

断面が緩やかに変化する水路における内部段波

ON INTERNAL SURGES IN A STRATIFIED RESERVOIR WITH GRADUAL CHANGE IN CHANNEL CROSS-SECTION

福岡捷二*・角田 学**・鈴木研司***

By Shoji FUKUOKA, Manabu TSUNODA and Kenji SUZUKI

When the high concentrated turbid water enters into a reservoir and collides at the dam, an internal surge is formed. With the repetition of the surge, the turbid water spreads in an extensive space of reservoir. The understanding of behavior of the surge is necessary to manage properly the water quality in the reservoir. As a reservoir has in general a three-dimensional geometry, the behavior of surge seems to be different from that of the two-dimensional surge. In this study, the experiments of internal surge are carried out by using the three-dimensional reservoir model with gradual change in channel cross-section. It is shown that the motion of surge is considerably affected by a reservoir geometry and by the selective outflow. Theoretical investigation is also made on the height and the advance speed of surge.

1. 序 論

高濃度の濁水が貯水池に大量に流入すると、濁水は貯水池内で広範囲に滞留する¹⁾。この原因の1つは、流入濁水が下流端で反射することにより生じる内部段波にあり、段波の遡上、反射の繰り返しに伴い濁水は広範囲に拡がる。したがって、貯水池水の濁水化の軽減には、内部段波の挙動を明らかにするとともに、流入濁水の選択的放水の可能性を検討する必要がある。

内部段波は、下流端衝突時に濁水のもつ運動量および濁水と周囲水との密度差によって影響される。段波の挙動を明らかにするためには、濁水が貯水池に流入し、下流端に衝突するまでの濁水の運動をあらかじめ把握しておく必要がある。これらの点に関し多くの研究が行われてきており^{2)~4)}、たとえば、著者らの一人は^{4)~6)}、成層化した二次元および三次元貯水池に流入する濁水の運動について実験と理論の両面から検討し、両貯水池での濁水の流動機構を明らかにしている。

内部段波は、ここで対象とする貯水池のほかにも強い風が吹いた後の深い湖、フィヨルド、沿岸域あるいは水門のある感潮河川部などでしばしば生じる。これらの中の代表的なものとして、ネス湖における内部段波の観測がある^{7),8)}。ネス湖は細長く、水深の大きい湖であるため、夏期に十分に発達した温度躍層が形成される。風は湖の長手方向に卓越し、この吹走流により上層水は岸方向に流され、温度躍層は岸で著しく低下する。その結果、重力の復元力が生じ、内部段波が形成される。段波は岸で反射する際に底勾配の影響で流れが片側にかたよるため、段波の形状は横断方向に非対称となる。このように、細長く二次元的な湖であっても、そこで生じる段波は三次元的な挙動を示す。

内部段波の形成要因と同様なものに内部跳水がある。内部跳水に関する研究は、従来より実験的、理論的に数多く行われてきた^{9)~12)}。しかし、内部跳水の研究は二次元の場合が大部分である。現実の貯水池は一般に複雑な平面・縦断形状を有し、そこでの段波の挙動は二次元的な段波の場合と異なるため、二次元内部跳水の知識をそのまま内部段波に適用できない場合も多い。そのため、断面の変化する貯水池での内部段波と二次元的な内部段波を比較、検討し、両者の相違点を明らかにすることが必要である。本研究では、一様断面および漸変断面水路

* 正会員 工博 Ph.D. 建設省土木研究所河川研究室長 (〒305 茨城県筑波郡豊里町大字旭1番地、研究当時東京工業大学助教授工学部土木工学科)

** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)

*** 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科 (同上)

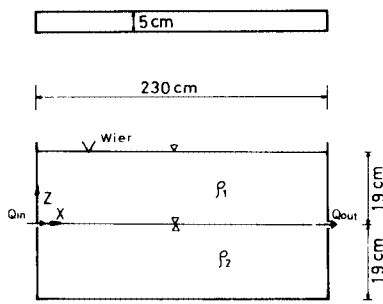
で形成される内部段波の挙動、段波内の流動について実験的に検討し、水路の幾何形状が段波の挙動に及ぼす影響を明らかにする。また、内部段波に伴う貯水池水の濁水化を軽減する手段として、濁水の選択的な放水に伴う段波の変形について検討する。最後に、運動量方程式と連続方程式を用いて段波の波高および速度について解析を行い、実験結果の説明を試みる。なお、本研究の一部は第27回水理講演会論文集¹³⁾に発表済みであるが、本研究はさらに漸変断面水路での内部段波の実験、解析および考察を加えたものである。

