

II-60

礫列河床における砂の洗掘・堆積と輸送量に関する実験

北海道大学工学部 ○学生会員 田中 航太
 北海道大学大学院 中村 健作
 北海道大学大学院 正会員 長谷川和義
 水資源開発公団 正会員 竜澤 宏昌

1. はじめに

山地河川では、巨礫・大礫などで構成されるステップ部と小さな砂礫で構成されるプール部(淵)が交互に連なる独特の階段状形態(礫列)が見られ、山地での美しい景観を引き立てている。また、河川やその周辺を生息範囲とする生物にとって、この河床形態が良好かつ安全な理想的空間を提供していることが報告されている。

一方、これらの河床形態は山地域からの土砂流出と密接に結びついており、プール部の貯砂機能によって流砂量のコントロールされていることが澤田ら¹⁾によって指摘されている。このような土砂流出調節機能を解明するためには水理学的解析や地形学的アプローチなどから礫段や礫列河床の発生条件を解明し、応用していくことが重要となるであろう。現在までに、長谷川²⁾、竜澤・林・長谷川³⁾の数多くの実験や現地観測によって山地河川の実態が次第に明らかにされてきている。この中で礫段・礫列の波長や波高の推定式が提案されており、河床砂礫の粒度分布が成因に大きく関わっていること、特に TALBOT 型粒度分布の存在がこれらの河床波の安定にとって重要であることが確認されている。筆者らはそれらの成果に基づいて礫列河床を人工的に再現し砂の流下実験を試みることにした。

上流からの土砂流出が礫列河床によっていかなる影響を受けるかを観測するため、2種類の粒径の砂を再現されたプール部の最上段に給砂し、各プールの洗掘・堆積状態ならびに砂の流送状態を観測した。また、この実験結果より流量から流砂量を予測するためのモデル式をたて、水理学的解析を行った。本論文では、実験結果とモデル式の報告をする。

2. 実験装置と実験方法

2-1. 実験装置の概要

礫段や礫列の発生する山地河川河床材料の粒度分布は TALBOT 型の粒度分布を有することが知られている。TALBOT 曲線とは、コンクリートの分野で粗骨材・細骨材などの混合材料の最大密度を与える粒度分布の理想型を表す曲線であり、以下によって与えられる。

$$P_i = (d_i / d_{max})^n \quad (1)$$

d_i : i 番目の粒径クラスの代表径

d_{max} : 材料中の最大粒径

P_i : d_i の大きさの篩目のを通過する材料の全体に占める重量百分率

一般に指数 n が $1/2 \sim 3/4$ の時によく締め固まるといわれており、実験は、 $n=1/2$ 、 $d_{max}=5.0(\text{cm})$ の混合砂礫を用いた。流量の測定には、電磁流量計を用いた。実験水路は、長さ 11m、幅 30cm、深さ

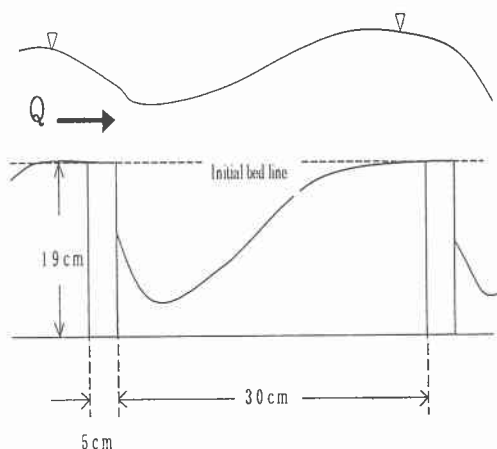


図-1 実験装置

Experiments Of Sediment Transport On The Rib-Beds Of Steep Rivers
 by Kota TANAKA, Kensaku NAKAMURA, Kazuyoshi HASEGAWA and Hiromasa TATSUZAWA

