

明石工業高等専門学校 正員 神田 佳一
 京都大学防災研究所 正員 村本 嘉雄
 京都大学防災研究所 正員 藤田 裕一郎

1. はじめに

護床工下流部の局所洗掘に関して、河床が混合砂礫で構成される場合を対象として洗掘実験を行い、洗掘形状及び洗掘穴内の表層土砂の粒度特性に関して考察するとともに、既報¹⁾で示した均一砂の場合の計算法を修正して混合砂礫河床の洗掘形状を予測し、実験結果との比較からその妥当性を検討した。

2. 実験の概要

実験には、幅23cm、長さ4m及び河床勾配1/100の亚克力製長方形断面水路を用いた。水路上流部1.5mの区間には図-1に示すホロースケアブロックを幅方向に4列設置し、その下流部は、図-2に示すほぼ様な砂と礫を混合したものをイボ要素の底面高さ（図-1のA-A）まで敷き詰めた移動床とした。実験は、表-1に示すように砂礫の混合割合を3通りに変化させて行い、それぞれ等流状態での摩擦速度 U_{*0} が河床材料の90%粒径に対する限界摩擦速度に等しくなるように流量を設定した。いずれの場合も、通水後水路下流端から流出する砂を適宜ブロック上流端から給砂し、動的な洗掘条件のもとで河床形状の時間変化を詳細に測定した。

表-1 実験条件

	F	d_m (mm)	Q (l/s)	h_0 (cm)	U_{*0} (cm/s)
Run. 1	7:3	2.4	2.79	3.5	5.1
Run. 2	6:4	3.3	5.58	4.7	5.7
Run. 3	5:5	4.3	8.28	6.4	6.3

F : 砂と礫の混合割合（重量比）、 d_m : 平均粒径、 Q : 流量
 h_0 , U_{*0} : 下流等流部の等流水深及び摩擦速度

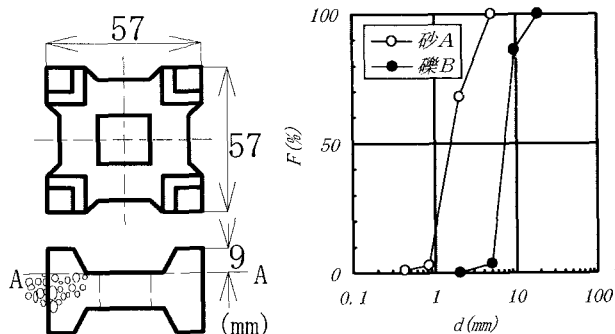


図-1 護床工ブロックの形状 図-2 河床材料の粒度分布

3. 実験結果及び考察

図-3は、ほぼ動的平衡状態とみなせる通水後 $t=60$ 分におけるRun 2の河床形状の鳥瞰図を均一砂の場合¹⁾ ($d_m=1.5$ mm)と比較したものである。イボ型の粗度要素が直角格子に並んだホロースケアブロック上では、ブロック底面付近の流れはイボ要素の前面で遅く、要素間では速い流れとなるため、混合砂礫河床においても均一砂の場合と同様に、粗度変化直下流のイボ要素間の延長上で深掘れが生じて横断方向に凹凸のある3次元的な河床形状となる。しかしながら、混合砂礫の場合には、洗掘穴の最深部では河床の横断分布はほぼ一様であって、また、洗

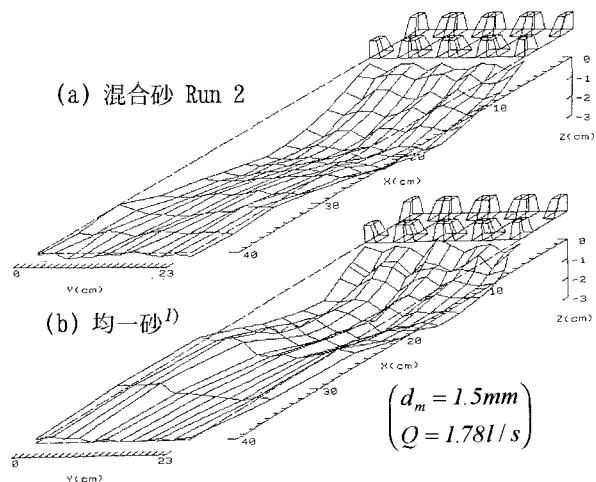
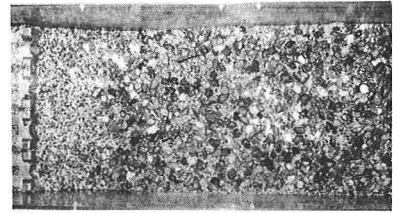
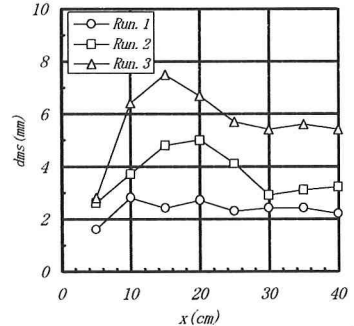


