

## ◆ ダム分野における新技術特集 ◆

## 土砂放流を考慮した減勢工の設計手法

桜井 力\* 柏井条介\*\*

## 1. はじめに

ダムの貯水池計画では100年間に堆砂するであろう容量を予め堆砂容量として確保しているのが通例である。一方、利水容量を持たない洪水調節専用ダムでは、図-1に示すように放流管やオリフィスなどの常用洪水吐き(以下、単に放流管という)を下方に設けることによって洪水時に積極的な排砂を行い、堆砂容量を減じ、貯水池空間を有効利用することが可能である。最近のダムでは貯水池の堆砂対策として専用の排砂設備を設置する例が見られるようになってきたが、同様の機能を洪水調節専用ダムに発揮させるためには、放流管・減勢工の一連の放流設備は、単に減勢効果および放流能力を満足するだけでなく、排砂設備としての機能が要求される。また、放流設備の設計に際して必要となる磨耗に関する負荷量を知るために、洪水時において貯水池から排出される土砂量や粒度などを精度よく予測することも必要となる。本報告は、常用洪水吐きを通じて貯水池の土砂を下流に排出する場合の減勢工の設計手法について減勢工における土砂の挙動を支配すると考えられる減勢池内の3次元的な流速分布に着目し、水理模型実験による検討結果をとりまとめたものである。

## 2. 基本的な考え方

## 2.1 土砂の排出と減勢工に求められる水理特性

図-2に洪水調節専用ダムにおける土砂放流の考え方を示した。ダムにおいて常用洪水吐きを用いて洪水調節を行っ

ている場合、大流量時は水位が高いため、放流管上流における貯水池内の流速は小さく、ウォッシュロード成分等を除いては土砂の流出は少ないと考えられる。しかし、図に示すように洪水の初期、末期あるいは小洪水時など流量が小さく、水位が低い場合には貯水池内の流速は大きくなり、堆積した砂を侵食し、放流管を通じて減勢池に土砂を流入させることとなる。減勢池内では流速が減少するため、これらの土砂は減勢池内に堆積する。

次の洪水などにより流量が増加し、貯水位が再び上昇すると減勢池内の流速は大きくなり、減勢池内に堆積した土砂は再び移動を開始する。

この際の減勢工内の流況が土砂移動を左右することになる。減勢工内の流れが断面方向に一樣で下流方向へ向いていれば、土砂は副ダムを越流する流れによって下流へ運搬される。しかし、減勢工内に平面的な渦が生じていると、土砂は滞留し、流れとともに回転移動することとなり、減勢工床

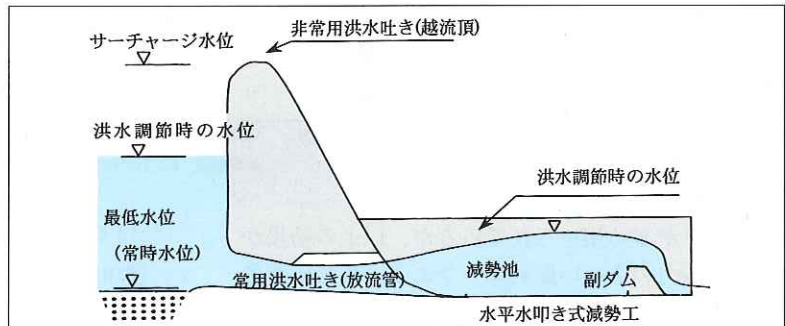


図-1 洪水調節専用ダムの放流設備

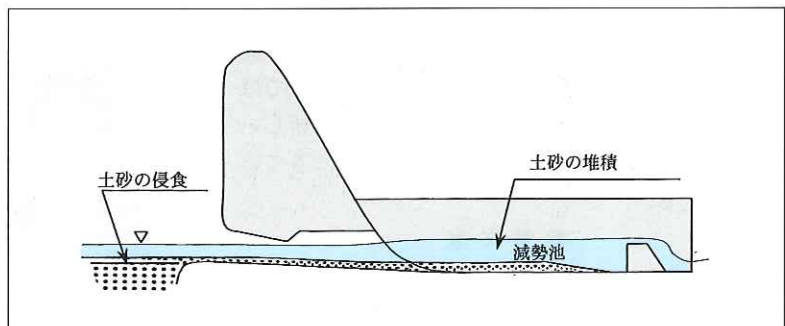


図-2 洪水調節専用ダムにおける排砂

版および側壁の摩耗を著しく進行させることになる。放流管による排砂を行う以上、土砂の流下に伴う磨耗は避けられないが、減勢工において平面的な渦を生じするような流況を生じさせないことが磨耗を最小限に押さえるために必要である。

