

混合砂礫逆フィルターによる河床洗掘防止効果に関する研究

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
愛媛大学大学院 学生員 ○藤岡 貴之
日本道路公団 正 員 徳安 芳典

1. はじめに

河川構造物の安定性を脅かす要因に、周辺河床の局所洗掘があるがその防止・軽減対策として捨石工法がよく用いられている。この工法は様々な流況に対応できる反面、河床砂と被覆石礫の関係を扱った研究が少なく、その設計には経験やモデル実験に頼らざるを得ないのが現状である。洗掘防止に有効な石礫護床の条件は、①:被覆石礫が流送されずに長期的に安定すること、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 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の3つが考えられる。すなわち、条件①のもとで条件②か③のいずれかが満たされれば、河床は洗掘されずに安定することになる。

本研究では、河床砂が被覆石礫層から抜け出さない条件に関する実験と、被覆石礫層下の吸い出し力の減衰について考察を行い、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. 河床砂が被覆石礫の空隙を物理的に通過しない条件に関する実験

ここでは上記の条件②を検討するために、内径10cmのアクリル製の管内にフィルター礫を設置し、一定の水頭差 $\Delta H = 10\text{cm}$ で10分間流れを発生させ、フィルター礫からの河床砂の抜け出し特性を調べた。使用する河床砂 d (2.28, 1.48, 0.71, 0.41, 0.27, 0.14, 0.06 cm)に対して、フィルター礫の粒径 D (3.20, 2.28, 1.48, 0.71 cm)で層厚 L を($L/D = 1.0 \sim 3.0$)変化させて、一定時間内の河床砂の抜け出し率を測定した。図-1に $L/D = 1.0 \sim 3.0$ における、砂の通過率 p と礫と砂の粒径比 D/d の関係を示す。層厚の増加に伴って砂が通過しにくくなるが、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が生じるためである。これらの図をもとに、河床砂が被覆石礫を物理的に通過できない粒径比、すなわち非通過限界粒径比 $(D/d)_c$ を以下のように定める。

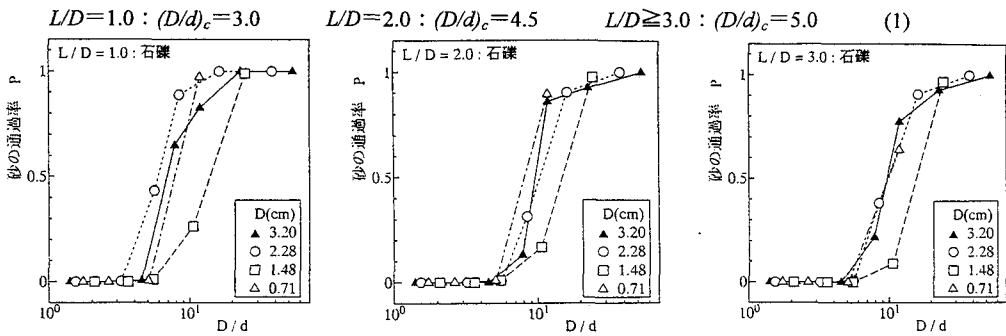


図-1 砂の通過率 p と D/d の関係

3. 被覆石礫を通しての掃流力に関する検討

ここでは条件③に関する検討を行う。図-2において被覆石礫を施した時の被覆層下に作用する掃流力 $\rho U_*'^2 (= \beta \rho U_*^2)$ を測定するのは困難であるが、石礫層を通しての掃流力の減衰定数 β が決まれば $\rho U_*'^2$ から ρU_*^2 が求められる。鈴木ら¹⁾によると、この β は石礫で被覆された河床の洗掘領域では、洗掘の進行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、 $\rho U_*'^2 / \rho g d = \tau_{*c}$ (≈ 0.05)と被覆表層の流速の実測値から推定した摩擦速度 U_* から実験的に次式で表されている。

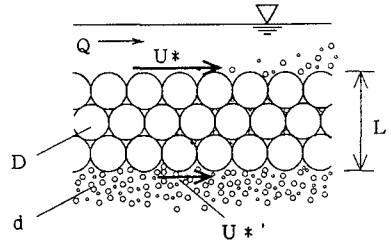


図-2 記号図

$$\beta = \exp(-0.7L/D) \quad (2)$$

ただし, U, U_s :被覆石礫及び河床砂表層における摩擦速度, s :砂の水中比重 ($=\sigma/\rho-1, \sigma$:礫の密度, ρ :水の密度), g :重力加速度, d, D :河床砂, 被覆石礫の粒径, τ_{*c} :河床砂の無次元限界掃流力である。

また, 図-2 より, 被覆石礫表層と河床砂表層の圧力勾配 I は, 次式で表される。

$$I = \frac{\Delta h}{L} = \frac{u^2}{2gL} = \frac{4U_s^2}{f \cdot gL} \quad (\because u = \sqrt{8/f \cdot U_s}) \quad (3)$$

