

## 【技術ノート】

## 沈砂池用排砂ボールゲートの水理模型実験

## Hydraulic Model Test of Discharge Ball Gate in Sedimentation Basin

鈴木 孝 則\*  
Takanori SUZUKI宮 本 佳 典\*\*  
Yoshinori MIYAMOTO長 井 常 満\*\*\*  
Tsunemitsu NAGAI若 松 力\*\*\*\*  
Chikara WAKAMATSU

## 1. はじめに

「ボールゲート」とは「ボールの形をしたゲート」という、形状から名付けられた非常にユニークなゲートである。

今回、このゲートの水理模型を作成し、動作確認実験をはじめ、いくつかの実験を行った。その結果、実用機においても十分機能すると思われるデータが得られたので、ここにボールゲートの紹介をも兼ねて、この実験について述べる。

## 2. ボールゲートとは

## (1) 開発目的

水路式発電所の溪流取水設備（タイプは各種あるが、ここでは溪流取水設備で一般的なスクリーン底部取水方式—チロルタイプを対象に考えている）においては、通常時に少しずつ沈砂した土砂、あるいは洪水時に濁水と共に流入してくる多量の土砂を排出する際、設置場所がその性質上山岳僻地であり、電源もなく、自動排出装置を持たないため、排出のための作業員の派遣や、作業そのものが困難で、管理に苦慮しているのが現状である。

また、洪水時には、土砂混じりの濁水が導水路に流れ込み、導水路への堆砂という問題をもかかえている。

そこで、これらの問題を解決しようと、洪水時の増水量を利用して排砂ゲートの開閉、排砂を自動、無人化するこのボールゲートを考案した。

## (2) 原理と動作説明

原理は単純である。図-1のようにすりばち状の沈砂池底の中央に排砂口が設けられており、そこにボール状をした栓（以下「ボールゲート」という）がはまってい

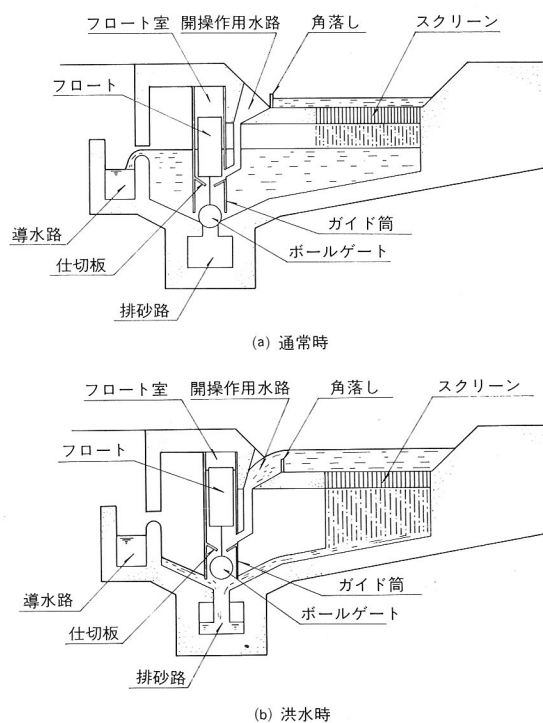


図-1 ボールゲート

る。このボールゲートにはロープを介してフロートが連結されており、①開操作の際はフロート室に水を満たし、フロートに浮力を与え、ボールゲートを引き上げる。②閉操作の際はフロート室への水の供給をストップすると、フロート室底の小孔よりフロート室内の水が流出するとともに、ボールゲートは閉じる。

次に、通常時（図-1(a)）と洪水時（図-1(b)）の各々の場合について動作説明をする。

## a) ボールゲートの通常時

通常時は、図-1(a)のように取水スクリーン上流の水

\*川田工業㈱富山本社技術部次長 \*\*川田工業㈱富山本社技術部開発課課長\*\*\*川田工業㈱富山本社技術部開発課係長  
\*\*\*\*川田工業㈱富山本社技術部開発課

深が、開操作設定水深以下なので、開操作水は角落しを越流せず、したがって、フロート室への供給がないのでボールゲートは閉塞したままである（スクリーンより取水した水は、沈砂後、導水路へ供給される）。