2. 実験方法および実験条件

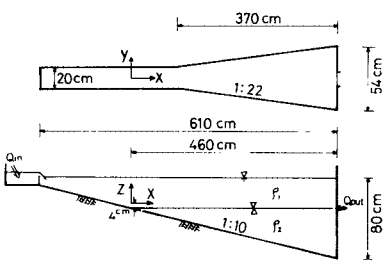
実験に用いた貯水池模型は、図-1に示すような断面をもつ二次元水路（水路A）および断面が緩やかに変化する水路（水路B）である。水路Aの上流端と下流端に幅5cm、高さ1cmのスリット型の流入口および放水口がある。水路Bの放水口の形状は、幅10cm、高さ1.5cmのスリット型である。放水口の位置は水路Aと同様に下流端の躍層上にある。

成層化した水路に上流から密度 ρ_n の濁水が流入すると、濁水は躍層上を侵入し、下流端で内部段波となって遡上する。放水を伴う段波の実験では、濁水が躍層に達したときに放水を開始する。

実験条件を表-1に示す。Run No. A, Bはそれぞれ図-1の水路A、水路Bを用いた実験に対応する。Run A-1~Run A-3は放水に伴う段波の変形、挙動を調べる



(a) 一様断面水路（水路A）



(b) 漸変断面水路（水路B）

図-1 実験水路

ことを目的としており、放水量以外の水理条件は3つのRunともほぼ同一である。Run B-1とRun B-2とはいずれも放水がない場合であるが、流入量が異なる。また、Run B-2とRun B-3は、段波の挙動に及ぼす放水の効果と比較、検討することを目的としている。

表-1の水理条件の中には、たとえば $\epsilon_0 = 0.0273 \sim 0.0300$ のように同一のRun No. で ϵ_0 の値に幅が存在している。これは、段波の遡上に伴う流速分布、密度分布等の変化を短時間で測定するのに複数回の実験が必要となるために生じたものである。表-1に示した変動幅では水路内の現象がほとんど同一になることが確かめられている。Run B-3は、 Q_{in} よりも Q_{out} の方が大きい、これは Q_{in} の濁水量が水路に流入すると周囲水と混入し、進入濁水の流量が数倍にもなるためである。

座標原点は、水路Aでは躍層上、水路Bでは躍層より4cm上方の位置にとる。流下方向に x 軸をとり、 z 軸は鉛直上向きを正とする。これらの座標系は図-1に記されている。

3. 漸変断面水路における内部段波の流動特性

最初に、比較のため一様断面水路での内部段波¹³⁾の流動特性を簡単に述べる。上層と下層の中間の密度で流入した濁水は、下流端で反射すると上下対称で横断方向に一樣な形状をもつ段波となり、ほぼ一定の波高、速度で遡上する。このとき、段波内部の流速は平均的に零であり、流れの運動エネルギーは段波の位置エネルギーに変換されている。放水がある場合には、流入濁水は放水がない場合のように段波との間で完全な跳水を起こさず、流入濁水の一部が段波の位置エネルギーに変換される。放水のために段波の波高、速度は減少するが、ほぼ一定速度で遡上する。このように、一様断面水路での段波は

表-1 実験条件

Run No.	Reservoir		Inflow *		Outflow	
	ρ_1 g/cm ³ ($\times 10^3$ kg/m ³)	ϵ_0	ρ_{in} g/cm ³ ($\times 10^3$ kg/m ³)	ϵ_d	Q_{in} ml/s ($\times 10^{-8}$ m ³ /s)	Q_{out} ml/s ($\times 10^{-8}$ m ³ /s)
A-1	0.9978 ~0.9980	0.0273 ~0.0300	1.0120 ~1.0130	0.0142 ~0.0150	100	0
A-2	0.9970	0.0300	1.0130	0.0150	100	30
A-3	0.9970 ~0.9987	0.0283 ~0.0318	1.0120 ~1.0140	1.0150 ~1.0153	100	100
B-1	0.9987 ~0.9973	0.0087 ~0.0091	1.0130 ~1.0149	0.0165 ~0.0178	200	0
B-2	0.9998 ~0.9999	0.0052 ~0.0061	1.0120 ~1.0130	0.0121 ~0.0132	100	0
B-3	0.9988	0.0049	1.0109	0.0120	100	300

$$\epsilon_0 = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1, \quad \epsilon_d = (\rho_n - \rho_1) / \rho_1$$

* 流入に関する諸量 ($\rho_n, \epsilon_d, Q_{in}$) はすべて流入前の値である。

二次元的な挙動を示す。これに対し、漸変断面水路では、段波は以下に示すように三次元的な挙動をとる。

(1) 段波の形状と速度

水路Bの漸拡部3.7mの区間に側面および上面から幅5cmのスリット光源をあて、段波の平面形状と縦断形状を写真撮影し、解析した。図-2(a)は $z=7\text{cm}$ 地点の平面形状を示す。図-2(b)は(a)の水路中央部のA-A'断面と側壁から5cm離れたB-B'断面の段波の縦断形状を示す。時間 t は流入濁水が下流端($x=460\text{cm}$)に衝突した瞬間からとられている。図-3、図-4はそれぞれ段波の波高、速度の変化を示す。これらより、漸変断面水路における段波は次の特徴をもつ。