また, 石礫層内の流れが乱流であるとする, 次式が成り立つ²⁾。

$$I \equiv \frac{2(1-\lambda)}{g\lambda^3 D} v^2 = \frac{16(1-\lambda)}{f \cdot g\lambda D} U_s^2 \quad (\because v = \sqrt{8/f \lambda U_s}) \quad (4)$$

ここで, u :被覆石礫表層の流速, v_p :河床砂表層の実質流速, v :礫層内の断面平均流速 ($=\lambda v_p$), f, f' :被覆石礫表層及び石礫層の空隙を管路とみなした場合の摩擦損失係数である。式(3)及び式(4)より, 減衰定数 β は次式で表される。

$$\beta = \frac{f}{f'} \frac{\lambda}{4(1-\lambda)} \left(\frac{L}{D}\right)^{-1} \quad (\because \beta = \rho U_s^2 / \rho U^2) \quad (5)$$

ここで, 各摩擦損失係数を次のように仮定する。

$$\sqrt{8/f'} = 6.0 + 5.75 \log(h/k') \quad (6)$$

$$\sqrt{8/f} = 1.74 + 2 \log(D/2k) \quad (7)$$

ただし, h :水深, k, k' :相当粗度である。いま, 実験室スケールを考慮して $\lambda = 0.4, h/k' = 15, D/2k = 1/0.414$ と仮定し¹⁾, 式(5)に式(6)及び(7)を代入することで次式が求められる。

$$\beta \equiv 0.54 \left(\frac{L}{D}\right)^{-1} \quad (8)$$

図-3 は式(8)を図示したものである。実験式(2)と比較すると, $L/D = 1.0 \sim 3.0$ の範囲において大きな差はなく, 鈴木ら¹⁾による実験式(2)は妥当であると言える。

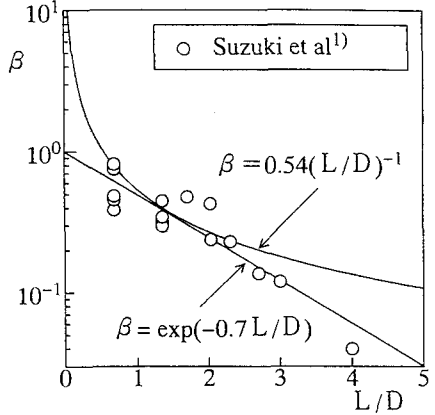


図-3 減衰定数 β と L/D の関係

4. 多層捨石工の設計例

ここでは上述した条件に基づき, 被覆層を粒径の異なる二層とする場合に層厚を小さくする捨石工の設計の一例を示す。ただし, 河床砂粒径は $d = 1.0 \times 10^{-3}$ [m], 洗掘領域の河床面での摩擦速度は $U_{*0} = 0.13$ [m/s], $\rho = 1.0 \times 10^{-3}$ [kg/m³], $\sigma = 2.65 \times 10^3$ [kg/m³], 石礫の無次元限界層流力は $\tau_{*c} = 0.05$ とし, 被覆石礫は密に設置し二粒径までとしている。その計算結果を表-1 に示す。A の様に一粒径の石礫で被覆した場合 16cm の層厚が必要であるが, 中間の粒径の石礫を層の中に入れ条件②を用いれば, B, C の様に層厚を極端に小さくできる。

表-1 多層捨石工の設計例

概念図	A	B	C	D	E
被覆石礫径 D_s (cm)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
$(L/D)_s$	5.0	1.0	2.0	3.0	4.0
表層厚 L_s (cm)	16.0	3.2	6.4	9.6	12.8
$D_s - D_i$ 間の満たす条件	条件①	条件②	条件②	条件②	条件③
D_s/D_i	32.0	3.0	4.5	8.0	16.0
中間層石礫径 D_i (cm)	-	1.07	0.71	0.4	0.2
$(L/D)_i$	-	3.4	2.8	2.0	1.0
中間層厚 L_i (cm)	-	3.64	1.99	0.8	0.2
$D_i - d$ 間の満たす条件	-	条件③	条件③	条件③④	条件③④
D_i/d	-	10.7	7.1	4.0	2.0
全層厚 L_t (cm)	16.0	6.8	8.4	10.4	13.0

5. おわりに

今後は, 層厚が非常に大きい場合の掃流力の減衰率の適合性や, 条件①~③に従って設計された石礫護床工の洗掘防止機能などの実験的検討が必要である。

参考文献 1) 鈴木・栗原・山本: 床固め直下流部の礫護床の水理条件, 愛媛大学工学部紀要, 第 14 巻, 1995.

2) Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N.: Transport Phenomena, John Wiley & Sons, 1960.