#### b) ボールゲートの洪水時

洪水時は、図-1(b)のように取水スクリーン上流の水深が増加し、角落しを越流した水が開操作水としてフロート室へ流れ込む。この水量によりフロート室水位が上り、フロートの浮力によってボールゲートは開き、沈砂していた土砂は水と共に、迅速に排出される。そして、洪水が続いている間中、ボールゲートは開のままであり、土砂混じりの水は排出され続ける。

### 3. 実験目的

この実験は下記の目的で行った。

- (1) ボールゲートの引上力の推定
- (2) 排砂状況の確認
- (3) 全体動作の確認

### 4. 実験装置

#### (1) 想定条件

この種の実験においては、仮定の設置環境を想定して実験装置を決定することが一般的といえるが、今回の実験では下記のような条件を想定して行った。

- ① 河床幅：B 5.0m
- ② 河床勾配：i 1/10
- ③ 最大使用水量取水位：h 0.1m
- ④ 土砂流出量：Ks 370m<sup>3</sup> (km<sup>2</sup>・年)
- ⑤ 流域面積：As 1.0km<sup>2</sup>
- ⑥ 年間動作回数（洪水回数）：n<sub>0</sub> 10回

また、沈砂池の仮定形状図を図-2に示す。

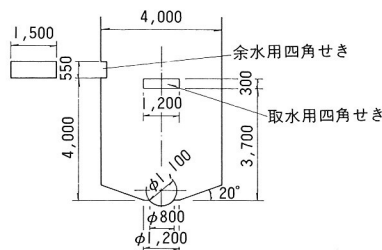


図-2 沈砂池仮定形状図

#### (2) 実験模型の縮尺

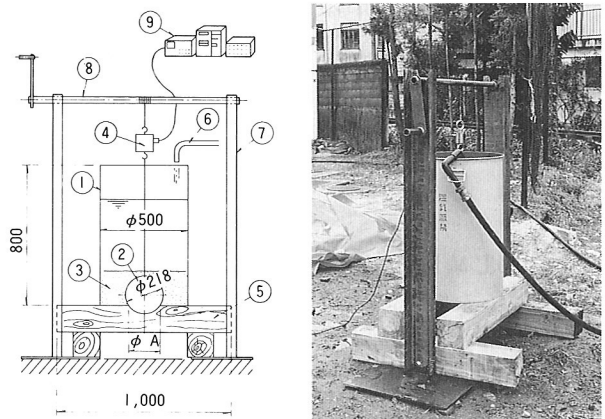
模型はできるだけ想定実機に近い大きさが好ましいが、実験場所、製作上等の制約から、ボール引上力の測定には、長さのスケールで1/5、1/20の2種類、排砂状況の確認、全体動作の確認には1/20の尺度を採用した。

その際、相似率はフルード相似が適用され、実機（添字P）と模型（添字m）の各々の単位の縮尺比は次のとお

りである。

- ① 長さ  $L_p/L_m = L_r$  .....(1)
- ② 面積  $A_p/A_m = L_r^2$  .....(2)
- ③ 流速  $V_p/V_m = L_r^{1/2}$  .....(3)
- ④ 流量  $Q_p/Q_m = L_r^{5/2}$  .....(4)
- ⑤ 体積  $M_p/M_m = L_r^3$  .....(5)
- ⑥ 粗度係数  $n_p/n_m = L_r^{1/6}$  .....(6)

1/5スケール実験装置を図-3、写真-1、2に、1/20スケール実験装置を写真-3にそれぞれ示す。



- ① ドラム缶  $\phi A = 120\text{mm}, 150\text{mm}, 180\text{mm}$  計 3 本
  - ② プラスティック球  $\phi 218\text{mm}$ , 6.84kg 1 個
  - ③ 砂（5mmフルイを通過したもの） 1 m<sup>3</sup>
  - ④ ロードセル（定格 100 kg） 1 セット
  - ⑤ 角材 □150×150×1000 4 本
  - ⑥ 給水装置 1 式
  - ⑦ 支持台 1 式
  - ⑧ ハンドル付巻上軸 1 式
  - ⑨ 記録、演算装置
- 1) ブリッジボックス 東京測器 SB-120B 1 式
  - 2) 動ひずみ計 共和電業 DPM110A 1 式
  - 3) 電磁オシログラフ 共和電業 RMV-500 1 式
  - 4) データレコーダー 共和電業 RTP-501AL 1 式

