

# 逆フィルターを用いた洗掘防止工に関する研究

## PROTECTION WORKS AGAINST LOCAL SCOURING USING RIPRAP REVERSE FILTER

前野詩朗<sup>1</sup>・藤田修司<sup>2</sup>

Shiro MAENO and Shuji FUJITA

<sup>1</sup>正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

<sup>2</sup>正会員 株式会社 奥村組 (〒545-8555 大阪府阿倍野区松崎町2-2-2)

The bed protection works around hydraulic structures such as weirs and bridge piers are usually collapse due to sinking into the sand caused by the sand removal around them especially during flood flow. Collapse of the protection works decrease the stability of important hydraulic structures, and they could be the factors of abrupt destruction of the hydraulic structures. Therefore, it is a very important hydraulic engineering problem to propose the protection works which is highly resistant against scouring. In this paper, effectiveness of the protection works against scouring using riprap reverse filter was investigated experimentally. Experimental results show that the riprap reverse filter have a great effect to protect the sand bed from scouring. And it is also clarified that the multilayered reverse filter has an effect to reduce the total thickness of the filter layer.

**Key Words :** bed protection works, multilayered riprap filte, local scouring  
water pressure variation

### 1. はじめに

高度成長期の砂防施設の整備や河川改修においては、土砂災害を極力防止する必要があるとの観点から砂防ダムなどの水理構造物が建設されたため、河川への流出土砂量が極端に減少し、全国各地の河川において河床低下が深刻な問題となっている。このような状況下において、堰や橋脚などを保護する目的で設置される護床工が洪水時に沈下散乱するといった被害が多く見られるようになってきた。写真-1は堰下流部の護床工の被災状況を示している。このような場においては堰下流部で跳水が発生し、河床には強度の変動水圧が作用することが考えられる。護床工の被災は、堰や橋脚などの重要な河川構造物の機能・安定性を低下させるのみならず、構造物そのものの壊滅的な破壊の要因となるため、護床工の被災機構を明らかにし、被災防止策を提示することは水工学上重要な課題である。

以上のような背景のもと、代表的な水理構造物である円柱橋脚周辺の局所洗掘を取り扱った研究が多くなされてきた(例えば、鈴木<sup>1)</sup>、辻本<sup>2)</sup>)。また、本研究で対象としている護床工の安定性を検討した研究としては、中川ら<sup>3)</sup>が護床工からの砂の抜け出し

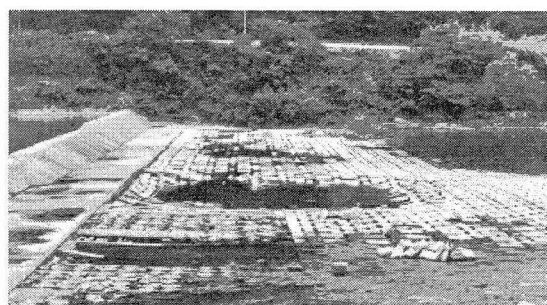


写真-1 堰下流部の護床工の被災状況

による空洞化の進行過程を明らかにした研究や、神田ら<sup>4)</sup>が護床工様式の違いが護床工下流部の最大洗掘深位置や底面せん断力に及ぼす影響を明らかにした研究などがある。一方、護床工の破壊防止の観点から行われた研究としては、鈴木ら<sup>5),6)</sup>や石野ら<sup>7)</sup>の研究があり、石礫層によるフィルターが洗掘防止に効果があることが示されている。前野ら<sup>8)</sup>は、写真-1で示したような場で発生する護床工からの土砂の抜け出しに関して、河床面に作用する強度の変動水圧が洗掘の進行と最終洗掘深を増加させることを明らかにしている。本研究はこのような強度の変動水圧が作用する場合における土砂の抜け出し防止に及ぼす石礫層フィルターの効果について検討する。

