

# 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

鈴木幸一<sup>1</sup>・山本裕規<sup>2</sup>・徳安芳典<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790 松山市文京町 3)

<sup>2</sup>正会員 工修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (同上)

<sup>3</sup>正会員 日本道路公団

河床の局所洗掘防止のための捨石工を粒径の異なる多層石礫層で構成し、相接する層間で物理的に石礫の移動がないいわゆる逆フィルター効果を利用することによって全体の捨石工の層厚を減少させるための、各層の満たすべき石礫粒径や層厚の条件を実験的に検討した。すなわち、上層の被覆捨石層の空隙を河床の砂礫が物理的に抜け出せない粒径条件および物理的に抜け出せても石礫層の減衰効果によって河床砂に作用する吸い出し力が砂の限界掃流力より小さくなるという条件を組み合わせることによって、石礫層厚を小さくさせる合理的な多層捨石工の設計基準を明らかにした。

**Key Words :** riprap bed protection, multilayers, inverted filter

## 1. まえがき

河川構造物周辺河床の局所洗掘を防止・軽減するために捨石工がよく施工される。石礫によって砂河床を被覆した場合には、多少の洗掘に対しても被覆層が柔軟に変形して対応できる利点があり、捨石洗掘防止工の有効性が報告されている<sup>1)~3)</sup>。ただ、捨石工の洗掘防止機構は必ずしも明らかにされているわけではなく、より合理的な捨石工の設計を行うためには、検討すべき点が多い。

石礫による河床の被覆層が長期的に安定して河床砂の局所洗掘を防止・軽減する機能を保持するためには、被覆する石礫が局所流によって動かされない程十分大きいという条件の他に、石礫層の空隙を通して河床砂の吸い出しがないことが必要である。河床砂の吸い出しを防ぐためには、石礫フィルター層厚が十分大きくフィルター層を通しての流れの吸い出し力(掃流力)が河床砂の限界掃流力以下であるか、掃流力が大きくてもフィルターを構成する石礫の粒径があまり小さくなくその空隙を河床砂が物理的に通過できないかのどちらかを満たせばよい。

Terzaghi の逆フィルターの概念<sup>2)</sup>は、上層が下層の砂礫を通過させないように下層から上層へ次第に粒径の大きくなる複数の石礫被覆層を図-1の様に設け河床砂の吸い出しを防止しようとするものである。

Grauw ら<sup>4)</sup>は、河床砂が石礫フィルター層を物理的に通過しないための条件として  $D_{50}/d_{50} < 3\sim 5$  ( $D_{50}$ :石

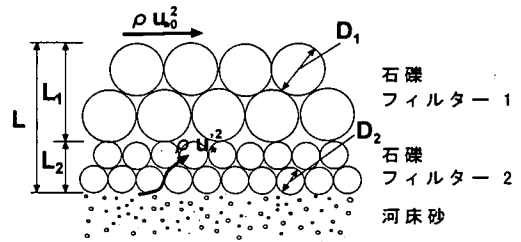


図-1 多層捨石洗掘防止工

礫フィルター層の 50%粒径、 $d_{50}$ :河床砂の 50%粒径)、フィルター層厚はフィルター石礫径の 5~6 倍は必要であるとしている。また米国水路実験所の実験によると、フィルター層の条件として  $D_{15} < 5d_{85}$ ,  $4d_{15} < D_{15} < 20d_{15}$ ,  $D_{50} < 25d_{50}$  を提案している<sup>2)</sup>。ただし、 $D_{15}$ ,  $D_{50}$  はそれぞれ石礫フィルター層の 15%および 50%粒径、 $d_{15}$ ,  $d_{50}$  および  $d_{85}$  はそれぞれ河床砂の 15%, 50%および 85%粒径である。ただ、これらの関係は特定の粒度分布をもつ混合砂礫を用いて実験的に示されたもので、必ずしも普遍的であるとは言えない。

一方、石礫フィルター層の表層に作用する洗掘力がフィルター層を通して減衰することによってフィルター層下の河床砂に作用する吸い出し力がどの程度になるかについて、著者らは段落ち部の流れを対象として実験的に研究している<sup>5)7)</sup>。それによるとフィルター層下の吸い出し力  $\rho u_*'^2$  とフィルター表層の洗掘力  $\rho u_{*0}^2$  の比  $u_*'^2/u_{*0}^2$

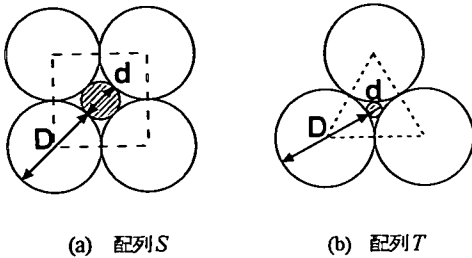


図-2 フィルター石礫球の配列

は実験的にはフィルター層厚 $L$ とフィルター石礫径 $D$ の比 $L/D$ の指数関数的に減少することが示されている。

本論文では、河床砂が石礫被覆層(フィルター)を物理的に抜け出せないような砂粒径と石礫粒径との関係および石礫フィルターを通しての掃流力の減衰特性を明らかにした後、粒径の異なった石礫による二層石礫逆フィルターによる捨石洗掘防止工の設計法について述べる。

