

人工および自然礫列上の土砂移動に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF SEDIMENT TRANSPORT ON ARTIFICIAL AND SPONTANEOUS RIB BEDS

中村健作¹・長谷川和義²・田中航太³・竜澤宏昌⁴

Kensaku NAKMURA, Kazuyoshi HASEGAWA, Kota TANAKA and Hiromasa TATSUZAWA

1 学生会員 北海道大学大学院工学研究科 博士課程 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

2 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 助手 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

3 学生会員 北海道大学大学院工学研究科 修士課程 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

4 正会員 水資源開発公団試験研究所水工研究室主任研究員 (〒338 埼玉県浦和市大字神田936)

Experiments of sediment transport were performed to investigate the characteristics of transportation on rib beds by using artificial ribs and spontaneously formed ribs. The transported sand from the head of channel was heaped in a pool to form a ridge by the flow with submerged jet in the case of artificial rib beds. The ridge in the pool was reduced in volume by the flow when the sediment supply from the upper pool reduced or ceased. Thus accumulation wave of sand slowly traveled to downstream with damping the height. On the other hand, the low flow on the spontaneously formed ribs ran through the crevices of a step to transport the sediment in a bed load state. So little stagnation of sediment transport system between them depended on the depth of the pools.

Key Words : movable bed experiment, sediment transport, rib bed, artificial rib

1. 緒言

山地河川には礫列・礫段などの階段状の河床が発達しており、さまざまな視点から研究がなされている。著者らの一部¹⁾²⁾³⁾も、これらの形態の溪流再生魚道への応用を企図して研究を続けてきた。今日、魚道において最も問題になっていることは流入土砂による埋没である。特に、山間地において砂防ダムや貯砂ダムに付帯して造られた魚道では、土砂堆積によってその維持が難しくなっているようである。本研究は、自然溪流の礫列や礫段の形状特性をあたえた溪流再生魚道に土砂流入が生じた際に、その機能がどのような影響を受けるかを明らかにしようとするものである。すなわち、自然流下状態のもとでプール内の土砂の排出がなされ、機能の回復がはかれるか否かを実験的に調べようとするものである。こうした研究は、山地河川における土砂輸送機構の解明に合い通じるものであり、そのことも念頭においている。後者に関する研究を最も先進的に進めたのは、澤田・芦田・高橋⁴⁾、芦田・江頭・安東⁵⁾、澤田⁶⁾などであり、現地観測・実験および理論解析によってその枠組みを明らかにするとともに、プールからの流出土砂量の推定式を提示している。こ

れらの研究は、最近、藤田・澤田⁷⁾らによってヒル谷試験ダムにおける土砂流出実験に応用され、環境影響評価法に用いられている。Whittaker⁸⁾も人工的な階段状河床を有する水路による流砂実験をおこなっており、流砂輸送波の伝播を示している。しかし、澤田の流出土砂推定式は適用限界を超えると不一致が生ずるなど、いまだ問題が残されている。本論は、均等波長の人工的な礫列を設けて砂移動を調べる実験と自然形成された礫列上の砂移動を調べる実験をおこない両者の比較を試みるとともに、神田⁹⁾による護床工下流における洗掘孔河床せん断力推定式の適用をはかった結果について述べている。

2. 人工礫列実験の概要と結果

(1) 実験装置と人工礫列河床の形成

魚道への応用を念頭においた人工礫列を以下の要領で作製し、長さ11m、幅30cm、深さ40cmの片面アクリルガラス製実験水路に設置して実験に供した。すなわち、水路底面に写真-1に示すような頂部に最大粒径礫を6個程度並べたステップ模型(高さ19cm、幅30cm、厚さ5cm)を35cm間隔で14列配置する。これらのス



写真-1 ステップ模型

表-1 実験条件

	流量 (l/s)	最大粒径 (cm)	84 % 粒径 (cm)	平均粒径 (cm)
礫列形成実験	11.5	5.0	3.52	1.67

	流量 (l/s)	平均粒径 (mm)	τ^*c	τ^*0	比重	間隙率
砂礫流出実験 case-1	1.5	0.75	0.034	0.161	2.56	0.422
砂礫流出実験 case-2	5	1.5	0.038	0.161	2.65	0.4

