

最大径礫移動限界を超える流量による 大波高礫列・礫段の形成

EXPERIMENTS ON DEFORMATION AND REFORMATION OF A STEP-POOL
SYSTEM FORMED BY THE PEBBLES WITH TALBOT GRAIN SIZE DISTRIBUTION

田中航太¹・竜澤宏昌²・長谷川和義³

Kota TANAKA, Hiromasa TATSUZAWA, Kazuyoshi HASEGAWA

¹ 学生員 北海道大学大学院工学研究科 博士前期過程 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

² 正会員 水資源開発公団試験研究所 主任研究員 (〒338-0812 浦和市大字神田936)

³ 正会員 北海道大学大学院工学研究科 工学博士 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

Movable bed experiments were conducted by changing the flow ratio and bed materials to find the deformation conditions of a step-pool system. The used bed materials are heterogeneous following the Talbot grain size distribution. New findings were obtained from the experiments about; 1) The index n of Talbot grain size distribution of bed surface materials increase from 0.5 to 1.4 by changing flow ratio until the bed shear stress becomes over the critical Shields stress for the maximum size pebble, 2) Under the flow condition over the critical Shields stress for the maximum size pebble, the initial step-pool systems are flushed out. However, the heaps of large pebbles arise soon after on the bed to form new strong step-pools.

*Key Words: mountain streams, step-pool, Talbot grain size distribution, movable bed
experiment, deformation and reformation of a step-pool*

1. はじめに

溪流にみられる河床形態の基本的な性質を明らかにものとし、それらを溪流環境の保全を目的とした河川工法に応用することを目指して、特に小規模の単位形態である礫列および礫段に着目した実験的な検討を進めている。そして、この一連の検討の中で、実溪流の河床表層の粒度分布データが $P = (d/d_{\max})^n$, $n = 1/2 \sim 3/4$ で表される Talbot 型の曲線によく従っていること、また、この Talbot 型の粒度分布の実験砂礫床に対して砂礫中の最大径程度の礫を移動限界とする流量を与えることで礫列・礫段の形態が発達し得ることを指摘した^{1), 2), 3)}。一方、これら形態の安定性については、芦田ら⁴⁾による破壊条件の提示や藤田・道上⁵⁾、藤田ら⁶⁾の現地観測による検証がなされている。しかし、河床砂礫の粒度分布との因果関係など依然として不明な点も多い。そこで、上述の Talbot 型の粒度分布を与えた実験砂礫床に礫列・礫段の形成から破壊に至る一連の過

程を再現して詳しい観察を行った。その結果、実験砂礫中の最大径礫の移動限界を超える流量を与えた砂礫床上に、これまでの実験で確認されたものに比べてより大波高の堅固なステップからなる礫列・礫段が発達し得るという興味深い現象を見出すに至った。本論では、こうした礫列・礫段の形成および破壊過程の観察結果と併せて、砂礫床表層の粒度分布特性を加味して考察した礫列・礫段の形成・破壊条件に関する結果を報告する。

2. 実験方法

実験には、長さ 11m、幅 30cm、深さ 40cm の片面アクリル板製の直線水路が設置された勾配可変装置を用いた。水路上流端には循環水の貯水槽と整流板、また、水路の末端には高さ 19cm の固定堰をそれぞれ設けている。流量の計測には給水管に取りつけた電磁流量計を使用した。実験は、この水路によく混合した実験砂礫

