

局所洗掘防止に有効な石礫護床工の条件

Conditions for Effective Protection Works by Stones or Gravel
against Local Scour of Sand Bed

鈴木幸一*・山本裕規**・栗原崇***

By Koichi SUZUKI, Hironori YAMAMOTO and Takashi KURIHARA

Protection works by stones or gravel against local scour of sand bed around river structures are effective only if the protected bed sand is not drawn out through the cover layer of stones or gravel which is stable against tractive force by the local flow. Hydraulic conditions for the effective protection works are studied experimentally. Bed sand can not geometrically move through the stones or gravel layer, when the ratio, D/d , of stones or gravel scale D to sand scale d is less than 2. The tractive force on the bed sand is exponentially reduced through the protection layer as a function of the ratio, L/D , of the protection layer thickness L to D .

Keywords: protection works, local scour, stones or gravel layer

1. まえがき

河川構造物周辺の局所洗掘の防止・軽減対策の考え方としては、局所洗掘の原因となる局所流を緩和させ河床に作用する掃流力を減じる方法と、洗掘される領域に作用する流れの掃流力に対する河床の抵抗力を補強する方法の2つに大きく分けられる。前者の例として、構造物の形状に工夫を加えたり、構造物周辺に付帯構造物を設置することなどで流れを制御する工法が挙げられ、後者としては洗掘領域をコンクリートなどで完全に固定床としたり、一定の大きさの石礫で被覆する捨石工法などがある。しかし、施工性や経済性を考えた場合、捨石による洗掘防止対策が最も有効であるように思われる。ただ、河川の規模や構造物の種類によって周辺の流況が異なることから、様々な流れに対応できる石礫護床工の設計方法の確立が必要であろう。石礫によって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る。しかし、石礫護床工が長期的に安定して河床の局所洗掘を防止・軽減する機能を保持するためには、被覆石礫が局所流によって動かされないほど十分大きいということの他に、その空隙を通しての河床砂の吸い出しがないことが必要である^{1), 2), 3)}。

本研究では、まず砂が礫間を物理的に通過できない粒径条件を自然砂について実験的に明らかにした。つぎに、河川構造物として下流端に段落ち部を有する床固めを対象として、その直下流部における局所洗掘に対して石礫護床工の有効性を実験によって示し、護床礫間を通して掃流力が減衰することによる河床砂の吸い出しがない条件に関して砂・礫の粒径および被覆礫層厚特性について実験的検討を行った。

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町3)

** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科修士課程 土木海洋工学専攻 (同上)

*** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科 (同上)

2. 洗掘防止に有効な石礫護床工の条件³⁾

砂河床の洗掘防止を目的として河床を石礫で覆う護床工が安定するには、被覆石礫そのものが流送されないことや、石礫間から河床砂が抜け出さないことなどの条件を満たす必要がある。そこで、洗掘防止に有効な石礫護床工の条件は図－1の記号を用いて以下のように示される。

条件①：被覆石礫が流送されず長期的に安定すること

被覆石礫に作用する掃流力が移動限界を超えない条件は、

$$U_*^2 / sgD < \tau_{*c} \tag{1}$$

である。ここに、 U_* ：被覆石礫表層での摩擦速度、 s ：砂の水中比重（ $=\sigma/\rho-1$ 、 σ ：礫の密度、 ρ ：水の密度）、 g ：重力加速度、 D ：石礫粒径、 τ_{*c} ：石礫の無次元限界掃流力（ ≈ 0.05 ）である。

条件②：河床砂が被覆石礫の空隙を物理的に通過できないこと

被覆石礫層下の河床砂が移動するほどの掃流力が生じてても、河床砂の粒径の程度によっては被覆石礫の空隙を河床砂が礫間から抜け出せない場合も考えられる。細砂は礫の空隙を3次元的に移動するから、この条件は被覆石礫の空隙体積と河床砂の体積との関係から決まると考えて、次式で表す。

$$\lambda_A D^3 / d^3 < \alpha \tag{2}$$

ここに、 λ_A ：被覆石礫の空隙率、 α ：実験定数である。

条件③：被覆石礫と河床砂の接触領域において河床砂が移動しないこと

被覆石礫層下の河床砂に作用する掃流力が移動限界を超えない条件は、次式で表される。

$$U_*'^2 / sg d = \beta U_*^2 / sg d < \tau_{*c}' \tag{3}$$

ここに、 U_*' ：河床砂表層での摩擦速度、 d ：河床砂粒径、 τ_{*c}' ：河床砂の無次元限界掃流力（ ≈ 0.05 ）である。河床砂表層に作用する掃流力については、石礫表層に作用する掃流力が石礫層を通る間に減衰されて河床に伝達すると考え、 β を礫層を通しての掃流力の減衰定数として、 $\rho U_*'^2 = \beta \rho U_*^2$ と仮定している。ただし、被覆石礫層下の流れは複雑であり、ここに言う掃流力とは河床面に沿う掃流力のみならず砂に作用する鉛直方向の吸い出し力をも含む概念のものである。

