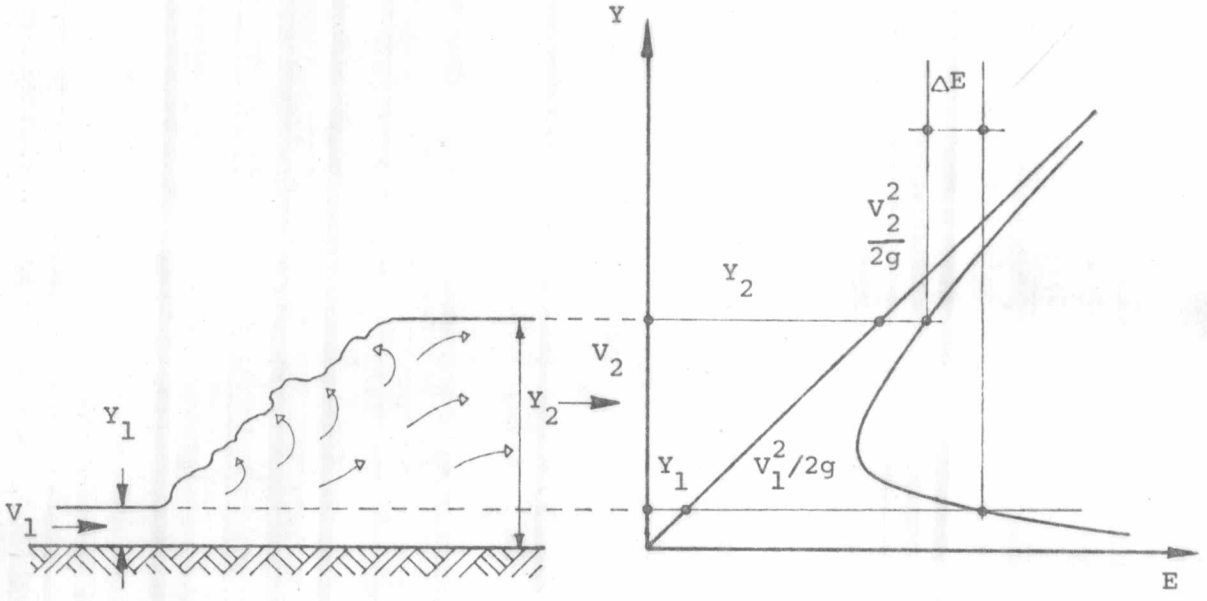
บทที่ ๓

ทฤษฎีบท

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

๓.๑ ไฮดรอลิคจั๊ม

ไฮดรอลิคจั๊ม คือ ปรากฏการณ์ของน้ำที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากสภาวะขั้นต่ำใต้จุดความลึกวิกฤต (Supercritical depth) เป็นสภาวะขั้นสูงเหนือจุดความลึกวิกฤต (Subcritical depth) หรือ อาจกล่าวได้ว่า เป็นปรากฏการณ์ที่มวลน้ำซึ่งไหลด้วยความเร็วสูง แล้วเปลี่ยนแปลงเป็นความเร็วต่ำอย่างกระทันหัน ทำให้เกิดพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลใหญ่ขึ้นและมีระดับน้ำสูงขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเกิดขึ้น คือ จากพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) มาเป็นพลังงานศักย์ (Potential Energy) และทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น