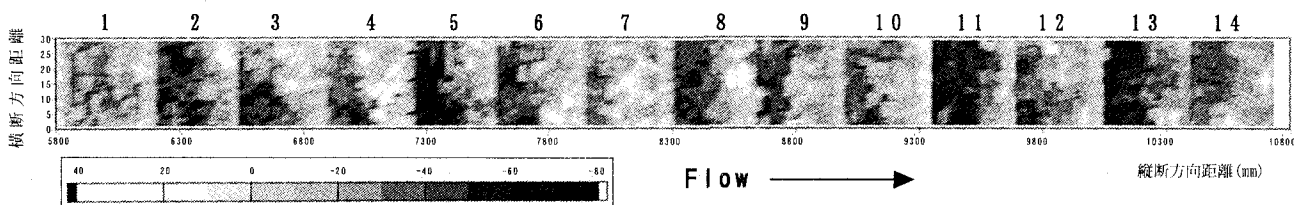


図-1 列礫河床形態実験におけるの定常河床地形

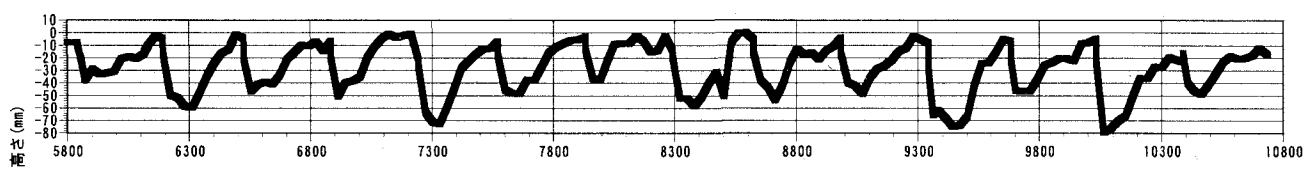


図-2 横断方向平均化による縦断定常河床形状

テップ間を, タルボット粒度分布 $P=(d/d_{\max})^n$ (P =通過ふるい重量比率, d =粒径, $d_{\max}$ =最大粒径) のべき数 $n=1/2$, $d_{\max}=5.0\text{cm}$ の A 砂礫によって平坦に埋め, 通水によってプール部を形成する. ステップ間隔(波長) λ およびステップ高 Δ は, 著者ら³⁾ が導いた次式によってある. ただし, 水路勾配 $I=1/10$ とし, 設定流量は最大粒径礫が限界掃流力状態になる $Q=11.5\text{ l/s}$ をあたえることにした.

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

$$\Delta = 6.43 I^{\frac{5}{6}} h_c \quad (2)$$

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

ここに, B は水路幅, h_c は流量から計算される限界水深である.

通水は無給砂状態で断続的に繰返しおこない, 河床形状が安定化するまで続けた. 定常状態に達したときの流況は, ステップ部を越える射流がプール部で跳水を経て常流に移移し激しい波をひき起こすというものであった. 通水中, 半波長が 2.5m におよぶゆるやかな主流部の蛇行が認められた. このようにして形成された河床状態を図-1 の平面コンター図, および図-2 の横断平均河床高縦断図に示す. ただし, 図-2 は初期平坦面からの変位によって示している. 主流部の蛇行に

対応する河床の交互深掘れが図-1 に認められる. 砂礫堆の発生によるものであろう. この結果, 図-2 に見られるように上流から 2, 5, 8, 11 番目のプールの洗掘深が大きくなっている.

(2) 砂流出実験の結果

礫列の形成流量は一般に大きく, 藤田・道上¹⁰⁾ による千代川における推定流量は 5 年確率流量とされており, 破壊流量はさらに大きなものになる. ここでは, 形成流量をかなり下回る年最大流量程度の流出によって運ばれる小粒径砂礫が, 礫列プールにどのように堆積し流出するかを調べる. この目的のためには, 上流からの給砂は時間一定とせず, むしろ変化させたほうが良い.

