution of water) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

10.1.2 ในสมัยสร้างโครงการเชื่อนเจ้าพระยาได้กำหนดให้ใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.20, 0.30, 0.40 และ 0.50 ม. แต่ต่อมาปรากฏว่าเมื่อฝนตกหนักหรือ มีน้ำขังเต็มพื้นที่เพาะปลูกแล้ว หรือในขณะผู้ใช้น้ำไม่ต้องการน้ำแต่เจ้าหน้าที่ไม่ปิดน้ำ ผู้ใช้น้ำก็มักนำเศษหญ้าหรือฟางมาอุดปากท่อ ซึ่งแน่นอนว่าบางส่วนจะไปอุดตันในท่อซึ่งจะทำความสะอาดหรือดึงเอาออกได้ยาก ดังนั้นขนาดท่อที่นิยมใช้ในปัจจุบันจึงไม่ควรเล็กกว่า 0.30 ม. และในการกำหนดขนาดท่อนั้นใช้สูตรดังนี้

$$H_L = (K_e + 1)\ \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2 \cdot n^2 \cdot L}{R^{4/3}}$$

ในเมื่อ H_L = ระดับต่างของผิวน้ำหน้าและท้ายท่อส่งน้ำเข้านา เป็น ม.

K_e = สัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านเข้าท่อ

= 0.78

V = ความเร็วกระแสน้ำในท่อ เป็น ม./วินาที

n = สัมประสิทธิ์ของความขรุขระของผิวท่อ

= 0.017

L = ความยาวของท่อ เป็น ม.

R = รัศมีอุทกศาสตร์ เป็น ม.

g = อัตราโน้มถ่วงของโลก

= 9.81 ม./(วินาที)^2

<u>ตัวอย่าง</u> ให้หาปริมาณน้ำผ่านท่อส่งน้ำเข้านาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.40 ม. ยาว 15 ม. ในเมื่อขณะนั้นระดับน้ำในคลองชอยและระดับน้ำในคูน้ำต่างกัน 0.12 ม.

<u>วิธีทำ</u> จากสูตร

$$H_L = (K_e + 1)\frac{v^2}{2g} + \frac{v^2 \cdot n^2 \cdot L}{R^{4/3}}$$

ท่อขนาด ϕ 0.40 ม.

$$A = \frac{\pi}{4}(0.40)^2 \quad \text{ม.}^2$$

$$P = \pi \times 0.40 \quad \text{ม.}$$

$$\therefore R = \frac{\pi}{4}(0.40)^2 \times \frac{1}{0.40\pi}$$

$$= 0.10 \quad \text{ม.}$$

$$\therefore 0.12 = (0.78 + 1)\frac{v^2}{19.62} + \frac{v^2(0.017)^2 \times 15}{(0.10)^{4/3}}$$

$$= 0.0907\,v^2 + 0.0934v^2$$

$$v^2 = 0.6518$$

$$\therefore v = 0.8074 \quad \text{ม./วินาที}$$

และ $$Q = \frac{\pi}{4}(0.40)^2 \times 0.8074$$

$$= 0.101 \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$$

$\therefore$ น้ำผ่านท่อส่งน้ำเข้านา 0.101 ม.^{3}/วินาที

10.1.3 เนื่องจากแรงดันของน้ำในท่อมีไม่มากนัก และเป็นท่อขนาดเล็ก จึงนิยมใช้ท่อกลมหล่อสำเร็จ (Precast concrete pipe) หรือในบางแห่งอาจใช้ท่อแอสเบสตอสซีเมนต์เสียเลย

10.1.4 ความยาวของตัวท่อให้คำนวณหาจากส่วนสัมพันธ์ของความกว้างหลังคันคลอง ความลึกของท่อที่ฝังและลาดตลิ่งของตัวคลองซอย

10.1.5 ในการกำหนดระดับปากท่อให้ถือเสมือนว่าระดับน้ำในคลองซอยเป็นระดับที่มีการไหลเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำเต็มที่และระดับด้านในของบนของตัวท่อจะต้องต่ำกว่าระดับผิวน้ำดังกล่าวไม่น้อยกว่า $1.5 \frac{V^2}{2g}$ เมื่อ V เป็นความเร็วกระแสน้ำในท่อ เว้นเสียแต่ว่าถ้ามีอาคารอัดน้ำ (Check structure) ในคลองซอยจึงจะยึดระดับน้ำเต็มที่ในคลองเป็นหลัก