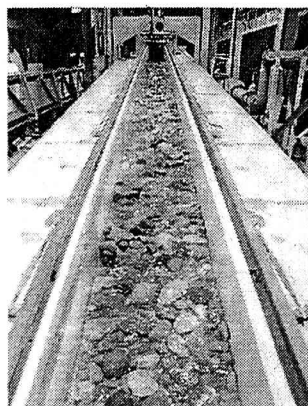


写真-1 5(l/s)通水後

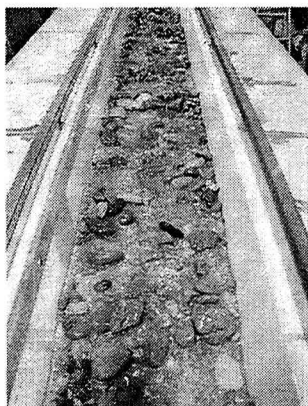


写真-2 6(l/s)通水後

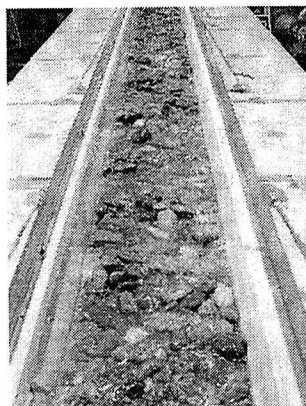


写真-3 7(l/s)通水後

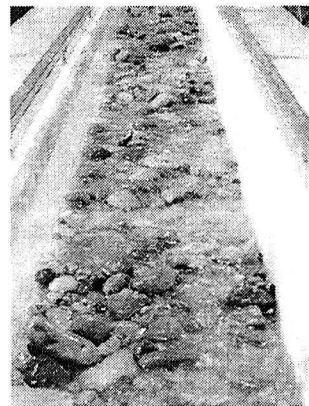
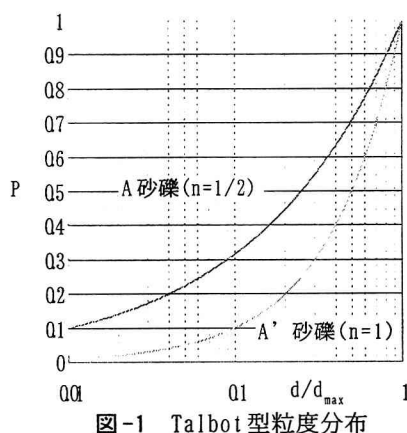


写真-4 8(l/s)通水後

表-1 実験条件表

通水区分	n	Q (l/s)	t (min.)	Q-t	h (cm)	τ_* d_{84}	τ_* d_{max}
A-1	1/2	5.0	30.0		3.34	0.057	0.040
A-2	1/2	6.0	30.0		3.60	0.062	0.044
A-3	1/2	7.0	30.0		3.85	0.066	0.047
A-4	1/2	8.0	30.0		4.08	0.070	0.049
A-5	1/2	9.0	15.0		4.30	0.074	0.052
A-6	1/2	10.0	10.0		4.51	0.078	0.055
A-7	1/2	11.0	5.0		4.71	0.081	0.057
A-8	1/2	12.0	5.0		4.90	0.084	0.059
A-9	1/2	13.0	5.0		5.09	0.088	0.062
A'-1	1	9.0	10				
A'-2	1	12.0	10				
A'-3	1	15.0	10				
A'-4	1	18.0	5				
A'-5	1	24.0	2				



を水路底面より25cm厚さに水平に敷き詰めてつくった初期河床を勾配1/10に設定し、水締めした後に無給砂の条件で断続的に通水するという方法で行い、流量の異なる通水を重ねることによって現れる河床の変化について観察した。実験砂礫には、図-1に示すとおり、次式のTalbot型の粒度分布を与えた2種類の混合砂礫を用いた^{1),2)}。

$$P = \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^n \quad (1)$$

ここに、 d_{max} は砂礫中の最大径(=5cm)、 P は d の大きさの篩い目を通過する砂礫材の全体に占める重量比率である。以上の流量および通水パターン・実験条件等を表-1に整理する。表中の水深は、山地河川の抵抗則として適合性の良好なHey式より計算している。

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log \left(\frac{ah}{3.5d_{84}} \right) \quad (2)$$

