

階段状河床形の発生機構と形状特性

芦田 和男・江頭 進治・安東 尚美

GENERATION AND GEOMETRIC FEATURES OF STEP-POOL BED FORMS

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA and Naomi ANDO

Synopsis

A series of step-pool bed forms, which is characterized in terms of steps spaced by pools, is found usually in mountain streams. Very few are known about step-pool bed forms, though they play an important role in the sediment transport phenomena through their formation, disruption and faculty of sediment control.

Discussion are made mainly on the mechanism of the formations and the geometric features for step-pool bed forms mentioned above. Results from experiments show that generation of a step-pool bed form is due to the formation of undundunes caused by sediment sorting and intermittent motions of the largest particles on bed. The domain where the bed form occurs is drawn from theoretical consideration, and data from experiments are classified well by it.

Data-analysis indicates that wave lengths are coincident to those of undundunes. Wave heights increase with the bed shear stress, and the non-dimensional ones, which are defined as a quantity of wave height divided by the mean diameter of armoured bed, take a constant value.

1. 緒 言

山地河道には、一般に一連のステップとプールからなる階段状河床形が見られる。これは、巨礫や巨石が流路横断方向に連なってステップを構成し、その上・下流側がプール状あるいは平坦になっているものであって、河床表面には顕著なアーマ・コートが形成されている。著者らの観察によれば、このような階段状河床形には、数年に1回程度起こるような出水でも破壊されない大規模なものから、通常の小出水でも破壊されてしまうような小規模のものまで、種々のスケールのものが存在している。これらのスケールは、形成時の流量、河床材料、流送土砂量とその粒度分布および河道条件などに対応して定まるものと思われ、また、形成過程においては分級現象が活発に起こることが推察される。

上記のことより、階段状河床形は、その形成と破壊のプロセスを通して、さらに、プール部における土砂の貯留機能を通して、流出土砂量およびその粒度分布を大きく変動させる大きな要因になっていることが考えられる。事実、プール部における貯留土砂量と水理量によって流出土砂量が規定されてしまうような河道の存在が確認されている¹⁾。このように、山地河道における土砂流出現象に関連する諸問題を究明するためには、階段状河床形の動態に関する理解が不可欠であるように思われる。しかしながら、この方面の研究は、あまり進展しておらず、これまでに現地調査に基づく実態の把握²⁾や、室内実験に基づく発生機構、形状特性などに関する若干の考察^{3,4)}が行われている程度であって、階段状河床形の果たす土砂水理学的な役割はほとんど理解されてない状況にある。

本研究は、山地河道における階段状河床形と流砂問題との関連性を究明するための一環として進められているものであって、ここでは、主として、階段状河床形の形成機構と形状特性に関する実験的検討を行う。なお、これらの主題については一部発表⁵⁾しているが、本稿は、その後の実験から得られた知見を、これら

の成果に加えて報告するものである。

2. 実験方法・条件

実験は、階段状河床形の発生・発達機構や、最終状態の形状特性を検討するため、さらには、流水の抵抗に関する資料を得ることを目的に行われている。

実験用水路は勾配可変の循環式のもので、その諸量は、幅 20 cm、深さ 17 cm、長さ 6 m であり、両側壁はアクリル製、底面は鋼製になっている。水路上流部には流量測定用のせきを有する水槽があり、下流部には循環水の貯水槽がある。水路側壁には、測定用台車を水路軸方向に移動させるためのレールが設置されている。また、測定台車は 2 重構造になっており、流れ方向 (x) ばかりでなく水路幅方向 (y) にも移動できるようにされている。台車には、位置の検出を行うためのポテンシヨ・メータが取り付けられている。

実験に用いた砂礫は 3 種類であって、その粒度分布を Fig. 1 に示す。ここに、A 砂の最大径 d_{max} 、平均粒径 d_m および $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ は、それぞれ 38 mm, 7.1 mm および 4.28 である。B 砂は、A 砂に含まれる最大径の礫を除いたものであって、各諸量は、 $d_{max}=25.4$ mm, $d_m=5.3$ mm, および $\sqrt{d_{84}/d_{16}}=3.26$ となっている。また、C 砂は、一様砂における河床形の成否をみるために用いたもので、 $d_{50}=6$ mm, $\sqrt{d_{84}/d_{16}}=1.24$ のほぼ均一な砂である。

実験は次のような手順で行われている。まず、水路下流端に砂止めをつけ、上記の材料を水路床へ厚さ約 10 cm に敷きならして水締めを行う。ついで、河床表面の粒度分布および初期河床位の測定を行い、給砂 0 の条件で所定の流量を通水し、適当な時間間隔で解析に必要な諸量の測定を行った。測定項目は、主として水位、河床位、流砂量とその粒度分布、および河床表面の粒度分布などである。また、通水中には水面や河床位の変化の状態を把握するため水路上方および側面より適当な時間間隔で写真撮影を行っている。水位および河床位の測定にはサーボ式水位計と河床位計が用いられており、前者においては原則的に 1 縦断測線上の測定を行い、必要があれば、横断方向の水面形が得られるように測定した。後者においては、流心に沿った 1 測線の測定を行ったものと、3 測線程度の記録をとったものがある。水位、河床位、およびその位置 (x, y) のサンプリング周波数は原則的に 50 hz とし、これらの信号はデータレコーダに収納した。

