

貯水池内における洪水伝播の解析とダム放流操作に関する考察

電力中央研究所 秋 元 保
同 丸 岡 計

1 ま え が き

洪水流の研究は古くから行われ、一様河道における洪水波の特性については、一応明らかにされている。また河道の下流端で、ダムによつて堰上げられている場合の貯水池内の洪水伝播の研究も、数多くなされている。これらの解析方法の多くは、貯水池内の水面が常に水平であると仮定し、連続の条件を用いて、貯水池の貯溜効果の検討を行つている。また、電気アナログ計算機によつて貯水池の洪水の本質を明らかにする研究や、実験的考察から基礎方程式の妥当性の検討を行うなど注目すべき成果をあげている。

筆者らは、不定流の一解析法として、さきに特性曲線法にもとづいた不定流の計算方法を提案したが、この計算方法は、流れにおける不連続点の移動を段波現象によつて解析し、それに続く流れを特性曲線法によつて解析する。そして、この二つの流れの解法を組合せて波動を解析する方法である。

この計算方法の応用として、貯水池内の不定流を電子計算機によつて計算し、その結果を模型実験によつて検討した。河道の下流端の境界条件として、ダムの放流条件を打込んだ計算を行い、ダムの放流操作による貯水池の貯溜効果について検討した。

2 基 本 式

流れの不連続点の移動を考えて、段波の基本式から、長方形断面水路の理想段波の伝播速度は次のように示される。

$$\omega = \frac{dx}{dt} = U_1 \pm \sqrt{gH_2 \left(1 + \frac{\Delta H}{2H_1}\right)} \approx U_1 \pm \left(\sqrt{gH_2} + \frac{\Delta H}{4} \sqrt{\frac{g}{H_1}}\right) = U_1 \pm \left(V_2 + \frac{\Delta V}{2}\right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 U_1, H_1 : 段波が到達する前の流速および水深、 H_2 : 到達段波の水深、 $V_1 = \sqrt{gH_1}, V_2 = \sqrt{gH_2}$ 、 $V_2 = V_1 + \Delta V$ である。一方、連続方程式は、

$$\Delta Q = (U_1 + \Delta U)(H_1 + \Delta H) - U_1 H_1 = \omega \Delta H, \quad \therefore \Delta U \cdot H_1 + \Delta H \cdot U_1 + \Delta U \cdot \Delta H = \left[U_1 \pm \left(\sqrt{gH_2} + \frac{\Delta H}{4} \sqrt{\frac{g}{H_1}}\right)\right] \Delta H$$

$V = \sqrt{gH}$, $\Delta V = \frac{\Delta H}{2} \sqrt{\frac{g}{H}}$ の関係を上式に代入すれば、

$$\pm 2 \Delta V \pm \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right) \frac{\Delta V}{2} = \Delta U \text{ となる。} \quad V_1 \pm V_2 \text{ とすれば}$$

$$\Delta U \mp 2 \Delta V = 0 \dots \dots \dots (2) \text{ となる。} (2) \text{ 式を} (1) \text{ 式に代入して}$$

$$\omega = \left(U_1 + \frac{\Delta U}{2}\right) \pm \left(V_1 + \frac{\Delta V}{2}\right) \dots \dots \dots (3) \text{ となる。}$$

上流からの段波に対して、(2)式は負符号、(3)式は正符号をとり、下流からの段波に対して、(2)式は正符号、(3)式は負符号をとる。次に段波の伝播したあとの流れに対して、不定流についての連続方程式および運動方程式は、

$$\frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \left(\frac{n^2 U^2}{R^{4/3}} - i\right) = 0,$$

となる。この両式から、特性曲線方程式を導くと、

$$\left. \begin{aligned} \text{曲線 } \frac{dx}{dt} &= (U \pm V) \text{ の上で} \\ d(U \pm 2V) &= g \left(i - \frac{n^2 U^2}{R^{4/3}}\right) dt \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

となる。(4)式は、上流からの流れに対して正符号、下流からの流れに対して負符号をとる。(2)、(3)および(4)式を使って不定流を計算する。

3 計 算 方 法

図-1に示すような($x-t$)平面で x 軸を分割し、この固定点上の値を求めて行く。 A_1, B_1, B_0 および C_0 点は段波の伝播した軌跡と、 x 軸を分割した A, B および C 断面との交点とする。 A 断面を水路の上流端とすれば、こゝで境界条件を与えらる。 A_1 から B'_1 に向う波の伝播速度は(3)式から、

$$\frac{X_{B'_1} - X_{A_1}}{T_{B'_1} - T_{A_1}} = U_M + V_M \dots \dots \dots (5) \quad \text{となる。}$$

$$\text{こゝに、} U_M = \frac{U_{A_1} + U_{B_0}}{2}, \quad V_M = \frac{V_{A_1} + V_{B_0}}{2} \quad \text{とする。}$$