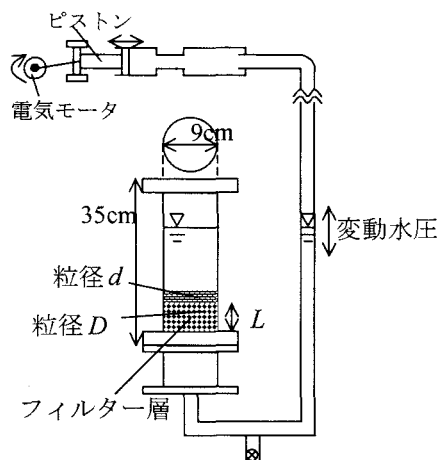


図-1 実験装置

表-1 実験条件

(a) 砂礫と砂の粒径比 ( $D/d$ )

| 石礫粒径<br>$D(\text{cm})$ | 砂粒径 $d(\text{cm})$ |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 0.219              | 0.184 | 0.144 | 0.110 | 0.092 | 0.063 | 0.025 |
| 0.650                  | 2.97               | 3.53  | 4.53  | 5.94  | 7.07  | 10.32 | 26    |
| 0.418                  | -                  | 2.27  | 2.91  | 3.82  | 4.54  | 6.63  | 16.72 |
| 0.310                  | -                  | -     | 2.16  | 2.83  | 3.36  | 4.91  | 12.38 |
| 0.261                  | -                  | -     | -     | 2.38  | 2.83  | 4.13  | 10.42 |

(b) 石礫粒径と層厚 ( $L/D$ )

| 石礫粒径<br>$D(\text{cm})$ | 層厚 $L(\text{cm})$ |       |       |       |
|------------------------|-------------------|-------|-------|-------|
|                        | 1cm               | 3cm   | 5cm   | 10cm  |
| 0.65                   | 1.54              | 4.62  | 7.69  | 15.38 |
| 0.418                  | 2.39              | 7.18  | 11.96 | -     |
| 0.31                   | 3.23              | 9.69  | 16.16 | 32.26 |
| 0.261                  | 3.84              | 11.52 | 19.19 | -     |

## 2. フィルター層を物理的に抜け出さない条件の検討

### (1) 実験方法および実験条件

鈴木ら<sup>6)</sup>は定常浸透流場における実験により、フィルター層厚が1層～3層の場合についてフィルター石礫粒径  $D$  と砂粒径  $d$  の粒径比  $D/d$  と砂の通過率の関係を示している。しかし、本研究で対象とするような変動水圧場では、フィルター効果が減少することが予測される。そこで本研究では、図-1に示す装置を用いて変動水圧（変動浸透流）場における  $D/d$  と通過率  $p$  との関係を実験的に検討する。

表-1は実験条件を示している。フィルター層厚を変化させるとともに、変動水圧を変化させた場合の通過率を測定した。

### (2) 実験結果および考察

図-2は  $D/d$  と通過率  $p$  の関係を示している。この図より、 $D/d$  が10程度になると殆どの粒子がフィルター層を通過することがわかる。フィルター層を粒子が通過しないための  $D/d$  は、フィルター層厚が大きくなると若干大きくなる。物理的に通過しない限界粒径比  $(D/d)_c$  の範囲は概ね3～5程度である。図-3は変動水圧を大きくした場合の結果を示