図-3、写真-1 1/5スケール実験装置

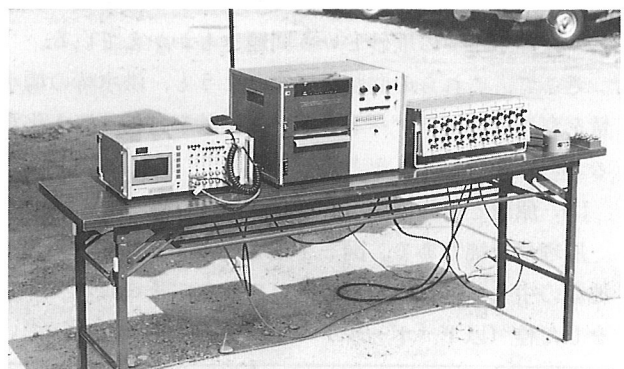


写真-2 1/5スケール実験、記録、演算装置

写真-3 1/20スケール  
実験装置

## 5. ボール引上力測定実験

## (1) 1/20スケールの模型による実験

## a) 実験方法

1/20スケール透明模型のフロート部分を外し、ボールゲートに直接糸を連結し、引上力をバネばかりで測定する(従って1/20スケール実験は、ボールゲート開閉用のガイドの筒—以下単に「ガイド筒」という—が設置された状態で行う)。実験の項目は表-1のとおりとする。砂は、1.2mmふるいを通過したものを使用した。

表-1 1/20スケール実験項目

| 実験項目               | 内容                                                            |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1. 水のみ             | 流量を最大取水量相当量184.5cm <sup>3</sup> /sに設定して引上力を測定する。              |
| 2. 水と砂<br>(しめ固めなし) | 上記の184.5cm <sup>3</sup> /sの流量の状態に砂を入れ、導水路へ砂がふれ出した時点で引上力を測定する。 |
| 3. 水と砂<br>(しめ固めあり) | 上記のように砂を入れ、導水路へ砂がふれ出した時点で、木片にて振動を与え、しめ固めた後に引上力を測定する。          |

## b) 実験結果

実験の結果を表-2に示す。

表-2 1/20スケール実験結果

| 実験項目               | 1回目<br>(g) | 2回目<br>(g) | 3回目<br>(g) | 平均値<br>(g) | 理論値<br>(g) | 最大値<br>(g) |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1. 水のみ             | 240        | 240        | 240        | 240        | 240        | 240        |
| 2. 水と砂<br>(しめ固めなし) | 250        | 260        | 250        | 253        | —          | 260        |
| 3. 水と砂<br>(しめ固めあり) | 350        | 350        | 365        | 355        | —          | 365        |

## (2) 1/5スケールの模型による実験

## a) 実験方法

図-3の実験装置のドラム缶の穴にプラスチック球をはめこみ、水のみ、砂のみ、および水と砂を入れ、巻上軸を5秒間で1回転させる。その際の荷重を電磁オシログラフに記録する。実験の項目は表-3のとおりとする。砂は5mmふるいを通過したものを使用した。

表-3 1/5スケール実験項目

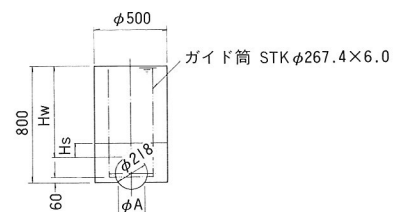
| 実験項目                           | 内容                                                                                              |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) 水のみ                         | 底の穴径φA=120mm, 150mm, 180mmの3種類について缶を満水にし引上力を測定する。                                               |
| 2) 砂のみ                         | 穴径φA=150mmの缶に、砂のみを入れて引上力を測定する(砂の高さは球上20cm)。                                                     |
| 3) 水と砂<br>(しめ固めなし)             | 穴径φA=150mmの缶に、砂を入れ、その後、水を入れて引上力を測定する(砂の高さは球上20cm, 水は満水)。                                        |
| 4) 水と砂<br>(しめ固めあり)             | 穴径φA=150mmの缶に、砂を入れ、その後、水を入れてから、木材で缶の周囲をたたいて、しめ固めた後、引上力を測定する(砂の高さは球上20cmと球の中心までの2種類, 水はどちらも満水)。  |
| 5) 水と砂<br>(しめ固めあり)<br>(ガイド筒あり) | 穴径φA=150mmの缶に、ガイド筒を入れクサビで固定し、外側に砂を入れ、その後、水を入れてから、しめ固め、引上力を測定する(砂の高さは球上20cmと40cmの2種類, 水はどちらも満水)。 |