U, V はそれぞれの断面における波の流速、および波速を示す。(添字(A, B, B', C)は断面の位置を示す)

同様に、 C_0 から B'_1 に向う波の伝播速度は、

$$\frac{X_{B'_1} - X_{C_0}}{T_{B'_1} - T_{C_0}} = U_N - V_N \dots \dots \dots (6) \quad \text{となり、}$$

$$\text{こゝに、} U_N = \frac{U_{B_0} + U_{C_0}}{2}, \quad V_N = \frac{V_{B_0} + V_{C_0}}{2} \quad \text{とする。}$$

(5)(6)式から2つの波の交点 B'_1 の($X_{B'_1}, T_{B'_1}$)が求まる。 A 断面から B' 断面の間で水路勾配(i)と摩擦損失($\frac{n^2 U^2}{R_0^4/8}$)のために波は変化する。この変化した波を($U_{A'_1}, V_{A'_1}$)とすると(4)式から、

$$U_{A'_1} = U_{A_1} + g \left(i_0 - \frac{n^2 U_0^2}{R_0^4/8} \right) \frac{X_{B'_1} - X_{A_1}}{U_0 - V_0}, \quad V_{A'_1} = V_{A_1} \dots \dots \dots (7)$$

$$U_{A_1} V_{A'_1} = U_{A'_1} V_{A_1}, \quad U_{A'_1} + 2V_{A'_1} = U_{A'_1} + 2V_{A_1}$$

$$\text{となる。こゝに } R_0 = \frac{BH_0}{B+2H_0}, \quad H_0 = \frac{V_0^2}{g}, \quad U_0 = \frac{U_{A_1} + U_{A'_1}}{2}, \quad V_0 = \frac{V_{A_1} + V_{A'_1}}{2} \quad \text{とする。}$$

(7)式を解いて($U_{A'_1}, V_{A'_1}$)を求める。また、 C 断面より B' 断面の間で水路勾配と摩擦損失のために変化する波($U_{C'_0}, V_{C'_0}$)は、

$$U_{C'_0} = U_{C_0} + g \left(i_0 - \frac{n^2 U_0^2}{R_0^4/8} \right) \frac{X_{B'_1} - X_{C_0}}{U'_0 - V'_0} \dots \dots \dots (8)$$

$$V_{C'_0} = V_{C_0}, \quad U_{C_0} V_{C'_0} = U_{C'_0} V_{C_0}, \quad U_{C'_0} - 2V_{C'_0} = U_{C'_0} - 2V_{C_0}$$

$$\text{となる。こゝに } R'_0 = \frac{BH'_0}{B+2H'_0}, \quad H'_0 = \frac{V'^2_0}{g}, \quad U'_0 = \frac{U_{C_0} + V_{C'_0}}{2}, \quad V'_0 = \frac{V_{C_0} + V_{C'_0}}{2} \quad \text{とする。}$$

(8)式を解いて($U_{C'_0}, V_{C'_0}$)を求める。 A_0 の波と C_0 の波が衝突してできる新しい波 B'_1 は B' 断面に生じる。(2)式から、

$$U_{B'_1} + 2V_{B'_1} = U_{A'_1} + 2V_{A'_1}, \quad U_{B'_1} - 2V_{B'_1} = U_{C'_0} - 2V_{C'_0} \dots \dots \dots (9)$$

となり、(9)式を解いて B'_1 の値($U_{B'_1}, V_{B'_1}$)を求める。固定断面 B の値は、 A_1, B'_1 の軌跡上に求めて次の内挿計算によつて計算する。

$$\frac{T_{B_1} - T_{A_1}}{T_{B'_1} - T_{A_1}} = \frac{U_{B_1} - U_{A_1}}{U_{B'_1} - U_{A_1}} = \frac{V_{B_1} - V_{A_1}}{V_{B'_1} - V_{A_1}} = \frac{X_B - X_{A_1}}{X_{B'_1} - X_{A_1}} \dots \dots \dots (10)$$