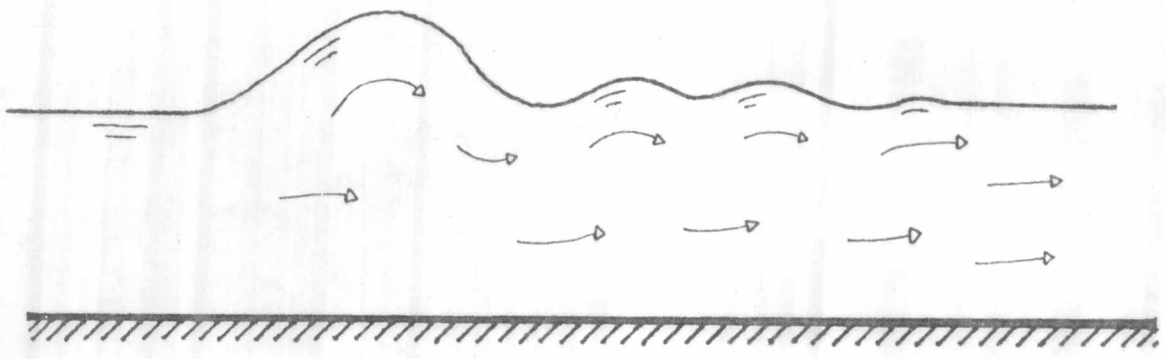
รูปที่ ๓.๑ HYDRAULIC JUMP

๓.๒ <u>ชนิดของไฮดรอลิคจั๊ม</u> (Type of Hydraulic Jump)

ไฮดรอลิคจั๊มที่เกิดบนพื้นราบมีหลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบได้แบ่งตาม Froude Number (F_1) ซึ่ง U.S.B.R. ได้ทำการศึกษาค้นคว้าและเรียกชื่อจั๊มตามรูปแบบต่างๆกันดังนี้คือ

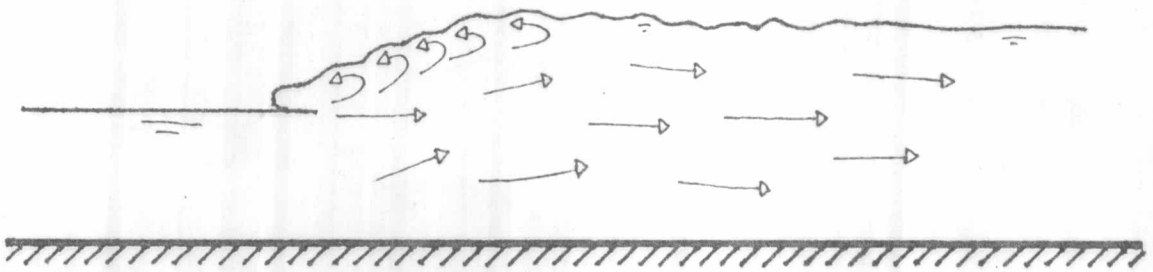
๓.๒.๑ เมื่อ F_1 = ๑.๐ การไหลของน้ำจะอยู่ที่ความลึกวิกฤต (Critical Depth) ซึ่งจะไม่เกิดไฮดรอลิคจั๊ม เปรียบการไหลของน้ำอยู่ที่จุด o ตามแผนภาพพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Diagram)

๓.๒.๒ เมื่อ F_1 = ๑.๐ ถึง ๑.๗ ความลึกของ Y_1 และ Y_2 จะแตกต่างกันเล็กน้อย จะเกิดความปั่นป่วนบนผิวน้ำเล็กน้อย เป็นเพียงปรากฏการณ์บอกให้ทราบว่าการไหลของน้ำพ้นจุดวิกฤตแล้ว เรียกจั๊มชนิดนี้ว่า Undular Jump