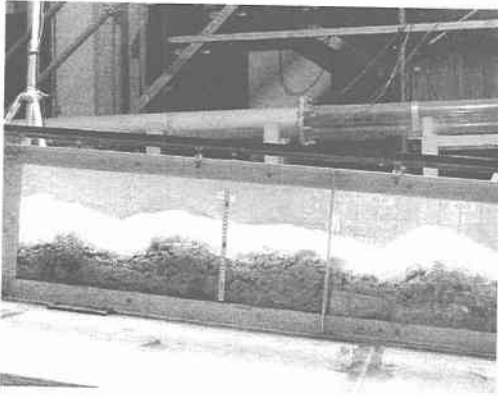


写真-1 礫列河床形成実験における通水状態

40cmの片面アクリル板製の勾配可変式水路であり、水路底面に高さ19cm、幅30cm、厚さ5cmのコンクリート製のステップ(図-1)を横断方向に14列設置した。これらの波長・波高は河床勾配1/10、流量11.5(l/sec)を想定した際の推定波高と波長である。竜澤・林・長谷川³⁾によれば礫列の波長 λ および波高 Δ は河床勾配 I の関数式で以下のように表される。

$$\lambda = 3.36 \sqrt{6.48\sqrt{I} - \frac{1}{3}} I^{-\frac{1}{6}} h_c \quad (2)$$

$$\Delta = 6.431 I^{\frac{5}{6}} h_c \quad (3)$$

$$h_c = \left(\frac{Q^2}{gB^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

ここに Q:流量 B:流路幅

2-2. 実験条件・実験方法

(1) 礫列河床形態の形成

はじめに所定のステップ間隔の波長を有する典型的な礫列河床を形成させるために、よく混合した実験砂礫を19cmの高さに水平坦に敷き詰め、 $I=1/10$ 、 $Q=11.5$ (l/sec)、無給砂の条件で通水・停水を断続的に繰り返した。このときの通水状態を写真-1に示す。停水毎に、河床変動の測定、末端流砂量の重量と粒度分布の測定、河床形状の計測を行い、末端流砂量が0になるまで通水を続けた。このようにして形成された定常状態における礫列河床の全景を写真-2に示す。

表-1 実験条件

礫列河床形成実験

流量(l/s)	最大粒径(cm)	水路幅(cm)
11.5	5	30
勾配	平均粒径(cm)	水路長(m)
0.1	1.67	11

砂礫流出実験 case-1

流量(l/s)	平均粒径(mm)	τ_{*c}
1.5	0.75	0.4125
比重	間隙率	τ_{*0}
1.56	0.422	1.6161

砂礫流出実験 case-2

流量(l/s)	平均粒径(mm)	τ_{*c}
5	1.5	0.925
比重	間隙率	τ_{*0}
1.65	0.4	1.777

(2) 礫列河床上の砂流出実験

河床が定常状態に達したとした後、最上段に貯砂プールを作り平均粒径0.75mm(case-1)および1.5mm(case-2)の砂を見かけの体積で10ℓを敷き詰め、通水・停水を繰り返すことにより、砂がどのように堆積・輸送されるかを調べた。実験条件を表-1にまとめる。