ここに、 u は流速、 u_* は摩擦速度、 $a=11.16$ 、 h は水深、 d_{84} は混合砂礫の84%粒径である。

また、通水回毎に、通水終了後に河床表層の一部

を採取して篩い分け試験を行い、その試料を再び採取部分に戻す作業を繰り返すという方法により、各通水回の前後における河床表層部分の粒度分布変化を把握した。

3. 実験結果

3.1 $n=1/2$ のTalbot型粒度分布河床

(1) 河床の変動状況

通水中または通水後の砂礫床面の状況を写真-1～8に、縦断形状等を写真-9、10に示す。

流量5(l/s)では、通水開始直後に最大径の礫を含む砂礫の移動が観察されたが、通水開始後約1分で砂礫の移動はほとんど見られなくなり、河床はほぼ定常化した。通水後の河床は粗粒化したものの、その高さについては通水前とほとんど変わらずほぼ平坦のままであった。

流量6(l/s)、7(l/s)では、いずれも通水直後から砂礫の移動・分級および反砂堆の形成が観察された。通水開始から約2分ほどで最大径礫の移動がなくなり、約5分後には河床はほぼ定常状態に至った。6(l/s)通水



写真-5 9 (l/s) 通水後

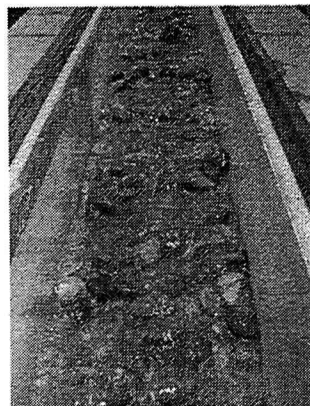


写真-6 10 (l/s) 通水後

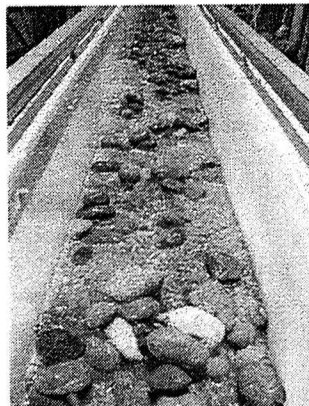


写真-7 11 (l/s) 通水後



写真-8 12 (l/s) 通水後

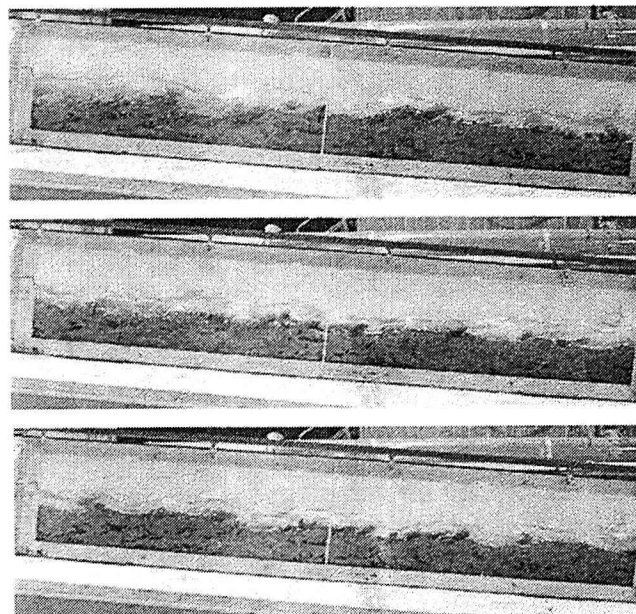


写真-9 9 (l/s) 通水中における河床変動