## 2. 河床砂が石礫フィルター層を物理的に通過できない条件

### (1) 球体の限界粒径比

粒径 $d$ の河床砂が粒径 $D$ の石礫フィルター層を物理的に抜け出せない条件は主として $D$ によって決まるフィルター層の空隙の大きさと $d$ の大きさによって決まると考えられる。したがって、この条件の支配パラメーターは $D/d$ であるが、フィルター石礫の形状や配置、敷設密度が異なることを考えると石礫フィルター層の空隙率 $\lambda_F$ も関係するであろう。

いま、簡単にフィルター石礫が球形である場合、球体どうしが完全に接し、比較的安定した状態となる配置として図-2に示す2つの配列について考える。配列 $S$ は4つの球体の中心が正方形となり、配列 $T$ は3つの球体が正三角形となるように組み合わせさせたものである。この球体を各配列に従って河床と平行に一層の被覆層としたとき、その球体の空隙を河床砂が抜け出せない粒径比 $(D/d)_c$ および被覆層の空隙率 $\lambda_F$ は、幾何学的な簡単な計算から

$$\begin{aligned} \text{配列}S: (D/d)_c &= 2.41, \lambda_F = 0.48 \\ \text{配列}T: (D/d)_c &= 6.46, \lambda_F = 0.26 \end{aligned} \quad (1)$$

となる。河床砂はフィルター層内を3次元的に移動するが、3次元的に各配列条件を満たすように配置を行えば、被覆層厚を増やしても式(1)の関係は変わらないことになる。いま配列 $T$ が最も密、また配列 $S$ が最も疎の石礫フィルターを考えると、石礫も河床砂も球形の場合には河床砂がフィルター層を抜け出せない限界粒径比 $(D/d)_c$ は図-3に示すように $\lambda_F$ が0.26から0.48に変化しその間に6.46から2.41に減少すると予想される。

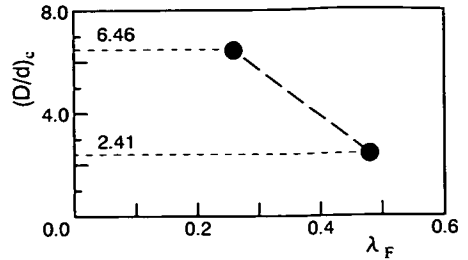


図-3 フィルター層の空隙率と限界粒径比 (球どうしの場合)

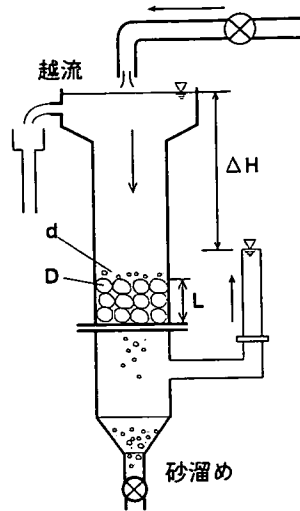


図-4 通過限界粒径比に関する実験装置

### (2) 砂礫を用いた実験

河床砂が石礫層を物理的に通過できない限界粒径比 $(D/d)_c$ を実験的に求めるために、図-4に示すような装置で簡単な実験を行った。すなわち、内径10cmの亚克力製円筒管内に粒径 $D$ 、厚さ $L$ のフィルター層をガラスビーズあるいは自然石礫で作し、その上に粒径 $d$ の砂を一定量投入し砂の移動が完全に停止するまで水頭差 $\Delta H$ で通水し、フィルター層を抜け出した砂の割合を測定した。フィルター層に石礫を用いた場合の実験条件は表-1に、またフィルター層にガラスビーズを用いた場合の実験条件を表-2に示している。ただ、投入砂の径 $d$ および石礫径 $D$ は公称 3.75, 2.65, 2.00, 0.95, 0.475, 0.335, 0.200, 0.085cm および 0.0425cm のメッシュのそれぞれ相接触するメッシュである分けられたもので、完全な均一砂ではない。フィルターの石礫あるいはガラスビーズの配列はできるだけ密に、また空隙の大きさが一樣になるようにしたので、ガラスビーズの場合は配列 $T$ に近いと考えられる。

なお、水頭差 $\Delta H$ は50cmとしたが、フィルターの石礫が流れの振動で動いて空隙が変化しない程度でできるだけ大きくしたものである。

表-1 被覆層に石礫を用いた実験条件

(a) 石礫と砂の粒径比

石礫粒径 $D$ (cm)	砂粒径 $d$ (cm)						
	2.28	1.48	0.71	0.41	0.27	0.14	0.06
3.20	1.40	2.16	4.23	7.32	11.11	21.43	50.00
2.28	-	1.54	2.82	4.88	7.41	14.29	33.33
1.48	-	-	-	2.93	4.44	8.57	22.00
0.71	-	-	-	-	2.59	5.00	11.67

(b) 石礫粒径と層厚

石礫粒径 $D$ (cm)	層厚 $L$ (cm)		
	1層	2層	3層
3.20	3.00	5.45	7.90
2.28	2.00	3.63	5.27
1.48	1.20	2.18	3.16
0.71	0.70	1.27	1.84

表-2 被覆層にガラスビーズを用いた実験条件

(a) ガラスビーズと砂の粒径比

ガラスビーズ 粒径 $D$ (cm)	砂粒径 $d$ (cm)				
	0.71	0.41	0.27	0.14	0.06
3.00	4.23	7.32	11.11	21.43	50.00
2.00	2.82	4.88	7.41	14.29	33.33
1.20	-	2.93	4.44	8.57	22.00
0.70	-	-	2.59	5.00	11.67

(b) ガラスビーズ粒径と層厚

ガラスビーズ 粒径 $D$ (cm)	層厚 $L$ (cm)		
	1層	2層	3層
3.00	3.00	5.45	7.90
2.00	2.00	3.63	5.27
1.20	1.20	2.18	3.16
0.70	0.70	1.27	1.84