通水流量の条件を Fig. 2 に示す。すなわち、小, 中, 大流量 Q_1, Q_2, Q_3 を階段状に与えたものと、最初から大流量 Q_3 を与えたものとがあって、いずれの通水も流砂の移動が殆どなくなるまで継続している。実験条件を Table 1 に示す。ここに、 d_{m0} : 河床砂礫の平均粒径の初期値, I_{b0} : 初期河床勾配, Q : 流量, Δt : 通水時間, $Q_{cm}, Q_{c90}, Q_{cmax}$: それぞれ平均粒径, 90% 粒径および最大粒径の移動限界流量で、相当粗度に関する Fig. 12 の結果と Egiazaroff の式⁵⁾を用いて推定されている。 F_{r0} : 通水初期のフルード数である。これらの実験ケースにおいて、Run II-6 は一様砂 (C 砂) における階段状河床形の成否をみたもので、

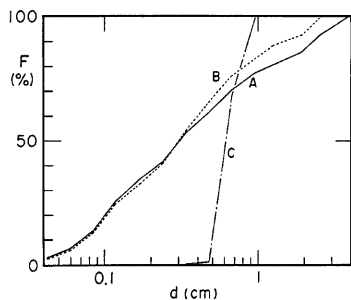


Fig. 1 Bed materials for flume experiments

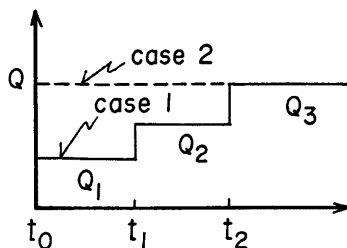


Fig. 2 Conditions of flow discharge

Table 1 Hydraulic quantities of experiments

Run. No.	d_{m0} (mm)	I_{s0} (sin θ)	Q (cm ³ /s)	Δt (min.)	Q_{cm} (cm ³ /s)	Q_{c90} (cm ³ /s)	Q_{cmax} (cm ³ /s)	F_{r0}
II-1	7.1	0.02	1300	113.6	4380	10900	17700	0.896
			4400	31.4				1.02
			5950	43.7				1.05
II-2	7.1	0.03	2670	44.0	2520	6420	10500	1.10
			5250	34.5				1.16
			8020	39.5				1.23
II-3	7.1	0.03	7700	50.7	2520	6420	10500	1.35
II-4	7.1	0.05	1800	25.0	1200	3200	5340	1.23
			4000	29.9				1.24
			7500	20.0				1.36
II-5	7.1	0.05	7400	24.6	1200	3200	5340	1.65
II-6	6.0	0.05	1500	235.8	1000			
II-7	7.1	0.10	350	38.3	397	1170	2010	0.997
			1300	33.9				1.32
			2500	40.0				1.24
II-8	7.1	0.10	2500	30.0	397	1170	2010	1.74
II-10	7.1	0.013	7800	86.1	7730	18900	30500	0.956
II-11	7.1	0.20	450	94.7	93	359	670	1.36
			852	40.5				1.13
II-12	7.1	0.20	780	51.4	93	359	670	1.64
II-14	7.1	0.008	12900	36.0	14400	34600	55400	0.843
II-15	7.1	0.075	1790	50.2	640	1790	3030	1.44
			3030	36.9				1.20
II-16	5.3	0.075	1450	46.9	416	1010	1750	1.52
			2230	67.2				1.26
II-17	5.3	0.075	2230	58.9	416	1010	1750	1.67
II-18	5.3	0.01	12900	4.0	7050	15100	24500	0.988

Run II-14 は lower flow regime における河床形の成否を、さらに、Run II-1, 2, 10, 14, 18 は河床形の発生限界近傍であると思われる領域での河床形の成否を見るために行ったものである。また、流量を階段状に与えている Run II-1, 2, 4, 7, 11, 15, 16 は、分級現象の活性度および流量の履歴が階段状河床形の成否や形状特性にどんな影響を及ぼすかをみたものである。また、Run II-16, 17, 18 は B 砂を用いた実験であって、階段状河床形の発生領域や形状特性において、A 砂を用いた実験との相違が起こるか否かに着目したものである。なお、Table 1 のシリーズのうち、II-1~8 までは既報^{a)}にも示されている。

3. 発生・発達機構と形成領域

3.1 発生・発達機構

水路側面において撮影した写真や、流砂量およびその粒度分布の時間変化に関する実験データに基づいて階段状河床形の発生・発達の状況を調べてみよう。Photo 1(a), (b), (c), (d), Fig. 3 および Fig. 4 は Run II-4 から得られたそれらのデータを示したものである。Run II-4 は流量 $Q_1=1.8\text{ l/s}$, $Q_2=4\text{ l/s}$ および $Q_3=7.5\text{ l/s}$ を階段状に通水したものである。Photo 1(a) は流量 Q_1 の通水初期、1(b) は流量 Q_1 の最終状態、1(c) および 1(d) は、それぞれ通水流量 Q_2 および Q_3 において分級現象がほぼ終了して河床がほぼ安定した時点の状況を示したものである。さて、Photo 1(a) に見られるように、通水初期の流れは、初期河床に対応してスムーズであるが、Fig. 3 および Fig. 4 のデータにみられるように、初期の段階においては粒径 1 cm よりも小さい砂礫の移動があり、分級砂礫による河床波の形成も認められる。流量 Q_1 の最