上から形成時、破壊時、再形成時

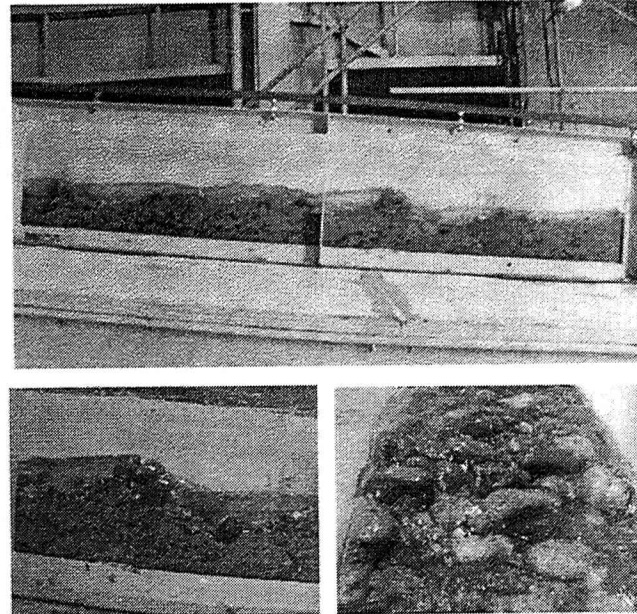


写真-10 10 (l/s) 通水後の河床写真

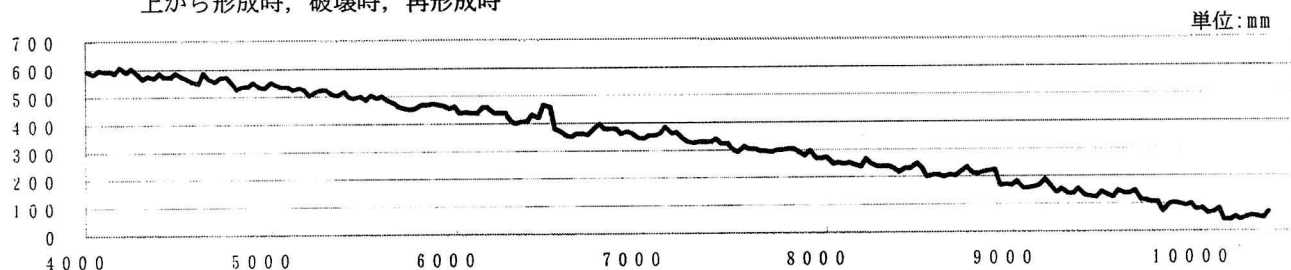


図-2 10 (l/s) 通水後の縦断河床図

後の河床には、写真-2, 3のとおり、礫列・礫段の形成と不明瞭ながらも交互砂礫堆の発達が認められた。

流量8.0 (l/s)では、通水開始からしばらくは河床に変化がみられなかったが、通水時間15分を経過したところで礫列・礫段の破壊が始まり、最大径礫を含む砂礫の移動が水路全域で起こった。その後、5～10分の間に、小規模河床形態が再形成され、砂礫床が定常状態に至る現象が観察された。写真-4のとおり、通水後の河床において不明瞭ながら交互砂礫堆と礫列・礫段の両者が混在する様子が観察された。

流量9.0 (l/s)～10.0 (l/s)では、写真-9の時間ご

との定点写真と図-2の縦断河床図に示されるように、通水中、常に礫列・礫段の発達と崩壊を繰り返しながら最大径礫を含むすべての砂礫が移動する状況が観察された。通水15分間では定常状態に至らなかったが、通水後の河床には、写真-5, 6に示すとおり礫列・礫段がほぼ水路全域に残留したかたちで認められた。また、写真-10のとおり、形成されたステップ部はこれまで観察された大礫1個程度のステップ部と違い、最大径礫が幾重にも重なる大波高のステップ部であった。この大波高ステップ部の形成過程は、次のようである。①最大径クラスの礫が反砂堆峰近傍に停留する、②その

