

### III-6 ダム機能強化のための放流設備設計手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 12～平 15

担当チーム：水工研究グループダム水理チーム

研究担当者：柏井条介、結城和宏、大黒真希

#### 【要旨】

重力式コンクリートダム既設洪水吐き横に設置されるダムの増強放流設備では、放流水を既設減勢工に導流する必要があり、湾曲導流水路の水理設計手法の確立、既設減勢工を利用した減勢工の水理設計手法の確立が求められている。本調査では、放流管新設時に必要になる湾曲エビ継ぎ管路について圧力特性を明らかにし、キャビテーションに対し安全な管路の設計方法を示した。また、越流頂新設時に必要になる湾曲開水路について、曲率半径の最も小さい屈折形状を対象に、導流壁沿い水面形及び減勢工への落下軌跡の推定方法を示し、導流壁高の算定、減勢池放流方法の検討を可能にした。減勢工については、円形の空中放流水脈を対象に跳水条件及び導流壁沿い水深を把握した。また、空中放流時の減勢時発生音について、発生音の強さ及び周波数特性を明らかにした。15年度は最終年度であり、以上の事項について継続検討しとりまとめた。

キーワード：エビ継ぎ管、衝撃波、跳水、減勢音特性

#### 1. はじめに

管理ダム数の増加に伴い、より効率的な貯水池の運用が求められるようになってきている。効率的な貯水池運用を実施するためには、放流設備の増強が必要になることが考えられ、これら施設の水利設計手法の確立が求められている。

重力式コンクリートダムの増強放流設備は、既設洪水吐き横に設置して既設減勢工を利用するのが有利な場合が多い。既設減勢工を利用するためには、放流設備導流部に湾曲部が必要になり、増設設備が放流管であれば管路による曲がり、越流頂であれば開水路流での曲がりが必要になる（図-1参照）。

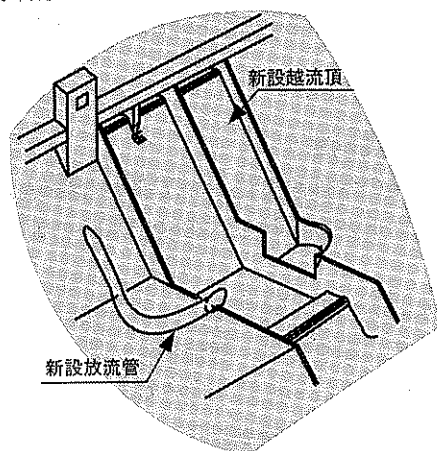


図-1 新設放流設備のイメージ図

高速放流設備では、導水路線形は直線、等勾配とするのが基本であり、湾曲水路の設計では、管路では管内圧力に関する、開水路では導流壁沿い水深に関する確かな知見に基づく設計手法の確立が必要である。

本調査では、湾曲管路について、実際の管路で用いられるエビ継ぎ管も含めて、壁面作用圧力特性を明らかにし圧力的に安全な設計方法を示した。また、湾曲開水路については曲率半径が最小になる屈折水平水路を対象に、導流壁沿い水面形及び減勢工への水脈放出軌跡を示した。これら検討は水利模型実験を中心に実施している。

既設減勢工への放流は、空中放流とするのが経済的に有利である。したがって、既設減勢工の適用可能性の検討、或いは改造検討では、空中放流水脈の減勢特性に基づく検討が必要となる。また、減勢時には逸散エネルギーの一部が音となり騒音問題を生じる可能性があるが、通常の跳水と比較して空中放流での発生音は大きくなることが懸念される。したがって、空中放流形式の選定では、水脈減勢時発生音に関する検討が必要である。

空中放流水脈の減勢特性について、本調査では、円形水脈を対象に水利模型実験を実施し、減勢池内での跳水条件等の減勢時水理特性を把握した。また、空中放流水脈の発生音の音響パワーレベル及び周波

数特性について、現地観測により把握した。

本調査は15年度が最終年度であり、ここでは成果の概要をとりまとめる。

## 2. 調査方法

### 2.1 湾曲放流管

曲がりを有し複雑な線形を持つ放流管は、従来、管内流速を10m/s程度以下に抑えて設計されてきた。一方、放流能力増強のための放流管は対象流量が比較的大きくなるため、管内流速を小さくすると著しく不経済な設計となる場合が生じる。

このためキャピテーションに対する安全性が確保される範囲で流速を高める必要がある。キャピテーションに対する安全性を確保するためには、湾曲部の壁面作用圧力特性を明らかにする必要がある、系統的な水理模型実験を行なった。

実験は、図-2に示すように水槽に取り付けた長さ $10D$  ( $D$ :管径)の水平管直下流に中心角 $60$ 度の湾曲管路を設けて実施した。湾曲管路下流には管路出口の影響が生じないように $5D$ 以上の長さの直管を設けている。

実験は、図示した鉛直面上で湾曲する場合及び水平面上で湾曲する場合の両者について実施しており、壁面作用圧力を調査した。

鉛直曲がりの実験では、スムーズな曲がり管(図-2の $\alpha=0$ 度)及びエビ継ぎ管( $\alpha>0$ 度)の両者の実験を行った。ここに、エビ継ぎ管は、直管を斜に切断して繋ぎ合わせ、曲線曲がりを禁じさせたもので、管径が1m以上と大きい場合には連続的な曲げによる管製作が困難なことからエビ継ぎ管が用いられている。

スムーズ管路の実験では、管径 $D$ を変化させてレイノルズ数を変化させるとともに、曲率半径 $R/D$ を変化させ曲がりの内外での壁面作用圧力を調査した。 $D$ を変化させた実験では $R/D=9$ と固定しており、 $D=0.03\sim 0.251\text{m}$ と変化した。実験のレイノルズ数( $=Dv/\nu$ ,  $v$ :管内平均流速、 $\nu$ :水の動粘性係数)の範囲は $4\times 10^4\sim 1.6\times 10^6$ である。また、 $R/D$ を変化させた実験では $D=0.251\text{m}$ (レイノルズ数の範囲 $=1\times 10^5\sim 1.6\times 10^6$ )と固定しており、 $R/D=4\sim 11.5$ と変化した。

エビ継ぎ管路の実験は、 $D=0.251\text{m}$ 、 $R/D=4$ 及び $9$ の場合を対象に、屈折角 $\alpha=4\sim 15$ 度と変化させ、

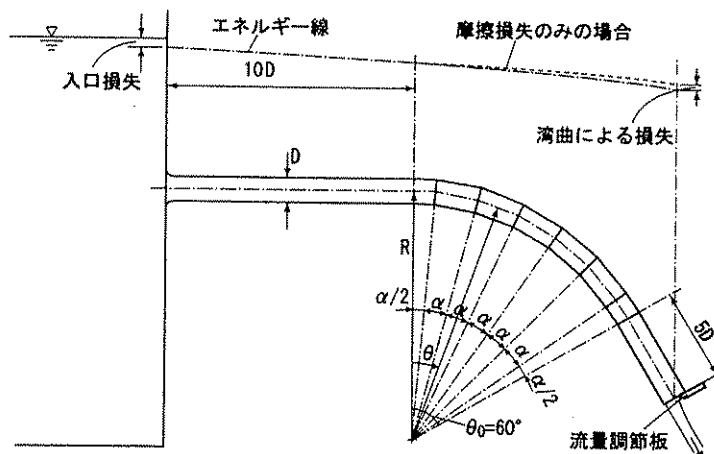
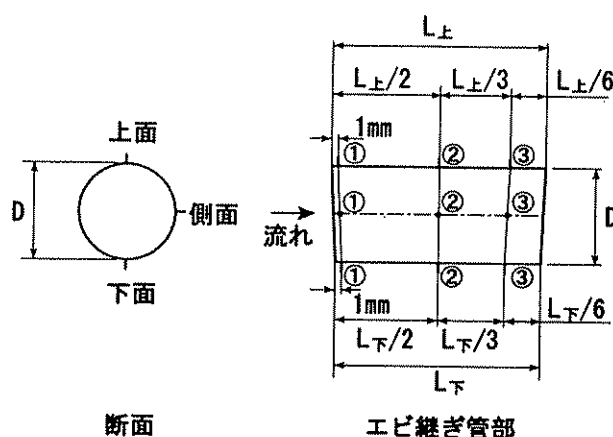


図-2 湾曲放流管模型概要図



断面 エビ継ぎ管部

図-3 エビ継ぎ管圧力測定位置

エビ継ぎ屈折角の影響を調査した。エビ継ぎ管の圧力測定位置を図-3に示す。

水平曲がりの実験は、鉛直曲がりのエビ継ぎ管と同様の条件にて実施し、水平とした場合の影響を調査した。

なお、実験結果の解析は、放流管の壁面作用圧力特性を表すのに用いられている圧力降下係数を用いて行っている。

### 2.2 湾曲開水路

湾曲開水路の水理設計において必要な情報は、導流壁沿い水面形及び減勢工への放出水脈の軌跡である。

湾曲開水路の水理に関するパラメーターは非常に多い。そこで、調査では、導流壁沿い水深が最も大きくなると考えられる屈折水路を対象に水理実験を実施した。実験模型の概要を図-4に示す。