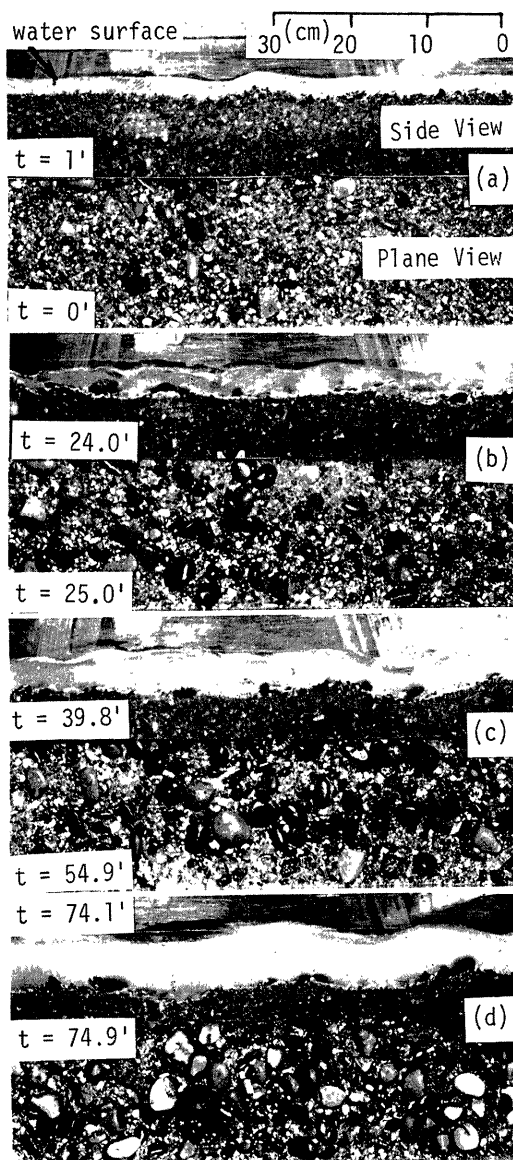


Photo 1 Generation and growth of a step-pool bed form in Run II-4. See figures 3 and 4, concerning the changes of flow discharges, sediment discharges and transported materials.

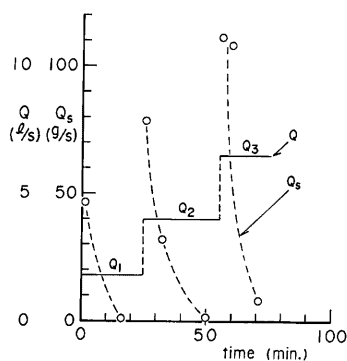


Fig. 3 Changes of sediment discharge in Run II-4

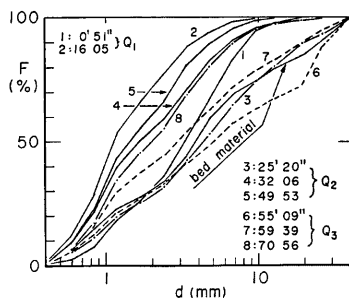


Fig. 4 Changes for the particle size distributions of transported materials in Run II-4

終段階に近づくにつれて、河床表面にはアーマ・コートが形成され、流砂量もわずかに存在する程度であって、その粒径も小さくなっている。この段階において、礫同士の咬み合いが局部的にみられ、階段状河床形も不明瞭ながら認められる。つぎに、流量 Q_2 の最終段階である **Photo 1(c)** をみると、分級砂礫によって形成された反砂堆が固定され、それと同位相の水面波が形成されている。**Fig. 3** および **4** の結果によれば、 Q_2 の通水初期には流砂量も比較的大きく、最大径に近い礫も若干流出していることが示されている。したがって、最大径よりも小さい砂礫はかなり活発に移動して河床には反砂堆が形成され、分級が進むに伴って、河床波が固定されたものと思われる。この段階においては、アーマ・コートの発達とともに巨礫同士の咬み合いも明瞭になり、河床には顕著な階段状河床形が形成されている。**Photo 1(d)** は、通水流量 Q_3

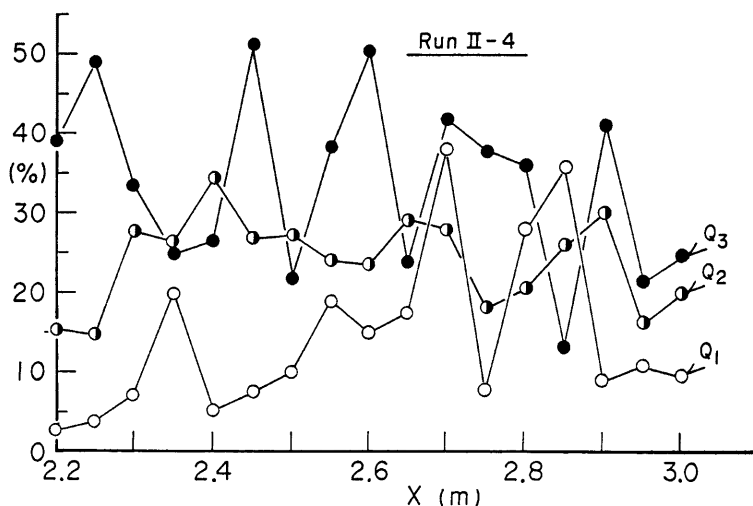


Fig. 5 The armoured bed surface in Run II-4. In which, the vertical axis indicates the ratio of projected area occupied by particles larger than two centimeters, and the horizontal one means the coordinate in flow direction.