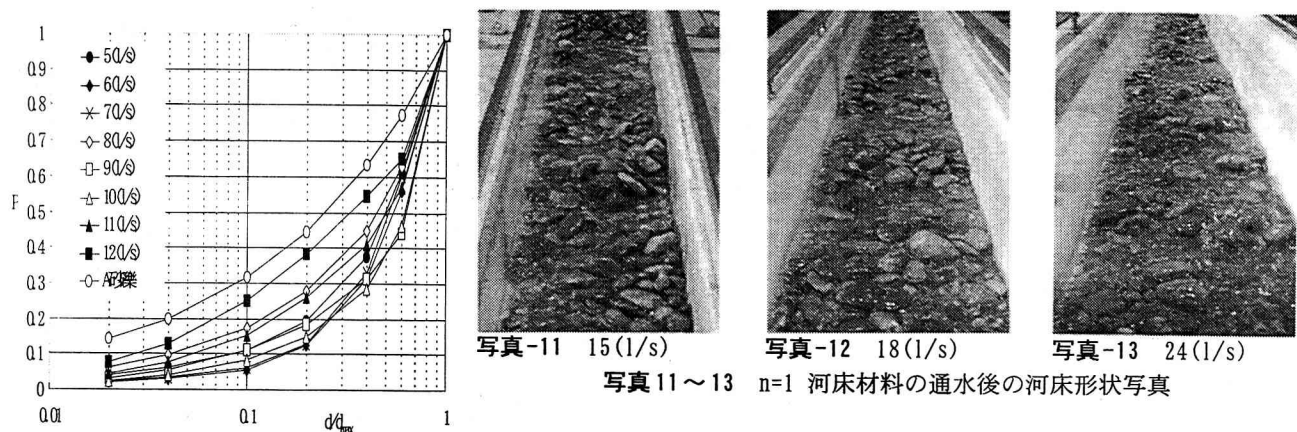


図-3 表層粒度分布

表-2 Talbot 粒度分布の
あてはめ結果

Q (l/s)	n	d_{84} (cm)
5.0	0.99	4.193
6.0	1.22	4.334
7.0	1.15	4.297
8.0	0.82	4.042
9.0	1.28	4.363
10.0	1.34	4.390
11.0	0.91	4.128
12.0	0.85	4.073