## b) 実験結果

最大引上力の測定結果のまとめを表-4に示す。

表-4 1/5スケール実験結果

| 実験項目                         | 測定<br>番号 | 穴径<br>φA(mm) | 水の高さ<br>Hw(mm) | 砂の高さ<br>Hs(mm) | しめ<br>固め | 1回目<br>(kg) | 2回目<br>(kg) | 3回目<br>(kg) | 平均値<br>(kg) | 理論値<br>(kg) | 最大値<br>(kg) |
|------------------------------|----------|--------------|----------------|----------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1) 水のみ                       | 1        | 120          | 600            | —              | —        | 10.8        | 12.0        | 11.4        | 11.4        | 10.57       | 12.0        |
|                              | 2        | 150          | 612            | —              | —        | 16.2        | 15.6        | 15.6        | 15.8        | 15.83       | 16.2        |
|                              | 3        | 180          | 630            | —              | —        | 21.0        | 21.0        | 21.0        | 21.0        | 22.45       | 21.0        |
| 2) 砂のみ                       | 4        | 150          | —              | 200            | なし       | 37.8        | 38.4        | 38.4        | 38.2        | —           | 38.4        |
| 3) 水と砂<br>(しめ固めなし)           | 5        | 150          | 612            | 200            | なし       | 37.2        | 43.8        | 43.2        | 41.4        | —           | 43.8        |
| 4) 水と砂<br>(しめ固めあり)           | 6        | 150          | 612            | 200            | あり       | 92.4        | 150.0       | 152.4       | —           | —           | 152.4       |
|                              | 7        | 150          | 612            | —109<br>球の中心   | あり       | 21.0        | 28.8        | 25.2        | —           | —           | 28.8        |
| 5) 水と砂<br>(しめ固めあり)<br>ガイド筒あり | 8        | 150          | 612            | 200            | あり       | 43.2        | 39.6        | 25.2        | —           | —           | 43.2        |
|                              | 9        | 150          | 612            | 400            | あり       | 36.0        | 36.0        | 38.4        | —           | —           | 38.4        |



次に、ボール引上時に電磁オシログラフに記録された波形について、「水と砂(砂の高さ20cm)しめ固めなし」の測定結果を例に説明する。

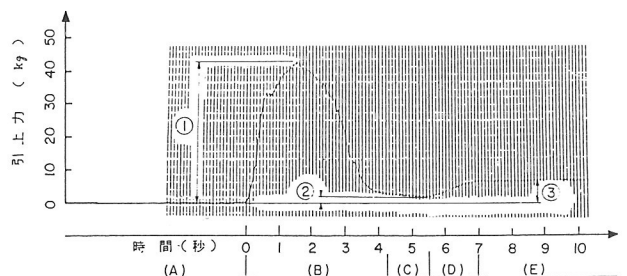


図-4 電磁オシログラフ記録波形

図-4における①～③及び(A)～(E)については、次のとおりである。

- ①：最大引上力（この例では43.8kg）
  - ②：自重－浮力（1.725kg）
  - ③：自重（7.150kg）
  - (A) 区間：引上前の状態
  - (B) 区間：引上開始によりボールが穴からはなれ、水中浮遊状態になるまで
  - (C) 区間：水位がボール上端まで下がらない水中浮遊状態
  - (D) 区間：水位がボール上端からボール下端まで移行している状態
  - (E) 区間：自重のみが作用している状態
- なお、(A)区間～(E)区間の状態を図-5に示す。

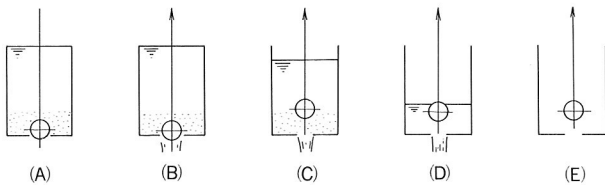


図-5 ボール引上時の各状態図

### (3) 考 察

#### a) 測定値の信頼性

「水のみ」の場合の引上実験においては、「水と砂」の場合と異なり、力学的不明部分が少ないので、理論値と測定値とを比較することにより測定値の信頼性をチェックすることができると考えられる。