上記河床形成実験の後, 水路上流部に長さ 50cm , 幅 30cm の貯砂プールを作製し, 平均粒径 0.75mm (Case-1) および 1.5mm (Case-2) のほぼ均一な砂を見かけ体積 10% 敷き詰めて通水し, それらの輸送状態を調べた. これらの実験における条件を表-1 に示す.

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, ステップからの落下水脈がプール河床に付着する場所の下流側に堆砂リッジを形成する形で順次プールを埋めていった. これらのリッジが次のステップに達しプールが満砂状態になるまでは砂の流出は本格化しない. 貯砂プールからの流砂の減少とともに, 礫列プールにおける落下水脈下流の堆砂がやせていくという状態が順次下流側に伝わる. しかし, 上流側プールがまったく空になると

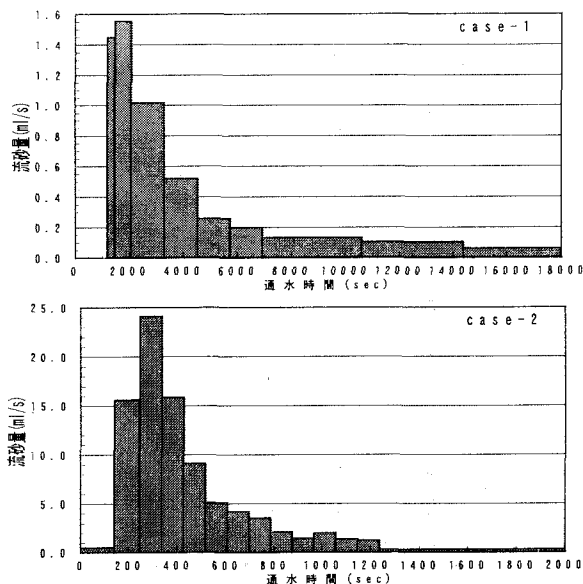


図-3 末端流砂量推移グラフ

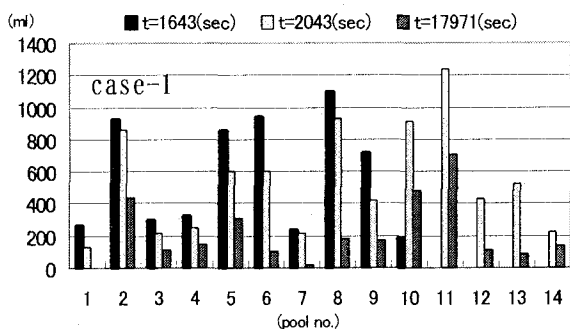


図-4 case-1 プール別堆砂量

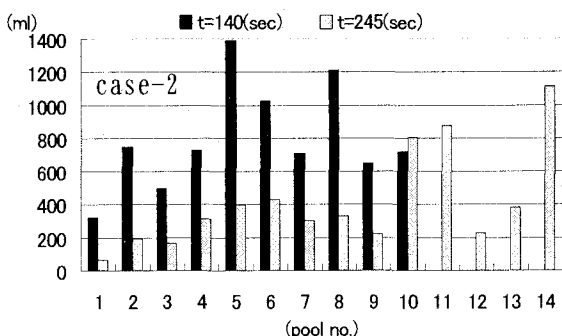


図-5 case-2 プール別堆砂量

いうことはなく、こうした現象は水路全体に長く続いた。水路末端において流砂量を計測しており、それらの時間変化を示したものが図-3である。貯砂プールからの流砂量が指数的に時間減少したことをうけて、末端での流砂量がガンマ分布関数状の時間変化を示している。

Case-1では、通水1643秒後、2043秒後、17971秒後に停水して河床形状を測定しており、これらの結果から各プールにおける測定時間内堆砂量の空間分布を求めると図-4になる。堆砂の波が時間を追って下流に伝播する様子がうかがえる。上流から2、5、8、11番目プールの堆砂量が多いのはこれらで洗掘深が大きいためである。同じくCase-2の河床形状測定は、通水