## 2.2 減勢工の形式

水平水叩き上に跳水を発生させる方式としては、排砂も考慮して、シルやバップル・ピア等の角柱状の不連続な補助構造物によることも考えられるが、これらはその構造上、高速流下においてキャビテーション損傷を生じる可能性がある。また、当然のことながら土砂の流下に伴う磨耗が避けられない。これらの現象によって補助構造物に損傷が生じた場合には、流況の著しい悪化を招く恐れがある。

それに対して、最近採用例が多い副ダム式の減勢工は、下流水深を確保することによって安定した跳水を生じさせる構造であり、水叩き長が確保されれば、副ダム自体が高速流にさらされることはなく、構造がマッシブであるため多少の損傷では著しい機能低下を引き起こすことはない。また、対象流量を超える流量に対してもある程度の減勢効果を持っている。もちろんこうした副ダム式減勢工の優位性は、耐磨耗性以外是一般のダムに対しても当てはまるものであり、最近のダム洪水吐き減勢工の設計では、ほとんどの場合副ダム形式が採用されている。今回の土砂放流を考慮した減勢工の検討においても副ダム形式を前提として議論を進めるものとする。

なお、洪水調節方式はゲートを有しない自然調節方式とする。

## 2.3 洪水調節専用ダム減勢工の特性

減勢工の設計においては、水叩き始端に跳水の始端が一致することが理想的であるが、そのためには減勢工始端部において水脈が減勢工幅まで拡幅している必要がある。通常、コンクリートダムでは下流面を流下中に水脈の拡幅が期待できし、フィルダムにおいては必要に応じてシュート部と減勢工の間に水路拡幅部が挿入される。しかし、洪水調節専用ダムでは減勢工の水叩き標高と放流管標高の差が小さいため、放流管からの放流水脈は拡幅のないまま減勢工に流入し、水叩き上で拡幅することとなる。

このような場合、減勢工内の流況は、図-3 に示すように流量が小さい場合は三次元的な噴流拡散

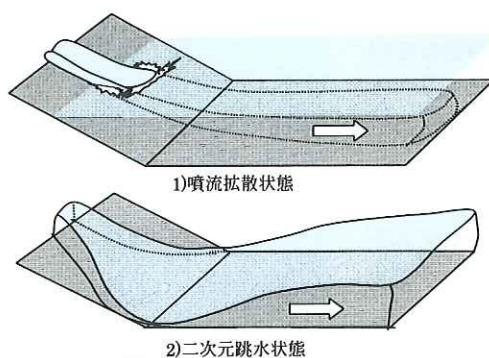


図-3 減勢工内の流況パターン

となり<sup>2)</sup>、流量が大きくなるに従い二次元跳水状態へと移行する。こうした場合の減勢工に必要なとされる下流水深や水叩き長の設定手法については Rajaratnam<sup>1)</sup> や角<sup>3)</sup> により検討されているが、減勢工内における土砂の移動、具体的には平面的な渦の解消を評価するためにはこれらの検討に加えて減勢工内の三次元的な流速分布についても知る必要がある。

なお、減勢工の対象流量が放流管からの最大放流量(計画最大放流量)程度に採られている場合には2)のように水脈の拡幅区間が必要となるが、対象流量が大きく、非常用洪水吐きである越流頂からの流入が対象流量となっている場合には、越流頂からの流入水脈は減勢工幅全体に渡るので2)のような水脈の拡幅のための区間は必要なく、跳水始端と水叩き始端は一致する。いずれにしろ、減勢工内の流れを完全な二次元的跳水に移行できれば流速はほぼ減勢工の全域に渡って下流方向へ向かうので土砂の回転はなくなるものと考えられる。

## 3. 水理模型実験の概要

### 3.1 実験装置

実験に用いた模型を図-4 に示す。このモデルダムは現在計画中の洪水調節専用ダムを参考に放流設備の規模を定めたものであり、サーチャージ水位における作用水頭を約50mとし、幅5m×高さ6mの放流管を間隔15mで2条配置したダムの1/50縮尺模型となっている。