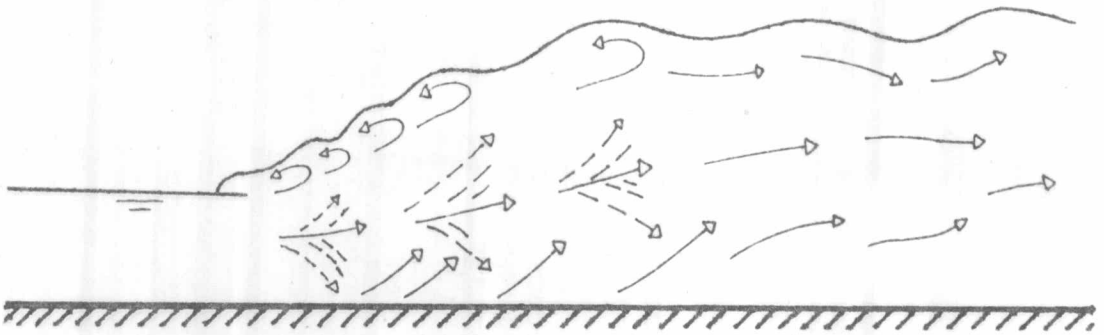
รูปที่ ๓.๒UNDULAR JUMP

๓.๒.๓ เมื่อ F_1 = ๑.๗ ถึง ๒.๕ ผิวน้ำราบเรียบ และหน้าตัดความเร็วของน้ำมีความเร็วสม่ำเสมอ เรียกจั๊มชนิดนี้ว่า Weak Jump



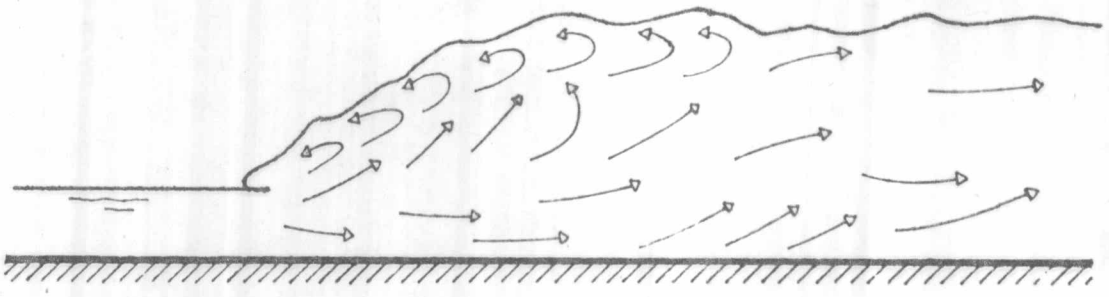
รูปที่ ๓.๓ WEAK JUMP

๓.๒.๔ เมื่อ F_1= ๒.๕ ถึง ๔.๕ จะเกิด Jet Oscillates กลับและพุ่งจากข้างใต้ถึงผิวน้ำ และกลับลงไปอีก บางครั้งมันเกิดขึ้นเป็นระยะทางไมล์ๆไปตามลำคลอง ซึ่งทำความเสียหายให้กับชายฝั่ง เรียกจั๊มชนิดนี้ว่า Oscillating Jump



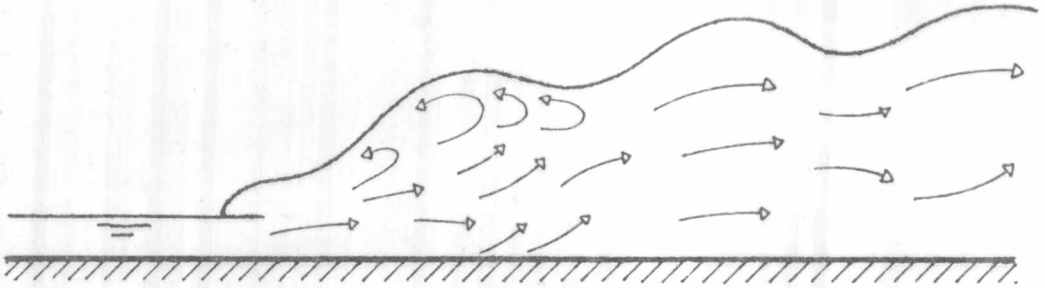
รูปที่ ๓.๔ OSCILLATING JUMP

๓.๒.๕ เมื่อ F_1= ๔.๕ ถึง ๙.๐ จะเกิด Steady Jump ซึ่งจัมรูปแบบนี้สามารถทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของน้ำ ๔๐ - ๗๐% ได้