水位による締切力Fの理論値は次のように示すことができる。

図-6のように半径rの球で、直径D<sub>2</sub>の穴を塞いでいる場合の、球の頂部からある任意の角θにおける微小部分△Sに作用する下向力△Fは次式で表わされる。

$$\Delta F = \Delta S \cdot \ell \cdot P \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに

$$\Delta S = r \cdot d\theta$$

$$\ell = 2\pi \cdot r \cdot \sin \theta$$

$$P = h_1 + r - r \cdot \cos \theta$$

球全体に作用する下向力Fを求めるためには、点0から点Aまでを積分すればよい。

$$F = \int_0^a (2\pi r \sin \theta) \cdot (h_1 + r - r \cos \theta) \cdot (\cos \theta) \cdot r d\theta \quad \dots\dots\dots(8)$$

この式により求めた理論値と測定平均値との差を調べた結果は、1/20スケール実験においてはゼロ、1/5スケール実験においては±7%以内に収まった。このことにより、この実験装置における測定値の信頼性は満足のいくものと考えられた。

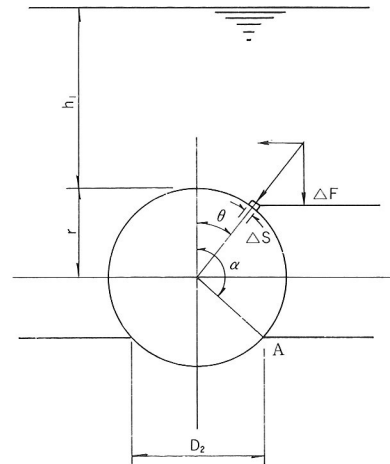


図-6 水位による締切力

#### b) ガイド筒の効用

1/5スケール実験において、ガイド筒がある場合とない場合の引上力の差は顕著である。同じ20cmの砂を入れ、しめ固めた場合においては、3回のうちの最大値を比較すると、ガイド筒ありは、ガイド筒なしの1/3.5である。

一方、ガイド筒がある場合で、砂深を2倍の40cmに上げてしめ固めても、20cmと比較して、3回のうちの最大値では、逆に測定値が減少している。つまり、ガイド筒がある場合は、ガイド筒外側の砂深はある程度以上になると引上力には関与しなくなる傾向にあると言えよう。

#### c) 作用荷重値の推定

本実験は、想定した実機の1/5、1/20の縮尺で行われたが、荷重は相似率により、尺度の3乗に比例することから、実機の想定荷重は実験値に各々125、及び8,000を乗じて求められる。この結果を表-5に示す。

ここで、表-5の実機換算値に着目すると、最大値の19.05tonが際だって大きいことがわかるが、これはガイド筒を設置せずにしめ固めを行い測定した値であり、ガイド筒がある実機においては、このように大きな値にはならないであろうと想定できる。

以上のような点を考慮すると、実機における最大作用荷重は6.0ton前後と推定される。

表-5 測定値の実機換算値

|            | 実験項目                        | ガイド筒の有無 | 測定最大値(kg) | 実機換算値(ton) |
|------------|-----------------------------|---------|-----------|------------|
| 1/20スケール実験 | 水と砂（しめ固めなし）3回のうちの最大値        | 有       | 0.260     | 2.08       |
|            | 水と砂（しめ固めあり）3回のうちの最大値        | 有       | 0.365     | 2.92       |
| 1/5スケール実験  | 水と砂（しめ固めなし）3回のうちの最大値        | 無       | 43.8      | 5.47       |
|            | 水と砂（しめ固めあり）3回のうちの最大値        | 無       | 152.4     | 19.05      |
|            | 水と砂（しめ固めあり）砂 20cm 3回のうちの最大値 | 有       | 43.2      | 5.40       |
|            | 水と砂（しめ固めあり）砂 40cm 3回のうちの最大値 | 有       | 38.4      | 4.80       |

## 6. 排砂状況及び全体動作確認実験

### (1) 実験方法

- ① 1/20スケールの取水設備全体模型において、最大使用水量相当量を流した状態にしておく。
- ② 砂を上記流れに混入させ、沈砂室に沈砂させる。
- ③ 導水路への給水口から砂が流出する状態まで沈砂させたら、流量を洪水相当流量に増加し、全体動作、排砂状況を観察する。それを沈砂池底面の円錐角が $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ の3種類について行う。