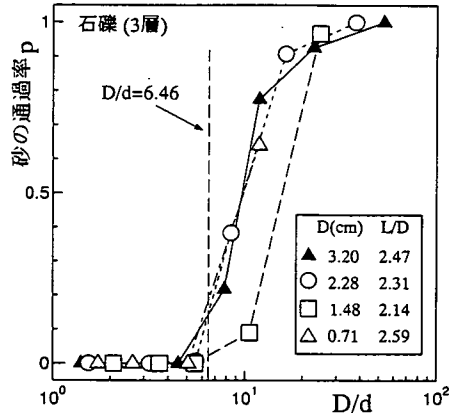
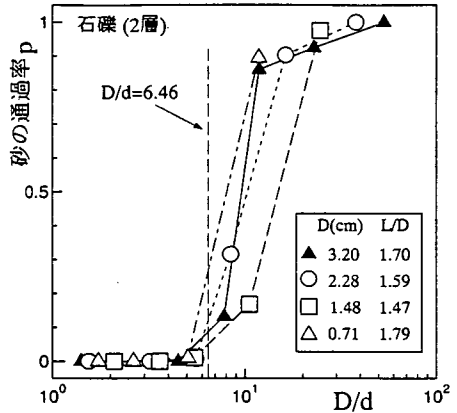
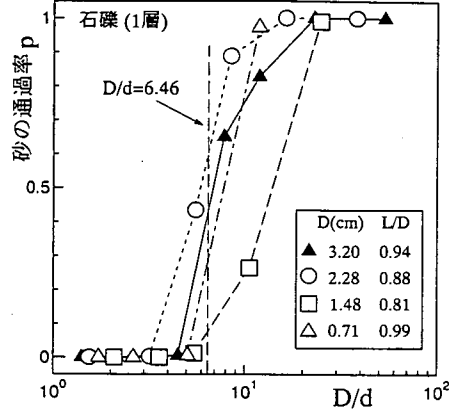


図-5 フィルター石礫径と砂粒径の比  $D/d$  と砂の通過率  $p$  (石礫フィルターの場合)

図-5および図-6にフィルター層厚を1層~3層で変化させた場合についてフィルター粒径と砂粒径の比  $D/d$  と砂の通過率  $p$  の関係を示している。図-5はフィルター層として石礫を、図-6はガラスビーズを用いた場合についてのものである。また、図中の破線は球体の配列  $T$  における限界粒径比  $(D/d)_c = 6.46$  を示している。フィルター層がガラスビーズではほぼ均一な粒径でできていても、投入砂が完全に均一でないことから、砂の通過率  $p$  がある幅の  $D/d$  の値をもって0から1に変化している。通過率  $p$  の変化に対応する  $D/d$  の幅はフィルター層がガラスビーズであっても石礫であっても、また、層厚が1~3層まで変化しても顕著な差は認められない。ただ、 $p = 0$  となる限界粒径比  $(D/d)_c$  は、表-3に示すように層厚が1層の場合は2~3層の場合よりやや小さく、また、被覆層が石礫とガラスビーズとで若干異なっている。配列  $T$  における理論値  $(D/d)_c = 6.46$  に対して、フィルター層厚が1層と小さい場合は  $(D/d)_c < 4.5 \sim 5.5$  となりがちになっている。層厚が小さいとフィルター石礫の不均一配置がそのまま空隙の不均一を生じるためである。一方、層厚が増すとフィルター石礫に不均一があってもその下層で是正されていれば砂は通過しにくくなるため、 $(D/d)_c$  は6.46より近づいているものと考えられる。同様な実験が

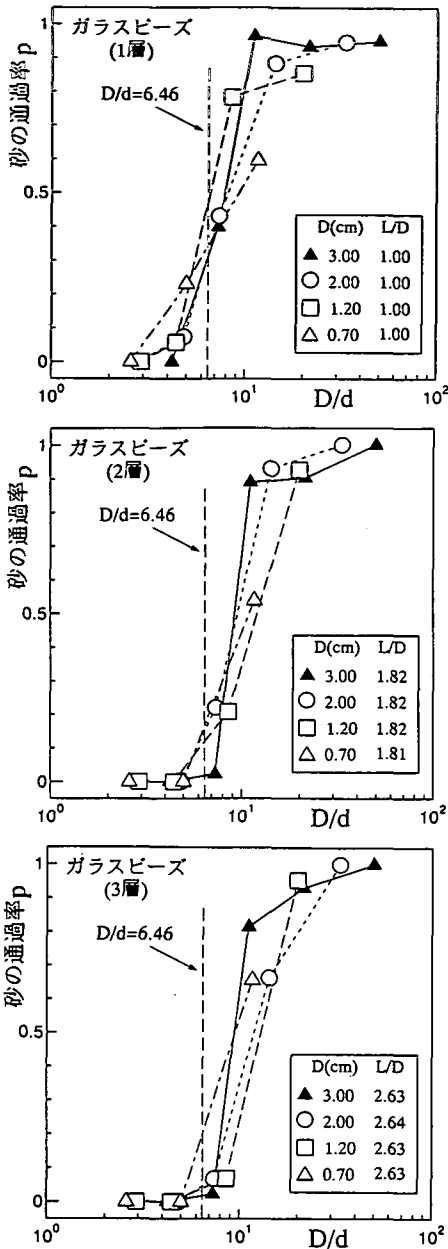


図-6 フィルターガラスビーズ径と砂粒径の比  $D/d$  と砂の通過率  $p$  (ガラスビーズの場合)