の最終段階のものである。**Fig. 3** および **4** の結果からもわかるように、通水初期には、最大径も移動するような条件になっており、流砂も活発で河床には **Photo 1(c)** の場合と同様な反砂堆が形成されている。最終段階に近づくにつれて河床低下による掃流力の減少と粗粒化による砂礫の抵抗力の増加のため、反砂堆は固定されとともに、比較的大きい砂礫の間欠的な移動によって河床波の峰付近に巨礫の集中が起こり、ステップ構造は **Photo 1(c)** のものよりもさらに強固なものになっている。

上述のことより、階段状河床形の形成要因として、分級砂礫による反砂堆の形成とその固定化、ならびに河床波の峰付近への巨礫の集中といったプロセスが考えられる。そこで、Run II-4 において巨礫の集中がどのように起こっているか調べてみる。その結果を **Fig. 5** に示している。これは、 $x=2.2\sim 3.3$ m 区間 ($x=0$ は上流端) の河床表面の粗粒化をみたもので、粒径 2 cm 以上の礫の河床面に占める割合を示したものである。**Photo 1** に見られるように、いずれの通水段階においても河床全面にわたって粗粒化が進んでいるが、流量の小さい $Q_1=1.8$ l/s のデータにおいても大きい粒子の集中域が不規則に現われているのがわかる。これよりも流量の大きい $Q_2=4$ l/s のデータにおいては、粗粒化がさらに明瞭になるとともに、大きい粒子の集中域が規則的に現われており、 $Q_3=7.5$ l/s においてはさらにこの傾向が顕著になっている。集中域の発生間隔をみると、 Q_2 では 15~25 cm 程度に推定され、 Q_3 においては 16 cm になっている。

河床形の発達と固定化のプロセスについてももう少し詳しくみてみよう。**Fig. 6** および **Fig. 7** は、Run II-17 における波長、波高、流砂量および流砂の粒度分布に関する時間変化をみたものである。まず、波高、波長についてみる。図よりわかるように、波長は通水開始後 3 分程度でほぼ発達を終了しており、かなり早い段階に波長は決定されるようである。また、波高の発達もかなり速いものの、流砂量が減衰するまでは、波高は若干なりとも増加し続けるようである。このような波高の発達は、局所的な勾配の影響によって反砂堆の峰の上流側に大きい礫が停止し、分級流送される砂礫がこれに接触してつきつきに停止するような機構を通して起こるものと考えられる。そこで、このような観点より流砂量とその粒度分布をみれば、大きい礫の移動がみられるのは通水開始後 13 分までであって、これ以後、流砂量は無視できるオーダになっており、そ

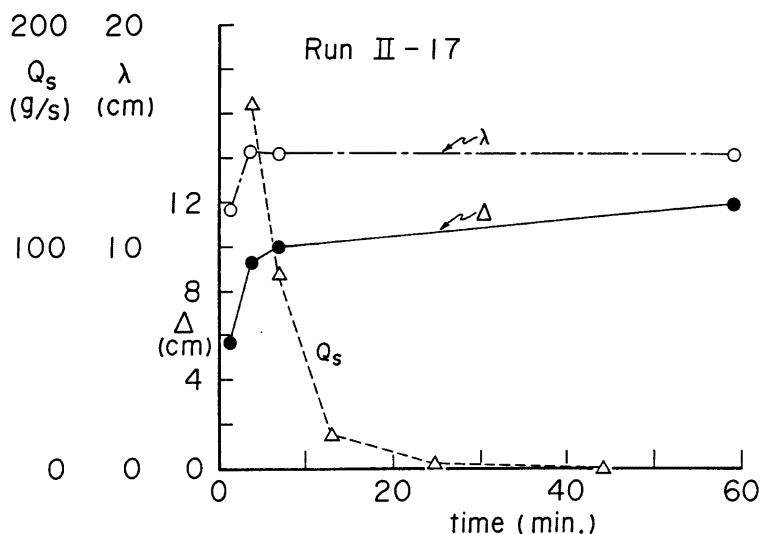


Fig. 6 Changes of wave length and height, and sediment discharge in Run II-17

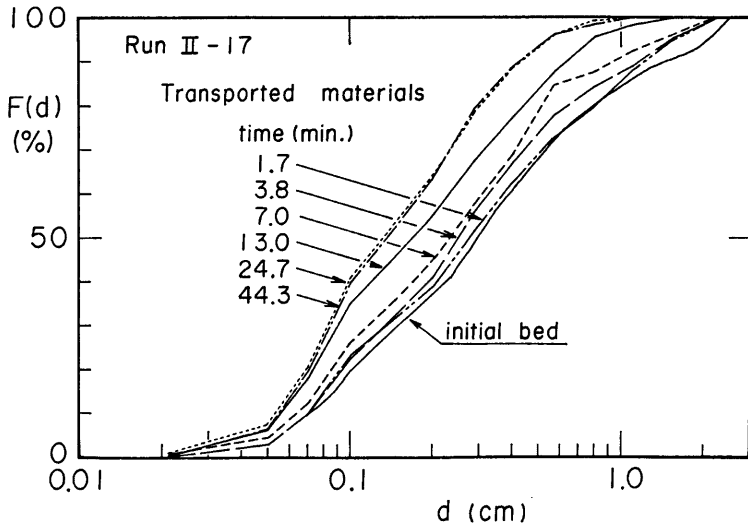
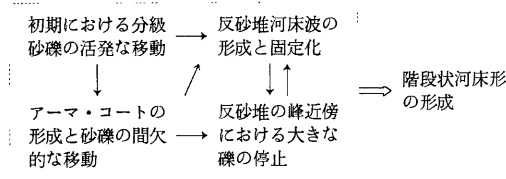


Fig. 7 Changes for the particle size distributions of transported materials in Run II-17

の粒度分布も小さくなっているのが判る。

ここで、階段状河床形の発生・発達機構に関する上述の考察を総合すれば、階段状河床形の形成機構として次のような過程が考えられる。



すなわち、混合粒径からなる河床において、ある範囲の砂礫が分級流送され、それによって河床には反砂堆が形成される。このような条件では、反砂堆のために掃流力の不均一が起こり⁶⁾、また、局所的な勾配の影響が現われて、反砂堆の下流側の峰から谷の部分においては、最大径程度の砂礫も間欠的な運動をする。しかしながら峰の直上流においては、勾配が緩く、逆勾配になることもあるため、大きい礫はこれ乗り越えることができずに停止する。同時に、河床表面の分級が進み、流砂運動が減衰して反砂堆は固定される。また、間欠的に運動する比較的大きい砂礫は、先に停止した礫に接触して停止したり、局所的な勾配の影響を受けて停止する。このようにしてステップ構造が形成されるものと考えられる。