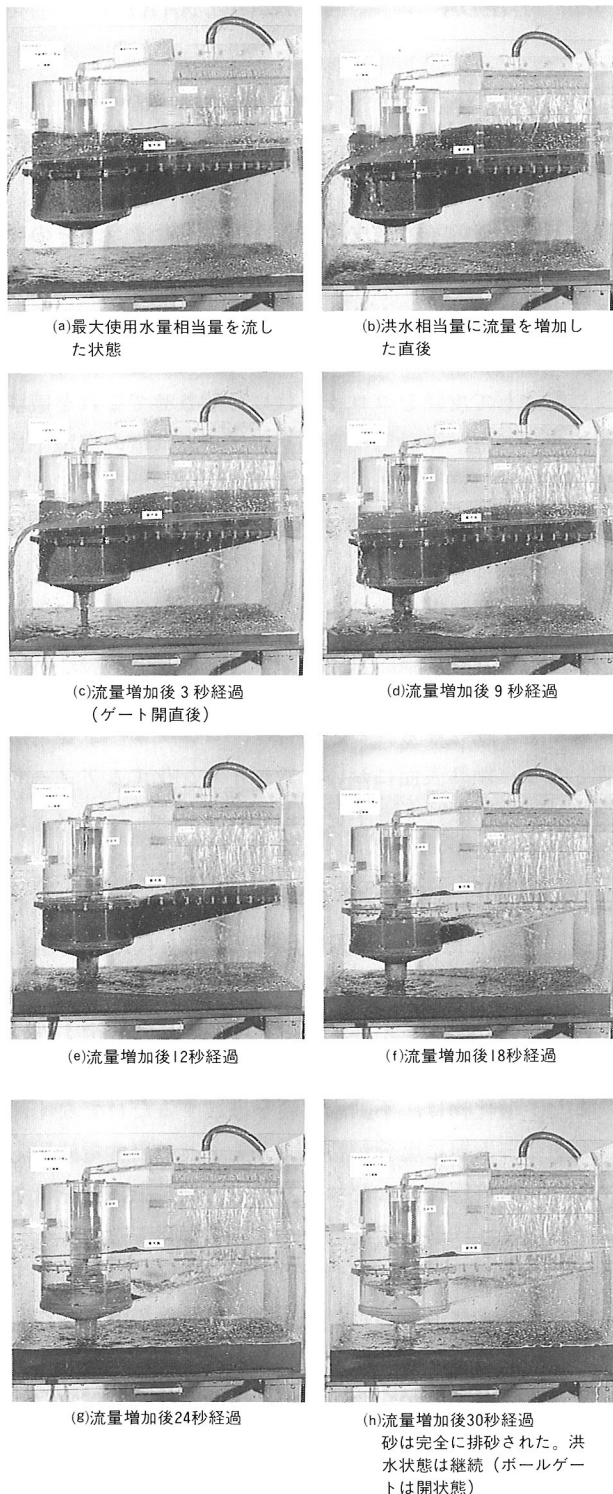


写真-4 排砂状況

### (2) 実験結果

- ① 動作は底面円錐角3種類ともに円滑であった。
- ② 排砂は底面円錐角3種類とも30秒程度で全沈砂量が排出された。

排砂状況を写真-4に示す。

### (3) 考察

全体動作、排砂状況ともに問題はなかった。

## 7. まとめ

今回の実験においては、

- ① 想定実機における引上力の推定ができたこと。
- ② 沈砂池の堆積土砂が30秒程度で100%排出されたこと。
- ③ 全体の動作はスムーズであり、特に問題となることはないこと。

以上の3点を確認することができた。

## 8. おわりに

この実験により、ボールゲートの実用化に向けての基礎的事項の確認はできたと思われる。今後は、開操作用水の取水口における除塵対策、あるいは、沈砂池底面の排出土砂による摩耗対策などの細部構造における問題を解決していきたい。

なお、本実験の計画・実施に際し、多大なる御助言と御指導を賜りました富山県企業局、発電所建設室の宮嶋詩郎工務第一係長殿に深く感謝の意を表するものである。

### 参考文献

- 1) 河村三郎：土砂水理学1，森北出版，pp.2～43，1982.
- 2) 土木学会：水理公式集，pp.13～123，1985.
- 3) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準（設計，頭首工，附・溪流取水工），pp.1～17，1978.
- 4) 農業土木学会：土地改良事業計画設計基準改定「頭首工」の解説，第3回農業土木学会，pp.65～73，1979.
- 5) 千秋信一：発電水力演習，学献社，pp.75～255，1984.
- 6) 全国治水砂防協会：改訂版砂防設計公式集，pp.30～49，1984.