

各種水理構造物は水路または構造物付近に発生する種々の水理現象によって周期的な変動水圧力を受けて振動することがあるが、一般にこれらの現象は多くの複雑な原因が組合された状態で現われる。水路内の流れの不安定現象を取扱った研究^(1,2)として開水路流れに対するもの暗渠内流れに関するものがあるが、不安定現象の原因は水路の形状によってかなり異なったものとなる。

この研究で取扱っているような放水路に主ゲートと副ゲートが設置されている場合の流れの不安定現象についての研究は少なく、K.Petrikat の模型実験による水圧力の変動の測定結果⁽³⁾のみにとどまっている。

1. 準定常理論による流れの解析

放水路流れの不安定現象を解析するために用いた仮定は次のようなものである。1)流れは1次元流れとする。2)自由表面の圧力は大気圧とする。3)非定常流れの場合と準定常流れの場合とする。

1.1 基礎式 放水路流れの不安定現象を解析するために図1,2のようなモデル化した流れの場を考えた。

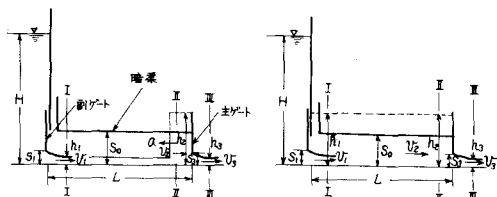


図1 流れの場1 $h_2 > S_0$

図2 流れの場2 $h_2 = h_3$

H = ダム水位
 h_1 = 検査面 I~I の水位 ($= C_0 S_1$)
 h_2 = " II~II の水位
 h_3 = 検査面 III~III の水位 ($= C_0 S_3$)
 S_1 = 副ゲートの開き
 S_3 = 主ゲートの開き
 S_0 = 放水路の高さ
 L = 放水路の長さ
 U_1 = 検査面 I~I の流速
 U_2 = " II~II の流速
 U_3 = 検査面 III~III の流速
 Q = 検査面 II~II の水位の前進速度 (伝播速度)
 C_0 = 縮流係数

まず流れの場1の安定、不安定に関する関係式はBernoulliの式と連続の式とから次のようにして求められる。

$$\text{検査面 I~II について} \quad \text{エネルギー式} \quad \frac{U_1^2}{2g} + h_1 = \frac{U_2^2}{2g} + h_2 + \Delta E \quad (1) \quad \text{連続の式} \quad U_1 h_1 - U_2 S_0 = a(S_0 - h_1) \quad (2)$$

$$\text{検査面 II~III について} \quad \text{エネルギー式} \quad \frac{U_2^2}{2g} + h_2 + \Delta E = \frac{U_3^2}{2g} + h_3 \quad (3) \quad \text{連続の式} \quad U_2 S_0 = U_3 h_3 \quad (4)$$

$$\text{ここに } \Delta E \text{ は跳水による損失を示すもので} \quad \Delta E = (h_2 - h_1) \left[\frac{(h_2 + h_1) \left[\frac{U_2^2 S_0^2}{4h_1 S_0 (a^2 + 2U_1 a + U_1^2)} - \frac{U_1 h_1 - a(S_0 - h_1)}{S_0} \right]^2}{4h_1 S_0 (a^2 + 2U_1 a + U_1^2)} - 1 \right] \quad (5)$$

$a=0$, $S_0=h_2$ とすれば(5)式は $\Delta E = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2}$ となり、開水路流れの跳水による損失が得られる。

$$(2) \sim (5) \text{ 式を用いて } h_2 \text{ に関する式を求めると} \quad h_2^3 + A h_2^2 + B h_2 + C = 0 \quad (6)$$

$$\text{ここに} \quad A = - \left[4 \sqrt{\frac{S_0 h_1 (H - h_1)}{(S_0 - h_1)}} + \frac{8 S_0 h_1}{(S_0 - h_1) \left\{ \left(\frac{S_0}{h_1} \right)^2 - 2 \right\}} \right], \quad B = \left[\frac{4 S_0 h_1 (H - h_1)}{S_0 - h_1} - h_1^2 + \frac{4 S_0 h_1 (H + h_3)}{\left\{ \left(\frac{S_0}{h_3} \right)^2 - 2 \right\} (S_0 - h_1)} \right]$$

$$C = 2 h_1^2 \frac{S_0 h_1 (H - h_1)}{(S_0 - h_1)} \quad \text{が得られ(6)式を解けば } a \neq 0 \text{ に対応する } [h_2]_{a=0} \text{ と算出することができ。}$$

一方前進速度 a は検査面 I~II 間の運動量の式と(2)式から求められ、 $a=0$ に対応する $[h_2]_{a=0}$ は次式で示される。

$$[h_2]_{a=0} = \sqrt{h_1^2 + \frac{4h_1}{S_0} (S_0 - h_1) (H - h_1)} \quad (7)$$