写真-2 河床形状の写真

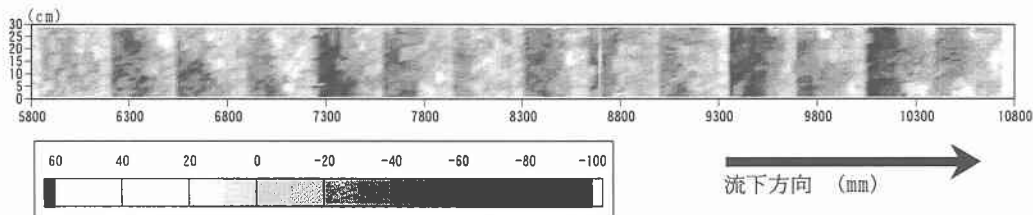


図-2 列礫河床形態実験におけるの定常河床地形

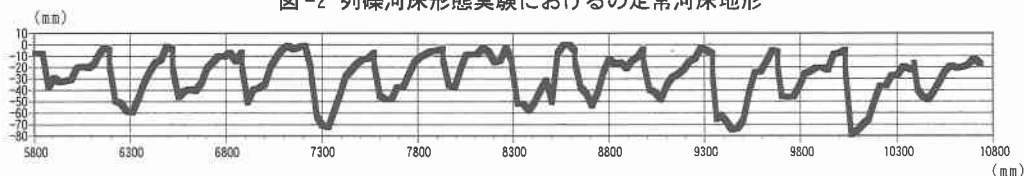


図-3 横断方向平均化による縦断定常河床形状

3. 実験結果

(1) 礫列河床形成実験の結果

1回目の通水直後、表層部の砂礫が活発な移動をはじめた。5cmの最大粒径砂礫にも移動が見られた。2回目以降は、最大粒径砂礫のほとんどが固定されたステップ近傍で停止した。末端流砂の粒径分布からも、通水回数が増すにつれてより細かい粒径分布へと変化していくのが読み取れた。その後、プール部における砂礫の貯留・輸送が繰り返され定常状態に達した。写真-1に見られるように、常射流を繰り返しプール部からステップ部にかけて跳水が発生し激しい波が生じている。通水中に半波長が2.5mに及ぶ主流部の緩やかな蛇行が見られた。

図-2は、写真-2に示される定常時河床形状のコンター図であり、横断方向にほぼ均一な砂礫河床が形成されていることが確認できる。

図-3は横断方向河床形状を示すものであり、ステップ直下流における洗掘と次のステップに向かう緩やかな上昇斜面の繰り返しが現れている。上流から2、5、8、11番目のプールの洗掘深が顕著なことが注目される。

図-4は、砂右岸の河床高の差をとり流下方向にプロットしたものであるが、半波長が2.5mほどの起伏が現れている。水路の蛇行とあわせて考

えると砂礫堆のような中規模河床波が形成されていた可能性がある。

(2) 砂流実験の結果

case-1、case-2ともに通水開始直後から貯留されていた砂が掃流状態で活発に移動し、流送・堆積を繰り返した。ステップ直下の深い洗掘部には堆積せず、斜面部に多く堆積した。case-1では1463秒後に、case-2では155秒後に実験水路末端より流出が認められた。末端より流出する砂礫の体積量を図-5に示す。図より、末端流砂量が γ 分布関数に類似した曲線によって変化していることがわかる。

図-6はcase-1における通水開始から1463秒後、2063秒後、17971秒後のプール別の堆砂量を河床変位より算出したグラフである。2番目、5番目、8番目、11番目の洗掘の深いプールに多く堆積する傾向が確認でき、堆積のピークが下流へ移動していく様子が推測できた。17971秒後には、末端流砂量がほぼ0になり、定常状態に達したもとして通水をとめた。全給砂量10lのうち4890mlが流出し、3040mlがプールに貯留された。残りの計測することが出来なかった砂礫については、比較的粒径の大きな砂礫の間隙に入り込み計測できなかったことが考えられる。写真-3にcase-1の堆砂の状況を

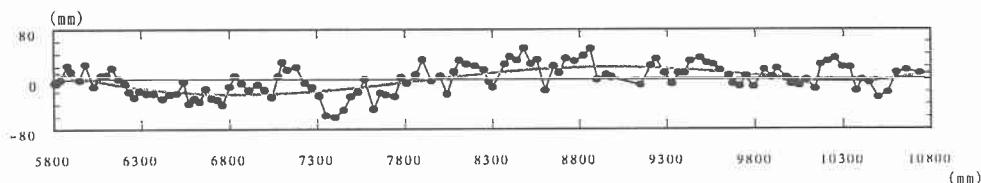


図-4 右側岸河床高-左側岸河床高のグラフ

示す。

図-7は、case-2での140秒後、245秒後のプール別堆砂量のグラフであるが、case-1と同様に洗掘の深いプールにおいての堆砂が顕著にみられるほか、堆積波形の下流側への伝播が認められる。通水開始後6215秒には全給砂量の約9割にあたる8880mlが流出し、通水を止めた。