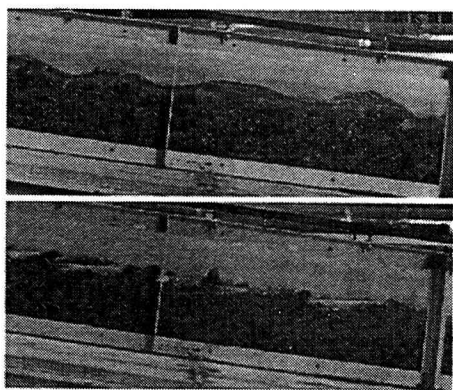


写真-14 河床粒度分布によるステップ波形の違い

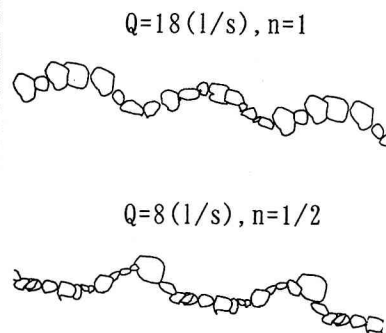


図-4 河床模式図

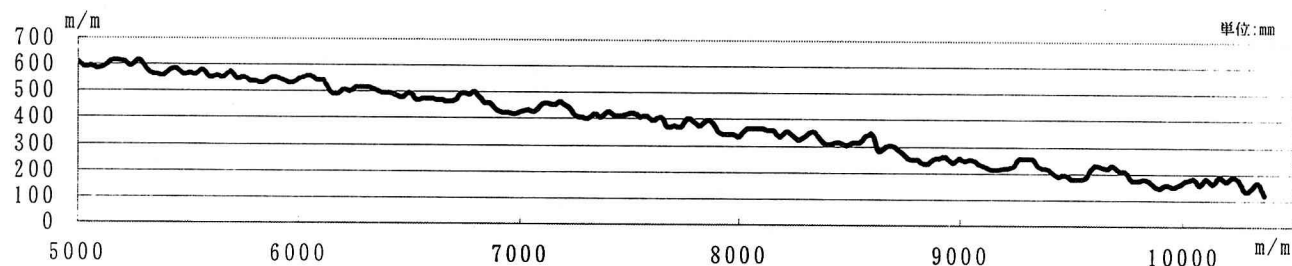


図-5 $n=1$ 河床材料実験における18(l/s)通水後の縦断河床図

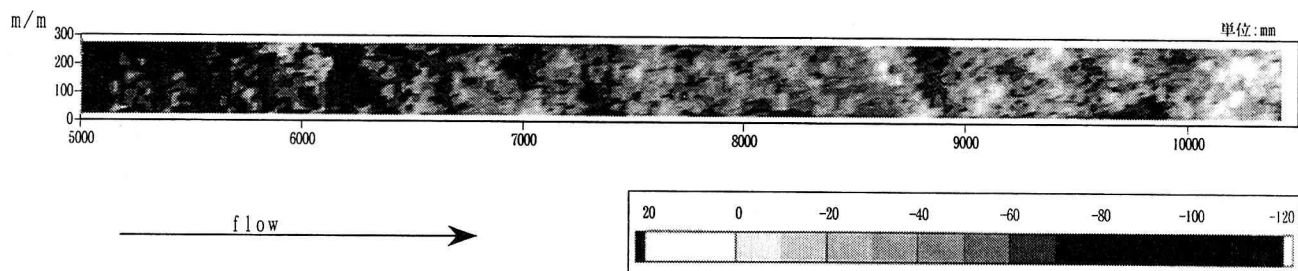


図-6 $n=1$ 河床材料実験における18(l/s)通水後の河床コンター図

直下に深い洗掘部が形成される, ③洗掘部によって反砂堆峰近傍で停止できなくなった最大径礫が洗掘部におち込み, そこで再度停留する, ④洗掘部で停止した最大径礫が流下してきた最大径礫の移動を停止させることで, やがて最大径礫の集積部ができあがる. この一連の現象が繰り返し行われると, 最大径礫の集積部は大礫が幾重にも重なる大ステップ部に成長する.

流量11.0(l/s)以上では写真-7, 8のとおり, 通水

直後から最大径礫を含む砂礫の活発な移動と反砂堆の形成が認められる. 反砂堆の峰近傍に大礫が一時停止する現象もみられるが, 停止時間はごくわずかであり最大径礫を含めたほとんどの砂礫は流れに乗って流下していく. 通水後の河床の状況は比較的大きな礫が集積する部分と比較的小粒径の砂礫で構成される部分とが交互に連なる分級波の様相を呈しており, 礫集積部の波高も10(l/s)までに形成された小規模河床形態の

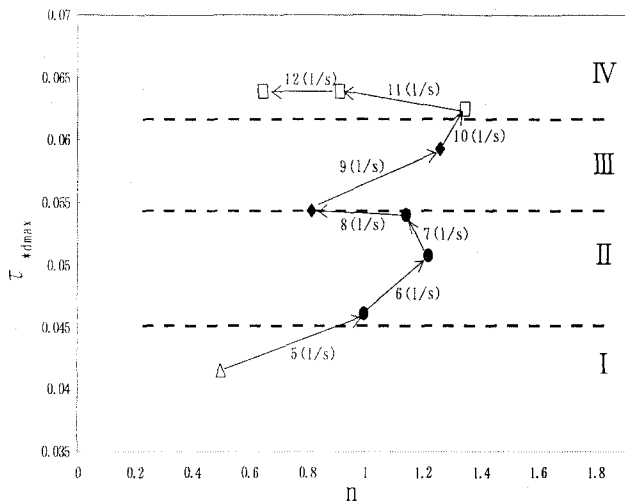


図-7 ステップ形成領域図

波高に比べて小さいことが確認できた。

(2) 砂礫床表層粒度分布の変化

通水ごとに、その前後における砂礫床表層の粒度分布を比較した結果を図-3に示す。これらによると、まず、流量10(l/s)では、流量8(l/s)のケースを除き、通水前後の粒度分布はほぼ同じか、通水後の方がより粗粒化した分布形となっている。流量8(l/s)において通水後の分布が細粒化した原因は、通水開始後15～25分で水路全域の河床アーマールコートが破壊が生じており、その後の通水5分程度では砂礫床が定常化し得なかったためと考えられる。また、流量11(l/s)以上では、砂礫床が細粒化しており、12(l/s)通水後の砂礫床表層の粒度分布は、元河床のA砂礫に近い分布形に変化している。