下流端で反射した直後は、段波の波高は中央部と側壁

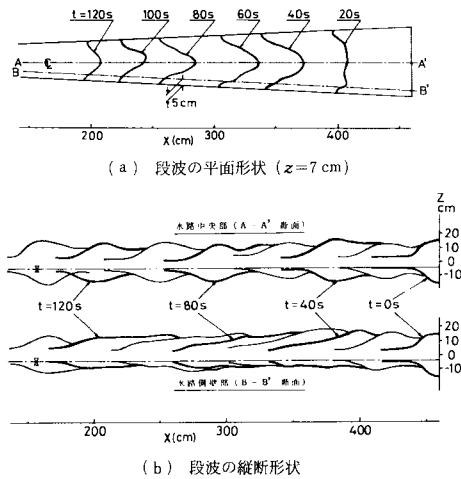


図-2 段波の形状変化 (Run B-1)

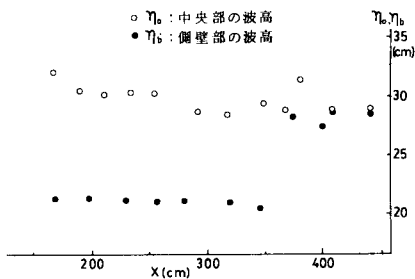


図-3 段波波高の距離的变化 (Run B-1)

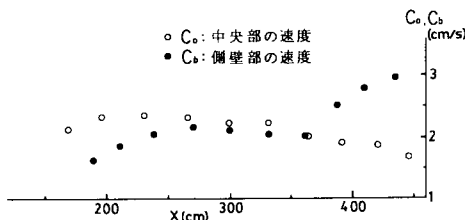


図-4 段波速度の距離的变化 (Run B-1)

部でほぼ同じ大きさを持ち、速度は中央部よりも側壁部の方が大きい。このため、段波は側壁側が突き出した平面形状をとる。その後、側壁部の速度は減じ、側壁部の波高も小さくなる。段波の速度は両断面とも $x=210\text{cm}$ 地点まではほぼ同じ割合で増加し、波高も徐々に増加する。これは水路幅がしだいに狭くなるためである。段波が $x=210\text{cm}$ 地点を過ぎる頃から、段波の速度は減じる。特に、側壁部の減少の割合は大きい。このため、側壁側が突出した平面形状はしだいに弱まっていく。

(2) 段波の遡上に伴う流速分布の変化

図-5は、段波内の流速が最大となる鉛直位置($z=0$)

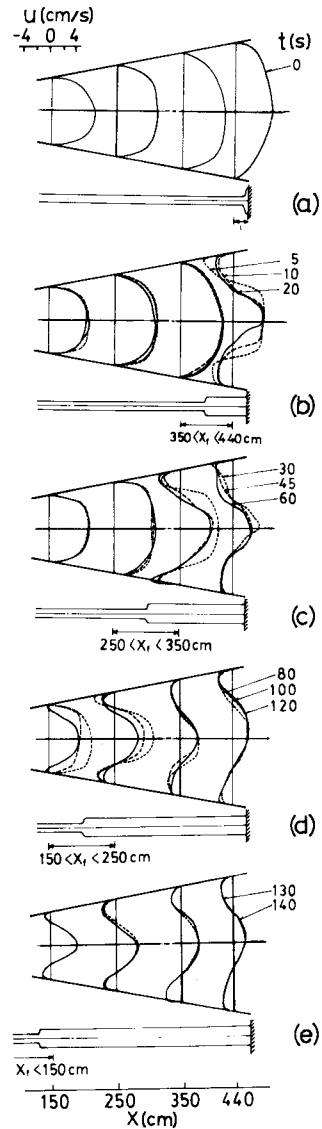


図-5 段波の遡上に伴う段波内の流速分布の変化 (Run B-1, $z=0\text{cm}$)

cm)での横断面内の流速分布である。(a)は流入濁水が下流端に達したとき,(b),(c),(d),(e)は段波フロントの位置 x_f がそれぞれ図に示す区間にあるときの流速分布である。流入水の中央部流速が側壁部のそれよりも著しく大きいため、濁水が下流端に衝突すると横断方向に圧力差が生じ、側壁側に向かう流れが生じる。側壁の間隔が上流方向に狭まっているため、側壁側に達した濁水は側壁沿いに逆流する。このような中央部の順流、側壁部の逆流は流入濁水が続く限り持続し、段波の遡上に伴い(b),(c),(d),(e)のように水路全体に生じるようになる。このように、①流入濁水の流速が中央部と側壁部で著しく異なること、②側壁間隔が上流方向に狭まっていることのため、段波内の流れに順流と逆流が存在する。(e)の $x=150$ cm地点の流速分布をみると、段波通過後であるにもかかわらず、側壁部に生じる逆流は小さく、側壁部の伝播速度も減じている。このため、段波の平面形状は三次元的なものから二次元的なものに変化していく。

