

橋脚周辺河床の粗粒化について

京都大学工学部 正員 中川 博次

京都大学工学部 正員 鈴木 幸一

京都大学大学院 学生員 ○中川 道弘

1. まえがき

ダム下流域や橋脚周辺部における clear water scour のように上流から土砂の供給がない場合でしかも河床が混合砂礫よりなる場合、洗掘が進行し掃流力が最大粒径砂の限界掃流力より小さくなると河床は形態の変化のみならず砂礫の粒度構成の変化によっても流床に對抗し、同一平均粒径の均一砂の場合に比して最終的河床低埋は小さくなる。Fig.1 は円柱周辺部における洗掘後の砂の粒度分布のスケッチであるが、洗掘孔底部が極度に粗粒化していることが認められる。本研究では、円柱周辺部における clear water scour の最終洗掘深に対する混合砂礫の効果について考察するとともに、粗粒化された河床砂の粒度構成について検討する。

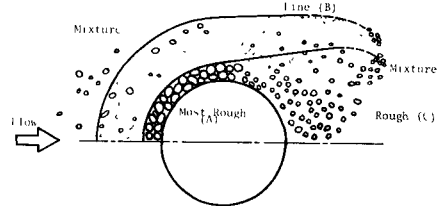


Fig.1 円柱周辺河床の sorting 状況

2. 理論的考察

円柱周辺部における洗掘は、まず円柱底部周辺における流れの集中、剥離渦流の作用によって Fig.2 の斜線部において生じる。この斜線部の河床低下と、その外側の領域にはほぼ砂の水中安息角 ϕ の傾きをもった斜面を形成する。また、実験的に斜線部中は主に円柱径によって決まり流れにはほとんどよらないことがわかってゐる。いま、円柱側面の $1/2 \leq y/D \leq (k+1/2) (kD)$ における掃流力に対して砂の移動が停止する条件から最終洗掘深を求める。 kD は流れの流量は洗掘後も円柱側面での kD に対応したボテンシャル流線から求める上流側の中より通過する流量に等しいと仮定し、洗掘深 Z_s を考慮して kD の平均流速 $\bar{u}$ を計算する。すなわち、Fig.2 を参照して、 $Z_s = 0$ のときは、

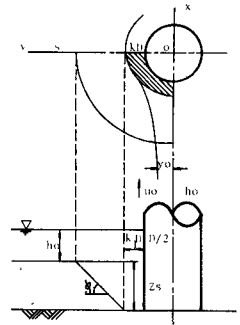


Fig.2 記号図

$$u_0 y_0 = \int_{y/2}^{(k+1/2)D} u_0 \left(1 + \frac{(D/2)^2}{y^2}\right) dy \quad \therefore y_0 = D \left(k + \frac{1}{2} - \frac{1}{4(k+1/2)}\right) \quad \dots \dots (1)$$

であり、洗掘が進行した状態（洗掘深 Z_s ）では、

$$u_0 y_0 h_0 = \int_{y/2}^{(k+1/2)D} u (h_0 + Z_s) dy, \quad \text{したがって、} \quad u = u_0 \left(1 + \frac{(D/2)^2}{y^2}\right) \quad \dots \dots (2)$$

であるので、 kD の平均流速 $\bar{u}$ は (2) より、

$$\bar{u} = \frac{1}{kD} \int_{y/2}^{(k+1/2)D} u dy = \frac{y_0 u_0 h_0}{kD (h_0 + Z_s)} \quad \dots \dots (3)$$

となる。そこで、 $\bar{u}/u_0 = \gamma_s$ とすると、 $\gamma_s = \rho (\bar{u}/u_0)^2$ の式を用いて掃流力で計算される。流速係数 γ_s については、河床形態によって大きく変化することが知られてゐるが、円柱側面の洗掘孔内ではこのようないずれともは明確ではない。青藤ら⁽¹⁾によれば、洗掘がある程度進行した場合には

ば 8~10 の値をとることゝ報告されいる。なお、 R_1 は実験的には1.2~5.25である。このように求めた掃流力が砂の境界掃流力と等しいとき、洗掘深が最終洗掘深であると考へられる。混合砂の境界掃流力のついでに、均一砂については、洗掘深の求め方が多くの研究がある。しかし、境界の定義的研究者により異なっているため、各提案式で求めた境界掃流力はそれらの間では10%程度の差がある。このことは、有意な河床変動が停止し粗粒化が生じる境界という意味で、Gessler⁽²⁾による $\bar{y}=0.5$ とする掃流力を採用する。本問題に対しては適当である。そこで、 $\bar{y}$ は armour coat における平均残留率である。 d_{max} , d_{min} とする混合砂の最大、最小粒径とすると、

$$\bar{y} = \frac{\int_{d_{min}}^{d_{max}} y^2 f_0 d d_i}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} y f_0 d d_i} \quad \text{ただし、} y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{(d_i-d_{min})/(\bar{d}-d_{min})} e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad (4)$$