### 3.2 実験ケース

実験は、減勢工幅  $B$ 、下流水深  $h_0$ 、水叩き長  $L$  および流入フルード数  $Fr$  をパラメータとして、表-1 に示すケースについて減勢工内の流速分布の測定を行った。ケース A-1-1~6 は副ダムを設けず、



十分下流の水  
位調節板を用  
いて下流水位  
を設定したも  
のである。そ  
他のケース  
では副ダムを  
設け、水叩き  
長を設定した。

表中、A-2-  
1~3 は同一の  
減勢工形状に  
おいてフルー  
ド数を A-3-1  
~2 は、同一  
のフルード数  
において水叩  
き長をそれぞ  
れ変化させた  
ものである。  
また B および  
C は A-2-1~3  
と同一のフル  
ード数におい  
て減勢工幅を  
変化させたも  
のであり、D  
は図-4 に示す  
ように減勢工  
幅を始端部の

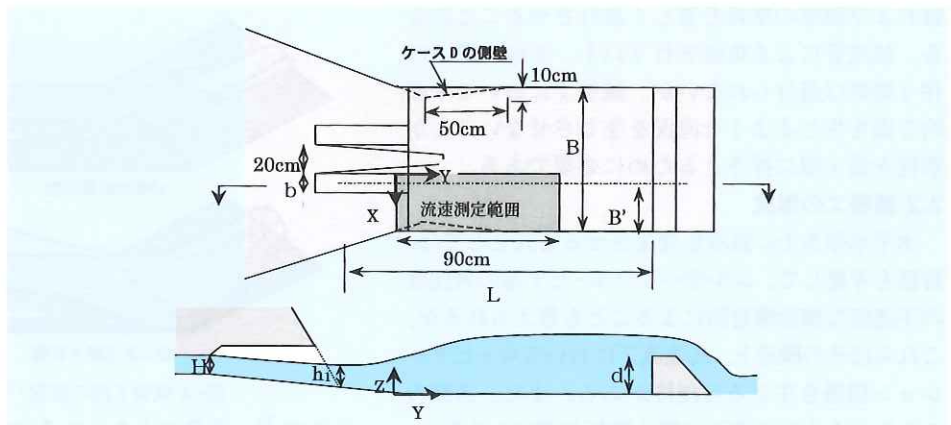


図-4 実験模型

表-1 実験条件

| 実験<br>No. | 流量<br>$Q$<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 流入流速<br>$V_0$<br>( $\text{m/s}$ ) | 流入水脈<br>厚さ $h_1$<br>( $\text{m}$ ) | フルード<br>数 $Fr_0$ | 減勢工幅                  |                        | 放流管幅<br>$b$<br>( $\text{m}$ ) | 放流管高<br>$H$<br>( $\text{m}$ ) | 水叩き長<br>$L$<br>( $\text{m}$ ) | 副ダム高<br>$d$<br>( $\text{m}$ ) | 下流水深<br>$h_0$<br>( $\text{m}$ ) | $\alpha$<br>$B'/(b/2)$ |
|-----------|----------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------|
|           |                                        |                                   |                                    |                  | $B$<br>( $\text{m}$ ) | $B'$<br>( $\text{m}$ ) |                               |                               |                               |                               |                                 |                        |
| A-1-1     | 0.040                                  | 2.08                              | 0.096                              | 2.15             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          |                               |                               | 0.20                            | 4.00                   |
| A-1-2     | 0.040                                  | 2.08                              | 0.096                              | 2.15             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          |                               |                               | 0.25                            | 4.00                   |
| A-1-3     | 0.040                                  | 2.08                              | 0.096                              | 2.15             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          |                               |                               | 0.30                            | 4.00                   |
| A-1-4     | 0.060                                  | 2.80                              | 0.107                              | 2.73             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          |                               |                               | 0.25                            | 4.00                   |
| A-1-5     | 0.060                                  | 2.80                              | 0.107                              | 2.73             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          |                               |                               | 0.30                            | 4.00                   |
| A-1-6     | 0.080                                  | 3.56                              | 0.112                              | 3.39             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          |                               |                               | 0.30                            | 4.00                   |
| A-2-1     | 0.040                                  | 2.08                              | 0.096                              | 2.15             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 4.00                   |
| A-2-2     | 0.060                                  | 2.80                              | 0.107                              | 2.73             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 4.00                   |
| A-2-3     | 0.070                                  | 3.17                              | 0.110                              | 3.05             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 4.00                   |
| A-3-1     | 0.060                                  | 2.80                              | 0.107                              | 2.73             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.45                          | 0.12                          |                                 | 4.00                   |
| A-3-2     | 0.060                                  | 2.80                              | 0.107                              | 2.73             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.25                          | 0.12                          |                                 | 4.00                   |
| B-1       | 0.040                                  | 2.08                              | 0.096                              | 2.15             | 0.55                  | 0.125                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 2.50                   |
| B-2       | 0.050                                  | 2.43                              | 0.103                              | 2.42             | 0.55                  | 0.125                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 2.50                   |
| B-3 *     | 0.065                                  | 2.98                              | 0.109                              | 2.89             | 0.55                  | 0.125                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 2.50                   |
| C-1       | 0.040                                  | 2.08                              | 0.096                              | 2.15             | 0.40                  | 0.050                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 1.00                   |
| C-2       | 0.050                                  | 2.43                              | 0.103                              | 2.42             | 0.40                  | 0.050                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 1.00                   |
| C-3 *     | 0.060                                  | 2.80                              | 0.107                              | 2.73             | 0.40                  | 0.050                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 1.00                   |
| D-1       | 0.040                                  | 2.08                              | 0.096                              | 2.15             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 4.00                   |
| D-2       | 0.060                                  | 2.80                              | 0.107                              | 2.73             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 4.00                   |
| D-3 *     | 0.070                                  | 3.17                              | 0.110                              | 3.05             | 0.70                  | 0.200                  | 0.10                          | 0.12                          | 1.65                          | 0.12                          |                                 | 4.00                   |