著者らによって石礫を用いてなされている<sup>7)</sup>が、この時の実験では投下による施工の場合を考えて石礫を円管の上部から落下させてフィルター層を作ったためフィルター層が今回の実験ほど密にならず、砂の通過率  $p$  がやや大きめになっている。そして、 $L/D=1.0$  で  $(D/d)_c=3.0$ 、 $L/D=2.0\sim 3.0$  で  $(D/d)_c=4.5$  となっており、限界粒径比も若干小さくなっていった。

表-3 非通過限界粒径比の実験値

	石礫 フィルター		ガラスビーズ フィルター	
$L/D$	1.0	2.0	1.0	2.0~3.0
$(D/d)_c$	4.0~5.5	5.5~6.5	3.0~4.5	4.5~7.5

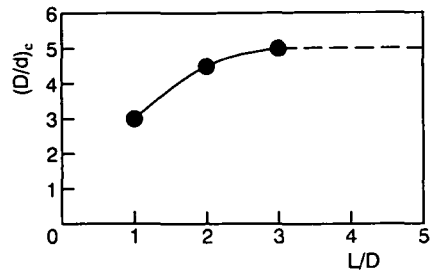


図-7 フィルター層厚と非通過限界粒径比の設計基準

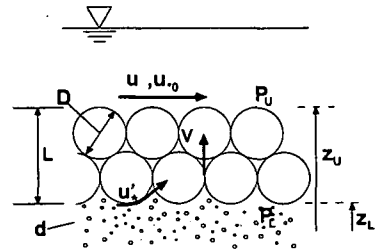


図-8 記号図

### (3) 非通過限界粒径比の設計基準

実際に捨石工を施工する場合、石礫を一つ一つ積み場合だけでなく水中へ投入する場合もあり、危険側を考えて、河床砂が被覆石礫層を物理的に通過できない、非通過限界粒径比  $(D/d)_c$  とフィルター層厚比  $L/D$  の関係を表-3を参考にして以下のように定める。

$$\begin{aligned}
 L/D = 1.0 & : (D/d)_c = 3.0 \\
 L/D = 2.0 & : (D/d)_c = 4.5 \\
 L/D = 3.0 & : (D/d)_c = 5.0
 \end{aligned} \quad (2)$$

$L/D \geq 3.0$  では実験値はないが、 $(D/d)_c$  は5.0より著しく大きくはならないと考えられるので、安全側をみて図-7の破線のように  $(D/d)_c=5.0$  とする。

### 3. 石礫フィルター層厚と吸い出し力の減衰特性

河床砂が小さくてたとえ石礫被覆層(フィルター層)の空隙を物理的に抜け出せるとしても、層厚が大きくて河床砂に作用する吸い出し力が小さくなれば河床砂の吸い出しはない<sup>8)9)</sup>。図-8に示すようにフィルター層の表層に作用する掃流力  $\rho u_0^2$  が石礫層を通して減衰し河床砂に  $\rho u^2$  の吸い出し力を作用させるとする。いま、掃流力のフィルター層を通しての減衰率  $\beta$  を次式で定義する。

$$\beta = \left( \frac{u_*'}{u_{*0}} \right)^2 \quad (3)$$

また、フィルター層内部の流れは複雑であるが、ここでは単純に河床砂表層とフィルター層表層間の圧力差によるフィルター層内の平均的な鉛直流れを仮定し、これによって河床砂が吸い出されるとして解析を進めた。

図-8のフィルター層  $L$  の上下でのピエゾ水頭差  $\Delta h$  を、

$$\Delta h = \left( \frac{p_L}{\rho g} + z_L \right) - \left( \frac{p_U}{\rho g} + z_U \right) = \frac{u^2}{2g} - \frac{v_p^2}{2g} \cong \frac{u^2}{2g}$$

と単純に考える。ここに、 $p_L$ :フィルター層底部 ( $z = z_L$ ) での圧力、 $p_U$ :フィルター層上部 ( $z = z_U$ ) での圧力、 $u$ :被覆石礫表層における流速、 $v_p$ :河床砂表層における実質流速で、 $u \gg v_p$  としている。

フィルター表層と河床砂表層のエネルギー勾配  $I$  は、

$$I = \frac{\Delta h}{L} = \frac{u^2}{2gL} \quad (4)$$

となる。いま、 $f$  をフィルター表層の摩擦損失係数とすると、 $u = \sqrt{8/f} u_{*0}$  であるから、

$$I = \frac{4u_{*0}^2}{fgL} \quad (5)$$

と書ける。フィルター礫間の空隙が疎であり、層内の流れは十分乱流に発達しているとするとき次式が成り立つ<sup>10)</sup>。

$$I \cong \frac{2(1-\lambda_F)}{g\lambda_F^3 D} V^2 \quad (6)$$

ここに、 $V$ :被覆層内における断面平均流速 ( $=v_p/\lambda_F$ ) である。また  $f'$  を石礫層の空隙を管路とみなした場合の摩擦損失係数とすると、 $V = \sqrt{8/f'} u_*'$  であるから式(6)は

$$I \cong \frac{16(1-\lambda_F)}{f'g\lambda_F^3 D} u_*'^2 \quad (7)$$

と書けるので、式(5)および式(7)より、次式が得られる。

$$\beta = \left( \frac{u_*'}{u_{*0}} \right)^2 = \frac{f'}{f} \frac{\lambda_F^3}{4(1-\lambda_F)} \left( \frac{L}{D} \right)^{-1} \quad (8)$$