上述の考察は、反砂堆の発生が階段状河床形の形成に対する重要な要件であることを示すものであるが、lower flow regime の河床波がその形成要因になり得るかどうかについても検討の必要がある。lower flow regime においてある程度の砂礫の移動があれば、砂漣あるいは砂堆が形成されることが推察される。そこで、砂堆上を間欠的に移動する大きな礫を想定し、さらに、このような礫が砂堆の峰近傍に停止したものと

しよう。すると、停止した礫の直上流は礫自身のせき上げのために掃流力が減少して、その近傍にはこれと咬み合うべき礫が輸送されにくくなることが考えられる。そのため礫同士の咬み合う機会が少くなる。そればかりでなく、もし礫が峰を越えて輸送される場合には、前面の剝離領域にそれが捕獲され、そこで停止することになる。したがって、分級過程における比較的大きい粒子の間欠的な移動は、河床波を平坦化させる方向に作用するものと思われる。これらのことを総合すれば、lower flow regime においては、階段状河床形の形成は、殆どその可能性がないものと考えられる。

3.2 形成領域

前節の結果を総合すれば、階段状河床形が形成され、かつそれが安定であるためには、次の4つの条件が満たされる必要がある。

- (a) 河床材料が混合砂である。
- (b) 流れが射流である (反砂堆の形成条件)。
- (c) 初期河床において、平均粒径よりも大きい砂礫 ($d_m < d_i < d_{max}$) の流砂運動が起こる (活発な分級現象の発生条件)。
- (d) 最大径が停止する (河床形の安定条件)。

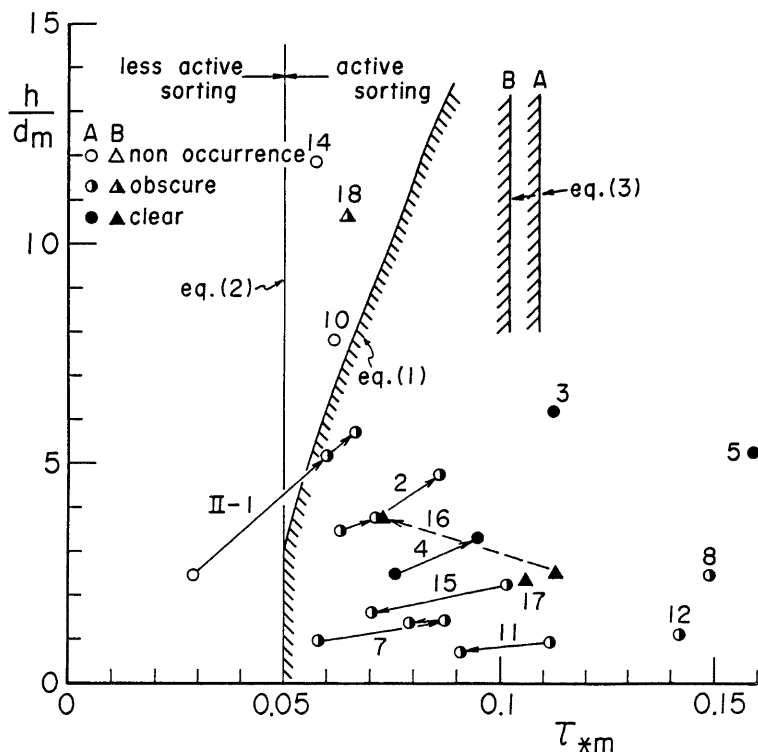


Fig. 8 Domain for the occurrence of step-pool bed forms. In which, A and B mean the materials shown in fig. 1.

これらの条件のうち、(b)、(c)および(d)は、それぞれ次式のように表すことができる。

$$\frac{h}{d_m} \leq \left(6.0 + 5.75 \log \frac{h}{\alpha d_m} \right)^2 s \tau_{*m} \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_{*m} \geq \beta \tau_{*cm}, \quad (\beta \sim 1) \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_{*m} \leq \tau_{*cm} \cdot d_{max} / d_m \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 h : 水深、 αd_m : 相当粗度 (α : 係数)、 $s = \rho_s / \rho = 1$ (ρ_s : 砂礫の密度、 ρ : 水の密度)、 $\tau_{*m} = U_{*2}^2 / g d_m$ (U_* : 摩擦速度)、 τ_{*cm} : 平均粒径の無次元境界掃流力、 $\tau_{*cm} \cdot d_{max}$: 最大粒径の無次元境界掃流力、 β : 分級流砂の活性度を表す係数で、1 よりも大きいが 1 に近い値である。

Fig. 8 には、(1)、(2)、(3) 式の条件を示すとともに、実験データが示されている。ここで、 d_m は通水初期の値であって、流量を階段状に与えた実験においては流量変化時点の河床表面の平均粒径を採用している。相当粗度は、後述の Fig. 12 の結果を参考にして、 $k_s = 2.6 d_m (\alpha = 2.6)$ とし、 τ_{*cm} および $\tau_{*cm} \cdot d_{max}$ は Egiazaroff の式を用いて推定している。一方、実験データに関しては、A 砂と B 砂を用いた実験をそれぞれ丸印と三角印で区別するとともに、河床形が発生しなかったもの (non-occurrence)、形成されているが、局部的であってステップの構造が十分でないもの (obscure) および規則的に見えて、ステップ構造も十分発達しているもの (clear) に分類している。また、データが矢印でつながっているものは、流量を階段状に与えた実験である。