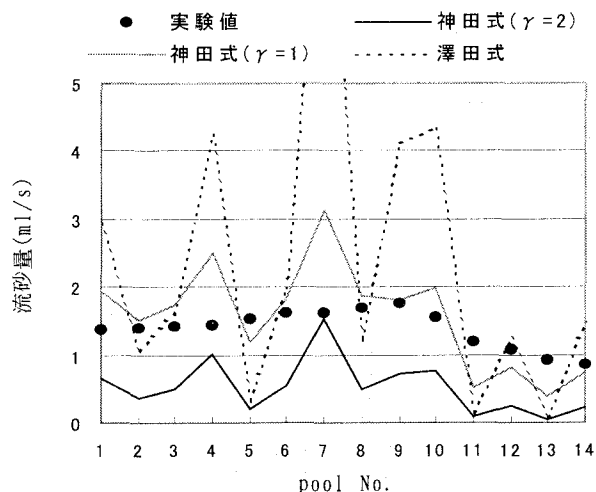


図-6 流砂量の実験値と計算値との比較 case-1

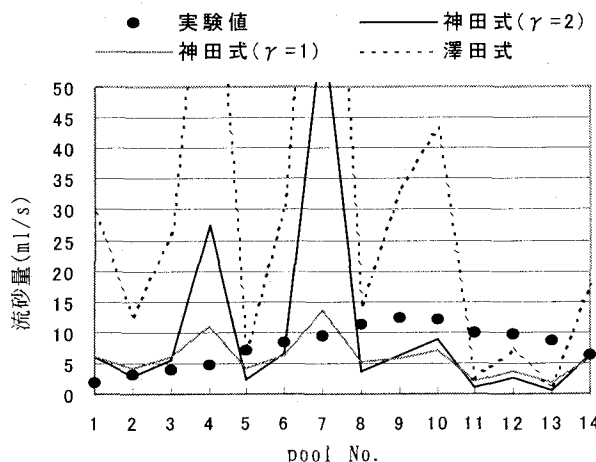


図-7 流砂量の実験値と計算値との比較 case-2

140秒、245秒後におこなわれ時間内の各プール堆砂量が図-5のように得られる。これらの値と図-3の末端流砂量を用いて、流砂連続式から各プールへの流入流砂量を、各プールからの流出流砂量+各プールにおける測定時間内堆砂量/測定時間間隔として順に上流に向かって求めると図-6、7中の●印になる。ただし、Case-1では、1643秒と17971秒における河床形状データを使用している。両Caseともプールの深さに関係なく、滑らかな流砂量分布波形の現れていることが注目される。流砂量分布波形の頂点から上流側は浸食状態にあり、下流側は堆積局面にあるが、Case-1で堆積側、Case-2で浸食側の勾配絶対値が大きくなっているほかは両方の状態で目立った違いが見られない。これは、測定時間間隔が長くプールの埋め戻しが水路全面におよんで、各プールの深さに違いがなくなったためと考えられる。