摩擦損失係数  $f$  および  $f'$  は次式(9)および(10)で表されるものとする。

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{h}{k'} \right) \quad (9)$$

$$\sqrt{\frac{1}{f'}} = 1.74 + 2.0 \log_{10} \left( \frac{D}{2k} \right) \quad (10)$$

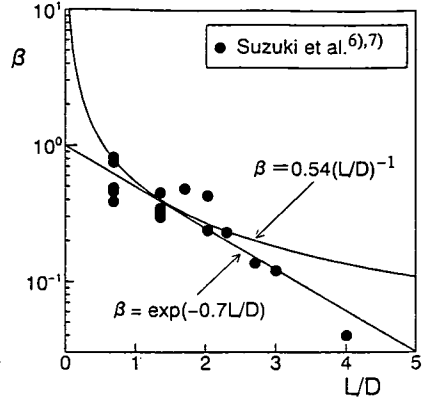


図-9 被覆層を通しての吸い出し力の減衰率と被覆層厚の関係

ここに、 $h$ :水深、 $k, k'$ :相当粗度である。いま実験室スケールを考え、 $\lambda_F = 0.4$ 、 $h/k = 15$ 、 $D/2k = 1/0.414$  と仮定すると式(8)は

$$\beta = 0.54 \left( \frac{L}{D} \right)^{-1} \quad (11)$$

となる。

図-9は  $\beta$  と  $L/D$  の関係を示したもので、図中、白丸は著者らの実験データでそれに対応する実験曲線が

$$\beta = \exp \left( -0.7 \frac{L}{D} \right) \quad (12)$$

で示されている<sup>7)</sup>。なお実験データは石礫で被覆された河床の洗掘が停止したとき被覆層下の河床砂は移動限界状態にあると考え、 $u_*'^2 / sgd (= \tau_*') \cong 0.05$  と被覆石礫表層の流速の実測値から推定した摩擦速度  $u_*'$  から、種々の  $L/D$  に対して求めた  $\beta$  の値である。

理論式(11)と実験式(12)とは  $L/D = 1 \sim 3$  ではほぼ同じと見なせる。ただ、理論式は石礫層内の流れを乱流としているため、 $L/D$  が大きくなって流れが弱くなり層流となれば適用できない。種々の仮定が多いため層流あるいは確率的な砂の挙動を考えたより詳細な議論<sup>11,12)</sup> は行わないが、式(11)あるいは式(12)で吸い出し力の石礫層を通しての減衰率の推定が一応可能であろう。

#### 4. 最上層のフィルター石礫が流送されない条件

捨石工を河床へ敷設する段階において、局所洗掘が進行している場所にわずかに石礫を逐次投入した場合には、その石礫は容易に河床砂礫とともに運び去られてしまう。逆に一度に多量の石礫を投入すれば礫同士の接触によって石礫が投入する場所からほとんど移動しないであろう。河床に存在する少量の石礫が運ばれやすくなる現象は、細かい砂礫上の単独の粗い石礫の移動性が

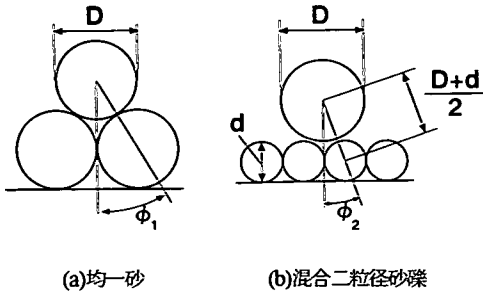


図-10 砂上の石礫の安息角

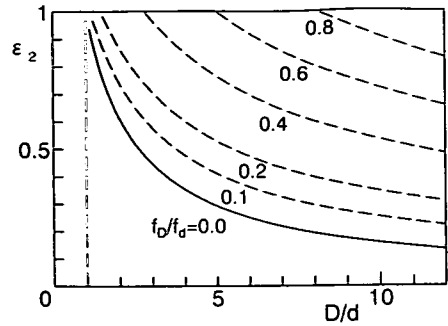


図-11 砂上の石礫の限界掃流力の補正係数

均一の石礫に比してかなり大きくなっているためである。この移動性の増大は、粗い石礫によってその周辺の流れが乱されることによって粗石礫周辺が洗掘されることと、主として図-10に示すように摩擦角  $\phi$  が減少することが考えられる。

いま流れによる抗力が仮に礫の中心に作用すると考えて、(a)図のように均一砂における静止摩擦係数を  $\tan \phi_1$  とすると、 $\tan \phi_1 (\cong 1/\sqrt{3})$  はほぼ一定とみなせる。一方、混合二粒径砂礫における摩擦係数  $\tan \phi_2$  は河床面を形成する砂礫の粒径とその上に重なっている石礫  $D$  の粒径の関数として

$$\tan \phi_2 \cong \frac{1}{\sqrt{(D/d+1)^2 - 1}} \quad (13)$$

のように一義的に決まる。砂の移動限界状態では、 $u_{bc}$  を砂粒子に作用する代表流速とすると、 $\rho u_{bc}^2 \sim \rho u_{bc}^2 \sim (\sigma - \rho)(2/3)d \cdot \tan \phi$  であるから摩擦係数は限界掃流力 ( $= \rho u_{bc}^2$ ) に対して線形関係があり、 $\tan \phi_2$  が小さくなれば限界掃流力は比例して小さくなる。したがって、安息角の補正は無次元限界掃流力  $\tau_{*c}$  を  $\epsilon_2 \tau_{*c} (\cong \tau_{*ci})$  と補正することになり、補正係数  $\epsilon_2$  は  $D/d > 1$  に対して

$$\epsilon_2 = \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{(D/d+1)^2 - 1}} \quad (14)$$