条件①は、被覆石礫が流送されないという石礫護床工としての基本条件であり、この条件のもとで条件②あるいは条件③のどちらかが満足されれば河床は洗掘されず安定することになる。

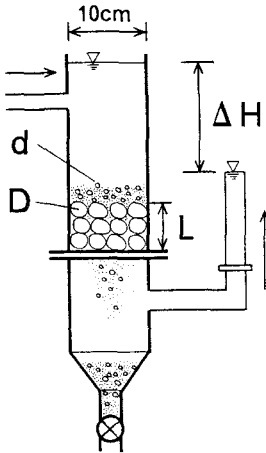
3. 河床砂が石礫層を物理的に抜け出せない条件に関する実験

前章で仮定した洗掘防止に有効な石礫護床の条件②を検討するために、石礫間を物理的に抜け出せない砂の限界粒径を得る基礎的実験を行った。図－2に示すような内径10cmの亚克力製の管内にフィルター礫を設置し、その上から任意の粒径の砂を敷き詰めて一定の水頭差 $\Delta H=10\text{cm}$ で10分間流れを発生させ、礫間からの河床砂の抜け出し状態を調べた。実験に使用する砂礫の粒径は表－1(a)にまとめて示しているが、フィルター礫は粒径 $D(\text{cm})$ で、層厚 L を表－1(b)に示す

表－1 実験条件

(a)通過層の礫粒径と通過砂粒径						
礫粒径 $D(\text{cm})$	砂粒径 $d(\text{cm})$					
3.20	2.28	1.48	0.71	0.34	0.14	0.06
2.28	1.48	0.71	0.34	0.14	0.06	-
1.48	0.71	0.34	0.14	0.06	-	-
0.71	0.34	0.14	0.06	-	-	-

(b)通過層の礫粒径と層厚			
礫粒径 $D(\text{cm})$	礫層厚さ $L(\text{cm})$		
	1層	2層	3層
3.20	3.20	6.40	9.60
2.28	2.28	4.56	6.84
1.48	1.48	2.96	4.44
0.71	0.71	1.42	2.13



図－2 実験装置

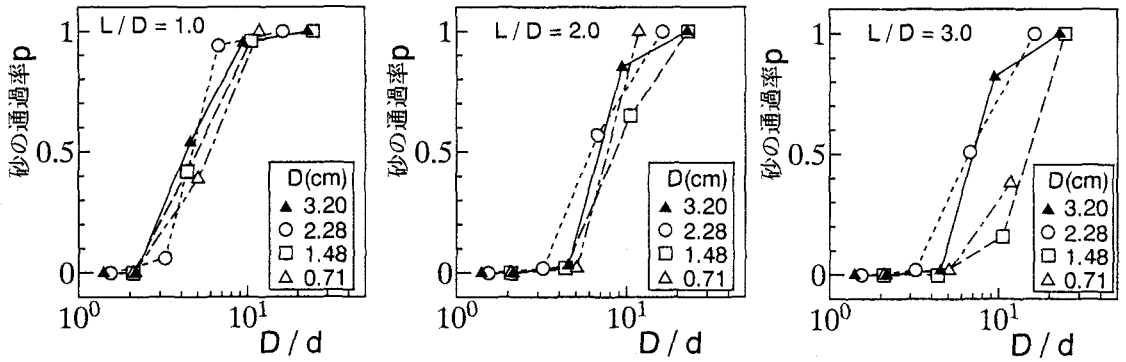


図-3 砂の通過率と礫砂粒径比 D/d および礫層厚の関係

ように変化させて一定時間内の砂の通過率を測定した。

図-3 に L/D を 1.0~3.0 で変化した場合における砂の通過率 p と粒径比 D/d の関係を示す。層厚 L の増加にしたがって砂が抜け出しにくくなり $L/D=1.0$ の場合 $D/d=2\sim3$ 、 $L/D=2.0$ と 3.0 の場合 $D/d=3\sim6$ が D/d の通過限界値となっている。礫層厚が大きいと礫層内部に砂が進入するものの礫の配置の違いによる空隙の変化などで礫層内に砂が停止するため、 $L/D=2.0$ と 3.0 の場合は $L/D=1.0$ に比して D/d の限界値が大きくなっていると考えられる。礫層内に砂が進入しない条件として考える場合、礫層厚さを礫粒径程度とした $L/D=1.0$ のデータを用いて評価するのが適当であろう。したがってフィルター礫粒径の変化によらず砂の通過率がほぼ一定であることから、礫間を抜け出せない砂の限界粒径比 D/d は、