3. 自然形成礫列実験の概要と結果

(1) 礫列形成実験の概要

人工礫列実験と同一の水路を用い、既述のA砂礫を

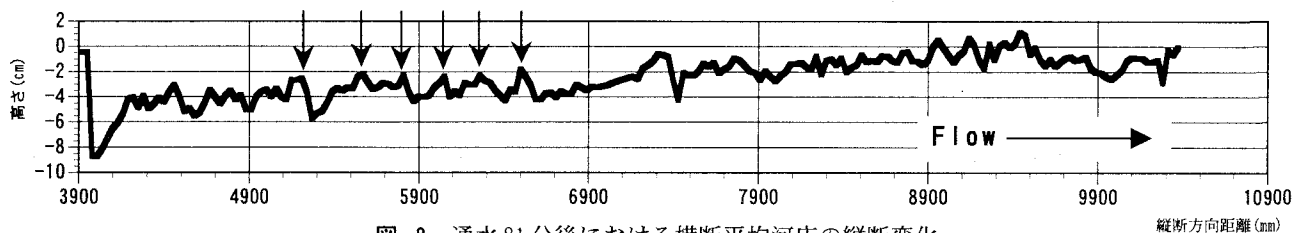


図-8 通水81分後における横断平均河床の縦断変化

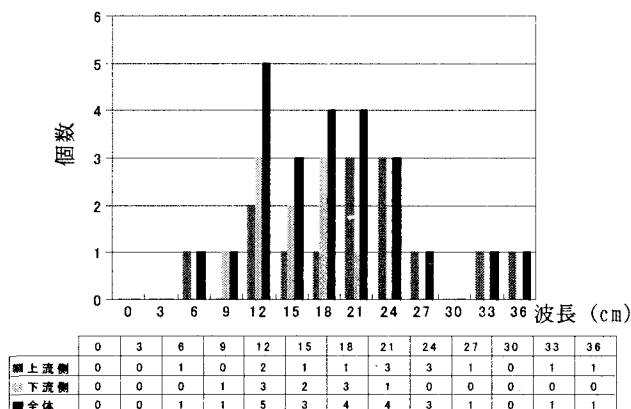


図-9 波長の頻度分布

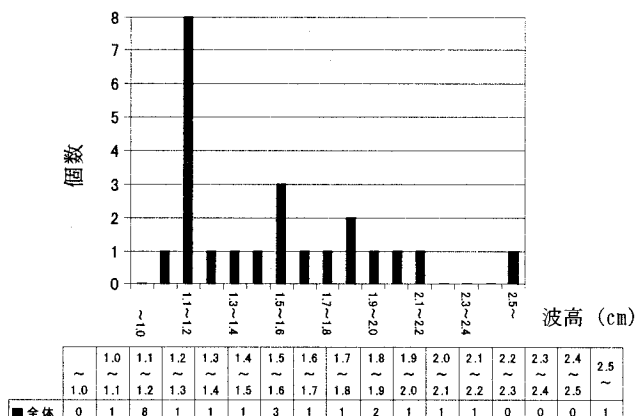


図-10 波高の頻度分布

平坦に敷き詰め、勾配を1/10として礫列の発生をなかった。当初人工礫列実験の形成流量11.5l/sと同じ流量をあたえた実験をおこなったが、砂礫の流動がとまらず礫列形成にまでいたらなかったため、84%粒径が限界掃流力状態になる流量6.7l/sをあたえて実験をおこなった。この流量では反砂堆流れと大礫の横断方向並びが認められ礫列が形成されたが、条件が異なるので人工礫列実験との比較は難しい。図-8は通水81分後における横断平均河床の縦断変化形状である。水路勾配を差し引いて描いてあるが、上流側浸食・下流側堆積の結果、全体の勾配がゆるくなっている。同図にみられるように、ステップが礫1層程度で構成されているためプール深が最大でも4cmほどとかなり浅いものになっている。

図-9, 10はそれぞれ波長、波高の頻度分布をしめすものである。両者ともガンマ分布的な広がりをもっていることがわかる。また、図-11はよく発達した礫列(図-8中の矢印)を選んで、波長と波高の関係を見たものである。同図中には式(1)、(2)から h を消去して示した波長-波高の関係理論線も描かれている。ただし、勾配1には河床面の平均勾配0.093をあたえた。実験流量に対応する理論値は理論線上の1点(図中の○印)であり、実測値はこの値の周りに集まっている。しかし、波長の散らばりが大きく、波高・波長間に弱い正の相関があるようにも見える。

(2) 砂流出実験の結果

人工礫列実験とまったく同じ二つの条件によって砂の流出輸送を調べた。ただし、ここでは紙数の都合か

ら計測回数の多いCase-1に対応する実験(流量1.5l/s, 砂粒径0.75mm)のみを扱うことにし、Case-1'と呼ぶことにする。

自然形成礫列上の低水流はステップ礫頂部を越えることがほとんどなく、河床低部の水みちをたどって3次元的な流れかたを示した。このため、大部分の砂は礫間を抜けて移動し、落下水脈も明瞭でないため通常の掃流状態に近い輸送形態になった。ステップ部が低くプール部が浅いため、埋め戻しも速やかにおこった。図-12は水路末端で計測した流砂量の時間変化である。図-3との比較から明らかなように、Case-1'の最大流砂量はCase-1のおよそ10倍になっている。