次に、水深方向の流速分布について述べる。図-6は $x=370$ cm地点の段波内の等流速線図である。実線が順流、破線が逆流、数字は x 方向の流速(cm/s)を示す。段波フロントが $x=300$ cmから200 cmまで移動している間に測定されたものである。同時測定が困難なため等流速線はややゆがんだものとなっている。しかし、中央部の順流、側壁部の逆流は全水深にわたり生じていることがわかる。

段波前面、段波内部の横断流速分布を、それぞれの断面での最大流速および水路幅で無次元化して示したものが図-7の(a),(b)である。図中の実線は次節の解析に用いられる。

(3) 段波の遡上による密度分布の変化

図-8は段波が通過する直前、直後の等密度線図である。段波通過により濁水層は広がるが、段波通過前後でいずれも断面内の等密度線は全体的にはほぼ平行で、横断方向に一様な密度場が形成されている。しかし、水路中央付近で等密度線はわずかに上昇している。この部分では流れは順流であり、高濃度の濁水がたえず流入しており、特に段波通過後の $z=5$ cm付近では流速は最大となる(図-6参照)ため、等密度線の上昇勾配が大きくなったものと考えられる。

(4) 段波の形成過程

以上のことから、段波の形成過程は図-9(a)のように模式的に示される。図中の矢印は流れの方向を示す。流入濁水が下流端に衝突すると、水路中央部の流速は側壁部よりも大きいため濁水の下流端ではいあがり形状は中央部が突出した凸型の形状となる(1)。そのため、下流端では濁水内の圧力は横断方向に不均衡になり、前

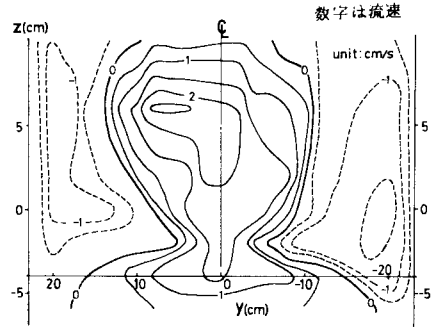
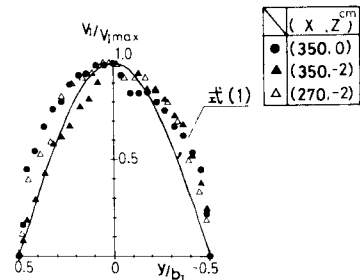
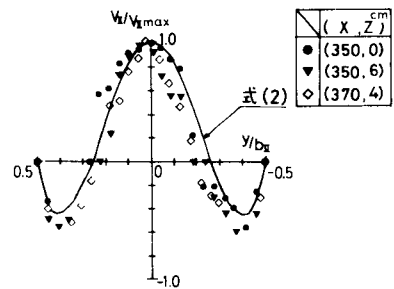


図-6 段波内の等流速線図 (Run B-2, $x=370$ cm)

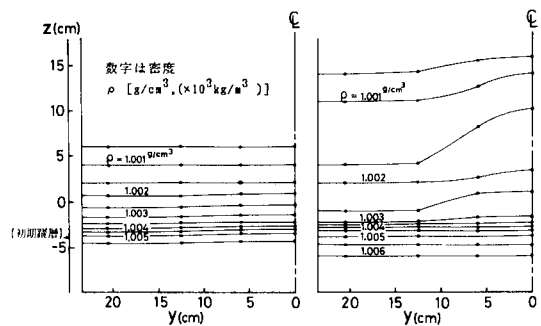


(a) 段波前面



(b) 段波内部

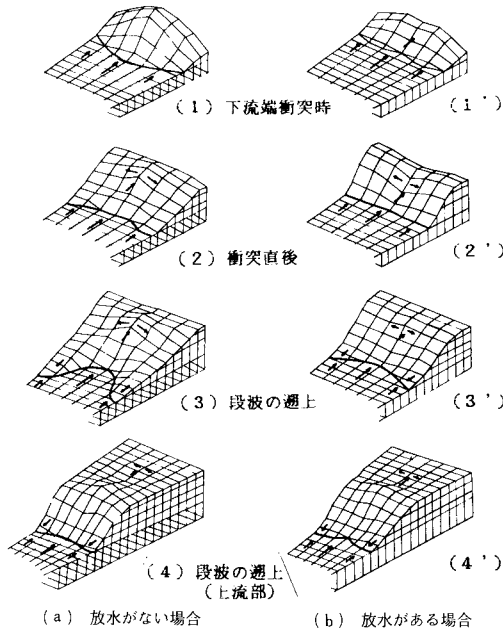
図-7 水平面内の無次元流速分布 (Run B-2)



(a) 段波通過前

(b) 段波通過後

図-8 段波通過前後の等密度線図 (Run B-2, $x=370$ cm)



図—9 段波の形成過程

この逆流は段波側壁部の伝播速度を大きくし、段波は側壁側で著しく突出した平面形状をとる(3). 上流部では、段波側壁部の速度は小さくなるため、段波の平面形状はしだいに一様化していく(4).