実験は、越流流れを減勢工導流壁天端標高まで導流し、水平水路上にて屈折させる場合を対象に実施

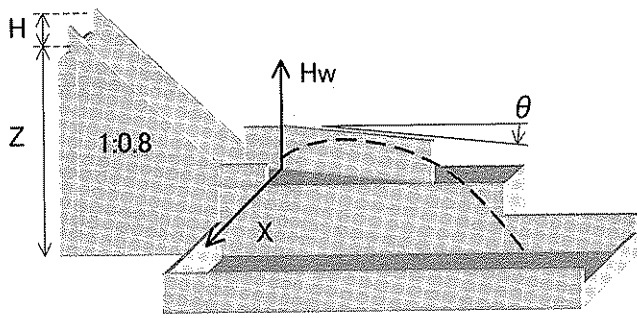


図-4 湾曲開水路の模型概要図

した。屈折部上流端は、堤体下流面と水平水路の交線より下流 0.1m地点であり、越流頂形状は設計水頭 0.1mの Harold 曲線、堤体下流面勾配は 1:0.8 である。

実験ケースは以下の通りであり、導流壁屈折部(以下、斜壁と称する)沿いの水深及び減勢池放流後の落下軌跡を計測した。計測ピッチは、斜壁方向に 0.1 m である。ここで、減勢池放流後の落下軌跡は、斜壁に直角な断面内の最高水位を対象に計測している。落下軌跡の平面上の経路は斜壁の延長線上より若干上流よりの直線上にあるが、ずれが大きなものでも 4° 程度程度であり、斜壁の延長上と考えて差し支えない。

屈折角度  $\theta$  : 15、30、45、60 度

水路幅  $B$  : 0.1、0.2m

越流水深  $h$  : 0.05、0.1m

落下高  $Z$  : 0.2、0.6、1m

なお、屈折を堤体上で行う場合については、既に

検討を行っており、導流壁沿い水深を推定することが可能である<sup>1)</sup>。また、水平床上の屈折水路の流れについては衝撃波理論による Ippen の解析<sup>2)</sup>が有名であるが、後に述べるように、斜壁沿いの水面形は上下流方向に変化する複雑なものであり、Ippen の解析による推定では不十分である。

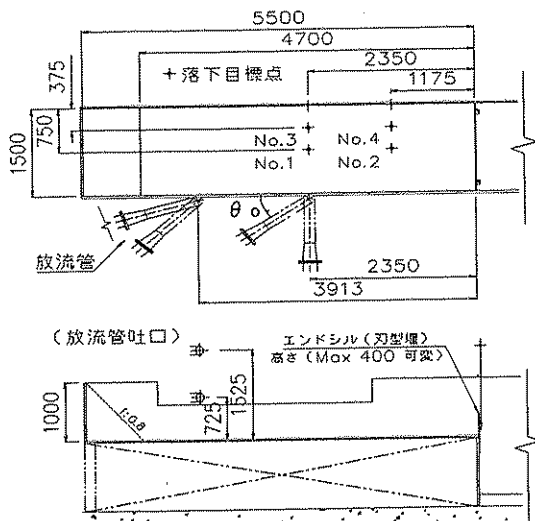
本調査では、実験結果より実験式の作成を行った。

### 2.3 減勢工

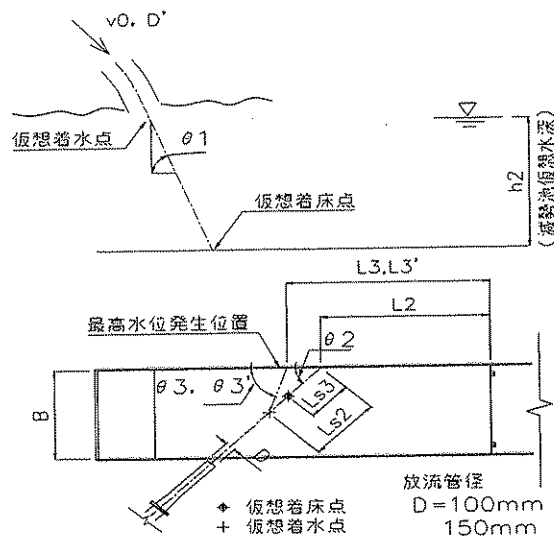
減勢工については、円形放流管からの放流水脈を対象に跳水条件、導流壁沿い這い上がり水深、流況に関する実験的な検討を行った。

実験模型を図-5に示す。実験は、上流端を堤体下流面勾配 1:0.8 の堤体で、下流端を高さ可変な刃型せきで仕切った幅 1.5m、長さ 4.7 (底面) の減勢池側方から口径  $D=0.1$  及び 0.15m の放流管放流水を水平方向に放出させて実施した。実験では図-5に示すように平面的な放流位置、方向を変化させるとともに、放流高さ及び流量を図-5の No.1~No.4 の各位置に落下するよう調整した。これらの条件は、実際に想定される減勢池規模及び放流条件を念頭に設定したものである。

実験は、各放流条件に対し、刃型せき高さを変化させ、底面上に露出射流を発生させない水位を求めるとともに、露出射流がない場合の流況、壁沿い水深を観測し、水理諸量の関係について、運動量式に基づく解析を行った。



実験概要図



記号説明図

図-5 空中放流減勢工実験模型概要図

## 2. 4 減勢時発生音

減勢時発生音については、既往現地観測データを収集するとともに、新たに現地観測を実施した。観測データの一覧を表-1に示す。

既往の研究により、減勢時の主たる発生音源は着水点付近にあることが分かっており<sup>3)</sup>、観測結果から着水点位置での音響パワーレベル(PWL)を次式で求め、発生音のパワーレベルとして分析した。

$$PWL = SPL + 20 \log(r) - 8 \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ここに、SPL: 観測点での音響パワーレベル(dB)、r: 観測点と着水点の距離である。上式は、音源が点音源で半球状態に伝播するものとして得られる式であり、複数点での観測が行われている観測値からその妥当性が検証されている(ただし、ダム上流など観測点と着水点間に明瞭な障害物がある観測点を除く)。

音源位置とした着水点は、次のようにして設定した。

①跳水式 : 水叩き始端

②空中放流: 水脈放出点流速を  $v_0 = (2gZ)^{1/2}$ 、 $Z = (\text{貯水位} - \text{放出地点標高})$  とし、空気抵抗を考慮した次式<sup>4), 5)</sup>により放出点からの落下軌跡を求め、減勢工水面との交点を着水点とした。

$$y = \ln(\cos \gamma + \tan \alpha \sin \gamma) / (gk^2) \quad (2)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(kv_{0y}), \quad \gamma = \left\{ \exp(gk^2 x) - 1 \right\} / (kv_{0x})$$

$$v_x = v_{0x} / (\exp(gk^2 x)), \quad v_y = \tan(\alpha - \gamma) / k$$

ここに、x: 放出点を原点とした水平距離、y: x における鉛直高、 $\theta_0$ : 放出角度、k: 空気抵抗係数、v: x、y 地点の流速である。

## 3. 調査結果

### 3. 1 湾曲放流管<sup>6), 7), 8), 9)</sup>

#### 3. 1. 1 湾曲部の圧力特性

図-6にスムーズ管及びエビ継ぎ管の湾曲部のピエゾ水頭分布を示す。凡例のうち、上面、側面、下面がそれぞれ曲がり外側、中央、内側の側線に対応しており、曲管部の圧力は遠心力の影響により、曲がり外側で大きく、内側で小さくなる事が分かる。この曲がりによる曲管内外の圧力分布は、同心円上を回転運動する2次元ポテンシャル流れ(自由渦流

表-1 観測データ一覧

ダム	形式	減勢形式	放流施設	流量(m <sup>3</sup> /s)	観測点
A	アーチ	空中放流	コンジット1条	最大430	ダム下流を中心に多数
			コンジット2条	106	
			コンジット3条	最大450	
B	アーチ	空中放流	ハウエルバンパーバルブ	5~20	キャットウォーク上
			コンジット1条	5~20	
C	アーチ	空中放流	コンジット1条	120	キャットウォーク上
			ホロージェットバルブ1門	16	
			クレスト1門	31	
D	重力式	空中放流	コンジット1条	0~100	ダム下流の敷点
a	重力式	跳水式	バルブ1門+コンジット1条	0~100	減勢工側壁上
b	重力式	跳水式	コンジット1条	27~60	減勢工側壁上
c	重力式	跳水式	コンジット1条	9~22	減勢工側壁上
			クレスト1門	14~28	