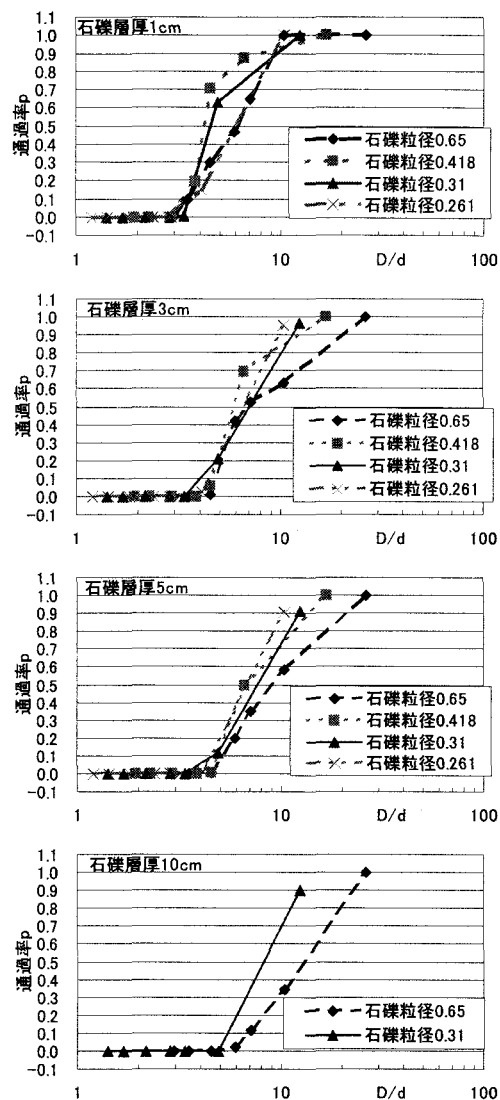


図-2 粒径比と通過率の関係（フィルター層厚の変化）

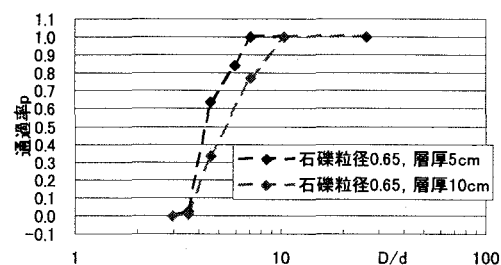


図-3 粒径比と通過率の関係（変動水圧の変化）

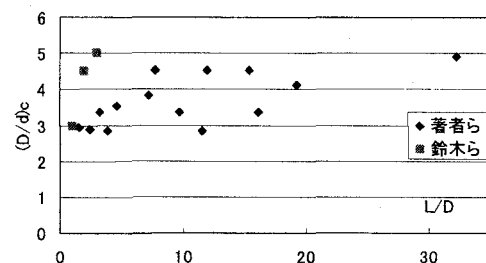


図-4 フィルター層厚と限界粒径比の関係

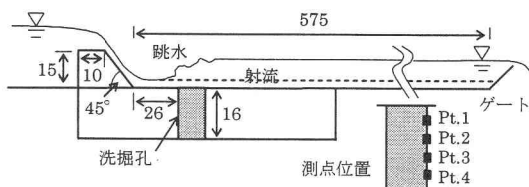
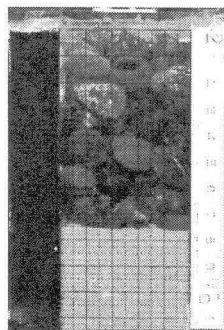
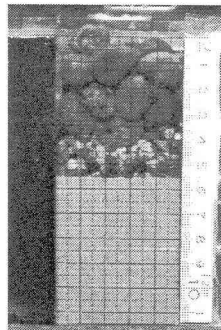


図-5 実験装置 (単位: cm)



(a) Case 1a



(b) Case 2b

写真-2 フィルターの設置状況

している。図-2の粒径と層厚が同じケースの結果と比較すると、変動水圧が大きくなると限界粒径比が小さくなることがわかる。

図-4はフィルター層厚と限界粒径比の関係を示している。鈴木ら<sup>6)</sup>は、砂礫が上層フィルター層の空隙を物理的に通過できない条件として、 $L/D$ が1, 2, 3のとき、 $(D/d)_c$ がそれぞれ3.0, 4.5, 5.0になることを示している。本実験の結果を見ると、変動水圧の影響によりフィルター層厚比が10~20とかなり大きな場合においても限界粒径比が4以下になる場合もあり、変動水圧の作用によりフィルター効果がかなり減少することがわかる。したがって、変動水圧が作用する場において護床工用のフィルターを設置する場合には物理的に抜け出さない条件としての限界粒径比を3程度にする必要がある。

### 3. 逆フィルターの有効性の検討

#### (1) 実験方法および実験条件

実験には図-5に示す、長さ16m、幅0.6m、深さ0.4mの可変勾配水路を用い、水路勾配は1/500としている。水路下流端から約5.5mの地点に洗掘孔を設け、洗掘孔より上流部26cmの位置に堰を設置している。水路の下流部にはフラップゲートを設置しており、跳水を生起させる位置を調節することができる。洗掘孔としては、16cm×5cm×5cmの亚克力製の角柱を洗掘の状況が可視化できるように水路右側のガラス面に添わせて設置した。間隙水圧の計測のため、図-5の測点位置に示すように洗掘孔の下流側の面に上から順に3cm, 6cm, 9cm, 12cmの4ヶ所に圧力変換器を取り付けた。また、洗掘孔上の水位変