(5) 段波に及ばず放水の効果

下流端で放水がある場合の段波の形状、速度、段波内の流速を測定し、放水がない場合の段波と比較し、検討する。図—9(b)の(1')から(4')は、(a)の(1)から(4)と対応する。濁水の一部は放水されるため、下流端でのはいあがり形状は中央部がくぼみ、側壁部が突出した凹型の形状になる(1')。この形状が明確に現われているのは、放水口の幅が下流端幅の2割程度であり、中央部の濁水が集中的に放水されること、および水路内を進入する濁水の流量と放水量とが同程度であり、放水量が十分大きいことによる。放水口の大きさは流入濁水の幅に比べて小さいため、放水されない濁水が存在する。この濁水は、下流端衝突後、放水がない場合と同様の過程を経て、側壁に沿って逆流する。しかし、放水により段波の波高、速度は小さくなり、図—10(a), (b)の比較からわかるように躍層付近の順流の領域は拡がり、逆流域および逆流速の大きさは減少する。このため、段波は放水がない場合のように側壁が著しく突出した平面形状を示さない(2', 3')。段波がさらに上流へすすむと、放水がない場合と同様に二次元的な段波へと近づいていく(4')

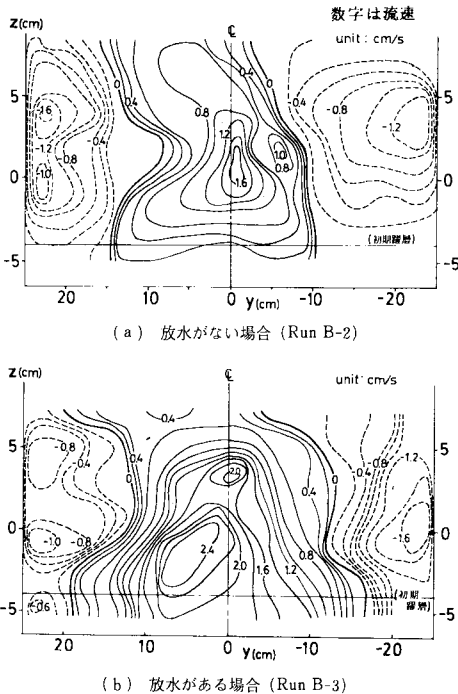
4. 漸変断面水路における内部段波の解析

漸変断面水路では、段波内の流れは、中央部で順流、側壁部で逆流となり、一樣断面水路での段波と比べて複雑になる。このような場での段波の波高、速度など流下方向の変化を把握するために、運動量方程式と連続方程式を用いて解析を行い、実験結果の説明を試みる。あわせて、放水がある場合と放水がない場合の二次元段波の実験結果の解析を行う。

(1) 一次元解析を行う際の仮定

断面の流下方向変化は緩やかであるため、段波は一次元的な運動をすとみなせる。段波の前後で検査面I, IIをとり、段波とともに移動する座標系を用いる。実験結果を考慮し、以下の仮定を行う。

- ① 段波の形状は、図—11(b)のように横断方向に一樣とし、上部波高 h_u 、下部波高 h_i 、速度 c は x のみの関数とする。
- ② 圧力は静水圧分布である。
- ③ 境界面から段波内への周囲水の混入は無視し、段波内部の密度分布は x 方向には一樣、 z 方向には直線分布である。
- ④ 段波の界面抵抗、側壁から受ける摩擦抵抗は運動



図—10 段波内の等流速線図 ($x=430$ cm)

述のように側壁に向かう流れが生じ、濁水層の水深は横断方向に一樣になる(2)。このとき、側壁部での段波の全エネルギーは側壁部の流入濁水の全エネルギーよりも十分大きくなるため、濁水は側壁に沿って逆流する。

