

石礫護床工の洗掘防止機能に関する研究

愛媛大学工学部 正 員 鈴木 幸一
愛媛大学工学部 正 員 山本 裕規
宇和島市役所 正 員 毛利 太三

1. はじめに

河川構造物周辺の洗掘防止の方法の一つとして、礫を用いた河床の抵抗力補強方法がある。この方法は様々な流況に対応できる柔軟性を持つ一方で、長期的な安定性を考慮した設計法が確立されていないため、その設計は従来の経験や模型実験に頼らざるを得ないのが現状である。

本研究では、河床に被覆する礫が掃流力により移動しない状態において、礫間から河床砂が抜け出さない条件について実験を行い、洗掘防止に有効な石礫護床の条件に関する検討を行った。

2. 洗掘防止に有効な石礫護床の条件

粒径 d の均一砂の河床表層を粒径 D の石礫で被覆したとき、河床が洗掘されず長期的に安定するため条件を図-1の記号を用いて次のように仮定する。

条件①：被覆石礫が流送されず長期的に安定すること

$$u_*'^2 / s g D < \tau_{*c} \quad (1)$$

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

$$\lambda_A D^3 / d^3 < \alpha \quad (2)$$

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

$$u_*'^2 / s g d = \beta u_*'^2 / s g d < \tau_{*c}' \quad (3)$$

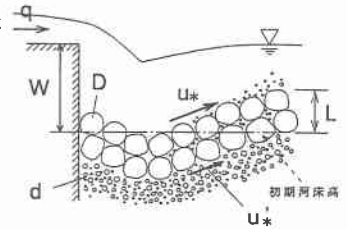


図-1 記号図

ここに、 u_* :被覆石礫表層での摩擦速度、 u_*' :河床砂表層での摩擦速度、 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、 τ_{*c} :石礫の無次元限界掃流力 (≈ 0.05)、 τ_{*c}' :河床砂の無次元限界掃流力 (≈ 0.05)、 λ_A :被覆石礫の空隙率、 α, β :実験的に求められる定数である。

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が満たされれば河床は洗掘されず安定することになる。

3. 河床砂が被覆石礫の空隙を物理的に抜け出せない条件に関する検討

前節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、内径10cmのアクリル製の管内に所定の層厚 L cmでフィルター礫を設置し、一定の水頭差 $\Delta H=10$ cmで10分間流れを発生させ、礫粒径より小さい任意の粒径 d ($=2.28, 1.48, 0.71, 0.34, 0.14, 0.06$ cm)の砂を少しずつ流し込んで、投入した砂の重量とフィルター礫層を通過する砂との重量比によって砂の通過率 p を求めた。礫粒径 D (3.20, 2.28, 1.48, 0.71 cm) に対して、フィルターの層厚 L を1層 ($L/D=1.0$) ~ 3層 ($L/D=3.0$) 変化させて実験を行った。図-2には $L/D=1.0$ と 3.0 の場合における、砂の通過率 p と礫・砂粒径比 D/d の関係を示している。フィルター礫層厚の増加に従って、礫間を通過しない砂の粒径が、礫粒径に比して小さくなっていることがわかる。これは礫層厚が大きくなると、礫層内部の空隙に停止する砂の割合が増加するためであるが、ここでは安全側を考え、図-2から $L/D=1.0$ における非通過限界粒径比 $(D/d)_c$ を2.0とすれば、(2)式の α は3.2で与えられる。ただし、 $\lambda_A=0.4$ としている。