で与えられる。ただし、この  $\epsilon_2$  は砂礫河床上に乗っている石礫の数が少なく礫間の干渉がない場合には正しいと考えられるが、石礫の数が多くなると礫同士が接触したり、礫による水流の局所的変化が近傍の石礫へ作用する流体力を変化させる。この場合、礫間の干渉を主に支配するパラメーターは、洗掘孔内河床での砂礫移動層における石礫・砂礫の混合割合  $f_D/f_d$  ( $f_D$ : 移動層における石礫の割合、 $f_d$ : 移動層における砂礫の割合) であり、実験的には  $\epsilon_2$  は次のように表される<sup>13)</sup>。

$f_D/f_d \leq (f_D/f_d)_c$  のとき:

$$\epsilon_2 = \left( \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} \right) \left[ 1 - \left\{ 1 - \left( \frac{\tan \phi_1}{\tan \phi_2} \right) \right\} \frac{f_D/f_d}{0.3(D/d-1)^{1/2}} \right]$$

$f_D/f_d > (f_D/f_d)_c$  のとき:

$$\epsilon_2 = 1 \quad (15)$$

ここに、 $(f_D/f_d)_c = 0.3\{(D/d)-1\}^{1/2}$ 、 $\tan \phi_2 / \tan \phi_1 = \sqrt{3} / \sqrt{(D/d+1)^2 - 1}$  である。 $\epsilon_2$  を図示すれば図-11のようになる。

砂礫河床に石礫を投入した場合の石礫の無次元限界掃流力  $\tau_{*ci}$  は

$$\tau_{*ci} = \epsilon_2 \tau_{*c} \quad (16)$$

である。ここに、 $\tau_{*c}$  は均一砂の無次元限界掃流力 ( $\cong 0.05$ ) である。石礫自体が移動しないための基本条件は、 $\tau_{*ci} < u_*^2 / sgD$  であって、流れの無次元掃流力  $u_*^2 / sgD$ 、 $D/d$  および  $f_D/f_d$  の関係で決まる。

## 5. 逆フィルター効果を利用した多層捨石工の設計

### (1) 多層フィルター層の安定条件

#### a) 捨石が流送されない条件

河床全面が捨石で覆われている場合 ( $f_D = 1$ ) の捨石表面に作用する掃流力  $\rho u_{*0}^2$  に対して流送されない最上層の被覆石礫の限界粒径  $D_c$  は

$$D_c = \frac{u_{*0}^2}{sg\tau_{*c}} \quad (17)$$

で与えられる。ここに、 $\tau_{*c} (\cong 0.05)$ : 無次元限界掃流力、 $s (\cong 1.65)$ : 水中比重、 $g$ : 重力加速度、 $u_{*0}$ : 捨石工表面の摩擦速度である。

#### b) 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

これを満足するための限界条件は式(2)あるいは図-7に示した通りである。いま捨石工最上層の石礫径を  $D_0$ 、河床砂の粒径が  $d$  であつたとし、 $D_0/d = a$  とする。中間層を  $n$  層設けるとすると接触する石礫層同士の粒径比  $D_k/D_{k-1}$  は式(2)の限界条件以内を満たし、かつ

表-4 設計例 (現場規模)

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
概念図					
表層石礫粒径 $D_0$ (cm)	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
$(L/D)_0$	3.0	1.0	1.0	1.0	2.0
表層厚 $L_0$ (cm)	120.0	40.0	40.0	40.0	80.0
$D_0 \sim D_1$ 間の満たす条件	条件 c)	条件 b),c)	条件 b)	条件 b)	条件 b)
$D_0 / D_1$	8.0	2.0	3.0	3.0	3.0
中間層石礫粒径 $D_1$ (cm)	-	20.0	14.0	14.0	9.0
$(L/D)_1$	-	2.0	2.0	1.0	1.0
中間層厚 $L_1$ (cm)	-	40.0	28.0	14.0	9.0
$D_1 \sim d$ 間の満たす条件	-	条件 b),c)	条件 b),c)	条件 b)	条件 b),c)
$D_1 / d$	-	4.0	2.8	2.8	1.8
全層厚 $L_n$ (cm)	120.0	80.0	68.0	54.0	89.0

表-5 設計例 (実験室規模)

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
概念図					
表層石礫粒径 $D_0$ (cm)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
$(L/D)_0$	5.0	1.0	2.0	3.0	4.0
表層厚 $L_0$ (cm)	16.0	3.2	6.4	9.6	12.8
$D_0 \sim D_1$ 間の満たす条件	条件 c)	条件 b)	条件 b)	条件 c)	条件 c)
$D_0 / D_1$	32.0	3.0	4.5	8.0	16.0
中間層石礫粒径 $D_1$ (cm)	-	1.07	0.71	0.4	0.2
$(L/D)_1$	-	3.4	2.8	2.0	1.0
中間層厚 $L_1$ (cm)	-	3.64	1.99	0.80	0.20
$D_1 \sim d$ 間の満たす条件	-	条件 c)	条件 c)	条件 b),c)	条件 b),c)
$D_1 / d$	-	10.7	7.1	4.0	2.0
全層厚 $L_n$ (cm)	16.0	6.8	8.4	10.4	13.0