รูปที่ ๓.๕ STEADY JUMP

๓.๒.๖ เมื่อ F_1 มากกว่า ๙.๐ จะเกิด Strong Jump หรือบางทีเรียก Choppy Jump ซึ่งมี Jet ความเร็วสูงไหลต่อเนื่องไปตลอดความยาวของท้ายน้ำ ผิวน้ำดูคล้าย Spray และขรุขระไม่ราบเรียบ เมื่อจัมในรูปแบบนี้เกิดขึ้น ควรสร้างแอ่งน้ำนิ่งให้ลึกพอ ทั้งนี้เนื่องจากค่า Y_2 มีค่ามากนั่นเอง



รูปที่ ๓.๖ STRONG JUMP

๓.๓ แผนภูมิของพลังงานจำเพาะ

ในฟลูม(flume) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พลังงานจำเพาะสามารถเขียนออกมาในรูปสมการดังนี้

$$E = Y + \frac{V^2}{2g} \qquad (๓.๓.๑)$$

จาก Continuity

$$q = VY$$

หรือ $$V = \frac{q}{Y}$$

ดังนั้น

$$E = Y + \frac{q^2}{2gY^2} \qquad (๓.๓.๒)$$

ถ้าเราให้ค่าของ q คงที่ โดยเปลี่ยนค่าของ E ไปเรื่อยๆ โดยให้สัมพันธ์กับ Y เราจะได้

$$(E - Y)Y^2 = \frac{q^2}{2g}$$

$$= \text{คงที่}$$

เมื่อค่า q และ g คงที่ ค่าของ E จะมีค่าน้อยที่สุดก็ต่อเมื่อ

$$\frac{dE}{dY} = 0$$

$$\frac{dE}{dY} = 1 - \frac{q^2}{gY^3} \qquad (๓.๓.๓)$$

$$= 0$$

ค่าของ Y ที่มีความสัมพันธ์กับค่าที่น้อยที่สุดของ E คือค่าความลึกวิกฤต (Critical Depth) ให้สัญญลักษณ์ของความลึกวิกฤตเป็น Yc

ดังนั้น

$$Yc = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \qquad (๓.๓.๔)$$

สำหรับความลึกต่างๆที่นอกเหนือไปจากสภาวะวิกฤต เราสามารถเขียนออกมาได้ว่า

$$Y^3 - EY^2 + \frac{q^2}{2g} = 0 \qquad (๓.๓.๕)$$

ซึ่งจากสมการที่ (๓.๓.๕) นี้ เราจะได้ค่าของ Y ออกมา ๓ ค่า โดยกำหนดค่าของ E , q และ g ค่าหนึ่งจะเป็นค่าติดลบซึ่งเราจะไม่นำมาคิด ส่วนอีกสองค่าจะมีค่าที่สูงและต่ำกว่าค่าความลึกวิกฤต ค่าความลึกที่ต่ำกว่าค่าความลึกวิกฤตเรียก Supercritical flow และค่าความลึกที่สูงกว่าค่าความลึกวิกฤตเรียก Subcritical flow

๓.๔ Critical flow, Subcritical flow และ Supercritical flow

Basic Dimensionless Numbers ใน Fluid Mechanics เป็นวิธีการขจัดหน่วยของตัวแปร เพื่อง่ายต่อการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า

ชนิดของแรงใน Fluid Mechanics สามารถแบ่งได้ออกเป็น ๖ ชนิดด้วยกันคือ

๑. Pressure force = $\Delta P L^2$

๒. Viscous force = μVL

๓. Gravity force = $\rho g l^3$

๔. Surface Tension force = σL

๕. Inertia force = $\rho V^2 L^2$

๖. Compressibility force = kL^2

Froude Number เป็นค่าที่ได้มาจากรากที่ ๒ ของอัตราส่วนของ Inertia force และ Gravity force ซึ่งเขียนออกมาในรูปสมการได้ว่า

$$\frac{\text{Inertia force}}{\text{Gravity force}} = \frac{\rho V^2 L^2}{\rho g L^3} = \frac{V^2}{gL} = F^2$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วถึง Critical depth, Subcritical depth และ Supercritical depth ซึ่งเราอาจจะกล่าวถึงความลึกเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของ Froude Number ได้ว่า