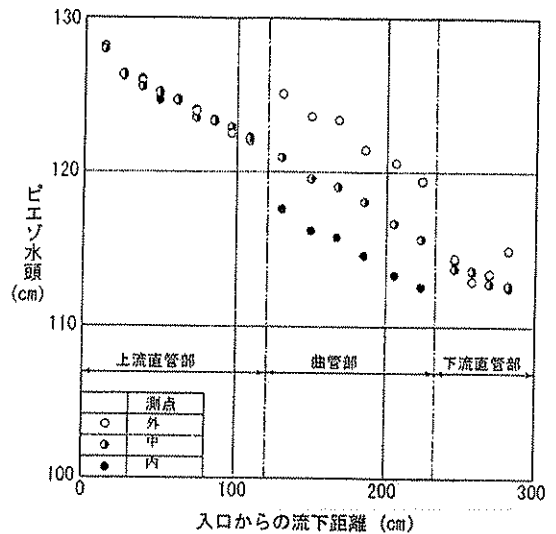


図-6  $\alpha = 0$ 度でのピエゾ水頭分布例

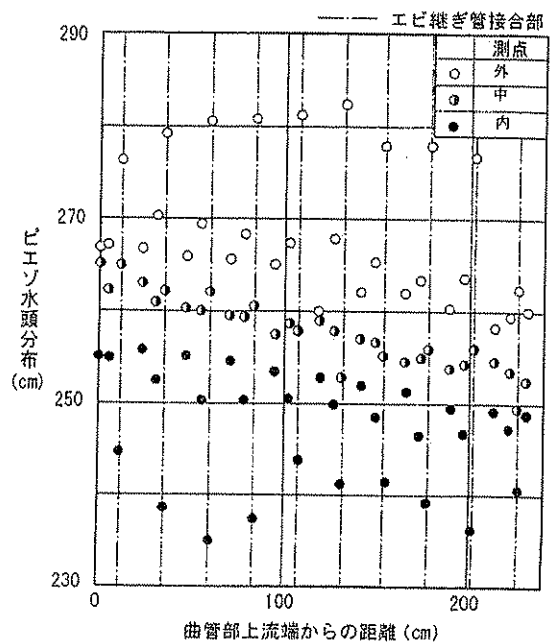


図-7  $\alpha = 6$ 度の曲感部ピエゾ水頭部分布例

れ)として比較的容易に計算することができ、実験値との比較的よい一致を見ている。ただし、 $R/D$ が小さくなるに従って、曲管下流側での内側の圧力が大きくなる傾向がある。こうした傾向は、 $R/D=6.5$ 以下で明確になっており、曲がりに伴う2次流の影響によるものと思われる。

図-7には曲管エビ継ぎ部のピエゾ水頭分布を示すが、エビ継ぎ接続部の直下流において、曲管外側では局所的な圧力上昇が、内側では圧力降下が生じていることが分かる。エビ継ぎ管の設計では、この接続部直下流での局所的な圧力変化の評価、特に、内側での圧力降下の評価が問題となる。

放流管の圧力特性は、一般に、基準断面での全水頭からの水頭降下分を、代表断面の速度水頭で除した圧力降下係数 $c_d$ にて表されている。今、基準断面を曲管直上流にとり、その位置での放流管出口中央を基準とする全水頭を $H$ 、代表断面の流速を曲管部の平均流速 $v_m$ とすると、 $c_d$ は次式で表される。

$$c_d = \frac{H - (p/\gamma + z)}{v_m^2 / 2g} \quad (1)$$

ここに、 $p/\gamma$ ：検査位置の圧力水頭、 $z$ ：検査位置と放流管出口標高の標高差、 $g$ ：重力加速度である。

圧力水頭の降下量は、基準断面と検査位置までの損失水頭と速度水頭で表すことができる。ここで、速度水頭を、断面平均流速から得られる速度水頭を基準に考えるものとし、断面平均流速から得られる速度水頭との差を、管の曲がりにより生じる遠心力によるものとエビ継ぎ管による局所的な影響によるものの和で与えられるものとする。更に、局所的な影響が断面平均流速から得られる速度水頭に比例するものとし、 $c_d$ を次式にて表現する。

$$c_d = f \frac{l}{D} + h(R/D) + \varepsilon \quad (3)$$

$$h(R/D) = \left\{ \frac{D}{8r \left( R/D - \sqrt{(R/D)^2 - 1/4} \right)} \right\}^2 \quad (4)$$

ここに、 $l$ ：曲管入口から検査断面までの管長、 $r$ ：検査位置の曲率半径（ $=R+\xi$ 、 $\xi$ ：曲率半径方向における、管軸と検査位置間の距離で、曲率半径方向を正とする。曲管外面で $D/2$ 、内側で $-D/2$ となる）である。式(3)の右辺第一項は、摩擦損失による圧力降下を、第2項は遠心力の影響を含んだ速度水頭による圧力降下を表している。また、第3

項の $\varepsilon$ は、エビ継ぎ管による局所的な影響を表す係数であり、 $\varepsilon$ が大きいほど、圧力値が低下することを表す。

式(3)では、損失として摩擦損失を取上げているが、実際には管の曲がりによる損失も生じる。また、先に述べたように $R/D$ が小さければ、曲がりによる2次流の影響も生じるものと思われる。 $\varepsilon$ は、エビ継ぎ管による局所的な影響を表す係数としたが、厳密には、これらの影響も含むものである。ただし、曲がりによる損失等の影響はそれ程大きくなく、特に、圧力的に問題となるエビ継ぎ接続部等においては、局所的な流速分布の影響が、 $\varepsilon$ の支配的要因となっていると考えて差し支えない。

なお、若干のばらつきはあるものの、 $c_d$ は $v_m$ によらずほぼ一定となっており、 $\varepsilon$ が断面平均流速から得られる速度水頭に比例することが確かめられている。

図-8に、式(3)から逆算して求められる $\varepsilon$ の曲管内での分布例を示す。図には、実験値(○)と数値シミュレーション結果の両者を示している。数値シミュレーションは、非圧縮性流体を対象とした汎用ソフトである $\alpha$ -Flowを用い、3次元乱流としての計算を行ったものである。結果は、C3-1、C3-2の2種類のものを用いているが、両者は、計算格子数が異なるものであり、C3-1に対し、C3-2の格子数を多く設定してある。計算結果は、エビ継ぎ管接続部近傍を除けば概ね再現されており、測点数の少ない実験値を補完し、連続的な $\varepsilon$ の分布を把握する一助とすることができる。エビ継ぎ管接続部近傍での値は、格子点数を多くすることにより実験値に近づくが、実験値での圧力変化はかなり大きい。C3-2の格子数は、通常の科学計算機で計算できる常識的範囲の最大数に近いものであり、通常の科学計算機を用いての実験値の再現は、それ程容易ではないようである。

いま、エビ継ぎ管ごとの $\varepsilon$ の分布形状をみると、曲管外側ではエビ継ぎ管中央付近にピークをもつ上に凸な、内側では下に凸な形状となっている。また、側面での $\varepsilon$ は概ね0の値を示しており、エビ継ぎ管の影響はあまり見られない。曲管内外でみられるピーク値は、エビ継ぎ管ごとにあまり変化はなく、外側では正の、内側では負の値をとる。これら符号は、自由渦で計算される圧力変化とは逆になっており、遠心力の影響を緩和する方向の影響となっている。

一方、曲管外側及び内側のエビ継ぎ管接続部では

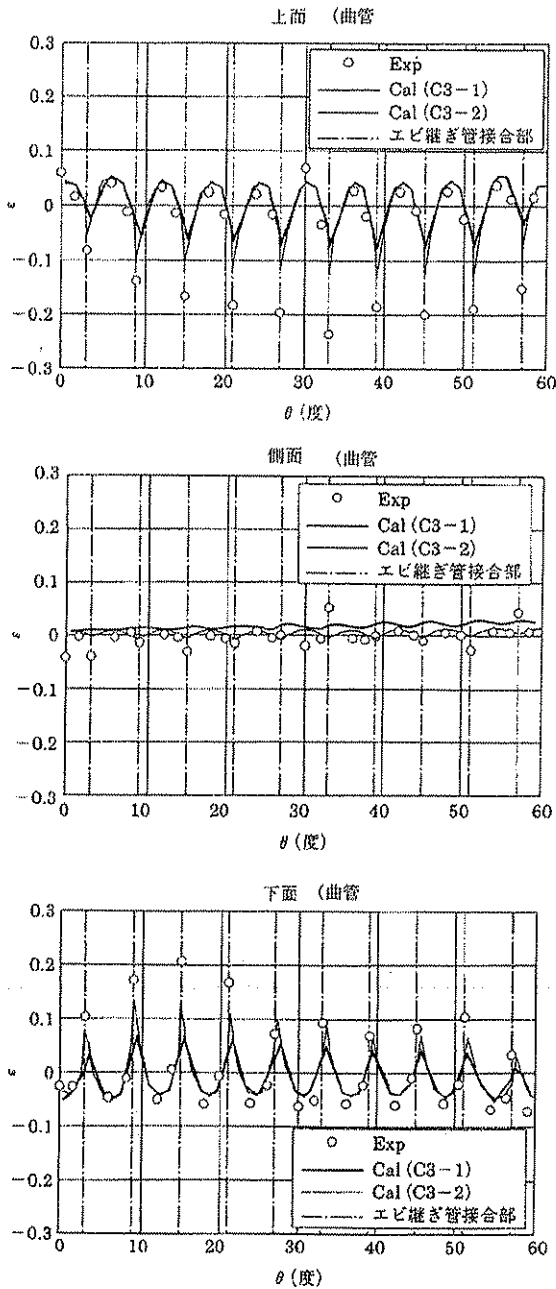


図-8 エビ継ぎ部の  $\varepsilon$  の変化  
( $\alpha = 6$ 度,  $R/D = 9$ , 鉛直曲がり)

尖鋭な分布形状を示しており、壁面の屈折による影響が顕著である。接続部の  $\varepsilon$  は外側で負、内側で正であり、遠心力による外側の圧力上昇、内側の圧力降下を助長する。この接続部近傍の  $\varepsilon$  の接続箇所ごとの変化は、外側と内側で異なり、外側では、曲管部上下流端付近を除き、一定値をとる傾向があるが、内側では、上流側の第 2~4 番目での  $\varepsilon$  が大きく、下流側では小さくなる傾向がある。この理由は明らかではないが、外側では流れは内側に屈折し、流れの剥離を伴わないのに対し、内側では流れの剥離を