$$\frac{D_0}{D_1} \frac{D_1}{D_2} \dots \frac{D_n}{d} = a \quad (18)$$

を満足している必要がある。

c) 石礫被覆層下の吸い出し力が河床砂の限界掃流力より小さい条件

いま、フィルター層を通しての吸い出し力の減衰率が式(12)で表されるとする。被覆層が $n$ 層ある多層の場合、各層の石礫に作用する吸い出し力が限界掃流力以下であるための条件は最上層を1として、第 $k$ 層のフィルター層の層厚 $L_k$ と粒径 $D_k$ の比を $(L/D)_k$ とすると

$$\exp\left(-0.7 \frac{L_1}{D_1}\right) \exp\left(-0.7 \frac{L_2}{D_2}\right) \dots \exp\left(-0.7 \frac{L_k}{D_k}\right) \frac{u_{*0}^2}{sgd} < \tau_{*c} (= 0.05) \quad (19)$$

となる。条件a)のもとに条件b)あるいは条件c)が満足されれば洗掘は生じない。

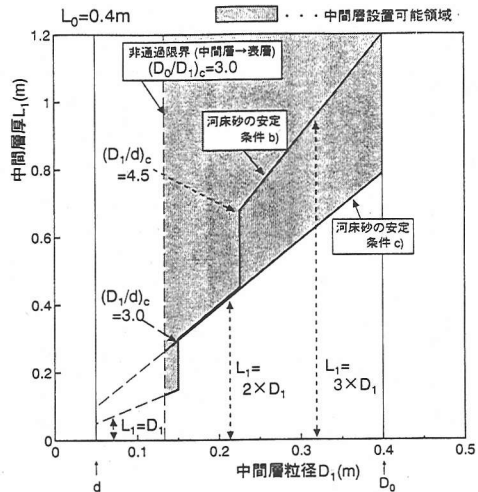
(2) 設計例

ここでは前節で示された多層フィルター層の安定条件を考慮した、合理的な捨石工の設計例を示している。通常捨石工は橋脚周辺や段落ち直下流部などの様々なケースにおいて敷設され、それぞれ対象となる流れ場が異なっているため、捨石表層に作用する掃流力の推定が困難になっている。設計にあたっては対象とする流れ場に応じてその流況と掃流力の関係について詳細な解析を行う必要があるが、ここに示す設計例では、床固め直下流部などでまだ洗掘が進行していない状態の洗掘領域の掃流力が計算できた場合を想定して、その基本的な設計方法について示している。

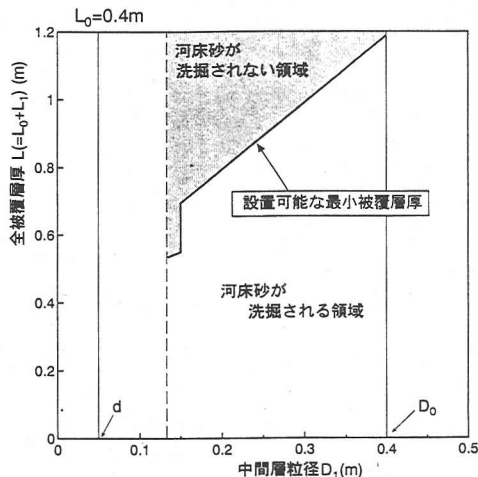
a) 設計条件1 (現場規模)

河床砂の粒径 $d=0.05\text{m}$ 、洗掘領域における摩擦速度 $u_{*0}=0.57\text{m/s}$ 、水の密度 $\rho=1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、砂礫石の密度 $\sigma=2.65 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、無次元限界掃流力 $\tau_{*c}=0.05$ 、被覆石礫は密に設置し、 $u/u_{*0}=15$ とする。

河床表層の摩擦速度に対して流送されない石礫粒径 $D_c$ は式(17)より求められ、 $D_c=0.4\text{m}$ である。安全率を考慮しなくてもよいとすると、被覆層表層には粒径 $D_0=0.4\text{m}$ の石を設置するとよい。被覆層を一粒径または二粒径とした場合の設計例を表-4に示す。この例では一粒径であれば被覆層厚は120cm以上必要になる。中間層を一層加えると種々の層厚変化が可能で(D)の例では層厚が54cmで一層の場合の半分以下になることがわかる。この(D)の例の場合は、下層の砂礫が上層の砂礫の空隙を物理的に抜け出せないという条件b)のみであり、逆フィルター効果を有効に利用している。



(a) 中間層厚 $L_1$ と中間層粒径 $D_1$ の関係



(b) 全層厚 $L_n$ と中間層粒径 $D_1$ の関係

図-12 洗掘防止に必要な中間層の条件

図-12(a)には表層石礫の粒径 $D_0 (=0.4\text{m})$ と河床砂粒径 $d (=0.05\text{m})$ を与えた場合の、洗掘防止に必要な中間層の粒径 $D_1$ とその層厚 $L_1$ の関係を示している。また、図-12(b)にはそのときの全層厚 $L_n$ を示している。表層石礫の層厚 $L_0$ の変化によって必要な中間層厚 $L_1$ は変化するが、ここでは表層石礫の層厚を最小限度の一層( $L_0=0.4\text{m}$ )とした場合についてのみ示している。図では中間層石礫が表層より抜け出さない領域内において、中間層と河床砂の間で満たすべき2通りの条件b)および条件c)が現れるが、いずれかの条件を満たしていれば河床砂は安定するので、この場合には中間層として粒径 $D_1=0.14\sim 0.15\text{m}$ 程度のものを層厚 $L_1=0.15\sim 0.20\text{m}$ で設置すれば、河床を粒径 $D_0=0.4\text{m}$ の均一礫のみで被覆する場合の1/2程度に抑えることが可能である。



## b) 設計条件2 (実験規模)

河床砂の粒径  $d=1\text{mm}$ , 洗掘領域の河床面における摩擦速度  $u_{*0}=0.13\text{m/s}$ , 表層石礫の移動に関する安全係数  $S_a=1.5$  とし, その他の条件は設計条件1と同じとする. また, 被覆石礫層数は経済性, 施工性を考えて二層までとする.