表-2 石礫フィルター条件

| Case | 安全係数 | Filter1 | 層厚     | Filter2 | 層厚     | Filter3 | 層厚     | 全層厚    | 減衰率    | 実験結果    |            |            |
|------|------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|------------|------------|
| 射流   | 跳水   | Sa      | D1(cm) | (L/D)0  | D1(cm) | (L/D)1  | D2(cm) | (L/D)2 | Ln(cm) | $\beta$ | 射流         | 跳水         |
| 1a-s | 1a-j | 1.0     | 1.25   | 6.0     | -      | -       | -      | -      | 7.5    | 0.015   | x          | x          |
| 1b-s | 1b-j | 1.0     | 1.25   | 7.0     | -      | -       | -      | -      | 8.7    | 0.007   | $\Delta$   | $\Delta$   |
| 1c-s | 1c-j | 1.0     | 1.25   | 8.0     | -      | -       | -      | -      | 10.0   | 0.004   | $\Delta$   | $\Delta$   |
| 1d-s | 1d-j | 1.5     | 1.87   | 5.0     | -      | -       | -      | -      | 9.4    | 0.030   | $\bigcirc$ | $\bigcirc$ |
| 1e-s | 1e-j | 1.5     | 1.87   | 6.0     | -      | -       | -      | -      | 11.2   | 0.015   | $\bigcirc$ | $\bigcirc$ |
| 2a-s | -    | 1.0     | 1.25   | 3.0     | 0.31   | 3.0     | -      | -      | 4.7    | 0.015   | $\Delta$   | -          |
| 2b-s | 2b-j | 1.0     | 1.25   | 3.0     | 0.31   | 6.0     | -      | -      | 5.6    | 0.002   | $\bigcirc$ | x          |
| -    | 2c-j | 1.0     | 1.25   | 3.0     | 0.31   | 9.0     | -      | -      | 6.5    | 0.000   | -          | $\Delta$   |
| 2d-s | -    | 1.5     | 1.87   | 3.0     | 0.31   | 3.0     | -      | -      | 6.6    | 0.015   | $\Delta$   | -          |
| 2e-s | 2e-j | 1.5     | 1.87   | 3.0     | 0.31   | 6.0     | -      | -      | 7.5    | 0.002   | $\bigcirc$ | $\bigcirc$ |
| 2f-s | 2f-j | 1.0     | 1.25   | 3.0     | 0.65   | 6.0     | -      | -      | 7.6    | 0.002   | x          | x          |
| 2g-s | 2g-j | 1.0     | 1.25   | 3.0     | 0.65   | 9.0     | -      | -      | 9.6    | 0.000   | $\bigcirc$ | $\bigcirc$ |
| 2h-s | 2h-j | 1.5     | 1.87   | 3.0     | 0.65   | 6.0     | -      | -      | 9.5    | 0.002   | $\bigcirc$ | $\Delta$   |
| 3a-s | 3a-j | 1.0     | 1.25   | 3.0     | 0.65   | 2.0     | 0.32   | 2.0    | 5.7    | 0.007   | $\Delta$   | x          |
| 3b-s | 3b-j | 1.5     | 1.87   | 2.0     | 0.65   | 2.0     | 0.32   | 2.0    | 5.7    | 0.015   | $\Delta$   | $\Delta$   |
| 3c-s | 3c-j | 1.0     | 1.25   | 3.0     | 0.65   | 2.0     | 0.32   | 6.0    | 7.0    | 0.000   | $\bigcirc$ | $\bigcirc$ |
| 3d-s | 3d-j | 1.5     | 1.87   | 2.0     | 0.65   | 2.0     | 0.32   | 6.0    | 7.0    | 0.001   | $\bigcirc$ | $\bigcirc$ |

動を計測するために容量式波高計を設置した。土砂の抜け出し防止策を検討するにあたり、捨石工を粒径の異なる多層石礫で構成する逆フィルター効果を利用した。フィルター材料には、平均粒径1.87cm, 1.25cm, 0.65cm, 0.31cmの自然石礫を、砂試料には、平均粒径0.25mm、比重2.65の豊浦標準砂を使用した。実験では1時間18( $\ell$ /s)通水し、その後、河床砂の抜け出しの有無を確認した。実験では、土砂の河床面からの離脱外力に影響すると考えられる鉛直方向の圧力変動を、前野ら<sup>8)</sup>の研究と同様に跳水による水面変動で与えることとし、洗掘孔より下流側で跳水が生起し、洗掘孔上が射流となる場合をCase s、洗掘孔上に跳水が生起する場合をCase jとする。それぞれについて、表-2に示すように石礫フィルター層を1層~3層としたケースで実験を行った。例えば、Case 2b-jはフィルター層が2層で跳水の変動水圧が作用している場合を示している。最上層フィルターについては、安全率を1.0とした場合と1.5とした場合について条件設定した。但し、明らかに逆フィルターが有効な場合や有効でない場合は実験を行っていない。表中の実験結果の○印は土砂の抜け出しがない場合、△は土砂の抜け出しが少しある場合、×印は土砂の抜け出しがかなりある場合を示している。