B_1 の値($U_{B_1}, V_{B_1}, T_{B_1}, X_B$)を使って、 A_2 および C_1 の値を順次求めて行く。

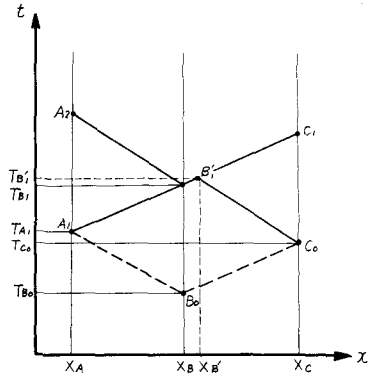


図-1

4 実験方法と結果

実験装置の大略を図-2に示す。実験に用いた水路は全長92.5m、巾1.00m、深さ0.80mの鋼製で勾配1/1000とした。流量は空気圧式の自動制御装置を用い、関数発生装置で図-3に示す洪水波形を与えた。流量の検出は、上下流の堰の越流水深から求めた。実験条件は表-1に示すような下流端の堰高を3種類、洪水波形の周期 T_0 を4種類について行なった。水路内の変動

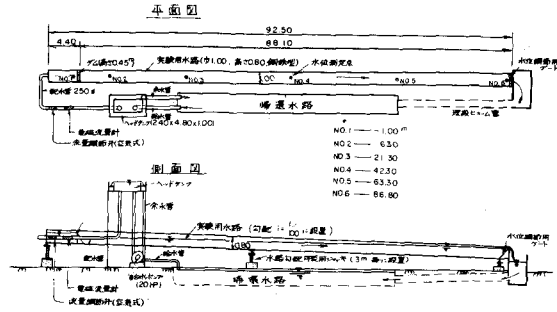


図-2

水位を図-2に示す測点6ヶ所において抵抗線式水位計を使って、ペンオシロに記録した。水路の粗度係数 n を測定すると、 $n=0.0101$ となつた。また下流端の堰の越流係数 $C=1.80$ であつた。実験結果の水位-時間曲線の一例を示すと図-4の実線に示すようになる。図-4(a)は下流端の堰高 H_0 を54cm、洪水波の周期 T を90secとした場合で、図-4

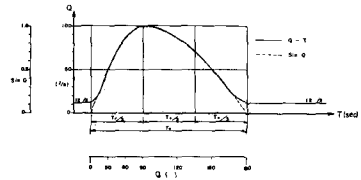


図-3

(b)は堰高 $H_0=54$ cm、 $T=540$ secとした場合の水路内の各点の水位である。

表-1

この実験条件と同じ条件について、電子計算機による不定流計算を行なった結果を図-4(a)(b)に点線で示した。計算結果と実験結果は良く一致し、計算方法の妥当性が実証された。

実験番号	実験条件
N_0	H_0 (m) T_0 (sec)
1-1	0.138 90
1-2	" 180
1-3	" 360
1-4	" 540
2-1	0.359 90
2-2	" 180
2-3	" 360
2-4	" 540
3-1	0.540 90
3-2	" 180
3-3	" 360
3-4	" 540

5 貯水池内の洪水伝播についての考察

図-4(a)(b)から見てわかるように貯水池の上流から与えた流量変動の周期によつて波動の状況が違っている。変動周期の短い場合は、波動が上流から下流に伝播し、下流端で波の一部は越流するが、一部は上流に反射して、水路内を波動が往復するように伝播する。このときの波の伝播速度は、 $\omega = U_M \pm V_M$ となる。しかし上流から与える流量変動の周期が長くなると、貯水池内を波動が往復する。しかし、その水位変動が重なり合つて貯水池内の水面は常に水平となるように見える。図-2に示す測点2,4,6の各点の水位変動および流量変動を同じ座標に示すと図-5のようになる。水位変動が一樣になることがわかる。一方上流端から与えた流量変動は、貯水池内の伝播が遅く、変動も低減する。すなわち、貯水池内の容量遅れによる貯溜効果が十分にあることがわかる。この場合、従来から用いられる貯水面は常に水平であると仮定して導かれる計算方法が適用できる。適用条件は、貯水池の長さ L 、周期 T_0 、水路の平均水深 H_0 とすれば、 $\frac{T_0 \sqrt{gH_0}}{L} = K$ においてこの K が7以上になる必要がある。