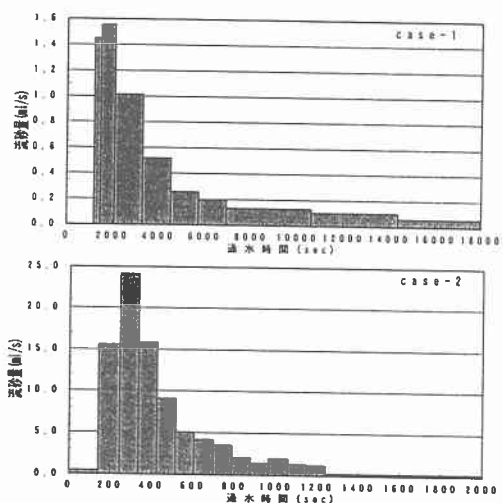


図-5 末端流砂量推移グラフ

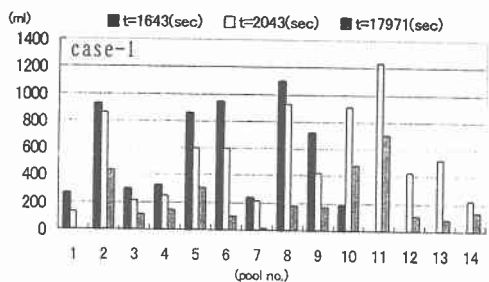


図-6 case-1プール別堆砂量

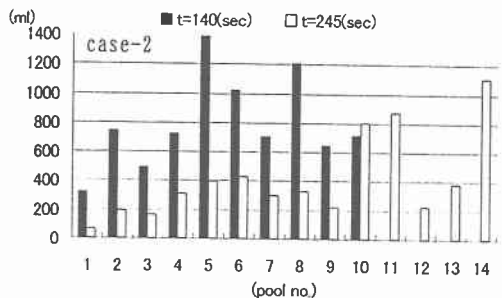


図-7 case-2 プール別堆砂量

(3) 流砂量の算出

末端流砂量と河床変位より、各プールから下流に流出する流砂量を流砂連続式(5)より差分して導かれる式(6)からもとめた。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B(1-\lambda)} \frac{\partial Q_B}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$Q_{B+i} = Q_{Bi} - B \Delta x (1-p) \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (6)$$

ただし、 Q_B :流砂量 p :空隙率 t :時間

i :プール番号

z :垂直上向きにとった河床高

Δx :ステップ間距離

Δz : Δt 間の平均河床面高の差

Q_{B1} は末端流砂量であり、 p は0.422として算出した。次に、各プール毎の平均せん断力を求めるために、神田ら⁹⁾による護床工下流部の洗掘に関する研究の成果を用いることにする。神田らによれば図-7のような最大洗掘深 z_m を有する洗掘穴における底面の平均せん断力は、流れ方向の運動方程式適用することによって次式で表すことができる。

$$\frac{\rho g h_c h_0}{\tau} = \frac{\left\{ -z_m(1-\beta) - \frac{h_c}{2} \left(3 - \beta^2 - \frac{2}{\beta} \right) \right\}}{\alpha S \left(\frac{z_m}{h_0} \right)^r - h_0 \lambda} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{h_0}{h_c}$$

ただし、 h_c :限界水深 h_0 :平坦部の等流水深

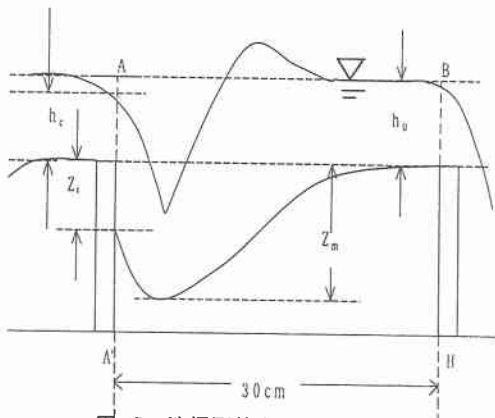


図-7 洗掘形状と記号の定義

S: プール内の水の堆積を流路幅で除した面積

ρ : 水の密度 g : 重力加速度

$$\alpha \text{ は } \frac{\tau_0}{\tau} = \alpha \left(\frac{z_m}{h_0} \right)^\gamma \text{ と仮定した時の係数}$$

この式によれば、平均せん断力は限界水深や等流水深などの水理量と河床形状によって求められることになる。

つぎに、求められた河床せん断力と、芦田・道上⁵⁾の流砂量式(8)を使い、プールより流出する流砂量の計算を行った。

$$q_B = 17\sqrt{sgd^3} \tau_{*c}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*0}} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_{*0}} \right) \quad (8)$$