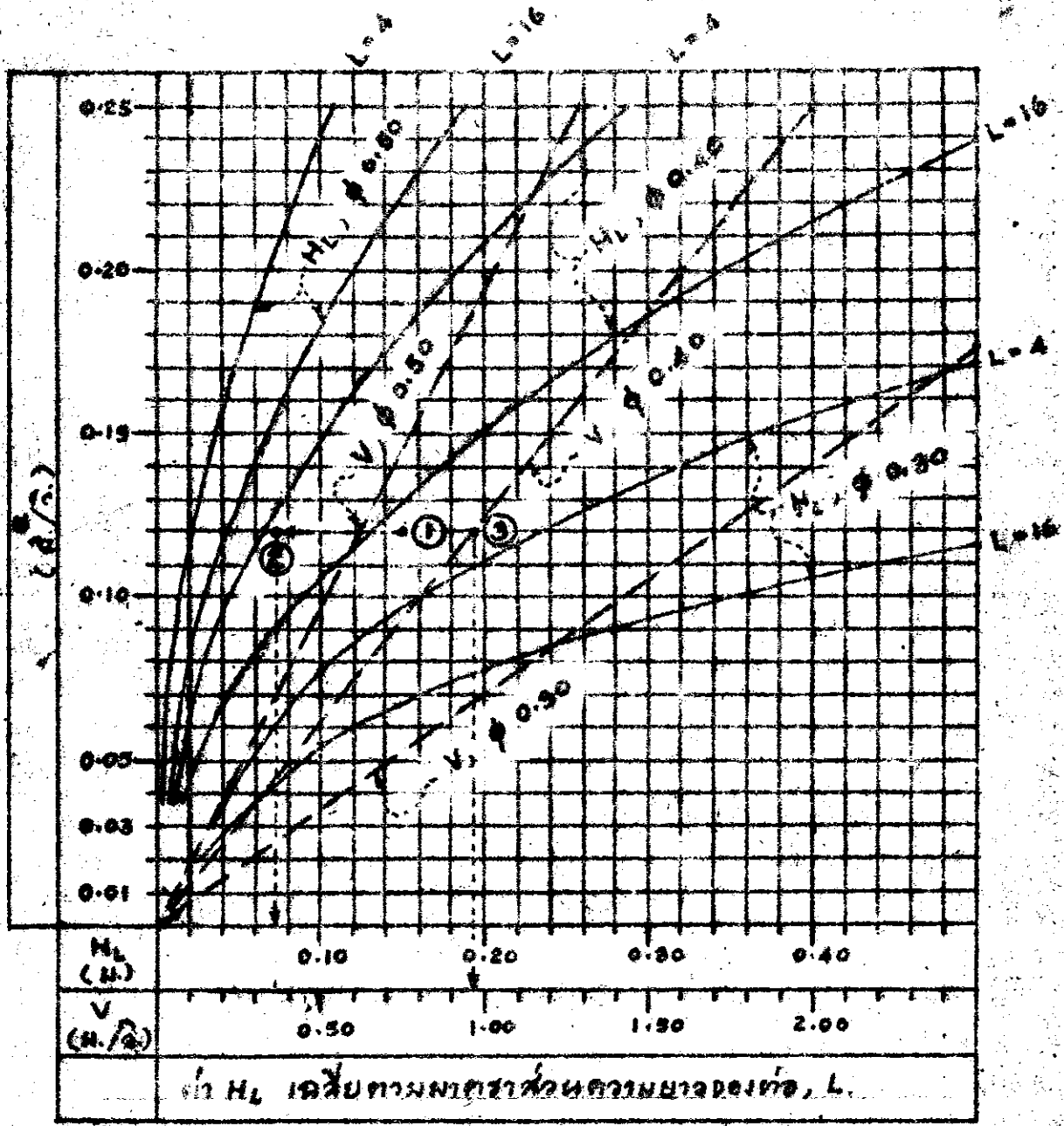
10.1.6 ที่ปลายท่อทั้งสองด้านจะต้องมีกำแพงหน้าท่อ (Head wall) และพื้น (Apron) และอาจจะต้องเรียงหินป้องกันการกัดเซาะตามความจำเป็น

10.1.7 การตรวจสอบน้ำลอดอาคารให้คิดเสมือนระดับน้ำหน้าอาคารเต็มถึงส่วนเผื่อความลึก (Freeboard) และท้ายน้ำน้ำแห้งในกรณีที่ความยาวไม่พอต้องใส่คอลล่า (Collar) ด้วย