#### (2) 逆フィルターの設計方法

実験条件の設定に際しては、鈴木ら<sup>6)</sup>が提案した設計法を適用した。以下にその概要を示す。

##### a) 最上層石礫の安定条件

最上層のフィルター石礫に対しては、フィルター層表面に作用する掃流力 $\rho u_{*0}^2$ に対して送流されない限界粒径条件 $D_c$ を満足させる。

$$D_c = u_{*0}^2 / s g \tau_{*c} \quad (1)$$

$s$ : 水中比重,  $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力,  $g$ : 重力加速度,  $u_{*0}$ : 最上層フィルター表面の摩擦速度

##### b) 物理的に抜け出さない条件

最上層のフィルター石礫径 $D_1$ と河床砂の粒径 $d$ の比を $D_1/d = r$ の場合について、限界粒径比を用

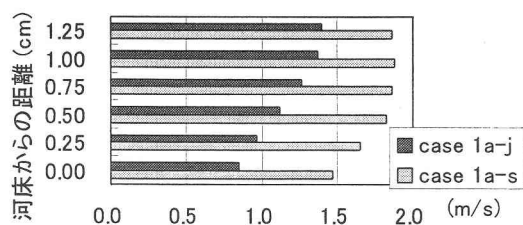
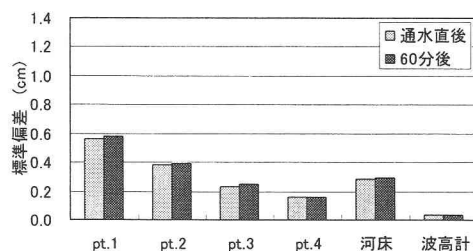
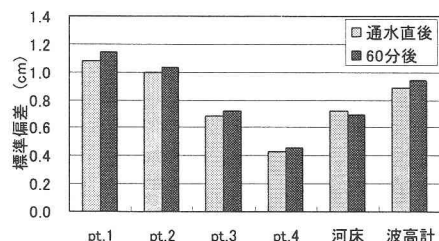


図-6 洗掘孔上の流速分布 (Case 1a-s, 1a-j)



(a) 射流(Case 2b-s)



(b) 跳水(Case 2b-j)

図-7 間隙水圧変動量

いて  $n$  層 (最上層を1とする) からなる逆フィルターを設計することを考える. フィルター層の石礫径をそれぞれ  $D_k$  とすると, 接触するフィルター層間の粒径比が  $D_k / D_{k+1} \leq (D/d)_c$  を満足し, かつ, 次式を満足する必要がある.

$$\frac{D_1}{D_2} \frac{D_2}{D_3} \dots \frac{D_n}{d} = r \quad (2)$$

c) 掃流力の減衰率による条件

フィルター層を通しての掃流力 (吸い出し力) の減衰率  $\beta$  は, フィルター層厚と粒径との比の関係により次式で与えられる.

$$\beta = \exp(-a \frac{L}{D}) \quad (3)$$

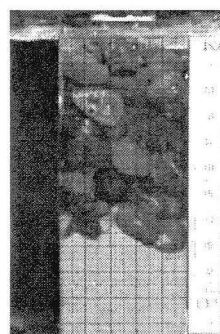
ただし,  $a = 0.7$  である. この減衰率に河床面上における無次元掃流力を掛けた値が

$$\beta(u_{*0}^2 / sgd) < \tau_{*c} (= 0.05) \quad (4)$$

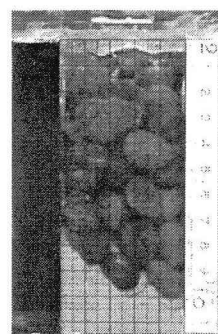
となるように設計する.