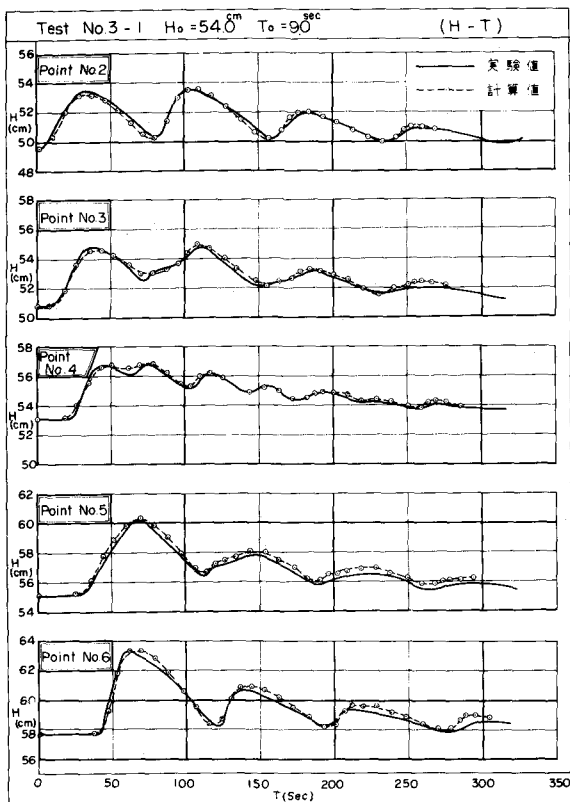


図-4 (a)

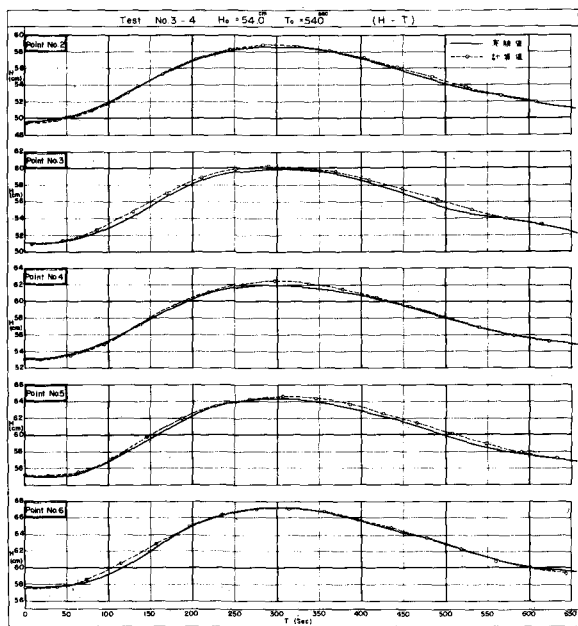


図-4 (b)

6 ダムの放流操作

についての考察

貯水池においては、一般に貯水池内の水位上昇を制限するためにゲート操作を行なうことが多い。貯水池水面が水平であるとの仮定からダムの近傍の水位を一定に保つて、貯水池の流入量と貯水池よりの流出量を常に同量にすると云う考えである。

下流端の水位を一定とした場合の不定流計算を行なつた。下流端の水位 H_0 を57.6 cmとして、周期を54.0 secの場合の計算結果を図-6に示す。貯水池内の水位は一定とはならずダム地点を節とする副振動が生じる。

流量変動は、流量の伝播が速くまた流入量より多い流量が下流に流出することがわかつた。この場合周期が短ければ短いほど流出量が多くなることは十分注意する必要がある。下流の境界条件がダムから越流する場合と水位を一定とした場合を検討する。測点2.4および6の各点の流速 U と波速 V を (U, V) 平面に示すと図-7.8のようになる。