$$D/d < 2 \sim 3$$

(4)

で与えられる。Graauw¹⁾によると、河床砂が被覆礫層を通過しない条件として、礫層内の流速が無視できる場合 $D_{50}/d_{50} < 3\sim5$ としている。ここに、 D_{50} :フィルター礫の50%粒径、 d_{50} :砂の50%粒径である。Graauwの値はフィルター礫層に比較的広範囲の粒径のものを使用しているため、本実験のように礫の粒径がほぼ一様で比較的大きい場合の(4)式より D/d が大きく与えられるものと考えられる。いま安全側を考えて非通過限界粒径比 $(D/d)_c$ を 2 とすると、(2)式の α は 3.2 となる。ただし、 $\lambda_A=0.4$ としている。

4. 被覆礫層を通しての掃流力の減衰と砂の抜け出し率に関する実験

4. 1 実験概要

ここでは礫層で被覆した場合の段落ち下流部の砂河床の洗掘特性から礫層を通しての掃流力の減衰や砂の抜け出し率を実験的に検討する。実験では一定の流量が供給可能な全長3.7m、幅0.3m、高さ0.5mの循環式水路を使用し、水路上流端から下流側1.0mを固定床として、その下流端を段落ちにする。固定床の下流側は砂礫による移動床になっている(図-1参照)。段落ち高さ W が 0.1m となるように河床砂を平坦に敷き詰め、その上を所定の層厚の礫で被覆し、基本的にはこの礫が移動しないような水理条件で通水を行った。被覆礫には粒径 $D=1.48\text{cm}$ のほぼ均一粒径のものを使用し、河床砂は礫間からの抜け出しが物理的に可能な粒径 $d=0.14\text{cm}$ (Run A) と 0.34cm (Run B) の2種類として、段落ち部で限界水深が生じる条件のもとで単位幅流量 q を表-2のように各3通り変化させた。各実験Run内で被覆礫の層厚 L を 0cm (被覆なし) から一層(約1.0cm)ずつ増加させ、それぞれ洗掘がほぼ停止する約180分後まで通水を行った。通水中の所定の時間(通水開始から5, 10, 15, 30, 60, 120, 180分後)において洗掘孔内で洗掘の最も顕著な地点(最大洗掘深よりわずかに下流側)での、河床から礫粒径程度の高さにおける流速 U_b を電磁流速計を用いて1分間(サンプリング間隔:1/20sec)測定し、同時に透明な水路側壁を通して洗掘孔形状を観測した。

表-2 実験流量

Run No.	$q(\text{cm}^2/\text{s})$
A-1, B-1	176.7
A-2, B-2	93.3
A-3, B-3	43.3

4. 2 礫護床工による局所洗掘の軽減効果

図-4に、各Runにおける平衡最大洗掘深 Z_{sf} （通水180分後の最大洗掘深）を礫で被覆しない場合の平衡最大洗掘深 Z_{s0} で無次元化した Z_{sf}/Z_{s0} と、被覆礫層厚 L を礫の粒径 D で無次元化した L/D の関係を示す。この図から礫の層厚を増加させれば洗掘軽減効果が大きくなっていくことがわかる。また、被覆礫と河床砂の粒径比 D/d が小さくなると、被覆礫層厚の少ない段階から洗掘軽減効果が顕著に現れるが、層厚がある程度増加すると粒径比 D/d による洗掘軽減効果の差が縮まる傾向にある。