3.2 $n=1$ の Talbot 型粒度分布砂礫床

この場合の河床材料は、最大径礫が重量割合で全体の約40%を占め、一様粒径に近づいている。通水後の河床形状を写真-11～写真-13に示す。

流量9(l/s)の通水では、通水開始直後から砂礫の移動は見られず、通水後の河床は通水前の河床とほとんど変化はなく平坦なままであった。

流量12(l/s)の通水では、通水直後砂礫の移動は認められなかったが、通水約5分後から下流端付近の部分で洗掘が見られ、1波長程度の反砂堆が形成された。その後、その反砂堆が水路中流まで遡上する現象が観察された。このような孤立波の発生原因として、下流端に設置した固定堰の影響が考えられるが、詳細は明らかではない。

流量15(l/s)の通水では、通水開始直後は砂礫の移動は観察されなかったが、通水開始約5分後から活発な移動が見られ、水路全域に渡って反砂堆の形成が確

認された。通水停止後の河床には反砂堆が明瞭に確認でき、大礫が一部分に集積する大波高のステップ部に類似した形状が見られた。流量18(l/s)通水後の縦断河床図を図-5に、河床コンター図を図-6にそれぞれ示したが、流量15(l/s)通水後の時より反砂堆が顕在化した。

しかし、流量24(l/s)ではほとんどの砂礫が流れに乗るように停止することなく下流方向へ移動し、水路末端より流出した。通水停止後の河床は大波高ステップ部の存在は認められず、大礫1個程度の小さな波高の礫列が形成された。この礫列は通水時には確認できなかったため、通水停止後に水路から水が流失していく過程で減少した流量に対応して形成されたものであると考えられる。

写真-14および図-4に河床材料の粒度分布によるステップ部の違いを示す。図-4の上図に示すように、流量18(l/s)、 $n=1$ の河床は正弦波を描くように丸みを帯びているのに対して、下図に見られる流量8(l/s)、 $n=1/2$ の河床はステップ部の直下部が洗掘され、ステップ部が鋭角に突出する形状を呈した。

両者は現在まで区別なく同じものと考えられてきたが、全く別の形成過程を有するものであり、今後区別して考えていく必要がある。

4. 小規模河床形態の形成・破壊に関する定量的評価

図-3の粒度分布形が式(1)に示した $P=(d/d_{max})^n$ の Talbot型分布に近似できるものと仮定し、最小二乗法により指数 n の変化を求めた結果を表-2に示す。通水前の n 値を通水時流量による最大径礫の無次元掃流力 τ_{dmax} との関係で表すと図-7のようになる。ここに、 $\tau_{dmax}=u_*^2/sgd_{max}$ であり、流れの抵抗則として前述の式(2)で表される Hey 式および連続式 $Q=Bhu$ との連立から求めた。著者らのこれまでの研究^{(1),(2),(3)}では、小規模河床形態が形成された砂礫床表層部分の粒度分布は $P=(d/d_{max})^{1/2 \sim 3/4}$ に落ち着くとしてきたが、より長い通水時間でかつ8回の通水を重ねた本実験は、表-2および図-7のとおり、 $P=(d/d_{max})^{1 \sim 1.4}$ までさらに粗粒化が進むという結果となった。小規模河床形態の形成および破壊状況を τ_{dmax} 値との関係で整理してみると、砂礫床表層部分の粒度分布が $P=(d/d_{max})^n$ に従うことを前提条件として、以下の4領域に区分されるようである。