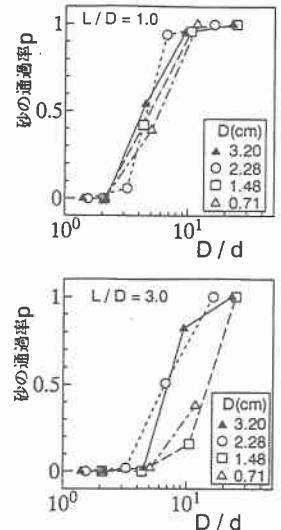


図-2 砂の通過率 p と L/D の関係

4. 被覆礫層を通しての掃流力の減衰効果に関する検討

(a) 実験概要 ここでは2節で仮定した条件③に関する実験的検討を行った。実験には全長3.7m、幅0.3m、高さ0.5mの鋼製水路を用いたが、水平河床で大き

な掃流力を得ることができなかったため、局所的に掃流力が大きくなる段落ち部での流れを利用した。すなわち水路上流端より下流側1.0mを固定床とし、その下流端を落差10cmの段落ちとした。その下流側は礫により被覆された均一砂による移動床となっている。被覆礫には粒径 $D=1.48\text{cm}$ のものを使用し、河床砂には礫間を通過可能な粒径が $d=0.14\text{cm}$ (Run A) のものと 0.34cm (Run B) の2種類として、被覆礫が基本的に移動しない流量（表-1に示す）で通水を行った。各Run内で被覆礫層厚 L を 0cm （被覆なし）から一層（約 1.0cm ）ずつ増加させ、通水時間は被覆のない状態で洗掘が停止する、約180分後までとした。また通水中所定の時間において、洗掘孔内で流れが下流側にはほぼ一様に流れ始める地点での、被覆礫表層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分間測定し、同時に流速測定位置より下流側の河床砂の洗掘体積を測定した。なお、洗掘孔内部においても流れが下流側に比較的一様に流れている場合は、河床のごく近傍において対数則が成立するものと仮定して、測定された u_b から礫表層における摩擦速度 u_* を計算した。

表-1 水理条件

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

(b) 実験結果 図-3には礫表層における無次元掃流力 $(=u_*^2/sgd)$ と、その掃流力に対応する河床砂の抜け出し率 $p_s\sqrt{d}/\xi g$ の関係をそれぞれRun A, Bについてまとめている。なお図中には参考のために、均一砂を使用して得られた中川・辻本のpick-up rate推定式¹⁾を示している。一層だけでも礫による被覆を行えば、被覆しない場合と比べて明らかに河床砂の抜け出し率が減少しており、礫表層での掃流力が同程度であっても層厚の増加に従って徐々に抜け出し率が減少する傾向にある。

礫層下の河床砂が移動限界状態と考えられる通水180分後において、(3)式が $u_*'^2/sgd = \beta u_*^2/sgd = 0.05$ となり、 β が実験的に求められる。図-4に β と被覆礫層厚 L と礫粒径 D の比 L/D の関係を示す。この図から β は、掃流力の減衰効果を表す定数として L/D の関数によって表され、実験的に次式で示される。

$$\beta = \exp(-0.7L/D) \quad (4)$$

この β を用いることで、図-3に示された被覆礫表層における無次元掃流力 $(=u_*^2/sgd)$ を、河床砂表層における無次元掃流力 $(=\beta u_*^2/sgd)$ によって図-5のように表せる。データにばらつきはあるものの、均一砂としての河床砂の抜け出し率に近づいており、礫層の掃流力減衰効果が β により評価可能であることがわかった。

5. おわりに

今後は異なる粒径の礫層についても実験を行い、礫層が掃流力を減衰させて河床に伝達するという仮定の有効性についてさらに検討する予定である。

参考文献 1) 中川・辻本: 土木学会論文報告集, 第244号, pp. 71-80, 1975.

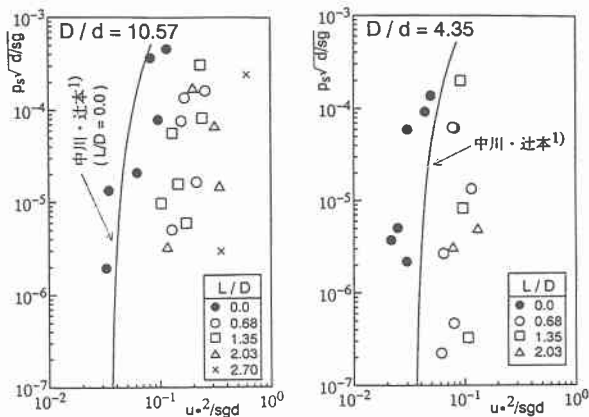


図-3 礫表層の掃流力と河床砂の抜け出し率

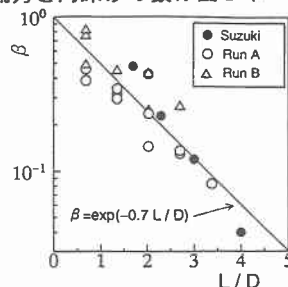


図-4 掃流力減衰定数

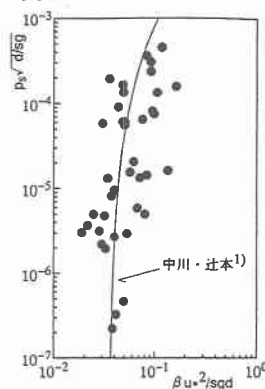


図-5 河床砂表層の掃流力と河床砂の抜け出し率