いま  $n$  層から成る逆フィルターを設計することを考えると, 河床砂に作用する吸出し力が限界掃流力以下であるための条件は最上層を第1層として, 第  $k$  層のフィルター層厚  $L_k$  と粒径  $D_k$  とすると,

$$\exp(-0.7 \frac{L_1}{D_1}) \exp(-0.7 \frac{L_2}{D_2}) \dots$$

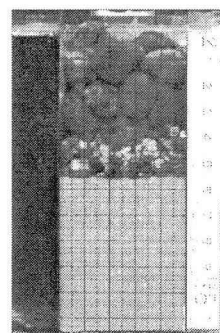


(a) Case 1a-s

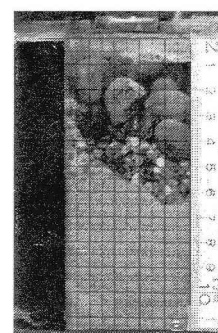


(b) Case 1a-j

写真-3 通水後のフィルター状況

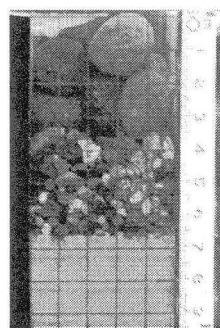


(a) Case 2b-s

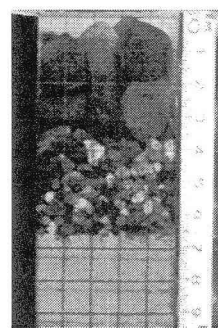


(b) Case 2b-j

写真-4 通水後のフィルター状況



(a) 通水前



(b) 通水後

写真-5 フィルター状況 (Case 3d-j)

$$\exp(-0.7 \frac{L_n}{D_n}) \frac{u_{*0}^2}{sgd} < \tau_{*c} (= 0.05) \quad (5)$$

となる. a)の条件のもとに, b)あるいはc)の条件が満足されれば河床砂の洗掘は生じない. 以上の設計条件を考慮して表-2に示した実験条件を設定した.

### (3) 実験結果

#### a) 洗掘孔上の流速分布

図-6はCase 1a-s, 1a-jの洗掘孔上 (河床面から上) の流速を示している. この図より, 洗掘孔上の流速は洗掘孔上に跳水が無いCase sシリーズの方が速いことがわかる. また, 洗掘孔上に跳水があるCase jの場合にはCase sよりも流速が遅いにも関わらず, 捨石工の間隙から土砂の抜け出しが起こるといふ後で述べる実験結果を考慮すると, 洗掘孔上に生起している跳水による水面変動が土砂の抜け出しに大きな影響を及ぼしていることがわかる.