である。この場合、 f_0 は洗掘前の混合砂の粒度曲線 f_0 に対する密度関数を用いるが、これは河床低下が停止する粗粒化が始まると考えられるからである。これは各粒径 d に対して f_0 の曲線から求めた境界掃流力である。洗掘深を仮定し、(3)式で求めた $\bar{y}$ を用いて (4)式により $\bar{y}$ を計算し、 $\bar{y}=0.5$ になる $\bar{y}$ を試行錯誤によって求める。なお、このときの armour coat における流出砂の粒度曲線 f_1 は f_0 から求められ、(5)式

$$f_1 = \frac{\int_{d_{min}}^{d_i} y f_0 d d_i}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} y f_0 d d_i}, \quad f_2 = \frac{\int_{d_{min}}^{d_i} (1-y) f_0 d d_i}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} (1-y) f_0 d d_i} \quad \dots (5)$$

3. 実験的考察

Table 1 に示す条件下で実験を行った結果、最終洗掘深 $\bar{y}$ について、Fig. 3 の黒丸で示す通り理論値と実験値とは比較的良好一致を示した。なお、白丸は別の実験の均一砂に対するものであるが、混合砂と異なり、均一砂では実験での $\bar{y}$ は明確に1.5以下であるが、いずれも洗掘される。最終状態はついでに、両者のこの違いについては、河床砂礫の組合

い方から検討しなければならない。

Fig. 4 は armour coat の粒度曲線の一例であるが、流水後5分で既に洗掘は停止しており、 $\bar{y}=0.5$ になっていることがわかる。洗掘停止時の粒度曲線は理論と実験とがよく一致している。Fig. 5, Fig. 6 はそれぞれ Fig. 1 における領域(B)に堆積した砂の粒度曲線の一例であるが、比較的粗い流出砂と細かい流出砂とを断片的に高2枚異なり、断片上の石流の流間には流送されるために、多少の粗粒化が生じたと考えられる。したがって、Fig. 5 の計算値 (5.5%) は、Fig. 5 と Fig. 6 の流出砂の合成されたものとなる。

(参考文献) 1) 斎藤, 浦, 岸田: 河床砂礫の洗掘について, 山形大学工学部研究報告 第20巻, 1号, 昭和三十九年
2) Gessler, J. Self-stabilizing tendency of alluvial channels, Trans. ASCE, Vol. 72, May 1952, pp. 45-47

Table-1 実験条件

Run No	D (cm)	h (cm)	u ₀ (m/s)	Sand d ₅₀ (mm)	$\sqrt{gH^3}/4h$
1	20	1/1000	12.0	A 0.10	1.43
2				B 0.12	1.54
3				C 0.12	2.77
4		10.0	33.3	A 0.10	1.43
5				B 0.12	1.54
6				C 0.12	2.77
7		8.0	26.7	A 0.10	1.43
8				B 0.12	1.54
9				C 0.12	2.77
10		10.0	33.3	D 0.10	1.61
11		8.0	26.7	D 0.10	1.61

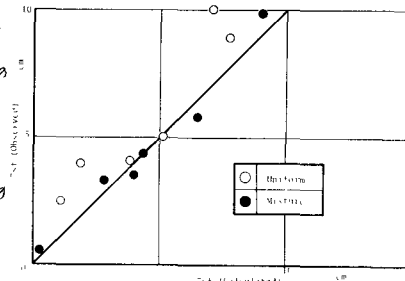


Fig. 3 最終洗掘深の計算値と理論値

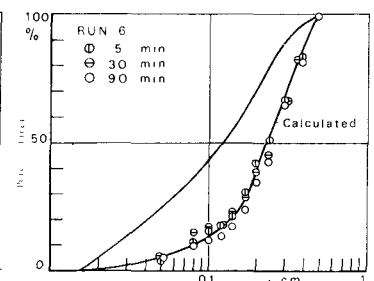


Fig. 4 Armour Coat の粒度曲線

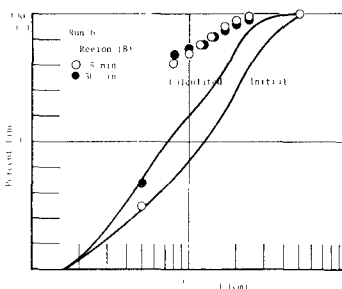


Fig. 5 流出砂(領域B)の粒度曲線

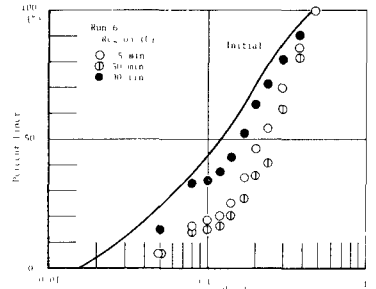


Fig. 6 流出砂(領域C)の粒度曲線