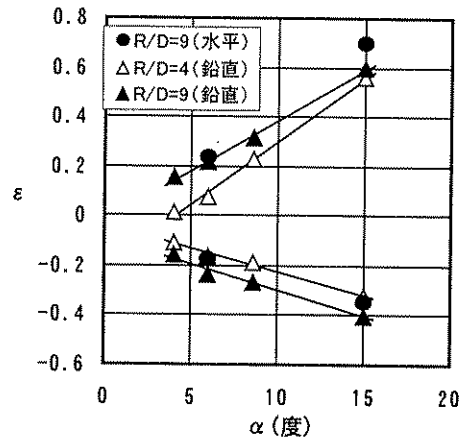


図-9  $\alpha$  と  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\min}$  の関係

伴っており、流下に伴う乱れ成分の増加により、剥離流れによる圧力への影響が緩和されたことが考えられる。

図-8 は、一例であるが、上述した  $\varepsilon$  の分布性状は  $\alpha$  や  $R/D$  が変わっても同様であり、ここで、設計上重要になると思われる、曲管外側及び内側での  $\varepsilon$  の絶対値の最大値と  $\alpha$ ,  $R/D$  の関係を図-9 に示す。図には鉛直曲がり、水平曲がり両者を示しているが、今鉛直曲がりの場合をみると、 $\varepsilon$  の絶対値が  $\alpha$  に対し直線的に変化していることが分かる。 $R/D = 9$  に対し、 $R/D = 4$  での値が小さくなっているが、これは、 $\alpha = 0$  度の場合にみられた曲がりに伴う 2 次流の影響等によるものと考えられる。 $\alpha = 0$  度の場合、 $R/D = 9$  での 2 次流の影響は小さいので、これ以上大きい  $R/D$  での  $\varepsilon$  の変化は小さいものと考えられるが、今後確認が必要である。

水平曲がりでの  $\varepsilon$  も鉛直曲がりでのそれと同様の値を示しているが、鉛直曲がりと比較して内外の  $\varepsilon$  とも若干大きくなる結果となっている。ナビエ・ストークスの運動方程式からは、保存力として重力のみが作用する場合には、重力の作用方向の違いによる管内運動への影響はなく、両者の差は、他の要因によるものと推察される。具体的には、鉛直曲がりとは水平曲がりでは、同じ流量時の放流管入口と水面までの距離が異なっており、吸い込み渦の状況が異なることが考えられる。鉛直曲がりでは、吸い込み渦の影響が出やすかったと推察され、特に圧力降下を示す曲管内側の  $\varepsilon$  には若干の余裕を見ても必要がある。因みに鉛直曲がりとは水平曲がりの最大  $\varepsilon$  の差は、20%程度である。なお、鉛直曲がりとは水平曲がりの差の原因として、この他コリオリの力が考えられるがその影響は小さいと思われる。

### 3. 1. 2 水理設計手法

3. 1. 1の結果を用いた増設放流管の水理設計手順について検討する。考えられるフロー図を、図-10に示す。なお、水理設計手順は、施設固有の制約条件を勘案の上、設計者それぞれが工夫すべきものと考えられ、以下に示す手順は、一般的とは考えているが、あくまで例示として位置付けられるものである。例示する手順は、一連の繰り返し検討により適切な形状を求めるものであり、設計経験の深い技術者であれば、より容易に適切解を見つけることができるかもしれない。

①施工時の貯水位条件を勘案し、放流管入口標高の初期条件を設定する。例えば、貯水位低下が困難な場合には、許容被り水深の範囲で、入口標高を高く設定する。また、ある程度の貯水位低下が容易に行える場合には、その範囲で入口標高を設定する。

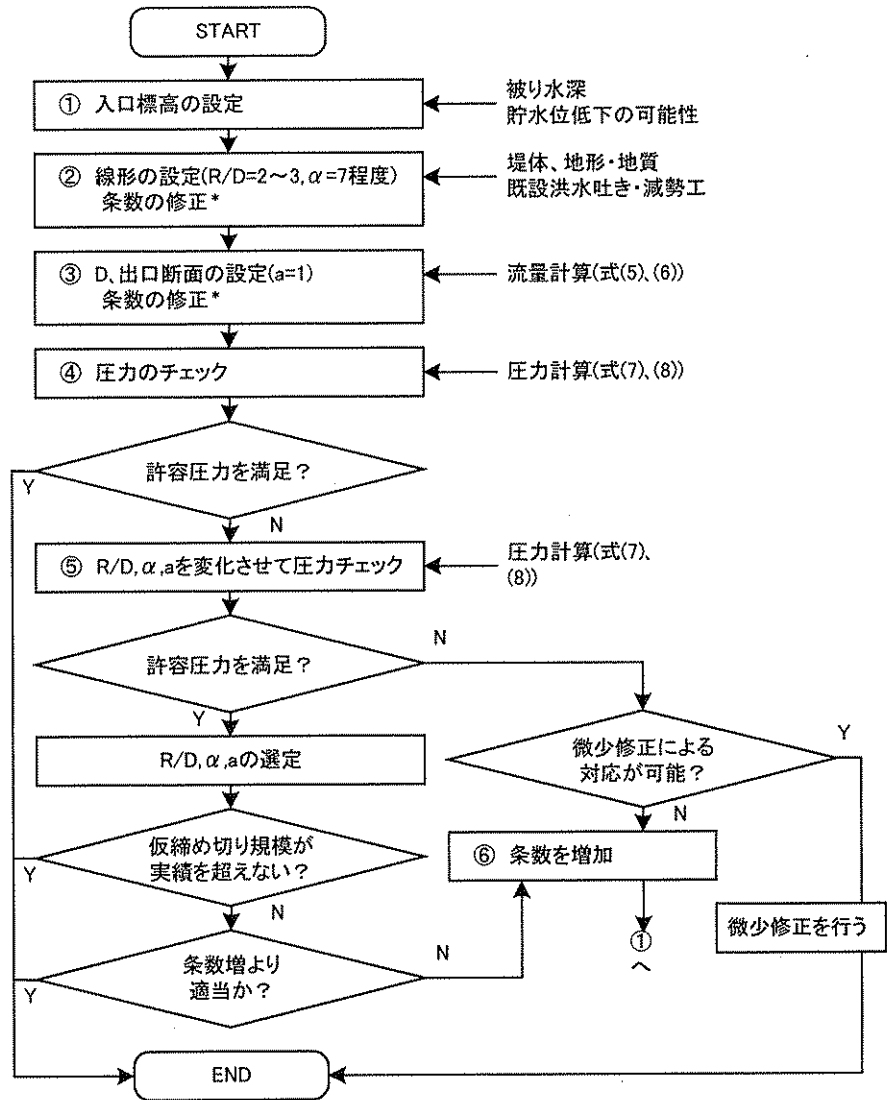
②設定した入口標高に対し、放流管線形を設定する。堤体内通過部の放流管は施工性を考慮して水平配置とし、曲管については、 $R/D=2\sim 3$ 、 $\alpha=7$ 程度を初期設定とする。このとき、 $D$ は損失水頭を無視して放流量を算定し、大まかな値を設定しておく。 $D$ はブロック幅の制約を受けるので、必要条数及び1条あたり放流量についても仮設定する。

③仮定した線形に対し、 $a=1$ として式(5)、(6)より放流量計算を行い、 $D$ 及び放流管出口断面を設定する。このとき、必要に応じ条数設定を見直す。

$$Q = CA_0 \sqrt{2gH_0} = aCA \sqrt{2gH_0} \quad (5)$$

$$C = C_0 \sqrt{\frac{1}{1 + a^2 C_0^2 \left( f_c + \sum \frac{f_b}{7} + fl_0/D + f_0 \right)}} \quad (6)$$

ここに、 $H_0$ ：放流管出口中心標高を基準とする貯



(注) \* は2回目以降の通過では必要ない。

図-10 増設放流管の設計手順

水池での全水頭、 $C_0$ ：ゲートの流量係数、 $A_0$ ：放流管出口断面積、 $A$ ：管径 $D$ の管路一般部の断面積、 $a = A_0/A \leq 1$ 、 $l_0$ ：管路の全長、 $\sum \frac{f_b}{7}$ ：管路系全体の曲がりによる損失を表す係数、 $f_0$ ：副ゲートの存在等、主ゲート付近の形状変化に伴う損失を表す係数である。

④設定した線形及び断面をもとに、式(7)、(8)を用いて圧力のチェックを行う。許容圧力は議論のあるところであるが、差し当たり通常の高圧放流管に準じ大気圧とする。また、 $\epsilon$ として、図-9の直線から求められる値を1.5倍した値を用いる。これは、鉛直曲がりと水平曲がりの差が20%程度あること及び管内平均流速に対する $\epsilon$ のばらつきが20%程度以下の範囲で見られたことを勘

案して設定である。

$$p/\gamma = H_0 - z$$

$$-\frac{v_m^2}{2g} \left\{ f_c + \sum f_b + f \frac{l_1}{D} + h(R/D) + \varepsilon \right\} \quad (7)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{2gH_0}{1/a^2 C_0^2 + \left( f_c + \sum f_b + fl_0/D + f_0 \right)}} \quad (8)$$

条件が満足されればそれでよい。許容圧力が確保されない場合には、 $R/D$ 、 $\alpha$ 、 $a$ を変化させて許容圧力条件を満足する組合せを求める。ここで、 $R/D$ は線形形状により、 $\alpha$ は溶接可能な最小部材により、また、 $a$ はブロック内に設置可能な最大 $D$ により制約を受けるので、その範囲内での検討となる。