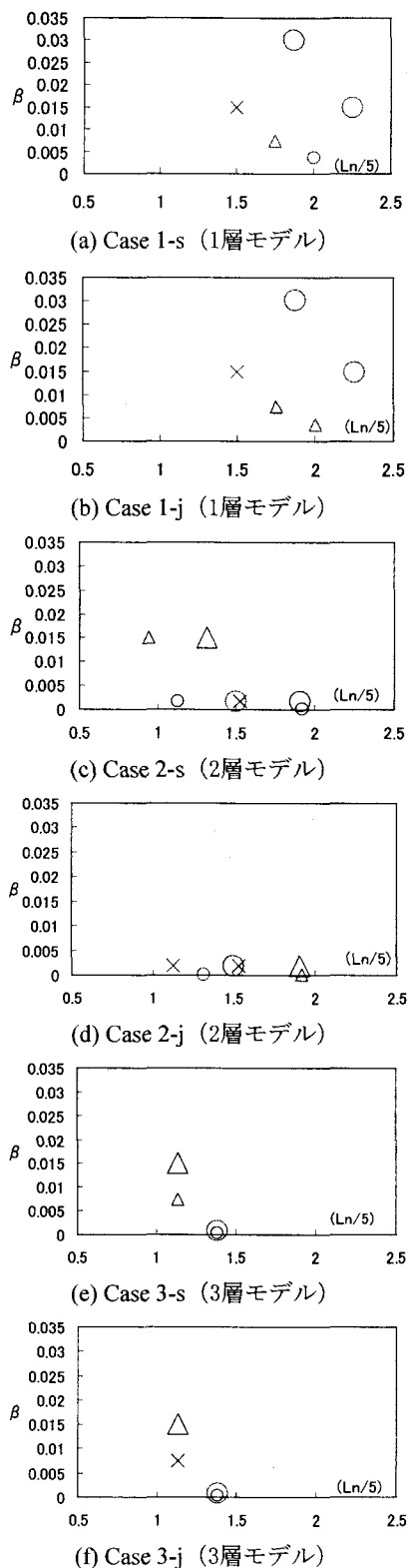


図-8 抜け出し比較図

#### b) 変動間隙水圧

図-7はCase 2b-s, Case 2b-jの場合の洗掘孔内における変動間隙水圧の変動量を示している。この図より、河床面から深くなるにつれて間隙水圧が減少していることがわかる。このことは洗掘孔内上部の水圧よりも下部の水圧の方が大きくなる時間帯がある

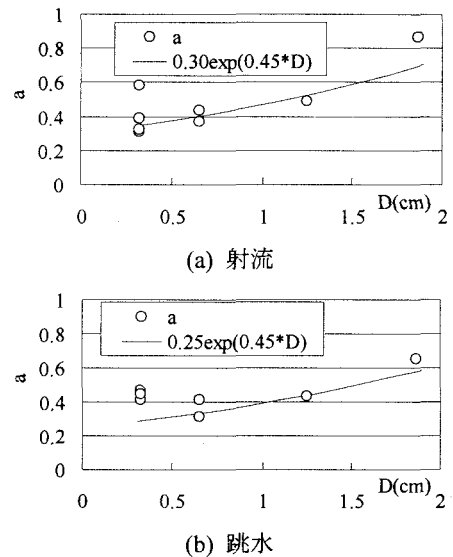


図-9 係数aの変化

ことを示しており、洗掘孔上部において有効応力が減少する可能性を示すものである。フィルター層がない場合について前野ら<sup>8)</sup>の研究で明らかにされているように跳水による変動がある場合の方が洗掘の進行速度および最終洗掘深さが大きくなっており、変動水圧は洗掘の進行と有意な関係があると考えられる。

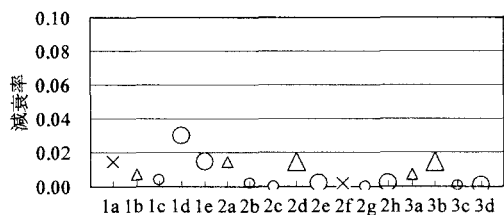
#### c) 土砂の抜け出し状況

写真-3はCase 1a-sおよび1a-jの場合の60分通水後の状況を示している。写真-2と比較すると、洗掘孔上が射流よりも跳水の場合の方が河床砂が抜け出しやすくなることがわかる。写真-4はCase 2b-sと2b-jの場合の実験終了時の状況を示している。この写真より、射流の場合には土砂が抜け出さないが、跳水の場合には土砂が抜け出すことがわかる。つぎに、写真-5はCase 3d-jの場合の結果を示している。この写真より、多層フィルターの方が総フィルター層厚を小さくできることがわかる。

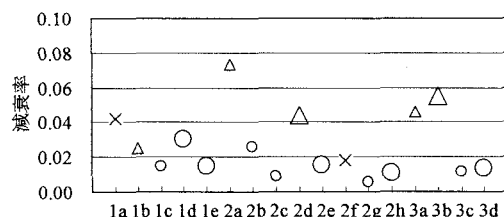
図-8は表-2中に示した実験結果について、全層厚（洗掘孔の辺の長さ5cmで無次元化している）と $\beta$ の関係で示している。図中の記号は、表-2中の実験結果と対応している。安全係数を考慮した場合の記号を大きくしている。これらの図より、安全係数を1.5として表層石礫の大きさを大きくしたケースでは河床砂の抜け出しが起こりにくくなることがわかる。図-8(c)(d)より、2層フィルターの場合、中間粒径が0.65cmよりも0.31cmの場合の方が河床砂の抜け出しの危険性が少なくなることがわかる。さらに、フィルター層を3層にすることによりフィルター層の総厚を抑えかつ抜け出しも防止しやすくなることがわかる。

#### d) 減衰率 $\beta$ の検討

多層フィルターを用いた実験により、フィルター

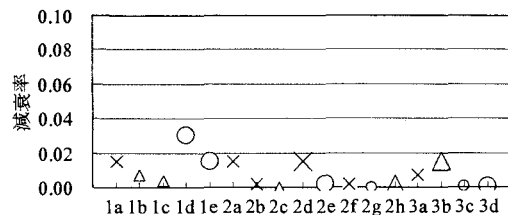


(a) 減衰率  $\beta$  (修正前)