ただし、 s : 砂の水中比重 d : 平均粒径

τ_{*c} : 無次元限界掃流力

τ_{*0} : 等流状態での無次元掃流力

u_{*c} : 限界摩擦速度

u_{*0} : 等流状態での摩擦速度

無次元限界摩擦速度に岩垣式(8)を用い、その値から無次元限界掃流力を導いた。

計算結果と実験結果を図-7にまとめて示す。図では、4番目、7番目の比較的洗掘の少ないプールで実験値と計算値に大きな差が生じている。これは水深が浅いために河床せん断力を大きく評価しすぎた結果である。そこで、神田らの論文では $\alpha = 4$ 、 $\gamma = 2$ となっているが $\gamma = 1$ と修正して流量を算出した結果も載せた。修正された式は、case-1では実験値に比較的良好に適合しているが、case-2ではあまりいい結果が見られない。図-8は横軸に実験結果、縦軸に計算結果をとった図である。case-1は、 $\gamma = 1$ としたケースでは描点が45度線の近傍によく集まっており実験結果に近い値が計算できている。一方、case-2では、 $\gamma = 1$ 、 $\gamma = 2$ の両方とも描点の散らばりが大きく実験結果とは異なる推定となっており今後の改善が必要である。

4. プールの洗掘・堆積モデル

ここでは神田らの原モデルに立ち戻り、プールにおける洗掘・堆積過程の追跡を試みる。神田らの原モデルは、護床工流下下部における局所洗掘穴を

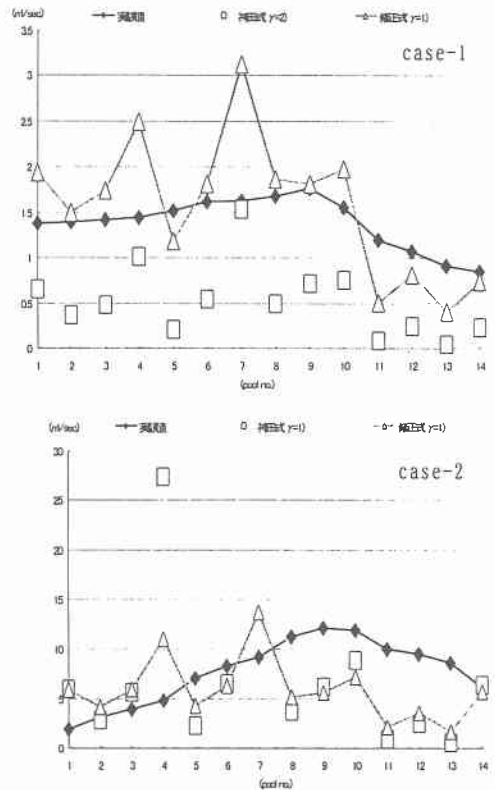


図-7 実験値と計算値の比較(1)

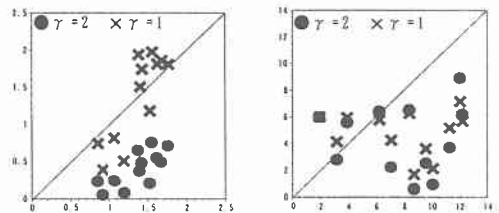


図-8 実験値と計算値の比較(2)

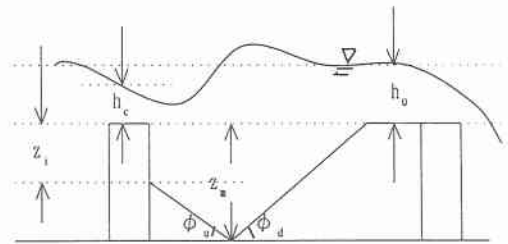


図-9 洗掘部の近似形状と記号の定義

すべて直線で近似し、平均せん断力を最大洗掘深 z_m から算出するものとなっている。すなわち、図-9のように、ステップ直下部の洗掘深を z_1 、上流側斜面勾配を ϕ_u 、下流川斜面勾配を ϕ_d とおくと平均せん断力は次式(9)で表される。