F เท่ากับ ๑ เป็น Critical flow

F มากกว่า ๑ เป็น Supercritical flow

F น้อยกว่า ๑ เป็น Subcritical flow

๓.๕ Continuity Equation

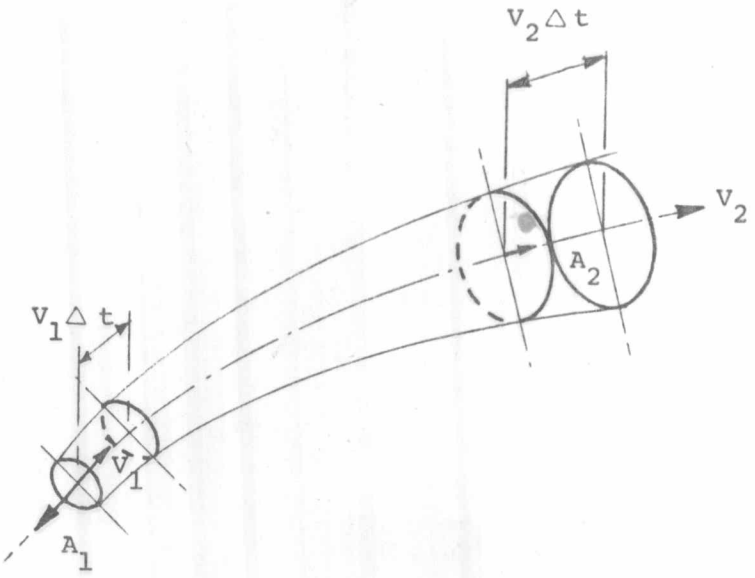
กฎของการคงสภาพของมวลได้กล่าวไว้ว่า ในคาบเวลาใดเวลาหนึ่ง มวลในระบบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากหลักการอันนี้จึงวิวัฒนาการมาเป็น Continuity Equation ดังจะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณา Stream tube ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็น A_1 และ A_2 โดยปล่อยมวลของของเหลวเข้าทางพื้นที่หน้าตัด A_1 และออกทางพื้นที่หน้าตัด A_2 ด้วยการเปลี่ยนแปลงของเวลาเวลาเป็น t ของเหลวซึ่งเข้าทางพื้นที่หน้าตัด A_1 จะไปได้เป็นระยะทาง V_1 t และออกทางพื้นที่หน้าตัด A_2 ได้ระยะทาง V_2 t จากคำจำกัดความที่ว่า ไม่มีของเหลวใดๆ ที่สามารถจะไหลออกจาก Stream tube ได้ นอกจากจะออกทางพื้นที่หน้าตัด A_2 ดังนั้นมวลของของเหลวที่ไหลเข้า Stream tube ที่มีพื้นที่หน้าตัด A_1 ในช่วงเวลา t จะต้องเท่ากับมวลของของเหลวที่ไหลออกจาก Stream tube ที่มีพื้นที่หน้าตัด A_2 ในช่วงเวลาเดียวกัน จากข้อความดังกล่าว จึงสามารถเขียนออกมาในรูปสมการได้ว่า