Case-1'は、通水後120秒, 180秒, 330秒, 480秒, 630秒, および4980秒の6回にわたって停水し、砂輸送によって変化した河床形状を測定している。図-13は、これらの値から求めた砂堆積量の空間分布である。堆砂の波が時間を追って減衰しながら下流に伝播していく様子がうかがえる。しかし、人工礫列実験と同様に、時間がじゅうぶんに経過した後も上流側プールにおいて砂の堆積がゼロになることはなく、水路全体に薄く残留している。図-14は、河床形状データと末端流砂量を用い流砂連続式から計算した流砂量の空間分布であり、時間ごとの変化を線種をかえて描いている。人工礫列実験と同様、礫列の存在にもかかわらず流砂量の分布は滑らかであり、また波形がより鮮明に現れている。前者は、プールの埋め戻しが速やかにおこなわれたためであり、後者は測定時間間隔が短いことによるものと考えられる。Case-1'の流砂量の波からその伝播速度を求めると、通水後150秒と255秒の

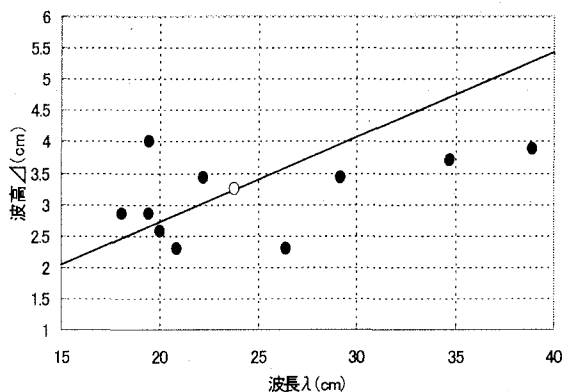


図-11 波長と波高の関係

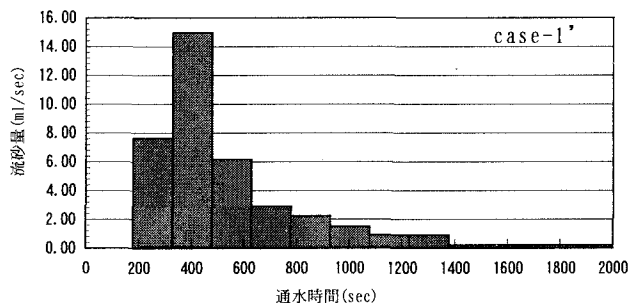


図-12 末端流砂量推移グラフ (case-1')

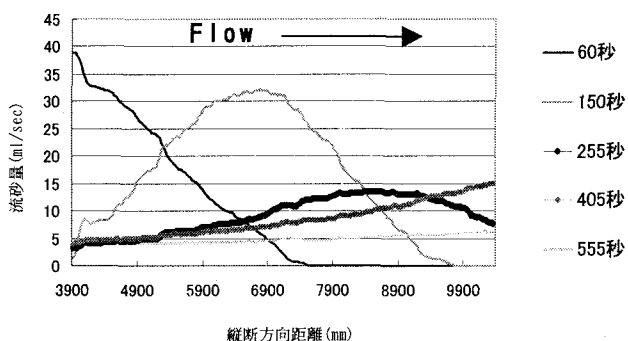


図-14 流砂量の空間分布

間でみて1.6cm/sとなりかなり大きい。この値は堆砂の波の伝播速度でもあり、 $-\Delta q_b / \{(1-p) \Delta z\}$ (ただし、 Δq_b は流砂の向きで測った流砂量の空間的变化、 p は砂の空隙率、 Δz は河床面高さの時間的变化)に一致し、プールが浅いほどまた流砂量が多いほど伝播速度が大きいということになる。

4. 礫列上の流砂量に関する検討

(1) 神田らによる洗掘孔底面せん断力

今次実験における礫列上低水流は、人工礫列では弱い落下水脈をともなう浅水流れ、自然形成礫列では礫間を抜ける水みち流れの形をとった。これらはいずれも澤田⁶⁾による噴流モデルとは異なっている。実際、澤田式を用いた流砂量の計算結果は、図-6, 7に示すようにプール深の影響を強く受けて変動し、平均的に大き