なお、 $D$ が小さい場合には、 $\alpha=0$ とすることが可能である。また、 $R/D$ 、 $a$ を変化させると放流量が変わるので、放流量についてもそのつど計算しなければならない。

$R/D$ 、 $\alpha$ 、 $a$ を変化させることで圧力条件が満足される場合には、その中から適当な組合せを選定する。

⑤  $R/D$ 、 $\alpha$ 、 $a$ を変化させても圧力条件を満足することができない場合には、放流管入口標高を下げ、②～④を繰り返す。

放流管入口標高は、現地地形により、その範囲が制約されるので、その範囲での設定となる。また、施工時水深が既往の実績範囲である30m程度を大きく超える場合には、施工に過大な負担をかけることも考えられるので⑥へ進むことと合わせ比較検討する。

⑥②～⑤の検討で圧力条件を満足する解が得られない場合には、放流管条数を増やし、1条当たりの放流量を小さくする。その上で、(条数設定の部分を除き)①から再検討する。

このとき、許容圧力との圧力差が小さい場合には、次の対処方法により圧力条件を満足できる可能性があるため、検討する。

・堤体通過部下流の鉛直曲がりでの圧力条件が満足されない場合には、コンクリート打設等の施工が確実に行える範囲で堤体通過部に勾配を設けてみる。

・曲がりの下流側で圧力条件が満足されない場合には、曲がり下流側で $\varepsilon$ が小さくなることを考慮し、 $\varepsilon$ を $\varepsilon_{\max}$ の50%程度としてみる。これは、曲がりの下流側では $\varepsilon$ が小さくなることを考慮したものであるが、得られた設計形状については、模型実験による確認が必要である。

### 3. 2 湾曲開水路

図-11に、斜壁沿い水面及び減勢工への放流軌跡の例を示す。図より、斜壁沿い水面は屈折位置から下流側に向かって水面が上昇する傾向にあることが分かる。上昇する水面はそのまま放流軌跡に受け継がれるが、放流軌跡は自由落下的な軌跡を描いており、水面ピークに達した後に放物線的に落下する。今回の実験範囲では、ほとんどのケースで図と同様の水面形状を示しており、最大水面が斜壁内で生じたのは、水路幅 $B$ が大きく、流量、落差の小さい一部ケースのみであった。

図中には、斜壁の屈折角 $\theta$ 及び斜壁への流入条件が同じで水路幅のみ異なるケースを比較して示してあるが、両者の導流壁沿い水面形、放流軌跡はほぼ一致しており、 $B$ の影響は小さいことが分かる。このことについても、他のケースも同様であった。

壁沿い水面形は上記のように比較的複雑な変化を示しており、同じ流入条件に対し、斜壁上の水深が一定になる既往の衝撃波理論では十分に解析されないことが考えられた。このことを踏まえ、ここでは次元解析による実験式を作成することを試みた。

導流壁沿い及び落下軌跡の水位を $h_w$ とし、表面張力や粘性の影響が小さいとすると、屈折水路に係わる現象 $f$ は次式で表される。

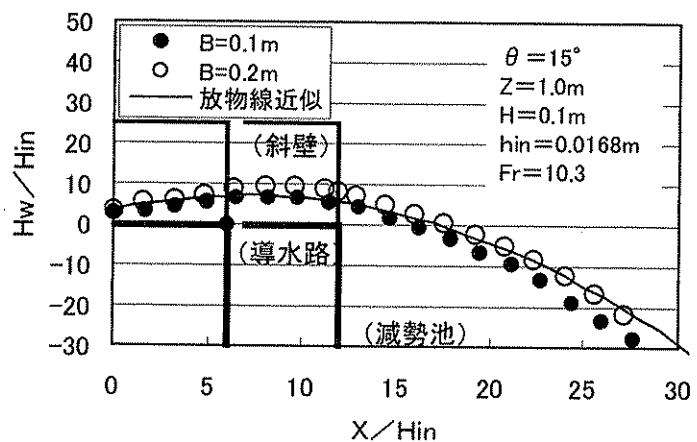
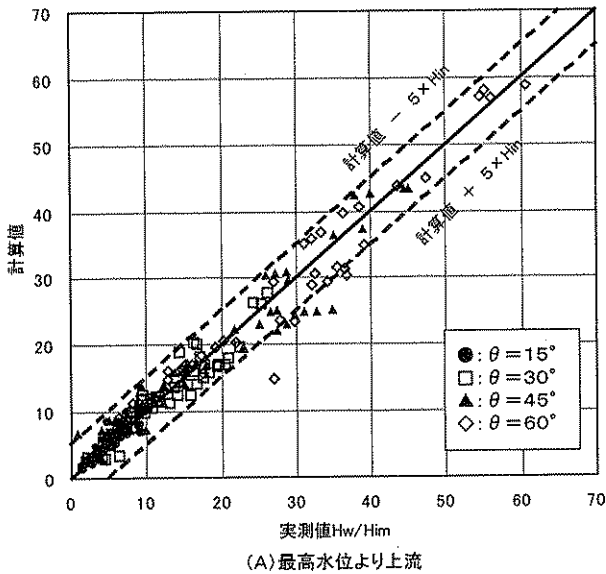


図-11 導流壁沿い水位及び放流軌跡例 (Fr=10.3,  $\theta=15^\circ$ )

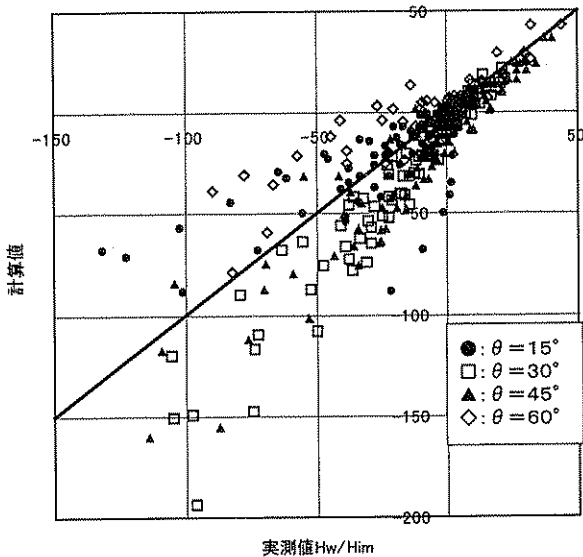


表-2 式(12)のpと係数

p	係数						
	a <sub>1</sub>			a <sub>2</sub>			a <sub>3</sub>
	k <sub>12</sub> (×10 <sup>-5</sup> )	k <sub>11</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	k <sub>10</sub> (×10 <sup>-2</sup> )	k <sub>22</sub> (×10 <sup>-4</sup> )	k <sub>21</sub> (×10 <sup>-2</sup> )	k <sub>20</sub> (×10 <sup>-1</sup> )	
h <sub>w0</sub>	4.29	-5.07	9.20	3.91	1.44	-3.41	1
h <sub>wmax</sub>	5.72	-0.29	0.13	-9.70	8.54	-5.72	1
x <sub>hwmax</sub>	-3.80	9.18	-9.15	-3.53	1.70	1.51	0



(A) 最高水位より上流



(B) 最高水位より下流

図-12 屈折水路水位の計算値と実験値の比較

$$f = f(h_w, h_{in}, v, g, \theta, B) \quad (9)$$

ここに、 $h_w$  : 水路底面を基準とする導流壁沿い

及び放流軌跡の水位、 $h_{in}$ 、 $v$  : それぞれ斜壁への流入水深及び流速、 $g$  : 重力加速度である。基礎次元量は長さや時間の2つであり、独立な無次元量は4個である。代表長さとして $h_{in}$ を採用すると、無次元量の関係式として次式を得る。

$$h_w/h_{in} = F(Fr, \theta, B/h_{in}) \quad (10)$$

ここに、 $Fr = v/(g h_{in})^{1/2}$  (フルード数) である。先に示したように、このうち  $B/h_{in}$  は影響しないものとして省略すると、結局  $h_w/h_{in}$  は  $Fr$  と  $\theta$  のみにより表されるものと推察される。

水面形については、図-11より放物線近似が可能なものと考え、次式によるものとした。

$$\frac{h_w}{h_{in}} = a \left( \frac{x}{h_{in}} - \frac{x_{hwmax}}{h_{in}} \right)^2 + \frac{h_{wmax}}{h_{in}} \quad (11)$$

$$a = \left( \frac{h_{w0}}{h_{in}} - \frac{h_{wmax}}{h_{in}} \right) / \left( \frac{x_{hwmax}}{h_{in}} \right)^2$$

ここに、 $x$  : 導流壁屈折部始端から測った水路に直角方向の距離 (減勢工側を正、図-4参照)、 $h_{w0}$  : 屈折水路の上流端の  $h_w$ 、 $h_{wmax}$  :  $h_w$  の最大値、 $x_{hwmax}$  :  $h_w$  の生じる  $x$  である。 $h_{w0}$ 、 $h_{wmax}$ 、 $x_{hwmax}$  は  $Fr$ 、 $\theta$  の関数として表されるものと考え、幾つかの関数形について検討した結果、次式を得た。

$$p/h_{in} = a_1 Fr^2 + a_2 Fr + a_3 \quad (12)$$

$$a_1 = k_{12} \theta^2 + k_{11} \theta + k_{10}$$

$$a_2 = k_{22} \theta^2 + k_{21} \theta + k_{20}$$

$p$  と各係数の関係を表-2に示す。なお、 $v$  及び  $h_{in}$  の算定は、越流水脈流下時の損失観測に基づく実験式を用いて行った<sup>10)</sup>。