$$\rho V_1 A_1 \Delta t = \rho V_2 A_2 \Delta t$$

หรือ

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q = \text{คงที่}$$



รูปที่ ๓.๗ การไหลของของเหลวใน Stream tube

๓.๖ Bernoulli Equation

Bernoulli Equation ได้รับการวิวัฒนาการมาจากกฎการคงสภาพของมวล เช่นเดียวกันกับ Continuity Equation อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีของ Bernoulli ก็ได้กล่าวไว้ว่า " In a steady flow of frictionless incompressible fluid flow system the total energy per unit weight of flowing fluid remains constant. " ซึ่งจากคำกล่าวนี้สามารถที่จะแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาการไหลใน Stream tube ระหว่างจุดสองจุด คือ ๑ และ ๒ ภายใต้ความกดดัน P_1 ที่จุด ๑ และไหลไปได้ระยะทาง ds_1 ในเวลา dt และด้วยความเร็ว V_1 และในทำนองเดียวกันที่จุด ๒ ของเหลวได้ไหลออกไปได้ระยะทาง ds_2 และความเร็ว V_2 แต่ด้วยความกดดัน P_2

สำหรับการไหลแบบ Steady flow มวลของของเหลวที่ไหลเข้าใน Stream tube จะเท่ากับมวลของของเหลวที่ไหลออกจาก Stream tube

$$\gamma\ dA_1 ds_1 = \gamma\ dA_2 ds_2 \qquad (\ ๓.๖.๑\ )$$

แรงกระทำที่จุด ๑ $= P_1 dA_1$

งานที่ได้จากจุด ๑ $= P_1 dA_1 ds_1$

งานที่ได้จากจุด ๒ $= - P_2 dA_2 ds_2$

จากกฎการคงสภาพของมวล

Work done on the system = Change in energies of system

$$P_1 dA_1 ds_1 - P_2 dA_2 ds_2 = (\ P.E\ ) + (\ K.E\ )$$

$$= (\gamma dA_2 ds_2 Z_2 - \gamma dA_1 ds_1 Z_1\ ) + (\ \gamma dA_2 ds_2 \frac{V_2^2}{2g} - \gamma dA_1 ds_1 \frac{V_1^2}{2g}\ )$$

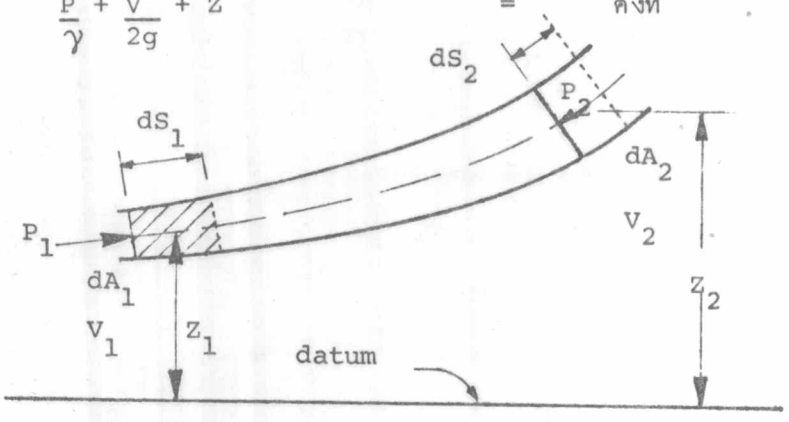
$$P_1 - P_2 = \gamma Z_2 - \gamma Z_1 + \gamma \frac{V_2^2}{2g} - \gamma \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = Z_2 - Z_1 + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

เขียนในแบบทั่วๆไป

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z = \text{คงที่}$$



รูปที่ ๓.๘ การไหลของของเหลวใน Stream tube

๓.๗ Momentum Equation

หลักพื้นฐานของการเคลื่อนที่คือ Newton's Second Law of Motion ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า " The time rate of change of momentum is proportional to the applied force and takes place in the direction force " หรืออาจกล่าวได้ว่า ผลลัพธ์ของแรงภายนอก F_x ซึ่งกระทำต่อมวล m. โดยกระทำไปในทิศทาง x จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมต่อหนึ่งหน่วยเวลาในทิศทางเดียวกัน