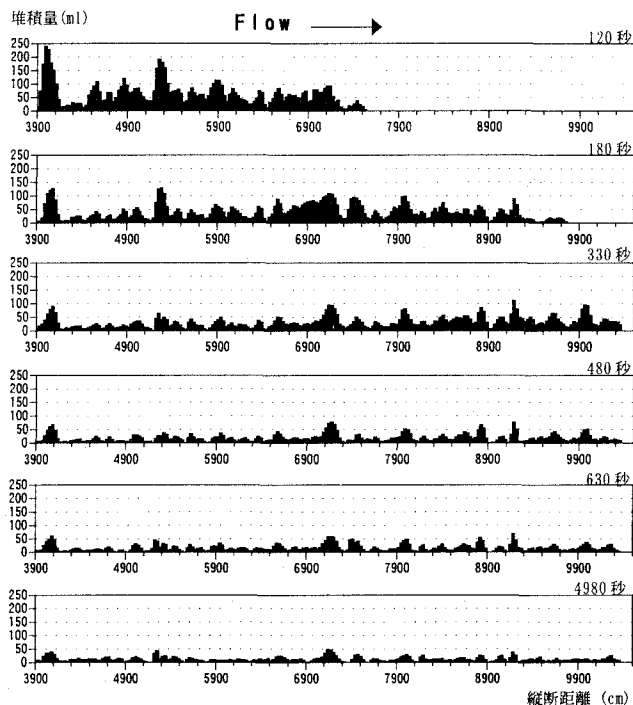


図-13 砂堆積量の空間分布

目の値を示した。

神田ら⁹⁾は、護床工下流部の洗掘孔形状を推定するのに際し、運動量方程式を用いた底面せん断力式を用いている。このモデルは局所的に集中した流れによるせん断力ではなく、洗掘孔全体における運動量の出入りによるせん断力を評価するようになっており、今回の実験状態に近いものと考えられる。

$$\bar{\tau} = \frac{\rho g h_c h_0 \left\{ -z_m (1 - \beta) - \frac{h_c}{2} \left(3 - \beta^2 - \frac{2}{\beta} \right) \right\}}{\alpha S \left(\frac{z_m}{h_0} \right)^\gamma - h_0 \lambda} \quad (4)$$

ただし、 $\beta = h_0 / h_c$ 、 $\bar{\tau}$ は底面せん断力、 z_m はプールの最深深さ、 h_0 はプール下流における砂堆積面上の水深、 S はプール体積を流路幅で除した面積、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。 α および γ は

$$\frac{\tau_0}{\bar{\tau}} = \alpha \left(\frac{z_m}{h_0} \right)^\gamma \quad (5)$$

と仮定したときの係数とべき数であり、 τ_0 は h_0 の等流流れによるせん断力である。

(2) 流砂量の推定結果

式(4)、(5)によるせん断力を有効せん断力とみなし、芦田・道上式によって流砂量を計算する。ただし、限界摩擦速度には岩垣式を用い、 S などの形状値は、実測流砂量を計算する際に使用した計測河床面を用いて求めることにする。また、実測流砂量と計算流砂量の対応時間を合わせるために、実測流砂量の計測時間をは

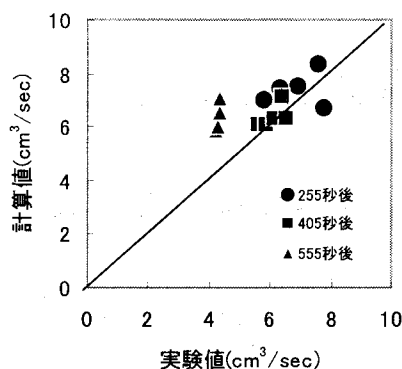


図-15 流砂量の時間変化

さむ二つの計算流砂量を時間配分平均して計算流砂量とした。

人工礫列に関するCase-1とCase-2の結果をそれぞれ図-6および図-7に示す。両図において、実線は神田があたえている $\alpha=4$ 、 $\gamma=2$ としたときの結果であり、実測値に比してCase-1では小さめ、Case-2では大きめの値が現れている。神田式(4)ではせん断力 τ がプール相対深(z_m/h_0)の2乗に反比例するかたちになっているために、プール形状の影響が強く出すぎているものと考えられる。グレーの線は $\alpha=4$ 、 $\gamma=1$ とした場合の計算結果であり、こちらは実測値に近いものになっている。ただし、この場合にもプールごとに違いが出ており、浅いプールで大きめ、深いプールで小さめの値をとっている。この性質は、短い時間帯で見た流砂量であれば妥当なものと考えられるが、既述のように実測値を求めた際の時間幅が大きく比較を困難にしている。