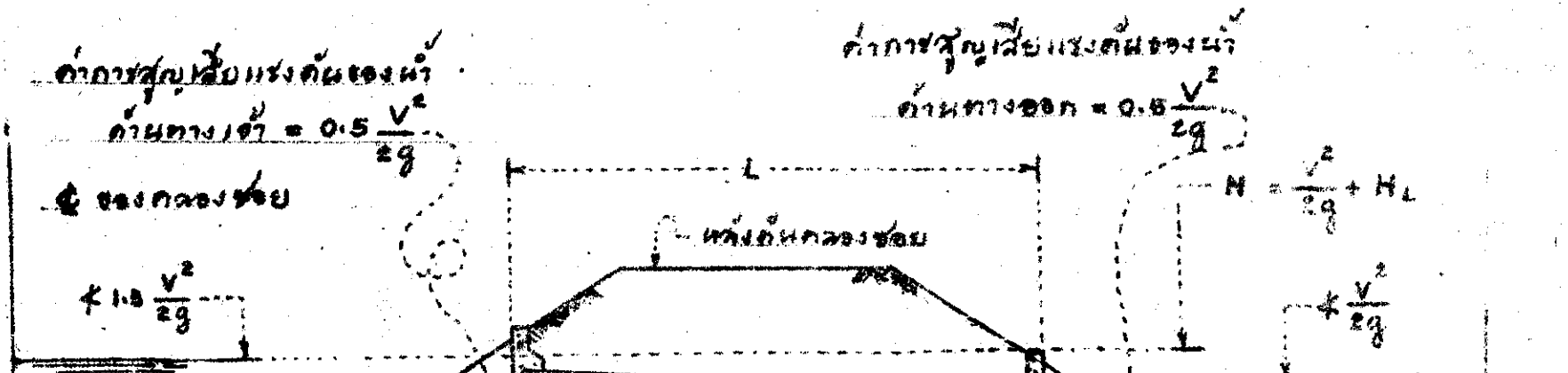
10.1.8 หน้าท่อจะต้องมีบานบังคับน้ำ ซึ่งอาจจะเป็นบานเหล็กเลื่อน (Slide gate) หรือไม้อัดน้ำ (Stop log) ก็ได้

10.2 เพื่อความสะดวกในการคำนวณ กรมชลประทานจึงได้สร้างโค้งเพื่อช่วยในการคำนวณ ซึ่งแสดงไว้ในหน้าถัดไป และจะขอยกตัวอย่างการคำนวณโดยอาศัยโค้งดังกล่าวไว้ดังนี้.-