ผลของการเกิดโมเมนตัมเกิดได้เนื่องจากมีมวล m และมีความเร็ว V โดยให้การเปลี่ยนแปลงของความเร็วของมวลที่เคลื่อนที่ในเวลา dt เป็น dV ซึ่งถ้าความเร็วเปลี่ยนแปลง โมเมนตัมก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม $= m.dV$

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในคาบเวลา $= m.\frac{dV}{dt}$

005225

จากกฎที่ได้กล่าวมาแล้ว เราจะได้

$$F_x = m.\frac{dV_x}{dt} \qquad (๓.๗.๑)$$

สมการที่(๓.๗.๑)นี้ เราเรียกว่า Momentum Equation

๓.๘ Sluice Gate

Sluice gate เป็น ประตูเปิดปิดในแนวดิ่ง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บน้ำในอ่างเก็บน้ำ และปล่อยน้ำบางส่วนเพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของ Sluice gate หรือที่เราให้สัญญลักษณ์เป็น C_c

ถ้าเราพิจารณาจุดสองจุด คือ จุดเหนือน้ำหนึ่งจุดและจุดใต้น้ำอีกหนึ่งจุด โดยใช้ Energy Equation เราจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$Y_a + \frac{q^2}{2gY_a^2} = Y_b + \frac{q^2}{2gY_b^2} \qquad (๓.๘.๑)$$

i 1772305X

และจากการจัดเรียงใหม่

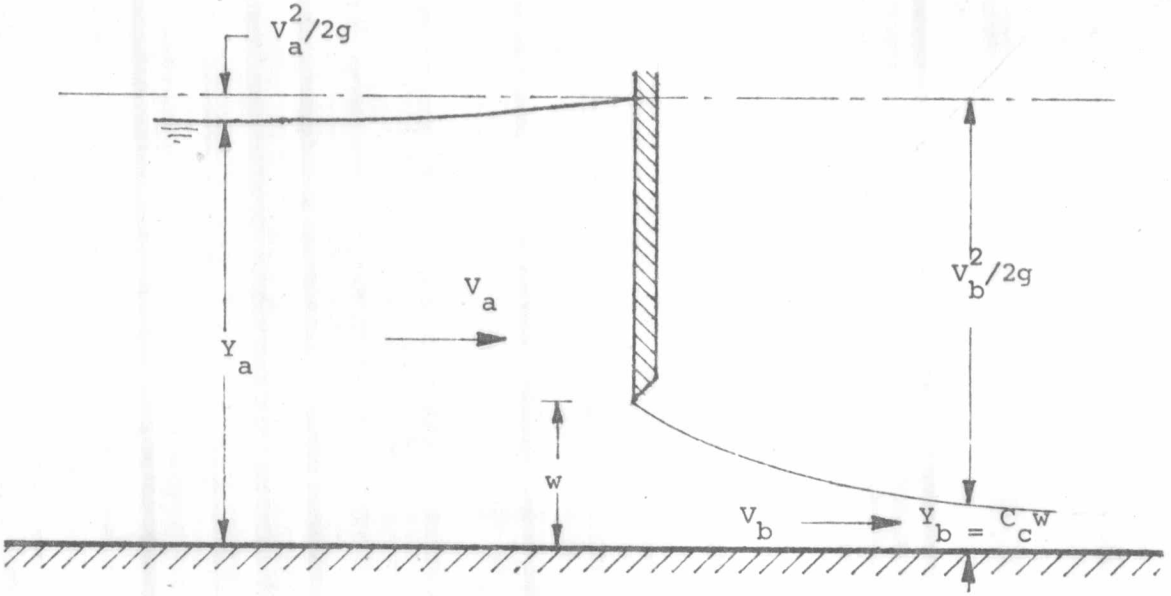
$$q = Y_a Y_b \sqrt{\frac{2g}{Y_a + Y_b}} \qquad (๓.๘.๒)$$