注) 流入流速は水叩き始端における流速を放流管出口の流速と水叩きまでの標高差から計算した値である。

なお、 $h_1 = Q/(2bV_0)$ ,  $Fr = V_0/\sqrt{gh_1}$ ,  $\alpha = B'/(b/2)$

み変化させた  
ものである。流速の測定は、図-4 に示した測点  
において行い、水深方向には 3cm ピッチで測定を  
行っている。測定は x-y 方向 (平面方向) の測定が  
可能な電磁流速計を用いて行い、測定時間 15 秒  
間における平均流速を求めている。

なお、減勢工内における平面的な渦の発生を考  
えた場合、放流管間隔も現象を支配するパラメー  
ターとなり得る。しかし、コンクリートダムでは  
構造上継ぎ目間隔は 15m が標準とされており、ま  
た、放流管はブロックの中央に置く必要がある。  
そのため放流管間隔は 15m 程度に限定されるこ  
とになり、事実、現在ほとんどのダムにおいて放  
流管間隔は 15m ないしはその倍数となっている。

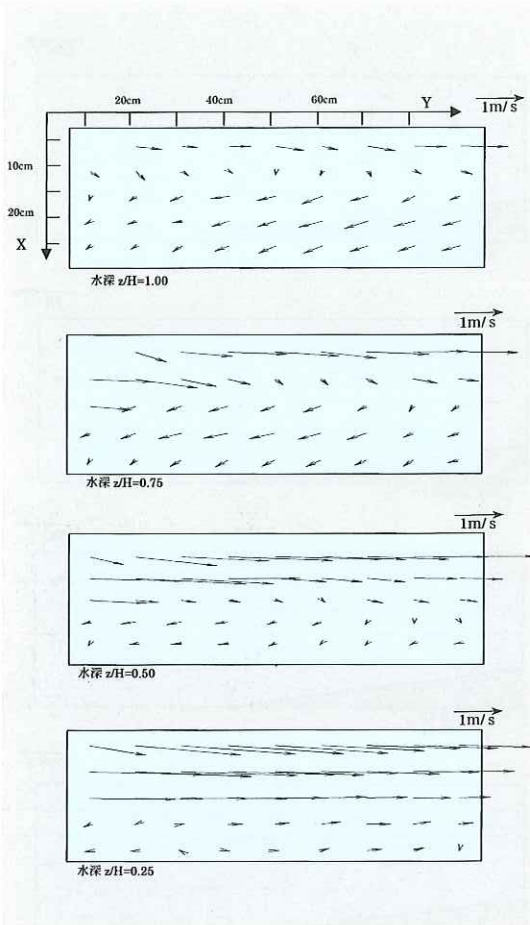
したがって、ここでの議論も放流管間隔について  
は固定して扱うものとした。

なお、各実験ケースとも、減勢工は十分な水叩  
き長および下流水深が確保されており、表中の \*  
は減勢工内の流れが図-3 の 2) の流況に移行した  
ケースを示している。