Fig. 8 の形成領域と実験値の対応をみてみよう。まず、式(1)および式(2) ($\beta = 1$) の境界付近のデータについてみると、形成領域に入らない Run II-1 の Q_1 のデータ、II-10、II-14 のデータは、やはり形成領域の外側にプロットされているのがわかる。また、II-1 の Q_2 、 Q_3 のデータおよび II-2、II-18、II-7 のものは、階段状河床形は形成されているものの、あまり明瞭でないデータとして示されている。これらは、Table 1 に示す条件から推察されるように、いずれも分級流砂の運動が活発でないか、あるいはフルード数が 1 に近いもののデータである。そのため、ステップ造が十分に発達しなかったものと思われる。一方、(1)式および(2)式の境界から離れて無次元掃流力が 0.7 を越えると、明瞭な河床形のデータが増えているのがわかる。また、(3)式で表される領域の外側に位置する全ての実験において階段状河床形が形成されているが、これらのデータは、通水初期には最大径が移動するような条件になっており、河床低下や分級現象が進むにつれて最終的には(3)式で表される領域に移動するものである。(3)式は階段状河床形の固定化の条件であって、これより外側のデータについては、(1)式および(2)式を満たしていれば、階段状河床形が形成されるものと考えてよい。

以上のように、階段状河床形の領域区分図は、分級の活性度を表す β や相当粗度に関する検討の余地を残すものの、実験における階段状河床形の成否をよく説明しており、本章で行った考察が妥当なものであ

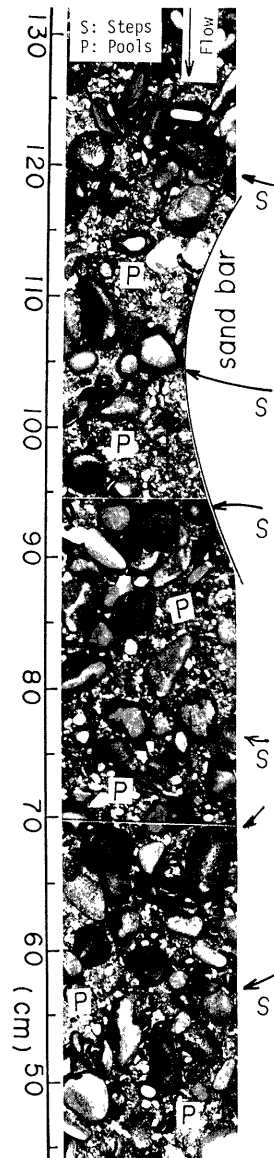


Photo 2 Features of bed surface in the step-pool bedform (Run I 7)

ることがわかる。なお、Run II-6 における一様砂の実験では、反砂堆や蛇行流路が形成されたが、階段状河床形の形成は認められなかった。階段状河床形の形成に関する粒度分布の影響については今後の検討課題である。

4. 形状特性

形状特性を調べるに当たり、水路実験によって得られる階段状河床形がどんな状態になっているのかを写真でみてみよう。Photo 2 は Run I-6^a の河床表面の最終状態である。前述のように、大きい礫が咬み合ってステップを構成し、これが横断方向に、あるいは斜めに連なっており、流れ方向の間隔(波長)はほぼ規則性をもっているのがわかる。また、ステップの直下流はプールになっており、この部分は分級作用が十分でないため、そこには比較的細かい砂礫が残っている。以下、このような特徴を有する階段状河床形の波長と波高がどのような水理量によって規定されるのか、実験結果をもとに考察してみる。

先の考察に基づけば、河床形の形成過程において、分裂・崩壊が顕著に起こらない限り階段状河床形の波長は、その重要な形成要因となっている反砂堆の波長にほぼ等しいことが予想される。そこで、Kennedy⁷⁾ による反砂堆の発生波数領域とステップの波数の関係を見たのが Fig. 9 である。図のデータは、ステップ構造の明瞭なものとそうでないものに区別されている。明瞭でないものは、通水初期において分級砂礫の移動が十分でないか、あるいは分級砂による反砂堆の形成が十分でなかったことに起因するものと思われる。したがって、階段状河床形の明瞭なものに着目して図をみれば、河床形の波長は反砂堆のそれにほぼ一致しているのがわかる。Fig. 6 の結果においても波長は通水初期にほぼ決定されることを考察したが、Fig. 9 の結果は、この考察結果とも一致している。

一方、波高の発達は、前章においても考察しているように、分級流砂の活性度に依存することが考えられる。すなわち、先に停止している大きい礫に対して、接触する砂礫が多いほど、また、その粒子が大きいほど波高は大きくなることが推察される。したがって、最大径が移動しない範囲においては、掃流力が大きいほど波高は大きくなることが推察される。そこで、A砂を用いた実験について、初期の平均粒径 d_{m0} を用い

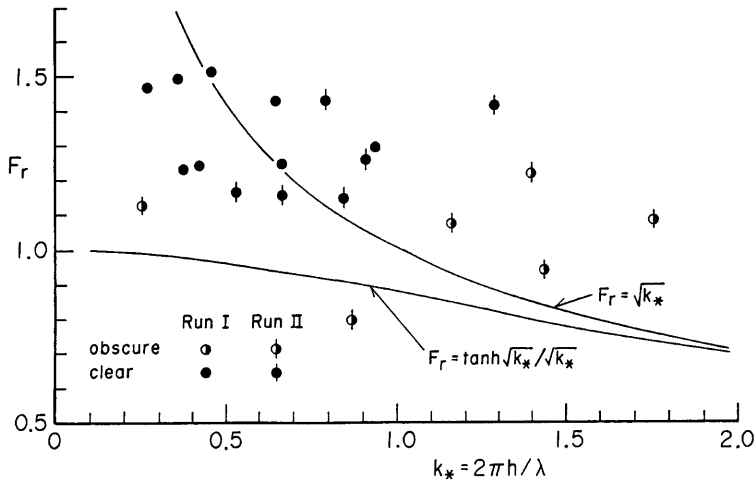


Fig. 9 Wave lengths of step-pool bed forms obtained from experiments. Kennedy's theory for the occurrence of undunes is shown.