4. 3 洗掘孔形状および洗掘孔底流速の時間的変化

図-5には、一例としてRun A-2（礫層厚 $L=1.0\text{cm}$ ）における洗掘孔形状の時間的変化を示しているが、他のRunもほぼ同様であった。通水5分後以降洗掘孔下流側斜面形状はほぼ相似で時間的に平行して河床が低下してゆき、180分後には洗掘がほぼ停止して河床が安定することがわかる。段落ち部において剥離した水脈が洗掘孔底部付近で再接触し、その後河床面に沿って流れることで河床面に強い掃流力が生じ、流下方向への洗掘が卓越することが実験的に認められた。図-6は、Run A-2の礫層厚 $L=0\text{cm}$ （被覆なし）と $L=1.0\text{cm}$ の場合の通水開始15分後に測定された洗掘孔底部付近における流速 U_b の変動特性を示している。礫で被覆しない場合、砂の埋め戻し等による河床の乱れが大きいために流速の変動が激しいが、わずかでも礫で被覆すれば流速の変動がかなり小さくなり、礫表面にはほぼ一定の掃流力が作用していることがわかる。また、洗掘孔底部の流速が時間の経過、すなわち洗掘孔の拡大に従ってどのように変化するか調べたものが図-7であり、各Runの通水180分後の洗掘孔底流速 U_b を通水5分後における洗掘孔底流速 U_{b0} で無次元化した U_b/U_{b0} と、通水開始5分後から180分後までの洗掘深 Z_{sm} を礫粒径 D で無次元化した Z_{sm}/D の関係で示している。実験では流速の測定位置の設定に誤差が大きかったためデータにかなりのバラツキがあるが、洗掘孔の拡大にしたがって洗掘孔底流速が減少する傾向が見られる。また、洗掘深が礫粒径程度より小さいときは流速の減少がほとんどなく、礫粒径以上の深さより洗掘が進行すれば流速は最終的に約20%以上減少している。したがって、洗掘孔の拡大によって洗掘孔の底部付近では掃流力が弱まり、最終的には河床砂を洗掘するほどの掃流力が得られなくなって洗掘が停止するものと考えられる。

4. 4 礫間からの河床砂の抜け出し率

河床砂上に被覆礫を施した場合、礫表層に作用する掃流力がほぼ一定であっても、河床砂は抜け出しと停止を繰り返しながら間欠的に洗掘される。洗掘孔下流側斜面の単位面積・単位時間の河床砂の平均抜け出し率 p_s （1/sec）は実験的に以下のように求められる。すなわち、 Δt 時間内に単位面積から抜け出すことが

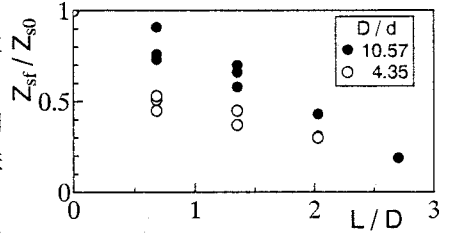


図-4 被覆礫層厚と洗掘軽減率

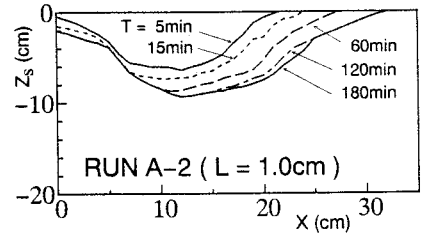
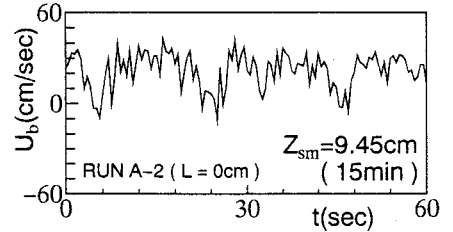
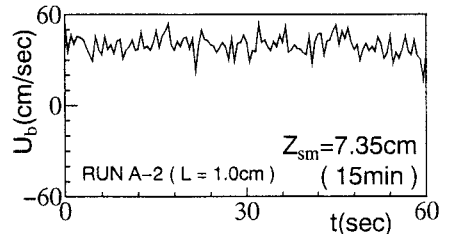