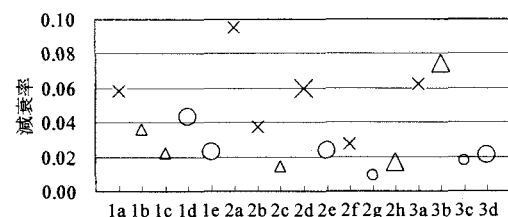


(b) 減衰率  $\beta_n$  (修正後)

図-10 変動水圧がない場合（射流）の減衰率の係数a



(a) 減衰率  $\beta$  (修正前)



(b) 減衰率  $\beta_n$  (修正後)

図-11 変動水圧がある場合（跳水）の減衰率の係数a

は河床砂の抜け出しを抑えるために有効であることがわかったが、鈴木ら<sup>9)</sup>が提案した河床砂が抜け出さない  $\beta < 0.02$  (Case 1dの場合は抜け出さない限界値 0.03としている)の設計条件を適用したにもかかわらず河床砂が抜け出す場合があった。この傾向は、跳水による強度の変動水圧が洗掘孔上に作用する場合に顕著であった。そこで、本研究では、実験結果をもとに、減衰率  $\beta$  を推定することにする。式(3)の係数  $a$  に問題があるものと考え、抜け出さなかった実験結果より  $a$  を逆算すると図-9のようになる。すなわち、フィルター粒径により  $a$  の値が変化することがわかる。また、跳水による変動水圧が作用する場合には  $a$  が全体的に小さくなるがわかる。図中の実線は近似曲線を示している。図-10と図-11はこの近似曲線を用いて各ケースの減衰率  $\beta_n$  を求めた結果を示している。これらの図より、係数  $a$  の取り扱ひの修正後は、変動水圧がない場合については河床砂が抜け出さないための条件を満足させることができるがわかる。変動水圧がある場合には若干ばらつきがあるものの、 $\beta < 0.02$  の設計条件内に抜け出しが多い×印のケースがなくなる。

#### 4. 結論

本研究では、逆フィルターを用いた河床保護工の有効性を実験的に検討した。得られた主要な結論は以下のようである。

- 1) 跳水などの強度の変動水圧を伴う場においてはフィルター層相互間を物理的に抜け出さない限界粒径比が小さくなる。
- 2) 逆フィルターによる抜け出し防止効果はかなりあるが、跳水が発生する場では変動水圧の影響を受

けて防止効果が減少する。

- 3) 逆フィルターは、フィルター層が多くなるほど、総フィルター層厚を小さくすることができる。
- 4) フィルター層を通しての掃流力の減衰率  $\beta$  の係数は、粒径により変化する。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、岡山大学大学院生（現岡山市役所）であった山縣正明氏にご協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 鈴木幸一：円柱橋脚周辺の局所洗掘に関する研究，土木学会論文集第313号，pp.47-54,1981.
- 2) 辻本哲朗・水上敏昭：円柱前面での局所洗掘機構のモデル化，第29回水理講演会論文集，pp.591-596,1985.
- 3) 中川博次・辻本哲郎・清水義彦，村上正吾：堰の被災機構としての護床工からの砂の抜け出しによる空洞化の進行過程，第31回水理講演会論文集，pp.359-364,1987.
- 4) 神田敬一・村本嘉雄・藤田裕一郎：護床工の様式による下流部局所洗掘形状の相違，水工論文集，第36巻，pp.43-48,1992.
- 5) 鈴木幸一，山本裕規，栗原 崇：局所洗掘防止に有効な石礫護床工の条件，水工学論文集，第39巻，pp.695-700,1995.
- 6) 鈴木幸一，山本裕規，徳安芳典：逆フィルターを利用した捨石洗掘防止工に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.572,II-40,pp.1-9,1997.
- 7) 石野和男，大谷英夫，勝井秀博：急潮流化における橋脚周辺の捨石洗掘防止工の設計に関する研究，土木学会論文集，No.521,II-32,pp.123-133,1995.
- 8) 前野詩朗，山縣正明，里本公明：護床工からの土砂の抜け出しに及ぼす変動水圧の影響に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp.409-414,2001.

(2003. 4. 11受付)