た無次元波高と無次元掃流力との関係調べると、Fig. 10 のようである。図中の番号は実験番号である。これによれば、掃流力が大きいほど波高も大きくなっており、上述の考察の妥当性が示唆される。なお、図中データ間を線で結んでいるのは、Fig. 2 のように流量を階段状に与えた実験であって、Run II-2, II-4 および II-7 における通水流量 Q_3 は、それぞれ Run II-3, II-5 および II-8 の通水流量に等しい。そこで、これらのデータを比較しながら波高に及ぼす流量の履歴の影響についてみると、II-2 と II-3 および II-7 と II-8 において、それぞれの波高はほぼ等しくなっている。しかし II-4 と II-5 を比較すれば、前者の波高が若干大きいようである。Table 1 に示すように、II-2 と II-3, II-7 と II-8 の通水流量は最大径の移動限界以下の流量であって、このような条件のときには、流量の履歴はほとんど見られないものと思われる。一方、II-4 と II-5 は、通水初期において最大径も移動するような条件であって、しかも II-4 においては流量 Q_2 の通水においてすでに河床表面近傍はかなり粗粒化されており、これが流量 Q_3 の通水に対する初期河床の条件となるのに対し、II-5 は材料 A (Fig. 1 参照) そのものが初期条件になる。したがって、II-4 と II-5 における波高の違いは、このような初期河床材料の違いに起因していることが推察される。しかしながら、最大径が移動する条件をもつ Run II-16 と II-17 の波高には差異が認められないことや、II-2 と II-3 および II-7 と II-8 の波高がほぼ等しいこと、および II-4 と II-5 における波高の違いもそれほど顕著なものではないことなどを総合すれば、給砂を行わないような条件のもとにおける流量の履歴は、波高に対して重大な影響をもたらさないものと思われる。

以上、要するに Fig. 10 の結果は、波高は分級流砂の活性度を表わす掃流力にほぼ依存することを示すものである。しかし、II-7 のデータが示すように、掃流力の増加に伴って波高がどこまでも大きくなるわけではなく、あるところから平衡値をもつようになると考えた方が論理的である。そこで、アーマ・コートの平均粒径は、ある掃流力の範囲ではこれと正の相関をもち、掃流力が最大径の移動限界付近まで大きくなるとアーマ・コートの粒径は変化しなくなるという事実に着目し、アーマ・コートの平均粒径で無次元化した波高と掃流力の関係について調べてみる。Fig. 11 はその結果を示したものである。データのばらつきは若干認められるものの、無次元掃流力には依存せず、無次元波高は平均的にみて 0.8 程度の値、すなわち階段状河床形の波高は、アーマ・コートの平均粒径の 0.8 倍程度になっているのがわかる。

これまでに行った議論は、階段状河床形の発生と形状特性に関するものであった。こうした問題や土砂水理学的な問題を扱うためには、流水抵抗に関する議論も重要である。Fig. 12 は、本実験における Darcy-Weisbach の f と h/d_m (最終状態) との関係を見たものである。図中には、 $k_s = d_m$ および $k_s = 2.6 d_m$ と置いた場合の対数型抵抗則も示されている。図の結果によれば、データは $k_s = d_m$ の曲線より上方にあって、 $k_s = 2.6 d_m$ の曲線の周囲に点状に在っている。これらのデータは、礫床河川における Hey⁹⁾ の結果である $k_s = 3.5 d_{s4}$ にほぼ対応して

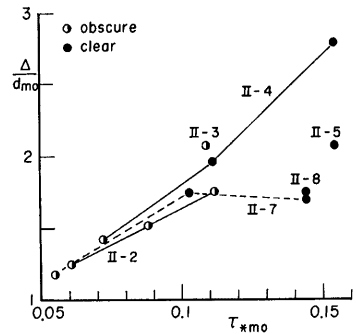


Fig. 10 The relation between nondimensional wave heights and shear stress. In which, d_{m0} indicates the mean grain size of material-A.

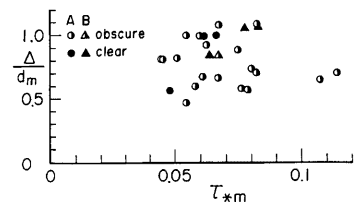


Fig. 11 Nondimensional wave heights obtained from experiments. In which, d_m indicates the mean diameters of armoured beds.