図-5 洗掘孔形状の時間変化の例



(a)被覆層がない場合



(b)被覆層がある場合

図-6 実測の河床面流速の変動例

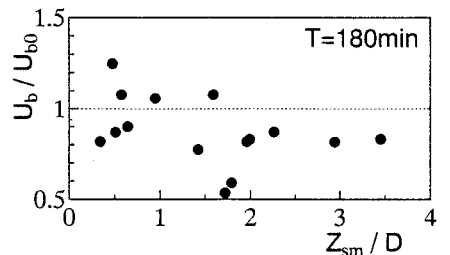


図-7 最大洗掘深と河床面流速の関係

可能な砂粒子の全体積 q_t は、河床表層の単位面積中に含まれ得る砂粒子の個数を n とすると次式のようになる。

$$q_t = np_s \left(\pi d^3 / 6 \right) \Delta t \tag{5}$$

ここに、 $n = \alpha_2 / (\pi d^2 / 4)$ 、 α_2 :砂粒子の形状補正係数 (≈ 0.785)、 d :砂粒径である。いま洗掘孔形状が時間的に相似形を保ち、図-8に示すように洗掘孔下流側斜面から Δt 時間内に V_t の体積の砂が吸い出されるとすると、この V_t と斜面長 ℓ を実測することで河床砂の洗掘孔下流側斜面の単位面積当たりの平均洗掘量 q_m は $q_m = V_t / \ell$ と表され、実験的に求められる。したがって $q_t = q_m$ とすれば p_s は、

$$p_s = (3/2) \{ V_t / (\alpha_2 \ell d \Delta t) \} \tag{6}$$

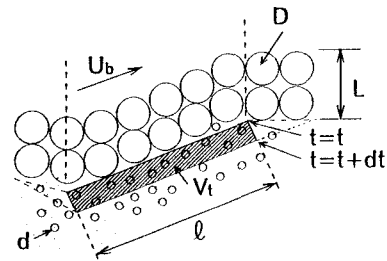


図-8 記号図

となる。この砂の抜け出し率 p_s と被覆礫表層に作用する掃流力、被覆礫層厚、礫・砂粒径特性との関係を見いだす必要がある。被覆礫表層に作用する掃流力については、従来より洗掘孔内部の流況に基づいた解析がRajaratnam⁴⁾や道上ら⁵⁾によって行われており、その結果を解析に用いるべきであるが、今回の実験では洗掘孔内部の流況に関してのデータが不足していることから、洗掘孔のごく底部付近では開水路における対数分布則 $U_b/U_* = 6.0 + 5.75 \log_{10} (y/ks)$ が便宜的に成立するものと仮定して掃流力を計算した。ここに、 U_b :測定流速、 U_* :礫表層に作用する摩擦速度、 y :礫層表面からの高さ、 ks :相当砂粒粗度 ($\approx D$) である。図-9には河床砂の抜け出し率 p_s を無次元化したパラメータ $p_s \sqrt{d/sg}$ と、礫表層に作用する無次元掃流力 U_*^2/sgd の関係を示す。図中の実線は中川ら⁶⁾による河床が礫で被覆されない ($L/D=0.0$) ときの河床砂のpick-up rate推定式である。一層でも礫による被覆を行うと、被覆をしない場合と比較して明らかに河床砂の抜け出しが減少していることがわかる。礫層厚の変化による河床砂の抜け出し率に明確な変化が見い出せないものの、巨視的には層厚の増加に従って河床砂の抜け出し率が徐々に減少し、ある礫層厚のとき抜け出しが完全に停止するものと考えられる。

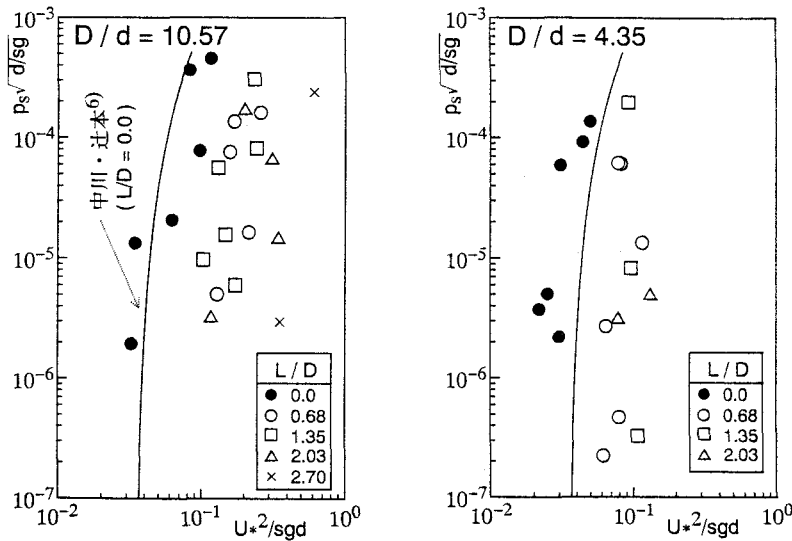


図-9 河床砂の抜け出し率と被覆礫表層の掃流力の関係

4. 5 護床礫層を通しての掃流力の減衰

条件③では、被覆礫層による掃流力の減衰効果を(3)式のように掃流力減衰定数 β を用いて表している。各実験Runにおいて河床砂の移動がほぼ停止する通水180分後では礫層下の砂が移動限界状態にあると考えられるから、そのときの被覆礫層上で測定した流速から推定した掃流力を用いると(3)式の β が実験的に求