図-12に、上式により求められる計算値と実験値の関係を示す。(A)に示した実験値は、導流壁屈折開始点から水位が最大値になるまでのものであり、(B)に示した実験値は、水位が最大値となった以降のもの

のである。水位が最大値になるまでは、計算値は実験値を流入水深  $h_{in}$  の5倍程度以内でよく近似していることが分かる。しかし、水位が最大値を過ぎると、距離が離れるほど計算値と実測値の差が大きくなりなり、計算値が実測値を近似しているとは言い難い。

### 3. 3 減勢工<sup>11), 12)</sup>

#### 3. 3. 1 跳水条件

空中放流水脈の跳水現象は3次元的であり、かつ着水点と導流壁や副ダムの位置関係の影響を受けるものである。従って、関連するパラメーターが多く無次元パラメーター間の関係から実験式を求める方法では、現象を十分に説明することが困難である。

図-13は露出射流が無くなる下流水位条件について、各種パラメーターの関係を試行錯誤的に検討し、最もまとまりの良い図として得たものである。図中  $d$  : 着床時放流水脈径、 $h_2$  : 下流水深で、当該流量が刃型せきを乱れなく越流する場合の水深として求めた、 $\theta$  : 着床時放流水脈が水面となす角、 $\theta_0$  : 水脈の放流方向が導流壁となす角である(図-5、図-14参照)。図では $\theta_0$ が90度の場合とその他で値が異なることからそれぞれの平均値を示しているが、依然としてばらつきが大きく、フルード数をはじめ他のパラメーターの影響も無視できないものと思われる。

以上の状況に鑑み、本調査では、運動量式に基づく解析をもとに、各種パラメーターの影響を検討することとした。

空中放流水脈の $\theta$ は放流条件により変化する。そこで、まず運動量式により水脈の分散状況を次の仮定を用いて算定した(図-14参照)

- ①ノズルからの放流水脈はエネルギー損失のない自由落下にて着床する。
- ②着床後の流向変化によるエネルギー損失及び底面せん断力を無視する。
- ③水脈の分散は、着床面内のある点を中心に放射状になされる。

結果は以下の通りであり、式(13)、(14)により分散する水脈の中心位置  $x_0$  が求まり、式(15)、(16)により着床断面外縁上の流量及び水深分布を求めることができる。

$$\frac{\int_0^{\pi} l_{\xi}^2 \cos \xi d\xi}{A'_0} + \frac{\pi \int_0^{\pi} l_{\xi}^3 \cos \xi d\xi}{16A'_0 F_r^2} - \cos \theta = 0 \quad (13)$$

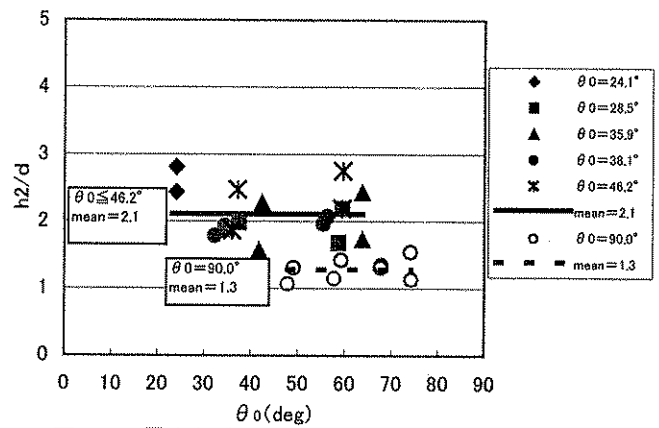


図-13 露出射流のなくなる下流水深条件

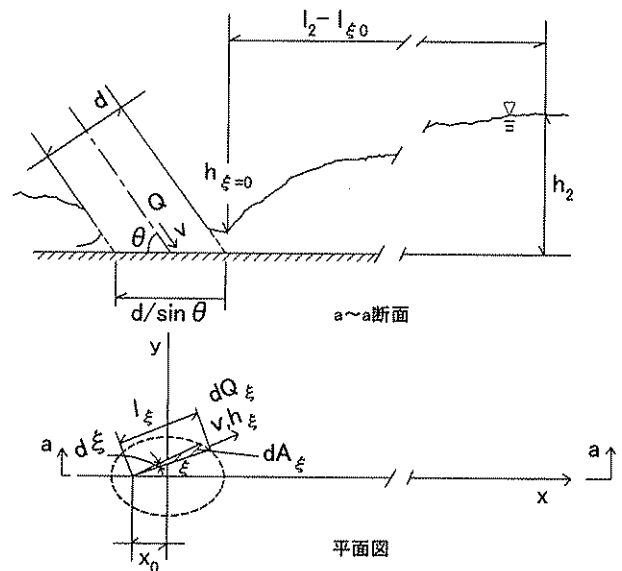


図-14 水脈の分散及び跳水に係わる諸量説明図

$$l'_{\xi} = \sqrt{(x'_{\xi} - x'_0)^2 + y'_{\xi}{}^2} \quad (14)$$

$$x'_{\xi} = \frac{x'_0 \tan^2 \xi \pm \sqrt{-x'^2_0 \sin^2 \theta \tan^2 \xi + t/4}}{t}$$

$$y'_{\xi} = \sqrt{1/4 - \sin^2 \theta x'^2_{\xi}}$$

$$dQ_{\xi} / Q = dA_{\xi} / A_0 \quad (15)$$

$$h_{\xi} = \frac{dQ_{\xi}}{v l_{\xi} d\xi} = \frac{l_{\xi} Q}{2v A_0} \quad (16)$$

ここに、 $l'_{\xi} = l_{\xi} / d$ 、 $A'_0 = A_0 / d^2$  ( $A_0$  : 着床断面積 =

$\pi d^2 / 4 \sin \theta$ )、 $F_r = v / \sqrt{gd}$ 、 $x'_{\xi} = x_{\xi} / d$ 、 $y'_{\xi} = y_{\xi} / d$ 、

$x'_0 = x_0 / d$ 、 $t = \sin^2 \theta + \tan^2 \xi$ 、 $x_{\xi}$ 、 $y_{\xi}$  : それぞれ  $l_{\xi}$

の着床断面外縁での  $x$  及び  $y$  座標であり、複号は、 $0 \leq \xi \leq \pi/2$  で +、 $\pi/2 < \xi \leq \pi$  で - をとる、 $g$  : 重力加速度、 $v$  : 着床位置での流速、 $\xi$  : 分散水脈成分の流向と  $x$  軸のなす角、 $h_\xi$ 、 $Q_\xi$  : それぞれ、着床断面外縁における  $\xi$  方向の分散水脈の水深及び  $\xi$  と  $\xi+d\xi$  に挟まれた微小区間を通過する流量、 $l_\xi$  :  $\xi$  方向にとった分散中心位置  $(x_0, 0)$  と着床断面外縁までの距離、 $dA_\xi$  :  $\xi$  と  $\xi+d\xi$  に挟まれた微小区間 (図の斜線部分) の面積 ( $=0.5l_\xi^2 d\xi$ ) である。

分散水脈が放射線状に跳水するものとするとき  $\xi$  方向の跳水式は次式となり、領域が十分広い場合の跳水に必要な計算が可能になる。

$$\left(\frac{h'_2}{h'_\xi}\right)^3 \left(\frac{l'_2}{l'_\xi}\right)^2 - (2F_r^2/h'_\xi + 1) \frac{h'_2 l'_2}{h'_\xi l'_\xi} + 2F_r^2/h'_\xi = 0 \quad (17)$$

ここに、 $h'_\xi = h_\xi/d$ 、 $h'_2 = h_2/d$ 、 $l'_2 = l_2/d$ 、 $h_2$ 、 $l_2$  : それぞれ跳水終端の流速分布がほぼ一様な断面での水深、 $x_0$  からの距離である。

上記計算値と実験値の比較を図-15に示す。ただし、計算値は、最も大きな下流水深を要する  $x$  軸方向 ( $\xi=0$ ) の成分に対し求められる  $h_2$  とし、跳水長を表す  $l'_2=4.0$  としている。図より、図-13と比較してばらつきは小さくなっているが、依然として30%程度の誤差が生じていることが分かる。

以上の式は、無限領域での跳水を考えており、側壁等の影響は考慮していない。減勢池規模を表すため、ここでは、跳水の運動量式において、下流側検査面の作用圧力が静水圧分布からずれる割合を表す係数  $\lambda$  を導入することとした。 $\lambda$  は、着床地点から側壁までの距離が近いなど動水圧が作用する場合には1以上の値を、平面渦などにより圧力低減が生じる場合には1以下の値をとるものと予想される係数であり、係数  $\lambda$  の導入により、式 (17) は、第一項に  $\lambda$  が掛かった式形となる。