1. $\tau_{dmax} \sim 0.045, n \geq 0.5$: 小規模河床形態が形成されない領域

流量5(l/s)時に観察されたように、最大径礫が全く移動しないために、小規模河床形態が形成されない領

域。

II. $\tau_{*dmax}=0.045 \sim 0.055, n \geq 1$: 小規模河床形態が形成され、砂礫床が定常化する領域

流量 $6(1/s) \sim 8(1/s)$ までに観察されたように、小規模河床形態が形成されるが、その後はそれ自体がもはや移動せず、砂礫床が表層の粗粒化とともに定常化する領域。この場合、ステップ部の大礫は深さ方向に一層構造である。また、形成時の流量を超える流量が再度与えられると、一部あるいは全体に破壊されるものの、その後再形成され安定化する。

III. $\tau_{*dmax}=0.055 \sim 0.06, n \geq 1$: 小規模河床形態が常に形成と破壊を繰り返す領域

流量 $9(1/s) \sim 10(1/s)$ で観察されたように、通水中、常に小規模河床形態が発達と崩壊を繰り返しながら移動する領域。この場合、ステップ部は大礫が幾重にも重なった多層構造をなし、見た目にも明瞭かつ堅固な感がある。

IV. $\tau_{*dmax}=0.06 \sim$: 小規模河床形態が形成されない領域

流量 $11(1/s)$ 以上で観察されたように、最大径礫を含む全粒径の砂礫がほとんど停留することなく流下してしまうために、小規模河床形態が形成されない領域。その他、 $n=1$ の混合砂礫を初期河床材料に持つ場合：

サインウェーブ状の滑らかな反砂堆形状が生じ、減水後にもその形状が残留する。

5. 結論

実験結果より得た新たな知見を以下のように整理した。

1) 砂礫床の初期粒度分布を $P=(d/d_{max})^{1/2}$ として、より長い通水時間で、かつ流量を徐々に増加させながら通水を重ねていくと、河床表層部分の粒度分布は $P=(d/d_{max})^{1 \sim 1.4}$ まで粗粒化していく。

2) このとき、砂礫中の最大径 d_{max} 礫の無次元限界掃流力 τ_{*dmax} 値によって、小規模河床形態が形成されない領域と形成される領域とに区分することができる。さらに、この形成領域は、小規模河床形態が形成された後に河床が定常状態に落ち着く領域と河床が定常状

態には落ち着かず小規模河床形態が常に形成と破壊を繰り返す領域に区分される。

3) 小規模河床形態が形成され河床が定常状態に落ち着く領域にあつては、ステップ部の波高は最大粒径程度であり、形成時の流量を超える流量が再度与えられると、一部あるいは全体に破壊が起きた後に再形成・定常化する。これに対して、河床が定常状態には落ち着かず小規模河床形態の破壊と再形成が繰り返される領域にあつては、ステップ部の構造は最大径礫が幾重にも重なりあう多層構造を成し、見た目にも明瞭かつ堅固な感があるという特徴がみられる。

4) $n=1$ の河床のような一様径に近い礫を初期条件にもつ河床では、集合流動的な流れによってサインウェーブ状の滑らかな反砂堆形状が発生し、減水後にも残留する。

参考文献

- 1) 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，水工学論文集，第42巻，pp.1075-1080, 1998
- 2) 竜澤宏昌・林日出喜・森高信・長谷川和義・藤田豊彦：広水理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，pp.731-736, 1996
- 3) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義：溪流の小規模河床形態に関する研究，土木学会論文集，No. 656/II-52, 83-101, pp.83-101, 2000
- 4) 江頭進治・芦田和夫・澤田豊明・西本直史：山地河道における階段状河床形の形状特性，第29回水理講演会論文集，pp.537-542, 1985.
- 5) 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，水工学論文集，第40巻，pp.223-228, 1996
- 6) 藤田正治・道上正規・澤田豊明：階段状河床の洪水による変形に関する現地調査，水工学論文集，第43巻，pp.725-730, 1999

(2000. 10. 2受付)