められる。すなわち、 $\beta U_*^2 / \text{sgd} = \tau_{*c}'$ において $\tau_{*c}' \simeq 0.05$ とし、推定した U_*^2 を代入することによって β を計算する。 β は被覆礫層の特性だけで決まると考え、被覆礫層厚 L と礫粒径 D の関数 L/D で表すと図-10のようになる。この図から β は実験的に次式で示される。

$$\beta = \exp(-0.7 L / D) \quad (7)$$

この β を用いて、礫表層に作用する掃流力から礫層下の河床砂に作用する掃流力が(3)式で計算できる。図-9に示された被覆礫表層に作用する無次元掃流力($=U_*^2/\text{sgd}$)と河床砂の抜け出し率の関係を、河床砂表層に作用する無次元掃流力($=\beta U_*^2/\text{sgd}$)と河床砂の抜け出し率の関係として書き直したものが図-11である。データのバラツキは大きいものの、河床砂に作用する掃流力の増加にともなって河床砂の抜け出し率が一義的に増加する傾向が見られ、礫層のもつ掃流力の減衰効果は掃流力減衰定数 β によって評価できることがわかった。

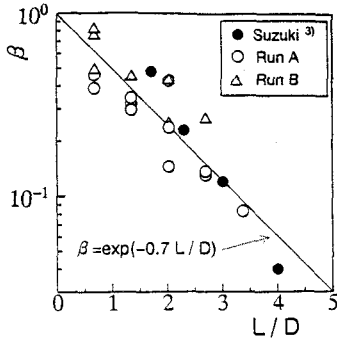


図-10 被覆層を通しての掃流力の減衰率と被覆層厚の関係

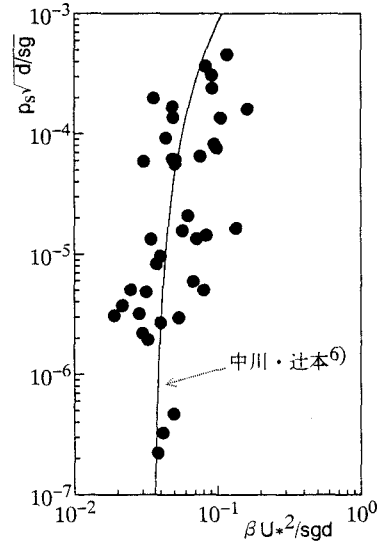


図-11 河床砂の抜け出し率と掃流力の関係

5. おわりに

本研究では、局所洗掘防止に有効な石礫護床工としての条件について実験的に検討した。その結果、粒径 D の石礫の空隙を通過できない粒径 d の河床砂の条件は $\lambda_A D^3 / d^3 < 3.2$ (λ_A :石礫層の空隙率)であること、また、河床砂の吸い出し力を含む概念の掃流力の被覆石礫層を通しての減衰率 β は $\beta = \exp(-0.7 L / D)$ で表されることなどが明らかになった。したがって、河床に作用する掃流力がわかれば、河床砂を移動させないための被覆礫層厚と礫粒径および砂粒径との関係が求められ、粒径の異なった石礫を用いた多層の護床工などを含めて、石礫護床工の合理的な設計が可能である。

参考文献

- 1) Arthur F. de Graauw, Ton van der Meulen, and Martin R. van der Does de Bye: Granular Filters: Design Criteria, Proc. ASCE, Vol. 110, No. 1, pp. 80-96, 1984.
- 2) 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.
- 3) Suzuki, K.: Reduction of local scour depth by armor coat formation downstream of consolidation work, Proc. 8th Congress, APD-IAHR, Vol. B, pp. 453-458, 1992.
- 4) Rajaratnam, N: Plane turbulent reattached wall jets, Proc. ASCE, HY1, pp. 95-112, 1968.
- 5) 道上正規・鈴木幸一・川津孝治: 床固め直下流部の局所洗掘のモデル化, 京都大学防災研究所年報, 第25号B, pp. 493-507, 1982.
- 6) 中川博次・辻本哲郎: 水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第244号, pp. 71-80, 1975.