$$\bar{\tau} = \rho g h_0 h_c \frac{-z_m(1-\beta) + \frac{h_c}{2} \left(3 - \frac{2}{\beta} - \beta^2 \right)}{\alpha \frac{\Phi_1 z_m^4}{h_0^2} + \alpha \frac{\Phi_2 z_m^3}{h_0} - \Phi_2 h_0 z_m} \quad (9)$$

$$\Phi_1 = \frac{(1-\varepsilon)^2 \cot \phi_u}{2} + \varepsilon(1-\varepsilon) \cot \phi_d + \frac{\cot \phi_d}{2}$$

$$\Phi_2 = (1-\varepsilon) \cot \phi_u + \cot \phi_d$$

$$\beta = \frac{h_0}{h_c}$$

流砂量式に芦田・道上式(7)、限界掃流力に岩垣式をもちいて流砂連続式(5)に代入するとともに、それらを差分化し、各プールでの最大洗掘深を求める。

初期条件を第1回目の測定プール深にとり、境界条件を上流端貯砂箱からの流出流砂量にとって、第2、3回目(case-1)、および第2回目(case-2)のプール深を求めた結果をそれぞれ図-10に示す。各プールの流出流砂量の精度が十分でない割には洗掘・堆積の傾向が比較的良好に現れているものと言える。計算値と実験値がずれている点は、堆積が最大洗掘河床点ではなくプールの下流側上昇斜面に起こっているものと考えられる。

5. 考察と展望

本実験の目的は、礫列河床を有する水路が砂の貯留・流送機構にどのような影響を与えるかを明らかにし、流砂量モデルを確立することであった。実験によれば各プールにおける流出流砂量はプール水深と密接に関係しており、その推定精度を上げることが重要である。一方、そのモデル化にあたってはプール河床せん断力の推定が肝要であり、流入点における水位の適切な評価が精度を決定しているようである。今後、この点に関するモデル化を進めたいと考えており、さらに様々なケースの実験を行う予定である。また、自然の礫列に見られるような波長が確率的に変化する場における砂流出と河床の洗掘・堆積に対する解析を行いたいと考えている。

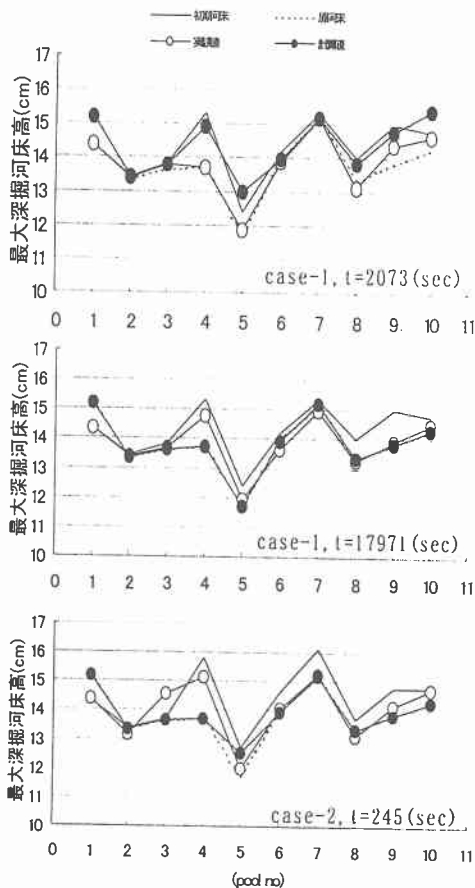


図-10 最大洗掘河床高の実験とモデルの比較

参考文献

- 1) 沢田豊明・芦田和男・高橋保: 山地河道における掃流砂の流掃過程, 第25回水理講演会論文集, pp. 507-514, 1981年
- 2) 長谷川和義: 溪流の淵・瀬の水理とその応用, 1997年(第33回)水工学に関する夏季講習会テキスト, 1997年
- 3) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義: 溪流河川における河床砂礫の混合特性と階段状河床形の形状特性, 1998水工学論文集, 第42巻, pp. 1075-1080
- 4) 神田佳一・森本龍助: 護床工下流部における局所洗掘穴内のせん断力と洗掘の軽減に関する研究, 1999年2月水工学論文集, 第43巻, pp. 617-622