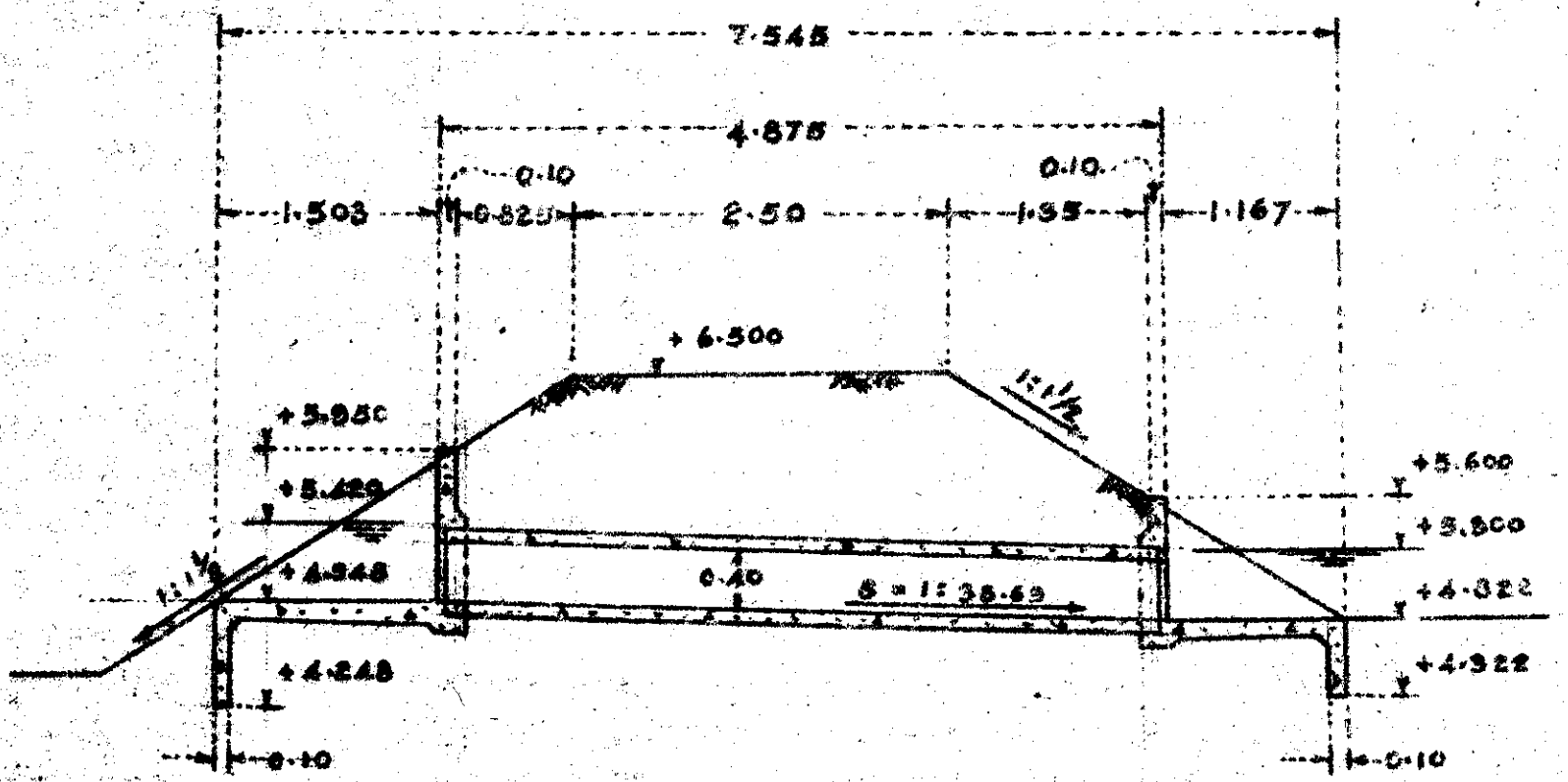
<u>ตัวอย่าง</u> ให้ออกแบบท่อส่งน้ำเข้านาแยกจากคลองซอยสายหนึ่งซึ่งมีอาคารอัดน้ำเพื่อรักษาระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับ + 5.420 และระดับน้ำในคูน้ำจะต้องไม่ต่ำกว่า + 5.270 ในเมื่อปริมาณน้ำผ่าน 0.12 ม.^{3}/วินาที และกำหนดให้หลังคันคลองอยู่ที่ระดับ + 6.500 กว้าง 2.50 เมตร ลาดตลิ่ง 1:1$\frac{1}{2}$ ดินเป็นดินเหนียวที่อ่อนตัว



ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำต้น ค่าการสูญเสีย แรงดันน้ำ ในแต่ละขนาดและความยาวของท่อส่งน้ำเข้านา



รูปตัดตามยาว ท่อส่งน้ำเข้านา แสดงระยะและค่าต่าง ๆ



รูปท่อส่งน้ำเข้าฝาประกอบตัวอย่าง

ความยาวของตัวท่อ = $0.10 + (0.55 \times 1.5) + 2.50 + (0.90 \times 1.5) + 0.10$

= $4.875 < 5.00$ ม. ที่สมมุติไว้จึงใช้ได้

∴ กินเป็นดินเหนียวที่อ่อนตัว

$C_w = 3.00$

การตรวจสอบน้ำลอดอาคารให้คิดเมื่อน้ำเต็มคลองซอยแต่ในคูน้ำแห้ง ซึ่งถือว่าน้ำในคลองซอยอาจเต็มที่ถึงระดับ + 5.950

∴ $H = 5.950 - 4.822 = 1.128$ ม.

ความยาวของน้ำลอดอาคาร = $0.70 + 0.60 + 0.40 + 0.50 + \frac{7.545}{3}$

= 4.715 ม.

∴ $C_w = \frac{4.715}{1.128} = 4.18$

> 3.00 ใช้ได้

สำหรับการเสริมเหล็กนั้นเนื่องจากตัวท่อนั้นใช้ท่อหล่อสำเร็จ ดังนั้นจึงไม่ต้องคำนวณส่วนกำแพงหน้าท่อและพื้นทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำนั้นใส่เหล็กเสริมเพื่อรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็พอ