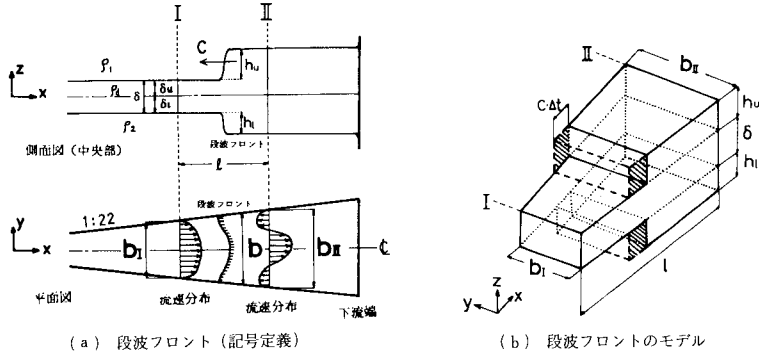


図-11 漸変断面水路における内部段波

量変化，圧力変化に比し小さく無視する。

⑤ 検査面 I，II の流速分布は相似形を保つ。

いま，それぞれの断面の流速分布形は図-7(a)，(b)より次のようにおく。

$$\frac{v_1(x, y, z)}{v_{1max}(x, z)} = \cos\left(\pi \frac{y}{b_1}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{v_n(x, y, z)}{v_{nmax}(x, z)} = a_1 \cos\left(\pi \frac{y}{2 b_{11}}\right) + a_2 \cos\left(\pi \frac{y}{b_n}\right) + a_3 \cos\left(\frac{3\pi}{2} \frac{y}{b_n}\right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに， $v_1(x, y, z)$ ， $v_n(x, y, z)$ は段波前面，段波内部の流速分布， $v_{1max}(x, z)$ ， $v_{nmax}(x, z)$ は対応する断面の最大流速， b_1 ， b_n はそれぞれの流路幅， a_1 ， a_2 ， a_3 は実測流速分布より与えられる定数である。最大流速 $v_{1max}(x, z)$ ， $v_{nmax}(x, z)$ を実験結果に基づき次式で与える。

$$v_{1max}(x, z) = \begin{cases} a(x) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{\delta_u}\right) : 0 \leq z \leq \delta_u \\ a(x) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{\delta_l}\right) : -\delta_l \leq z \leq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$v_{nmax}(x, z) = \begin{cases} \beta(x) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{\delta_u + h_u}\right) : 0 \leq z \leq \delta_u + h_u \\ \beta(x) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{\delta_l + h_l}\right) : -\delta_l - h_l \leq z \leq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

ここに， $a(x)$ ， $\beta(x)$ は最大流速の x 方向変化を表わす関数， δ_u ， δ_l は段波前面の上部および下部の濁水厚である。

ここでは，段波前面，段波内部の x 方向流速 v_1 ， v_n を実験結果より式 (1)，(2) のように与えたが，これらの式が流れの基礎式をどの程度満足しているかを検討する必要がある。実験の制約上， x 方向流速のみしか測定されていないので， v_1 ， v_n の実測値を与え，二次元の連続方程式から y 方向の流速 v_y を算定し，その大きさを検討した。その結果，段波内部の順流域と逆流域の

境界付近を除き，どの地点でも v_y は v_1 ， v_n の 2 割程度の大きさである。したがって， x 方向流速に比して v_y は無視できるので，式 (1)，(2) を以降の解析に用いることにする。

(2) 基本方程式

x 方向の運動量方程式は

$$\iint_{\Pi} \rho_d (v_n + c)^2 dy dz - \iint_{\Gamma} \rho_d (v_1 + c)^2 dy dz = P_x + F_x \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここに， P_x ， F_x は I 断面と II 断面に作用する圧力差および側壁から受ける力の総和の x 成分である。 z 方向の力はつり合っていると考え，

$$\int \rho_d g dz = (\rho_1 h_u + \rho_2 h_l) g \frac{\delta + h_u + h_l}{h_u + h_l} \dots\dots\dots (6)$$

を得る。連続方程式は近似的に次式で表わすことができる。

$$\iint_{\Gamma} v_1 dy dz - \iint_{\Pi} v_n dy dz = c \cdot (h_u + h_l) \frac{b_1 + b_n}{2} \dots\dots\dots (7)$$

実験から得られた δ ， v_1 ， v_n ， ρ_d を与え，式 (5)，(6)，(7) より $c(x)$ ， $h_u(x)$ ， $h_l(x)$ を求める。ここで，式 (1) で表わされる v_1 の無次元流速分布は，図-7(a) の実線で表わされ，ほぼ実測値を説明することがわかる。また，流路沿いの数断面で測定された段波前面の流速分布から，断面 I では流量はほぼ一定であることが確かめられている。この条件と流入濁水の厚さ δ が流下方向に不変であることを考慮すると，式 (3) から $a(x)$ は次式で与えられる。

$$a(x) = \frac{\alpha_{x1} \left\{ b_0 + \frac{b_n - b_1}{l} (x - 90) \right\}}{b_0 + \frac{b_n - b_1}{l} (x - 90)} \dots\dots\dots (8)$$

ここに， α_{x1} は $x = x_1$ での断面最大流速値 (cm/s)， b_0 は漸拡水路の上流端の幅 (=20 cm) であり，式 (8) 中の数値 90 はその上流端が原点より 90 cm 下流にあることを示す。