設計条件1と同様な方法で行った設計計算例を表-5に示す. 上から一層と二層の間で逆フィルター効果を利用した(B)と(C)の場合に全被覆層厚をかなり小さくできる.

## 6. おわりに

河床の洗掘防止工としての捨石工を粒径の異なる石礫で多層とし, フィルター層厚を小さくする場合の設計基準について検討した. 得られた結果は以下の通りである.

- (1) 保護されるべき河床砂  $d$  が物理的に粒径  $D$  の捨石工を抜け出せない限界粒径比  $(D/d)_c$  を捨石工層厚  $L$  と  $D$  の比  $L/D$  との関係で式(2)のように定めた.
- (2) 捨石工層を通しての河床砂の吸い出し力の減衰率は式(11)あるいは式(12)で表される.
- (3) 最上層の捨石のフィルター層表層での存在率  $f_D/f_d$  と限界掃流力補正係数  $\varepsilon_2$  との関係を表(15)のように表した.
- (4) 多粒径多層の捨石工の設計例を示し, 逆フィルター効果によって全体の捨石工厚を大幅に減少できることを示した.

本論文は粒径の異なる石礫を用いた多層捨石工の合理的な設計方法に関する基本的な考え方を述べたものであり, 現時点では複雑な流れ場における捨石工表層の掃流力の評価法など, 未解明の部分も多い. 今後は対象とする流れ場を設定して実験を行い, 多層捨石工の有効性についてより詳細な検討を進めていく必要がある.

## 参考文献

- 1) 北川 信, 伊藤進一郎, 土谷政治, 今井貫爾: 強潮流下における大規模橋梁基礎の洗掘防止工に関する研究, 土木学会

論文集, No.438/II-17, pp.61-70, 1991.

- 2) Posey, C. J. : Tests of scour protection for bridge piers, *Jour. of Hydraulic Div., ASCE*, Vol.100, No. HY12, pp.1773-1783, 1974.
- 3) Chiew, Y.M. : Mechanics of riprap failure at bridge piers, *Jour. of Hydraulic Eng.*, Vol. 121, No. 9, pp. 635-643, 1995.
- 4) de Graauw, A.F., van der Meulen, T. and van der Does de Bye, M.R. : Granular filters: Design criteria, *Jour. of Waterway Port Coastal and Ocean Eng.*, Vol.110, No.1, pp.80-96, 1984.
- 5) Galay, V. J., Yaremko, E.K. and Quazi, M.E. : River bed scour and construction of stone riprap protection, "Sediment transport in gravel-bed rivers", C.R. Thorne, J.C. Bathurst, and R.D. Hey, John Wiley & Sons Inc., New York, pp.353-383, 1987.
- 6) Suzuki, K. : Reduction of local scour depth by armor coat formation downstream of consolidation work, *Proc. 8th Congress, APD-LAHR*, Vol. B, pp.453-458, 1992.
- 7) 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.
- 8) Worman, A. : Riprap protection without filter layers, *Jour. of Hydraulic Div., ASCE*, Vol.115, No.12, pp.1615-1630, 1989.
- 9) Worman, A. and Olafsdottir, R. : Erosion in a granular medium interface, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.30, No.5, pp. 639-655, 1992.
- 10) 石野和男, 大谷英男, 勝井秀博 : 急潮流下における橋脚周辺の捨石洗掘防止工の設計法に関する研究, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp.123-133, 1995.
- 11) McDowell-Boyer, L.M. Hunt, J.R. and Sitar, N. : Particle transport through porous media, *Water Resources Research*, Vol.22, No.13, pp.1901-1921, 1986.
- 12) Joy, D. M., Lennox, W.C. and Kouwen, N. : Stochastic model of particulate transport in porous medium, *Jour. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.119, No.7, pp.846-861, 1993.
- 13) 鈴木幸一, 栗原崇, 山本裕規 : 二粒径混合砂礫による流砂量に及ぼす砂礫の混合効果の検討, 水工学論文集, 第38巻, pp.627-632, 1994.

(1996.8.2 受付)

## MULTILAYERED FILTER PROTECTIONS WITH DIFFERENT RIPRAP SIZES AGAINST LOCAL SCOUR OF SAND BED

Koichi SUZUKI, Hironori YAMAMOTO and Yoshinori TOKUYASU

Riprap protection works against local scour of sand bed are practical and effective if the riprap size is large enough and the protected bed sand is not drawn out through the riprap filter. These stability conditions were studied experimentally, and the results are applied for the design of multilayered filter protections with different riprap sizes to reduce the total thickness of the protection works. The critical ratio of riprap  $(D/d)_c$  of riprap size  $D$  to bed sand size  $d$  for physically possible movement of sand through riprap porosity was determined, and the damping of the tractive force through the riprap filter was expressed as a function of the ratio  $L/D$  of filter thickness  $L$  to the riprap size. And examples of practical design of the multilayered filter protections were shown.