図7はダムから越流する場合で図8はゲート操作により水位一定とした場合である。

下流条件によつてループを画く様子が違つている。下流端で越流する場合は、左回りのループを画き、下流に行くに従つて振巾は小さくなる。水位一定の場合は右回

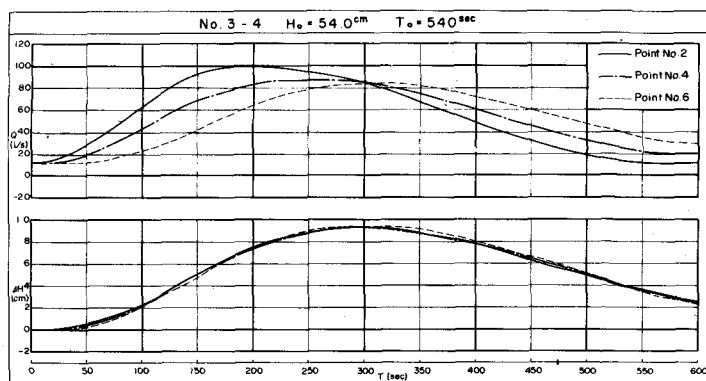
りのループを画いて下流に行くに従つて振巾は大きくなる。

貯水池の洪水調節と、洪水流の下流に及ぼす影響を少なくするためには、ダムのすぐ上流貯水池内の流速と波速の変化の割合が2:1となるように放流操作を行えばよい。

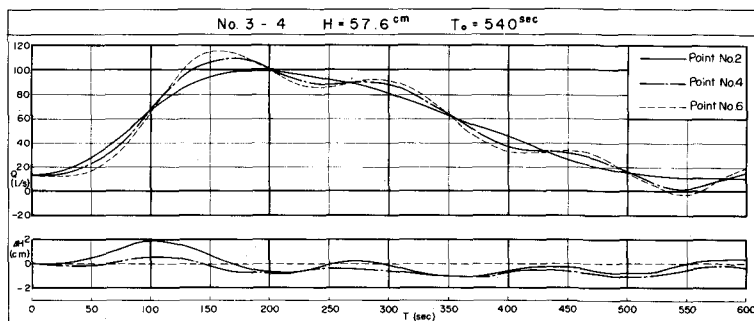
7 結 論

この実験ならびに計算結果を考察し要約すると次のようになる。

1. 開水路の不定流を解析する場合に、不定流の基礎方程式に不連続点の移動を考えた段波現象についての計算式を考慮する必要がある。
2. 段波現象を考慮した特性曲線法による不定流計算法を、貯水池内の洪水伝播の計算に適用し、これを電子計算機によつて計算した結果、実験値とよく一致し、計算方法の妥当性が確認された。
3. この計算結果から貯水池の下流端でダムを越流する場合の洪水伝播の機構を解明した。貯水面が常に水平であると仮定して導びかれる従来の計算方法が適用できるのは、 $\frac{T\sqrt{gH_0}}{L}$ の値が7以上の場合である。
4. ダムの放流をゲート操作によつて制限する場合に、従来は貯水面が水平であると仮定して計算されているが、この場合の水位一定条件では洪水の伝播が速く、流量も流入量より多くなることがわかつた。



図—5



図—6

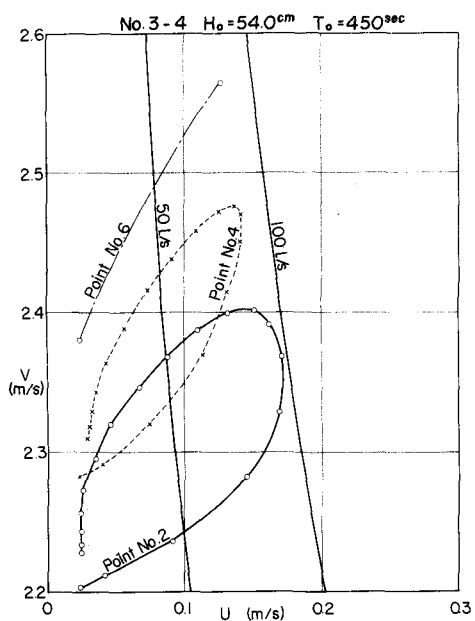


図-7

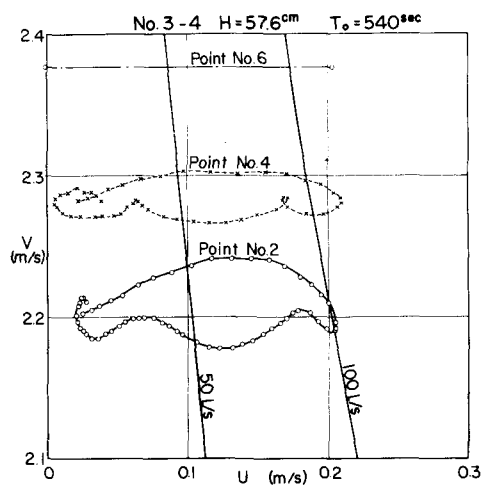


図-8

参 考 文 献

- (1) 石 原 ・ 岸 田 貯水池による洪水調節とその下流部洪水流に及ぼす総合的效果について
(京大防災研究所創立5周年記念論文集 昭和31.11)
- (2) 矢 野 ・ 足 立 貯水池における洪水波伝播に関する実験的研究
(全 上)
- (3) 矢野・芦田・高橋 境界条件による洪水流の変形に関する研究
(第9回水理講演会講演集)
- (4) 秋 元 特性曲線法による不定流の新計算法
(電研技術研究所所報 Vol. 13 No. 5.6)