#### 4. 跳水前の流況

前述のように減勢工における流況は跳水の前後  
において大きく異なる。最初に、跳水を生じる前  
の比較的フルード数の小さい場合の流況について  
の実験結果について検討を行う。

図-5 にケース A-2-2 における減勢工内の流速

図-5 減勢池内の流速分布 ( $\alpha=4$   $Fr=2.8$  A-2-2)

分布を示した。なお、水面は  $z/H=1.5$  程度にある。これによれば底面における流速は流下とともに徐々に中心部の流速が減じ、側方に拡散していく。しかし、こうした流速分布形状は底面付近に限られており、底面から離れるにつれて側壁に沿った逆流域が生じている。

次にこのような壁面に沿った逆流域における流速と下流水深の関係について見てみることにする。図-6 は、 $Y=5b (=0.5\text{m})$  の壁沿いの測点における水深方向の流速分布を下流水深を変えて比較したものである(ケース A-1-1~3)。これによれば比較的小さいフルード数の場合には水深が大きくなると流下方向に逆向きの流速は小さくなる。図-7 は同一の測点および下流水深の条件でフルード数を大きくした場合(ケース A-1-4~5, A-2-2)を比較したものであるが、水深による差異は見られない。

噴流が副ダムによって偏向させられることが逆流の発生要因の一つとして考えられる。図-8 は、

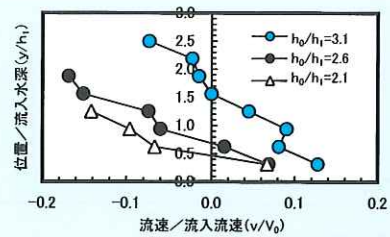
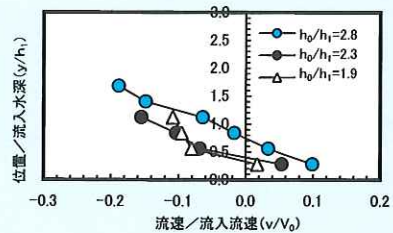
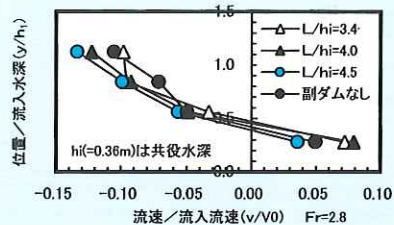
図-6 下流水深による断面流速分布の変化 ( $Fr=2.1$ )図-7 下流水深による断面流速分布の変化 ( $Fr=2.8$ )

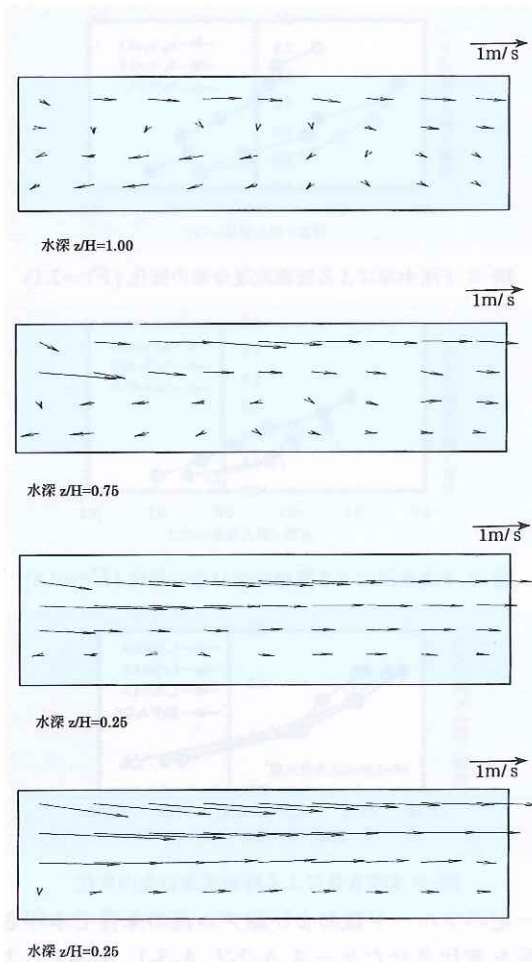
図-8 水叩き長による断面流速分布の変化

一定のフルード数および副ダム高の条件で水叩き長を変化させたケース A-2-2, A-3-1, A-3-2 および副ダムなしのケース A-1-4 において前述と同じ壁沿いの測点で水深方向の流速分布を比較したものである。なお、図中に示したように実験を行ったケースの水叩き長と共役水深の比は 3.4~4.5 となっている。ただし、ここで用いた共役水深は放流管幅での二次元跳水として求めた値であり、実験においては最も水叩き長の短いケースでも跳水には至っていない。図から明らかなように、跳水が生じるよりも小さな流量の範囲内においては水叩き長による流速分布の変化はほとんど見られない。