また、式(2)で表わされる v_n の無次元流速分布は、図-7(b)の実線で与えられる。ここに、式(2)の a_1 から a_3 までの値は、 $a_1=6.5, a_2=-12, a_3=6.5$ である。これらの値は、①水路中心線上で最大流速をとる、②壁面での流速は零である、③順流から逆流へ変化する点は $y/b_n=0.25$ の位置とするの3つの条件より決められた。段波内の流れは流路幅が変化するため縦・横断方向にかなり複雑に変化する。そのため、断面IIの流量は波高、水路幅の関数であると予想されるが、ここでは、最大流速は主に水路幅の変化に支配されていると考え、式(4)の $\beta(x)$ を $\alpha(x)$ と同じ形で与えることにする。

$$\beta(x) = \frac{\beta_{x_2} \left\{ b_0 + \frac{b_n - b_1}{l} (x_2 - 90) \right\}}{b_0 + \frac{b_n - b_1}{l} (x - 90)} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 β_{x_2} は $x=x_2$ での断面最大流速値(cm/s)である。この $\beta(x)$ と先に述べた a_1 から a_3 までの値を用いて段波内の流量を計算したところ、実測の流速分布から求めた流量とほぼ一致する。

図-12は最大流速 V_{max} 、 V_{nmax} の鉛直方向の実測値と式(3)、(4)による計算値の比較である。実線は $x_1=x_2=370$ cm での α_{370} 、 β_{370} 、 h_u 、 h_l 、 δ の実測値を与え、式(3)、(4)を用いて計算したものである。図の破線は α_{270} 、 β_{270} を与え、式(8)、(9)より $x=270$ cm での $\alpha(270)$ 、 $\beta(270)$ を求め、式(3)、(4)を用いて $x=270$ cm での V_{max} 、 V_{nmax} を計算したものである。実測値と計算値の対応はよいと判断される。

計算には $l=30$ cm を与えたが、実験条件のもとでは l の選び方 ($10 \text{ cm} < l < 50 \text{ cm}$) は計算値にほとんど影響を与えないことが確かめられている。

(3) 計算結果

段波の波高、速度の計算結果と実験値の比較を図-13に示す。段波の平面形状は二次元的ではないので、実験値として段波中央部の速度 c_0 、波高 η_0 および側壁部の波高 η_b が示されている。計算値は実験値を必ずしも精度よく説明しているとはいえない。しかし、漸変断面水路の段波内の流動はきわめて複雑であり、解析では段波

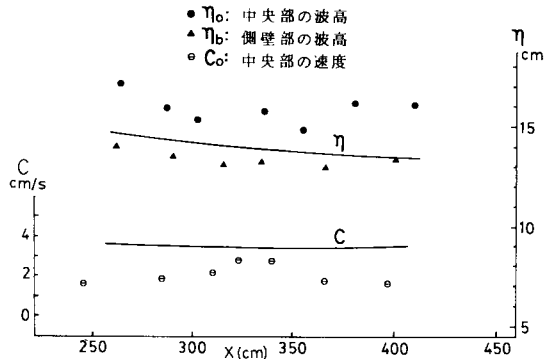


図-13 段波の波高 η 、速度 c の実測値と計算値の比較 (Run B-2, $\eta = h_u + h_l + \delta$)

内の流動をかなり単純化していることを考慮すると、計算結果は現象の大略把握に成功しているといえよう。

(4) 一樣断面水路における内部段波への適用

一樣断面水路の段波に以上の解析を適用する。段波内部は逆流が存在しないため、解析は容易になる。段波の前面および内部の流速分布形として図-14の実線を用いる。○印は実測値である¹³⁾。これらの分布形と式(5)、(6)、(7)を用いて解析を行った結果を図-15に示す。速度および波高(上部波高)の計算値は放水がない場合、ある場合のいずれも実測値をよく説明する。これは、段波内の流れが漸変断面水路での段波のように複雑でなく、段波の挙動がさきに述べた一次元の運動量方程式、

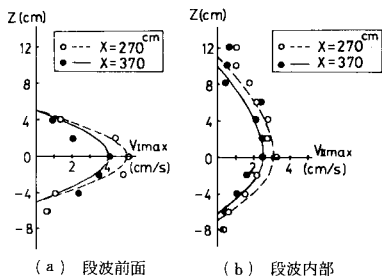
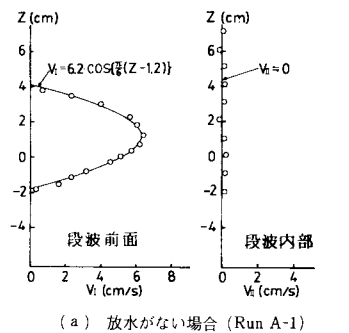
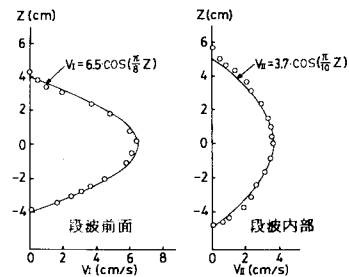


図-12 最大流速の鉛直方向変化 (Run B-2)