การที่น้ำในส่วนเหนือน้ำจะไหลไปสู่ส่วนท้ายน้ำได้มากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับการเปิดปิดของ Sluice gate ซึ่งเราได้ให้สัญญลักษณ์ w เป็นส่วนที่ Sluice gate ได้เปิดขึ้น ความเร็วที่ออกจากประตูน้ำมีความเร็ว $= \sqrt{2gY_a}$ และค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำมีสัญญลักษณ์เป็น C_d เราก็จะได้สมการใหม่ว่า

$$q = C_c w \sqrt{2gY_a} \sqrt{\frac{Y_a}{Y_a + Y_b}} \qquad (๓.๘.๓)$$

$$= C_d w \sqrt{2gY_a}$$

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + \frac{C_c w}{Y_a}}} \qquad (๓.๘.๔)$$



รูปที่ ๓.๙ Sluice gate

๓.๙ Profile of Jump

ในการที่จะออกแบบกำแพงของแอ่งน้ำนิ่งให้ประหยัดและได้ผลดีมากที่สุด จำเป็นที่จะต้องทราบค่าความลึกหลังจากเกิดไฮดรอลิคจั๊มแล้ว ดังนั้นการหา Profile of Jump จึงมีความจำเป็นมาก จากการที่ทราบค่าความลึกของน้ำหลังจากการเกิดไฮดรอลิคจั๊มแล้ว ก็เอาค่าความลึกของน้ำนี้มาคำนวณหาค่าความกดดันของน้ำที่กระทำบนพื้นของแอ่งน้ำนิ่งได้อีกด้วย ซึ่งกำแพงของแอ่งน้ำนิ่งก็จะนิ่งอยู่บนพื้นนี้เอง

Rajaratnam (๑๙๖๘) ได้บันทึกไว้ว่า การกระจายของแรงกดดันไม่อยู่ในกฎของ Hydrostatic ของ Jump แต่ Pressure Profile บนพื้นมีลักษณะเช่นเดียวกับ Average Water Surface Profile นอกจากใกล้ๆปลายจั๊มซึ่งมีแรงกดดันมากกว่า

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้วัด Profile ตลอดความยาวของฟูม มิได้วัด Profile ของ Jump เพราะการวัด Profile ของ Jump ทำได้ยากมาก เนื่องจากในขณะที่เกิดไฮดรอลิคจั๊ม ระดับของน้ำจะเป็นคลื่นมาก ซึ่งถ้าวัดออกมาก็จะได้ผลที่ไม่แน่นอน ผู้วิจัยเพียงแต่เขียนภาพ (sketch) ไว้ในขณะทำการทดลอง

๓.๑๐ Air Entrainment

Burkov et al ได้ตั้งข้อสังเกตุไว้ว่า ในลำคลองที่มีฟองอากาศจะมีแรงเสียดทานระหว่างผนังของลำคลองน้อยกว่าในลำคลองที่ไม่มีฟองอากาศ ในขณะที่มีแรงเสียดทานระหว่างผิวน้ำกับบรรยากาศของลำคลองที่มีฟองอากาศจะมากกว่า ซึ่งผลทางด้านการสูญเสียพลังงานของลำคลองที่มีฟองอากาศ และลำคลองที่ไม่มีฟองอากาศ แทบจะไม่แตกต่างกันเลย

Wiles (๑๙๓๗) ได้ตั้งข้อสังเกตุไว้ว่า ถ้าค่าของ Kinetic Flow Factor หรือค่ากำลังสองของ Froude Number มีค่าน้อยกว่า ๑๒ ในขณะที่มีฟองอากาศอยู่ในจั๊ม

จะมีค่าความยาวของจั๊มน้อยลง แต่ถ้าค่านี้มีค่ามากกว่า ๑๒ ความยาวของจั๊มก็จะเพิ่มขึ้น

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานโดยไม่นำค่า Air Entrainment มาคิด