実験結果を近似する  $\lambda$  として、次式が得られた。

$$24.1 \text{ 度} \leq \theta_0 \leq 46.2 \text{ 度}$$

$$\lambda = a(l'_2 - l'_{\xi=0})/L'_0 \quad (18)$$

$$\theta_0 = 90 \text{ 度}$$

$$\lambda = 1 + a(l'_2 - l'_{\xi=0})/L'_0 \quad (19)$$

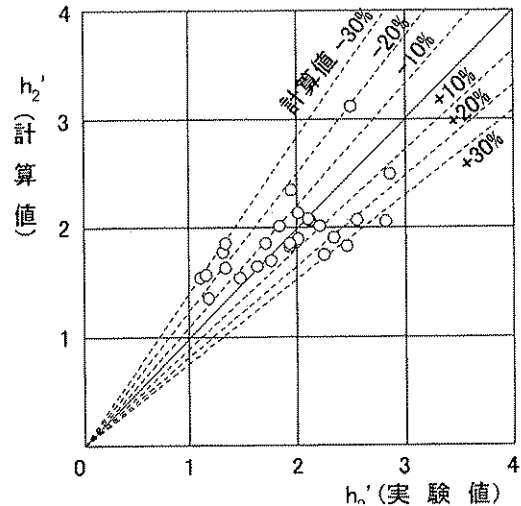


図-15  $h_2'$  の実験値と計算値の関係

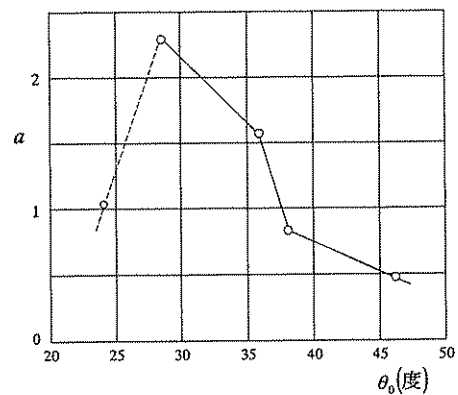


図-16  $a$  と  $\theta_0$  の関係 ( $24.1^\circ \leq \theta_0 \leq 46.2^\circ$ )

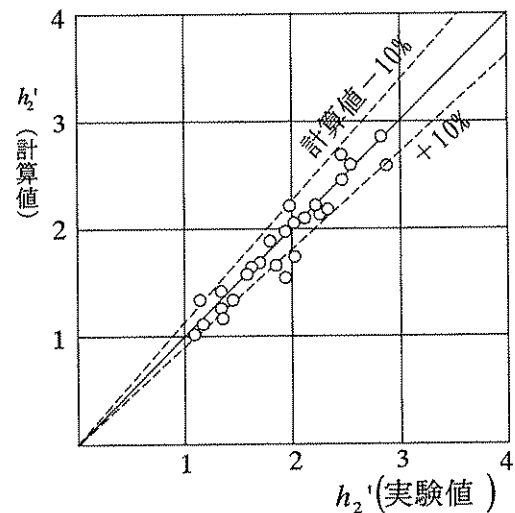


図-17  $h_2'$  の実験値と計算値の比較 ( $\lambda$  による補正)

ここに、 $L'_0 = L_0/d$ 、 $L_0$  :  $\xi=0$  の方向の水脈下流端から導流壁又は刃型せきまでの距離であり、\*は  $\lambda=1$  の場合の値を表している。 $a$  は、 $\theta_0$  により変化する係数であり、図-16で示される。 $a=90$  度の  $a=0.59$  である。図-17には、上記方法で求められる

計算値と実験値を比較して示すが、計算値は実験値とよい一致をみている。

### 3. 3. 2 適用可能な流況

跳水に必要な下流水深を得たとしても、減勢工として適当な流況を確保できるとは限らない。

ここでは、刃型堰高が前節に示した方法で求められる下流水深を確保できる以上のものである場合を対象に、得られる流況を次のように分類した。

流況 A：減勢池内の平面渦は弱く、池内の流況は安定している。また、副ダムを越える流れも飛散することなく、幅方向の偏りも少ない（写真-1 (a)）。

流況 B<sub>1</sub>：A と C の中間で A に近いもの。

流況 B<sub>2</sub>：A と C の中間で C に近いもの。

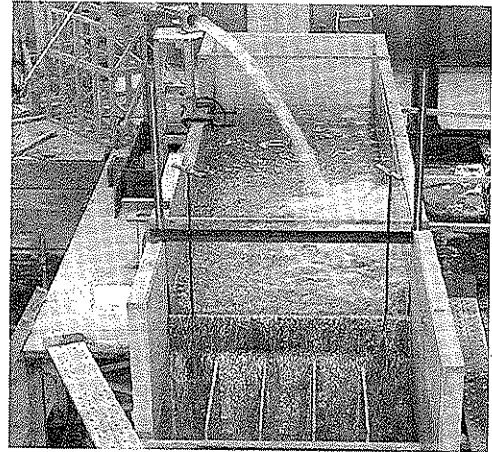
流況 C：減勢池内に顕著な平面渦を生じることにより、又は、放流水脈が刃型堰に近いことにより、刃型堰を越える流れが飛散傾向になるとともに、越流量の偏りも顕著となる（写真-1 (b)）。

実験では、刃型堰高  $h_2$  を、必要下流水深以上が得られる堰高の範囲で 0.4m を最大として 0.1m ピッチで変化させ、得られた流況を分類した。上記流況の違いは、減勢長と導流壁または刃型堰までの距離の関係を主たるパラメーターとするものと考え、ここでは、導流壁までの距離  $L_1$ 、刃型堰までの距離  $L_2$  と跳水長のそれぞれの方向での水平面投影距離の比と流況の関係を調査した。結果を図-18 に示す。図より、上記パラメーターにより流況区分が可能なことが分かる。

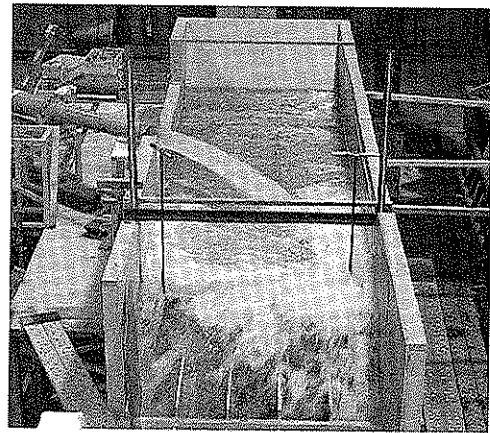
ここで、流況 C は、常時使用する放流設備としては、避けるべき流況と考える。流況 B<sub>2</sub> は全体の施設規模によっては採用することも可能であるが、ここでは、流量規模によらず採用可能な流況として流況 A 及び B<sub>1</sub> を採用すると、採用可能な流況を得る条件は次式で与えられる。

$$1.1 \frac{L_2' - L_1' \cos \theta_0}{L_2'} < -0.4 \frac{L_2' - L_1' \sin \theta_0}{L_1'} + 0.82 \quad (11)$$

なお、刃型堰高が所要の下流水深を与える以下の場合には、ほとんど全てのケースで流況 C、またはより飛散の大きいものとなっており、露出射流の発生は、これを防止する必要がある事が確認されている。



(a) 流況A



(b) 流況B

写真-1 減勢池内流況例 ( $h_2 > h^*_2$ )

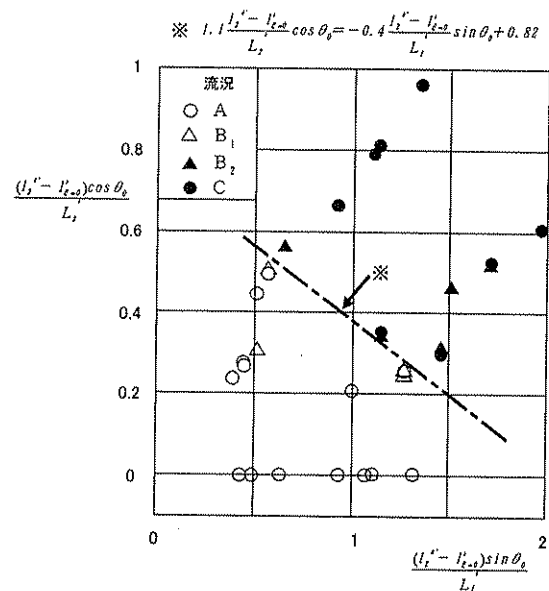


図-18 減勢池流況区分 ( $h_2 > h^*_2$ )

### 3. 4 減勢時発生音<sup>14), 15)</sup>

#### 3. 4. 1 発生音の大きさ

図-18 に放流設備 1 条(門)当りの着水時発生音の

音響パワーレベルと放流量の関係を示す。図より、1条あたりの発生音の音響パワーレベルは流量が増加するに従い大きくなること、音響パワーレベルの増加割合は流量が大きくなるに従って小さくなるのが分かる。また、同じ流量に対する音響パワーレベルは空中放流形式の方が、跳水式のそれより大きくなる傾向が見られている。

B、C ダムの音響パワーレベルは他の例に比較してかなり大きくなっているが、これらダムではダム下流面キャットウォークにて計測を行っており、反射波や減勢池から吹き上がる風の影響を受けている可能性がある。