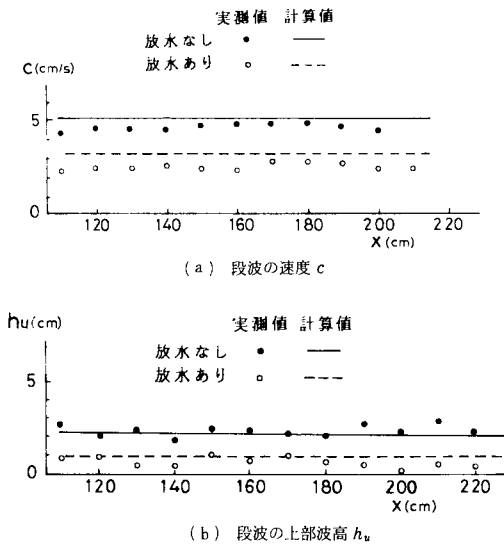


(a) 放水がない場合 (Run A-1)



(b) 放水がある場合 (Run A-3)

図-14 一樣断面水路における内部段波の流速分布



図一五 一様断面水路における内部段波の波高，速度の実測値と計算値の比較 (Run A-1, A-3)

連続方程式で十分記述できるためである。

ここでは，一次元解析が適用できるような幅が緩やかに変化する水路内の段波を扱ったが，貯水池形状の拡がり率が大きい場合，貯水池形状が非対称な場合およびV字谷の形状をもつ場合には二次元的な解析法の検討が必要である。

5. 結 論

内部段波の挙動および段波内の流動に及ぼす貯水池形状の影響を明らかにするため，一様断面および漸変断面水路で実験を行い，その結果の解析を試みた。

主要な結論を以下にまとめる。

(1) 流下方向に断面が漸拡する水路に流入する濁水の流速は，水路中央部の方が側壁部よりも著しく大きい。そのため，濁水が下流端に衝突すると，側壁側へ向かう流れが生じ，側壁沿いを逆流する。この水路中央部の順流，側壁部の逆流は濁水が入る限り，濁水層の全域にわたり連続して起こる。段波の平面形状は側壁側が突き出した凹形となり，横断形状は中央部の方が側壁部よりも高くなる。

(2) 放水が行われると，段波の波高，速度は小さくなり，段波内の順流の領域は拡がり，逆流域は狭くなる。このため，段波の平面形状は放水がない場合のように側

壁側が著しく突出した平面形状とはならない。

(3) 一次元運動量方程式，連続方程式に基づき，実測流速分布を用いて漸変断面水路での段波の波高，速度の流下距離変化の解析を行った。計算値は実測値を説明する。

(4) 一様断面水路での段波について同様の解析を行ったところ，放水の有無にかかわらず段波の波高および速度の計算値は実測値をよく説明する。

謝 辞：本研究を進めるにあたり，大都工業株式会社 稲葉清美氏（当時，東京工業大学工学部技官）の協力を得た。ここに，心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 安芸周一：貯水池濁水現象，水工学に関する夏期研修会講義集 A，土木学会，pp.1-1~1-26，1975。
- 2) 芦田和男・江頭進治・中川 一：傾斜路路上における泥水塊の挙動に関する研究，京大防災研年報第 24 号，B-2，pp.265~282，1981。
- 3) 平野宗夫・羽田野袿義：密度流先端部の流動特性について，土木学会論文報告集，第 314 号，pp.67~73，1981。
- 4) 福岡捷二・福嶋祐介・村田和夫・荒井 健：成層化した二次元貯水池に流入する密度流の実験的研究，土木学会論文報告集，第 293 号，pp.65~77，1980。
- 5) 福岡捷二・福嶋祐介：成層化した二次元貯水池中で分岐する密度流の解析的研究，土木学会論文報告集，第 294 号，pp.73~84，1980。
- 6) 福岡捷二・福嶋祐介・宮本高行：三次元貯水池に流入する濁水の流動機構，東京工業大学土木工学科研究報告，No.26，pp.67~103，1980。
- 7) Thorpe, S. A., Hall, A. and Crofts, I.: The internal surge in Loch Ness, Nature, Vol. 237, pp.96~98, 1972.
- 8) Thorpe, S. A.: Near-resonant forcing in a shallow two-layer fluid: A model for the internal surge in Loch Ness?, J. F. M., Vol. 63, Part 3, pp.509~527, 1974.
- 9) Yih, C. S. and Guha, C. R.: Hydraulic jump in a fluid system of two layers, Tellus, Vol. 7, pp.358~366, 1955.
- 10) 岩崎敏夫：密度流の諸問題，水工学に関する夏期研修会講義集 B，土木学会，pp.16-1~16-37，1966。
- 11) 早川典生・Stefan, H.: 混合を伴う内部ジャンプについて，第 17 回水理講演会講演集，pp.44~49，1973。
- 12) 室田 明・中辻啓二・中村圭二郎：内部跳水の流動形態一とくに反転流域の特性，第 28 回水理講演会論文集，pp.321~326，1984。
- 13) 福岡捷二・角田 学・稲葉清美：二次元および三次元貯水池における内部段波，第 27 回水理講演会論文集，pp.109~116，1983。

(1984.12.10・受付)