(6)(7)式に任意の h_1 と h_3 とを与えて $[h_2]_{a=0}$ と $[h_2]_{a=0}$ とを算出し、両者から検査面 II~II の水位が前進速度を有するかどうか求められる。流れの場1の流れが安定であるか不安定であるかが判別される。

次に流れの場2の安定、不安定に関する関係式は流れの場1と同様に流れの場2における検査面

I ~ I の流入流量 Q_1 , 検査面 III ~ III の流出流量 Q_3 の流量差 $\Delta Q (= Q_3 - Q_1)$ から得られ, $\Delta Q = 0$ あるいは $\Delta Q \neq 0$ となる条件から流れが安定であるか不安定であるかが求められる。

検査面 I ~ I の単位幅当りの流量 Q_1 は $Q_1 = C_d S_1 \sqrt{2g(H-h_1)}$ (8)

検査面 III ~ III の単位幅当りの流量 Q_3 は $Q_3 = C_d S_3 \sqrt{2g \left\{ 2 \frac{C_d S_1}{S_3} (H-h_1) - \left(\frac{C_d S_1}{S_3} \right)^2 (H-h_1) + h_1 - h_3 \right\}}$ (9)

となる。 Q_3 の誘導に際してはエネルギー損失 ΔE として $\Delta E = \frac{v_1^2}{2g} \left(1 - \frac{C_d S_1}{S_3} \right)^2$ なる急拡大による損失を考慮している。 また (8) ~ (9) 式における h_1 は $[h_2]_{a=0}$ に対応するものである。

1.2 流れの不安定現象の周期 流れの場 1, 2 に対する安定, 不安定は $a=0$, $a \neq 0$ あるいは $\Delta Q=0$, $\Delta Q \neq 0$ によって判別でき, 準定常的な考えから, 流れの場 1 → 流れの場 2 になる周期 T_1 および流れの場 2 → 流れの場 1 になる周期 T_2 は次のようにして求められる。

$T_1 = \frac{L}{a}$, $T_2 = \frac{L(S_2-h_1)}{\Delta Q}$ (10) 従って流れの場 1 → 流れの場 2 → 流れの場 1 になる

不安定現象の振動数 f は $f = \frac{1}{T_1 + T_2}$ (11) で与えられる。

2. 実験結果との比較

$H=0.8^m$, $L=0.3^m$, $S_2=0.12^m$ なる条件で副ゲートが設置されている断面がベルマウス状になった矩形断面のダム放水路で得られた水理実験の結果⁴⁾と同一の条件を (6)(7) 式と (8)(9) 式に代入し, $a=0$, $a \neq 0$ および $\Delta Q=0$, $\Delta Q \neq 0$ なる安定, 不安定領域を算出し, 比較したのが図 3 である。 また (11) 式で求められる不安定現象の振動数と上記の水理実験結果とを比較したのが図 4 である。

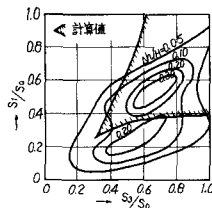


図3 不安定領域

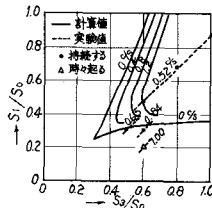


図4 不安定現象の振動数

図 3 の ///// 部分が (6) ~ (9) 式で算出される不安定領域であり, $\Delta h/H$ をパラメータとして等高線で示してあるのが実験値である。 $\Delta h/H$ の値が大きくなっている範囲は不安定現象が激しく起っている部分である。 実験値と準定常理論から算出される範囲とはかなり一致しているよう

であるが, 副ゲートの床き (S_2/S_0) が小さい範囲で実験と計算とは異なった結果となっている。 これは副ゲートが設置されている断面が実験ではベルマウス状になっていたため流れが図 1 に仮定した流れの場になっていなかったことによるものと考えられる。

図 4 に不安定現象の振動数が示してあるが, 実験値と計算値とは差が認められるが, 傾向的な一致は認められるようである。

3. 結 言

ダム放水路流れの不安定現象と準定常理論で解析し, 水理実験の結果と比較したが傾向的にかなり一致が得られた。

- 参考文献 1) 岩佐：用水路水流の不安定限界について 土木学会誌 40-6 530-6
2) W.H. Li & C.C. Patterson：Free Outlets and Self-Priming Action of Culverts Proc. ASCE HY3 June '59
3) K. Petrikat：Vibration Tests on Weirs and Bottom Gates Water Power May '58
4) 吉岡：ダム放水路のゲートの振動に関する水理実験 日造船技報 30巻1号 '69