図-3 洗掘形状の鳥瞰図

掘の深さに対する洗掘長さの比が均一砂の場合よりも大きくなっている。これは、洗掘穴の最深部及び下流斜面では、 $t=60\text{min}$ での河床の状態を示した写真-1からもわかるように、河床近傍の細粒分が吸い出されて粗粒化し、河床表面が礫のみで覆われることによって、深さ方向の洗掘が抑制されたためである。図-4は、実験終了後（ $t=60\text{min}$ ）の洗掘穴表面の土砂を x 方向に5cmピッチで約2cmの厚さで採取し、その平均粒径 d_{ms} の流下方向分布を示したものである。 d_{ms} は、いずれも洗掘穴の最深部（ $x=15\text{cm}$ ）付近で最大となっており、これは河床せん断応力のピークとも一致していて、ここでは粗粒化が進行していることを示している。この傾向は、粗粒分の割合が大きい場合ほど顕著であるが、洗掘穴の下流では d_{ms} は、流下方向に変化していない。また、粗度変化直下流部（ $x=5\text{cm}$ ）で d_{ms} が最少となるのは、洗掘穴の上流斜面上で形成される主流の剥離に伴う渦によって細粒分が捕捉され、そこに堆積したためであると思われる。（写真-1参照）


 写真-1 通水後（ $t=60\text{min}$ ）の河床表面の状況

 図-4 通水後（ $t=60\text{min}$ ）の河床表層土砂の平均粒径の流下方向分布

4. 河床変動に関する数値解析

ホロースケア護床工下流部では、流れの集中する粗度要素間の延長線上で深掘れが生じ、その周辺の砂は横断勾配が水中安息角 ϕ に等しくなるまで洗掘穴内に滑落する。そこで、洗掘穴の横断形状を図-5(b)のように台形で近似し、粗度要素間中央の延長線に沿ったある幅 B_c の仮想的な河床について砂の収支を考えると、洗掘の進行速度 $\partial z/\partial t$ は次式で表わされる²⁾。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \hat{q}_b(x) - \int_0^x \hat{q}_b(x-\xi) f(\xi) d\xi - \hat{q}_{bi} \left(1 - \int_0^x f(\xi) d\xi \right) - \frac{q_{bs}(x)}{A_f d_m B_c} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{q}_b(x)$ 、 $\hat{q}_{bi}$ は x 地点及び護床工上の平衡流砂量、 $q_{bs}(x)$ は単位幅当たりの砂粒子の横流入量（図-5(b)のハッチング部分の面積）、 $A_f d_m$ は掃流砂の移動層厚、 λ は砂の空隙率及び $f(\xi)$ は砂の跳躍距離 L の確率密度関数であり、 $f(\xi) = \exp(-\xi/L)/L^3$ とした。

洗掘穴内の平衡流砂量は、均一砂での実験で得られた底面せん断応力分布をべき関数でモデル化し²⁾、粒径別の限界掃流力を与えて、芦田・道上式³⁾から算定した。ただし、護床工上流の流砂量には水路下流端（ $x=2\text{m}$ ）での平衡流砂量を与えた。

図-6は、Run 2について、通水後 $t=10\text{min}$ 及び 60min における最大洗掘が生じた縦断線上での河床形状を実測と計算と比較したものである。いずれの場合も、計算値は実測値とよく一致しており、本解析は、河床の限界掃流力を適切に評価すれば、混合砂礫河床の場合でも適用しうるものと考えられる。

5. おわりに

護床工下流部における混合砂礫河床の洗掘形状について、実験的に検討するとともに、数値解析を試みその妥当性を検討した。今後さらに、実河川への適用性についても検討していきたい。

【参考文献】 1) 神田・村本・藤田・金川・中村：水工学論文集，第35巻，pp. 501-506，1991。2) 神田・村本・藤田：水工学論文集，第357，pp. 57-662，1993。3) 鈴木・道上・川津：第26回水理講演会論文集，pp. 75-80，1982。3) 芦田・道上：土木学会論文報告集，第206号，pp. 59-69，1972。

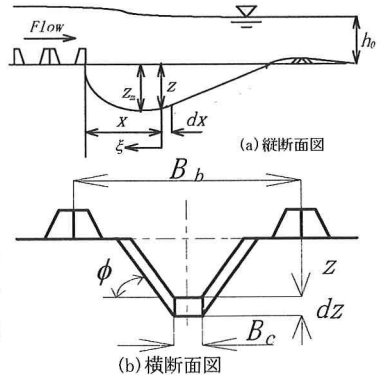


図-5 洗掘穴の模式図

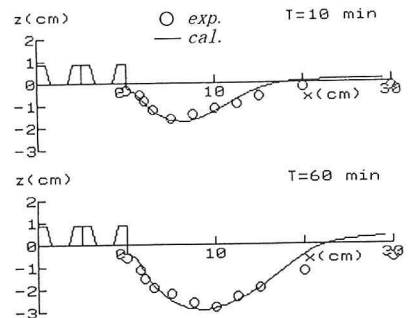


図-6 縦断河床形状の比較 (Run. 2)