最後に、減勢工幅による流速分布の変化について比較する。図-9 は、減勢工の拡散率  $\alpha$  を 2.5 とした場合のケース B-2 について減勢工内の流速分布を示したものである。流れは表層部の一部を除いてほぼ下流方向に向いており平面的な渦は生じていない。

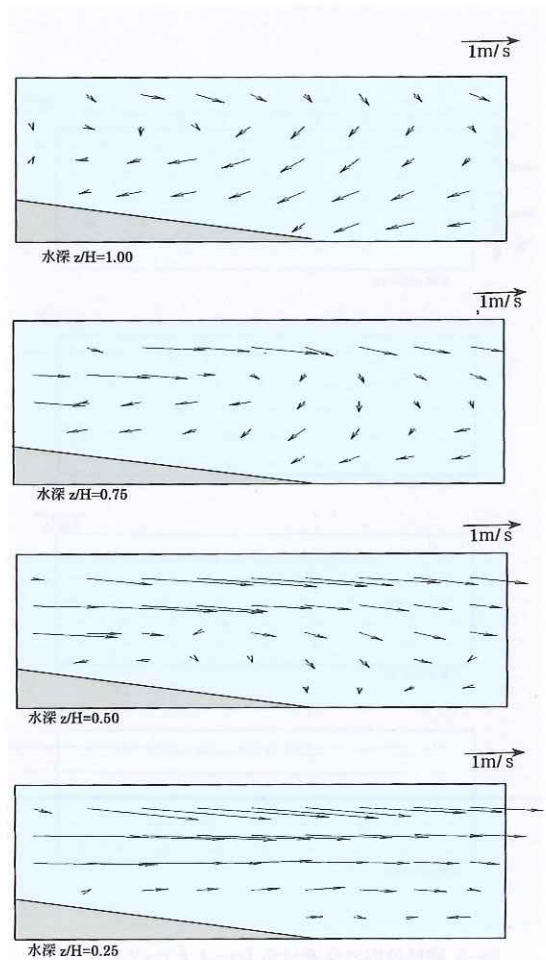
以上の検討から、減勢工内の平面的な渦の発生は減勢工幅が主な支配要因であることがわかった



図-9 減勢池内の流速分布 ( $\alpha=2.5$   $Fr=2.4$  B-2)

が、減勢工幅を小さくすることは単位幅当たりの流量を増加させ、減勢工の壁高、副ダム高および水叩き長を増大させることになり、建設コストの点からは不利である。また、下流に制約条件があり、こうした対策がとれない場合もある。

図-5 に示した流況を観察すると、拡散した水脈の背後の減勢工全体の流れにとっては遊びの領域が平面的な渦の発達を促しているものと考えられる。これを側壁で置き換えた場合(ケース D-2)の流速分布を図-10 に示した。完全に渦が消滅したとはいえないものの、土砂移動に大きな影響を与えと考えられる中層から底層における流れはほぼ下流方向に向いている。側壁に置き換えた部分は本来減勢には寄与しておらず、これによって側壁高や水叩き長の規模が大きくなることもない。ただし、この改良は、放流管からの放流に対して

図-10 減勢池内の流速分布 ( $\alpha=4$   $Fr=2.8$  D-2)

は問題がないものの越流頂からの流入に対しては不利に働く場合もあるので水理実験において詳細な検討が必要である。

## 5. 跳水時の流況

減勢工内の流れは流量が増加して跳水が開始すると大きく変化する。図-11~13 はそれぞれケース A-2-1~3、B-1~3 および D-1~3 おける  $Y=6b$  ( $=0.6\text{m}$ ) の壁沿いの測点における水深方向の流速分布を比較したものである。減勢工幅を適切に採った B のケースおよび前述の改良を加えた C のケースではそれぞれフルード数が 2.9 および 3.1 で図-3 の 2) に示した二次元跳水状態となり、図-12 および 13 に示すように底面付近における流下方向流速が急激に大きくなる。また、減勢工内はほぼ全測点とも上記と同様な流速分布となった。