模型実験及び現地観測データを比較した跳水式に対する発生音の検討によれば<sup>13)</sup>、流入エネルギーが音に変換する割合（変換効率）が、流入フルード数の関数として与えられることが示されている。図-19 に変換効率と流入フルード数の関係を示す。変換効率は次式で定義される。

$$\text{変換効率} : \beta = W/E \quad (20)$$

$$W = 2\pi^2 \frac{P_r^2}{\rho_a c} \quad (W) \quad (21)$$

$$E = 0.5 \rho_w Q v^2 \quad (22)$$

ここに、 $\rho_a$ : 空気密度  $1.2 \text{ kg/m}^3$ 、 $c$ : 音速  $334 \text{ m/s}$ 、 $P_r$ : 距離  $r(\text{m})$  における音圧 (pa)、 $\rho_w$ : 水の密度  $1000 \text{ kg/m}^3$ 、 $Q$ : 流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $v$ : 突入流速 ( $\text{m/s}$ ) である。

また、流入フルード数  $Fr = v/\sqrt{gh_{in}}$  であり、跳水式ダムでは、 $v = 0.9 \times (2gZ)^{1/2}$ 、 $Z$ : 貯水位 - 副ダム標高とし、流入水深  $h_{in}$  はゲート開きと管幅の大きい方を  $L$  として、 $h_{in} = Q/(Lv)$  にて求めた。また、空中放流式では式(2)で示される空気抵抗を考慮して着水点流速を求め、跳水式と同様に流入水深を求めた。

図-19 より、 $Fr$  が小さくなるに従って  $\beta$  が大きくなる傾向にあること、また、 $Fr$  が  $20 \sim 30$  以上では  $\beta$  の変化が小さいことが分かる。

また、空中放流式の  $\beta$  は跳水式のそれより全般に大きく、同じ放流量、フルード数の条件での発生音は空中放流式におけるものが大きくなるのが分かる。空中放流式のうち B、C におけるものは A、D のものよりかなり大きい値となっているが、先に述べたように B、C のものはアーチダム堤体の反射等の影響を受けていることが考えられ、発生音としては A、D の関係を用いるのが妥当と思われる。

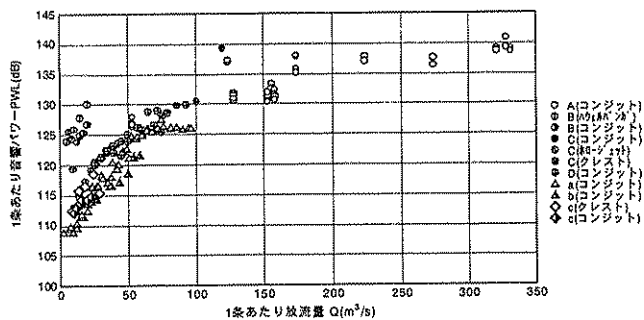


図-19 音響パワーレベルと1条あたり放流量の関係

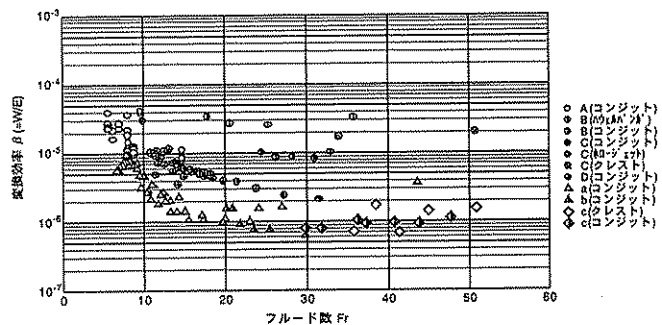


図-20 放流設備1条あたりの変換効率とフルード数の関係

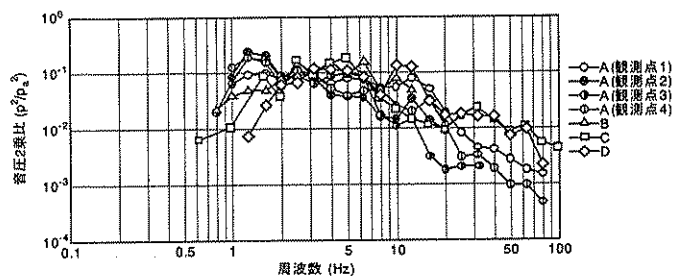


図-21 空中放流式の周波数特性

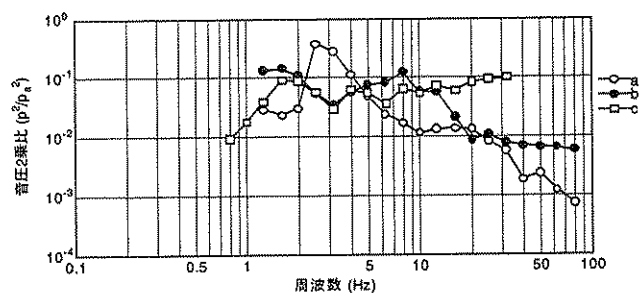


図-22 跳水式の周波数特性

### 3. 4. 2 周波数特性

図-20、21 にそれぞれ空中放流式、跳水式の周波数特性を示す。図は、1/3 オクターブ分析で得られ

た音圧の2乗値をオーバーオール値の2乗で除して無次元化したものである。また、放流量やコンジット、バルブ、クレストなどの放流設備による違いは小さく、観測点ごとの平均値を示している。

図より、空中放流式の周波数特性は1~10Hz付近が緩やかな山となっており、ダムによる差は小さいことが分かる。跳水式についても、空中放流式と同様の傾向を示しているが、aダムでは2~8Hz帯で先鋭なピークを有しており、他の観測値とやや異なる傾向となっている。aダムで明確なピークが生じている理由は明確ではないが、aダムではコンジット出口の減勢池内にゲートハウスが隣接して設けられており、その影響によることが考えられる。

#### 4. まとめと課題

以上の結果を今後の課題も含めてまとめると以下の通りである。2)、3)の事項については、今後の課題も残されており、現在検討を継続している部分もあるが、本調査により一応の成果を得たものと考えている。

- 1) 湾曲放流管について、スムーズ管及びエビ継ぎ管の壁面作用圧力特性を明らかにし、キャビテーションに対する安全性を確保しつつ管内流速を大きくする放流管の設計方法を示した。
- 2) 湾曲開水路流について、最も曲率半径の小さい屈折水路を対象に、導流壁沿い水深及び減勢工への放流水脈軌跡を推定するための実験式を作成した。  
実験式は、適用範囲が実験条件内に限られる。実験は比較的幅広い条件に対し実施しているが、より広い条件に対応するためには解析的な現象の再現が必要なものと思われる。このことを考慮し、現在運動量式に基づく解析を継続実施している。
- 3) 減勢工について、円形放流水脈を放流する場合を対象に、運動量式に基づく解析を行い、跳水条件及び適用可能な流況を得るための条件を示した。  
検討では、減勢池規模の影響を入という補正係数で表したが、物理的な意味合いが必ずしも明確でない問題を有している。実験範囲を超える条件に適用していくためには、物理的意味がより明確な影響評価方法の確立が望まれる。そのためには、まず、無限領域を対象とした提案式の検証を行う必要があり、現在実施中である。
- 4) 空中放流水脈の減勢時発生音について、同じ流量、流入フルード数の場合の発生音は跳水式のそ

れと比較して大きいこと、周波数特性は1~10Hz付近に緩やかな山を形成する雑音であり、跳水式のそれと同様であることを示した。

提示した観測結果より、空中放流時の発生音予測が可能である。

#### 参考文献

- 1) 柏井条介、村岡敬子：ダム漸縮導流水路の水理特性、土木技術資料、Vol.30、No.4、pp.3~8、1988
- 2) Ippen, A.T.: Mechanics of supercritical flow, Symposium on high-velocity flow in open channels, Trans. ASCE, Vol.116, pp.268~295, 1951
- 3) 桜井力、柏井条介、桜井寿之：地下に設けられる跳水式減勢工の発生音特性、水工学論文集、第43巻、pp.491~496、1999
- 4) 川上謙太郎：ノズルジェットの水平到達距離に関する研究、土木学会論文報告集、第191号、pp.83~89、1971
- 5) 川上謙太郎：スキージャンプ式余水路射出水の水平到達距離に関する研究、土木学会論文報告集、第219号、pp.37~44、1973
- 6) 柏井条介、宮脇千晴：円形放流管湾曲部の圧力特性、ダム工学、Vol.9-4、pp.245~25、1999
- 7) 桜井寿之、柏井条介：円形放流管湾曲部流れの数値シミュレーション、ダム技術、No.166、pp.53~58、2000
- 8) 小野雅人、柏井条介：水平エビ継ぎ湾曲管路の圧力特性、土木学会第57回年次学術講演会、pp.169~170、2002
- 9) 柏井条介：既設重力式コンクリートダム堤体に設置する増設放流管の水理設計、ダム技術、No.207、pp.31~47、2003
- 10) 野口澄彦、中西徹：ダム堤趾導流部の流れと導流壁高の設計法、土木技術資料、Vol.32-3、pp.45~51、1990
- 11) 田村洋満、柏井条介：減勢工側方からの空中放流水脈の側壁沿い這い上がり位置と高さ、土木学会第57回年次学術講演会、pp.173~174、2002
- 12) 柏井条介、田村洋満：放流管空中放流水脈の跳水条件、土木技術資料、Vol.44-9、2002
- 13) 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室：天ヶ瀬ダム水理模型実験報告書(その2)、土木研究所資料、No.3718、2000
- 14) 小野雅人、桜井力：減勢工の発生音特性に関する現地観測、ダム工学会第11回研究発表会講演集、2000
- 15) 小野雅人、柏井条介：ダム放流音に関する現地観測—天ヶ瀬ダム(アーチ式ダム)の放流音特性、土木技術資料、No.44-7、pp.58~63、2002