図-15は、自然形成礫列のCase-1'について、 $\alpha=4$ 、 $\gamma=1$ としたときの比較結果を示すものである。ただし、水路流下距離5.62mから6.83mまでの間のよく発達した5箇所の礫列(図-8中の矢印)を選んで、通水255秒、405秒、555秒についてみている。実測値と計算値の対応はおおむね良好であるが、555秒の時間帯で実測値が小さく現れている。これは、礫列形状があまり変わらず掃流力が保たれているにもかかわらず、上流からの給砂が不足したためと考えられる。

5. 結 言

魚道を想定した人工礫列および自然形成させた礫列の上で、最上流端の貯砂プールから低水状態によって砂を流送させる実験を試み以下の結果を得た。

1) 均一波長・大プール深を有する人工礫列上の低水流は弱い落下水脈をとまなう浅水流状態にあり、上流端からの輸送砂が落下水脈下流側にリッジを形成して堆積する。これが次のステップに達した後に本格的な砂

の流出が生じ、順次下流側のプールを埋めていく。

2) 上流端からの輸送砂が減るとプール内のリッジがやせていき、上流側から順に元の状態に復していくが、礫間に残留する砂があって長時間後にも堆砂はゼロにならない。

3) これらの過程は空間的に減衰進行波の形で伝播する。大プール深を有する人工礫列では伝播速度が遅く、水路末端の最大流砂量も小さくて流出が長時間におよぶ。

4) ガンマ分布の異波長・小プール深を有する自然形成礫列では、低水流は礫間を抜ける水みち流れとなり、輸送砂は掃流状態で速やかに運ばれる。このため、堆砂の波および流砂量の波などの伝播速度が非常に大きく、水路末端の最大流砂量も人工礫列実験に比べて10倍も大きい。

5) 神田らによる洗掘孔の底面せん断力を用い、簡単な修正をおこなうことで各ステップにおける流出流砂量のある程度良好に推定することができた。この式ではプール深が大きい場合に小さめの、小さい場合に大きめの流砂量が算定され実際に反映している。

参考文献

- 1) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義：渓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，水工学論文集，第42巻，1075-1080，1998。
- 2) 竜澤宏昌・林日出喜・森高信・長谷川和義・藤田豊彦：広水条件下における小規模河床波(礫列・礫段)の形成と形状特性，水工学論文集，第43巻，731-736，1999。
- 3) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義：渓流の小規模河床形態に関する研究—魚類等の生息環境保全対策への応用を目指して—，土木学会論文集，No.656/II-52，83-101，2000。
- 4) 沢田豊明・芦田和男・高橋保：山地河道における掃流砂の流送過程，第25回水理講演会論文集，pp.507-514，1981。
- 5) 芦田和男・江頭進治・安東尚美：階段状河床形の形成機構と形状特性に関する研究，第28回水理講演会論文集，pp.743-749，1984。
- 6) 沢田豊明：山地流域の土砂流出に関する研究，京都大学学位論文，1985。
- 7) 藤田正治・澤田豊明・水山高久・木下篤彦：砂防ダムからの排出土砂の移動とそれが渓流環境に与える影響，水工学論文集，第44巻，pp.1215-1220，2000。
- 8) Whittaker, J.G.: Sediment Transport in Step-pool Streams, Sediment Transport in Gravel-bed Rivers, Ed. By C.R. Thorne, J.C. Bathurst and R.D. Hey, John Wiley & Sons Ltd, 1987。
- 9) 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応力と洗掘の軽減に関する研究，水工学論文集，第43巻，pp.617-622，1999。
- 10) 藤田正治・道上正規：千代川における淵の構造と魚類の生息環境，水工学論文集，第40巻，pp.181-186，1996。

(2000. 10. 2 受付)