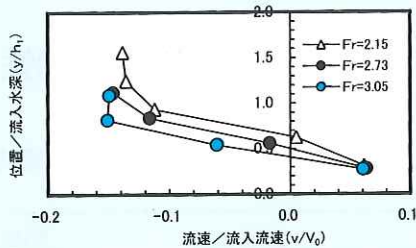


図-11 フルード数による断面流速分布の変化  
(ケース A-2-1~3,  $\alpha=4.0$ )

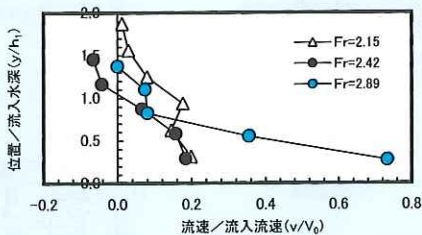


図-12 フルード数による断面流速分布の変化  
(ケース B-1~3,  $\alpha=2.5$ )

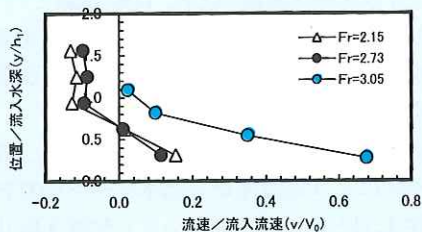


図-13 フルード数による断面流速分布の変化  
(ケース D-1~3,  $\alpha=4.0$ )

一方、実験ケース A の場合には二次元跳水状態への移行が不完全であり、図-11 に示したように側壁部に逆流域が残る不安定な流況となった。以上のように小流量時において平面的な渦を押しやる形状とすれば二次元跳水状態への移行が速やかに行われ、不安定な遷移状態は現れない。逆に小流量時において平面的な渦を生じる減勢工形状であると、二次元跳水状態への移行が不完全となり、流量が大きくなった場合には非常に流速の大きな渦を生じることになる。

## 6. まとめ

放流管による積極的な排砂を行う場合、磨耗を最小限に抑制するためには減勢工内に平面的な渦を発生させないことが必要である。本研究は、こうした土砂放流を考慮した減勢工の設計手法につ

いて、主に減勢工内の平面的な渦の発生に着目して検討を行ったものである。以上の検討によって得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 跳水が生じない流量の小さな範囲において 減勢工内に平面的な渦を発生させないためには洪水吐きの幅の拡幅率  $\alpha$  を 2.5 程度以下にする必要がある。
- 2) 減勢工の幅を小さくすることが困難な場合は拡散する水脈の背後に生じる流速の遅い領域を側壁で置き換えることにより平面的な渦の発生を抑制することができる。
- 3) 流量の小さい範囲において平面的な渦が発生しない減勢工形状とすれば、流量増加時に二次元跳水状態への移行が速やかに行われ、不安定な遷移状態は現れない。

なお、紙面の都合で触れられなかったが、減勢工からの下流への土砂流下を速やかに行うためには副ダムにスリットを設けるなどの工夫が必要となる。

また、本報告での検討は減勢工における土砂の移動を最小限に押さえるための手法である。放流管や減勢工始端部などは高速な土砂移動が避けられない部分であり、鋼板によるライニング等の保護が必要となる。これらの設計のためには、磨耗に関する負荷量を知る必要があり、洪水時において貯水池から排出される土砂量および粒度などを精度よく予測しておくことも重要である。

## 参考文献

- 1) N.Rajaratnam, K.Subramanya : Hydraulic Jumps below Abrupt Symmetrical Expansion, Journal of Hydraulics Division, ASCE, No.HY2, pp.481-501, March, 1968.
- 2) N.Rajaratnam, K.Subramanya : Diffusion of Rectangular Wall Jets in Winder Channels, Journal of Hydraulic Research, No.4, pp.281-294, May, 1967.
- 3) 角哲也、中西徹：流入水脈と幅の異なる跳水式減勢工の水理特性, 土木技術資料, 33-6, pp.21-27, 1991.

桜井 力\*



建設省土木研究所ダム部  
水工水資源研究室研究員  
Tsutomu SAKURAI

柏井条介\*\*



同 水工水資源研究室長  
Jyosuke KASHIWAI