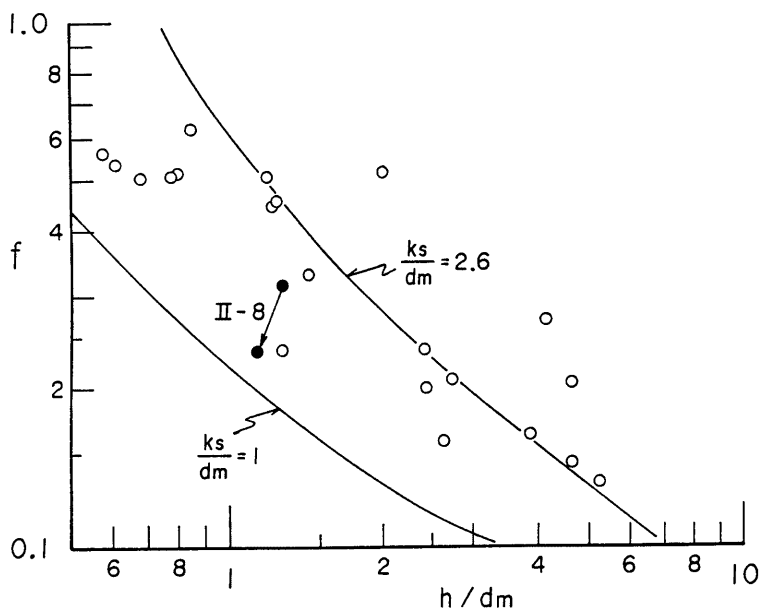


Fig. 12 Friction factors of water flow on step-pool bed forms. Logarithmic friction law is shown in the figure.

いる。

この種の流れでは、河床形による形状損失が流水抵抗をどの程度支配しているかも興味の対象となる。ここでは、その一例として Run II-8 における最終状態の抵抗と、粒度分布が変化しないように留意しながら、ステップを砂礫層の中へ押し込んで表面を滑らかにしたときの抵抗とを比較してみた。その結果を黒丸で示す。これによれば、形状抵抗と砂礫の抵抗はほぼ同じオーダーになっているようである。しかし、これについてはデータが少なく、今後の検討課題としておく。

5. 結 語

本研究においては、山地河道における土砂輸送現象を解明するための一環として、一連のステップとプールからなる階段状河床形の形成機構と形状特性について実験的に検討を行った。本研究によって得られた主要な成果、その意義ならびに今後の問題を要約すれば以下のようである。

(1) 現地における階段状河床形の実態を念頭に置いて室内実験を行い、河床形の発生・発達機構について議論した。その結果、発生については、分級流砂による反砂堆の形成と最大径程度の粒子の停止が重要な要因になることを推察するとともに、発達に関しては、分級による比較的大きな砂礫の間欠的な移動が主因になっていることを推察した。

(2) (1)の考察に基づいて、階段状河床形が形成され、しかもそれが安定であるためには、(a)混合砂であること、(b)流れが射流であること、(c)平均粒径よりも大きい砂礫が移動して活発な分級現象が起こること、(d)最大径が停止すること、が必要であることを示した。さらに、これに基づいて領域区分図を提示し、その妥当性を多くの実験データを用いて検証した。

(3) 階段状河床形の発達過程に関する実験結果に基づいて、波長の決定機構を検討し、階段状河床形の波長は、分級砂礫によって発生する反砂堆の波長に一致することを推察し、実験的にこれを確めた。

(4) 階段状河床形の波高は、分級流砂の活性度、すなわち掃流力に依存することを推察し、実験によってこれを確めた。さらに、アーマ・コートの平均粒径を用いた無次元波高は無次元掃流力によらずほぼ一定値になることを示した。

以上のように、階段状河床形に関する重要な知見が得られている。緒言でも述べているように、実際の山地河道の階段状河床形は、波長、波高が大きく、めったに破壊されることのないような規模の大きい階段状河床形の中に、これよりも規模の小さいものが形成されており、一般には重合的な構造をもっている。これらのうちの大規模なものは、かなり大きな出水によって形成されたことが推察され、これに重なって形成されている中、小規模の河床形は、その後の中・小出水、上流域および溪岸からの供給土砂量やその粒度分布に依存して形成されたことが容易に推察される。本研究の成果は、土砂の供給条件には注意を払わないで得られたものではあるが、河床材料の条件を供給土砂の条件に置きかえることも可能であり、形成条件および波長、波高特性に関する結論は、かなり一般性をもつものと考えられ、上述のような実際の河道にみられる階段状河床形の構造を説明できるものと思われる。

上述のように、本研究の発展性についてはかなり興味のあるところであるが、今後に解明しなければならない点も多く残されている。たとえば、階段状河床形は一樣砂では形成されないことが確かめられているが、砂礫に関する混合の程度と発生限界の関連性についての有力な情報を得ていない。また、土砂輸送現象の解明のためには、階段状河床形上における流れの構造を究明することも重要であるが、これについては、河床波の形成時の流れに対する抵抗係数を巨視的な視点より示すにとどまっている。さらに、階段状河床形もっている流送土砂の制御機能に関する検討も重要な課題である。今後、このような問題について種々の面から研究を進めていくつもりである。

本研究は文部省科学研究費一般Bの補助を受けて進めているものである。また、実験や図面作成に当たっては京大防災研究所吉田義則技官に御協力いただいた。ここに記して、感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 澤田豊明・芦田和男・高橋 保：山地河道の変動と砂礫の流出に関する研究，第26回水理講演会論文集，1982，pp. 105-110.
- 2) Ashida, K, T. Takahashi and T. Sawada: Sediment Yield and Transport on a Mountainous Small Watershed, Bull. D.P.R.I., Kyoto Univ., Vol. 26, Part 3, 1976, pp. 119-144.
- 3) Whittaker, J. F. and M. N. R. Jaeggi: Origin of Step-pool Systems in Mountain Streams, Proc. ASCE, Vol. 108, No. HY-6, 1982, pp. 758-773.
- 4) 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，1984，pp. 743-749.
- 5) Egiazaroff, I. V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY-4, 1965, pp.
- 6) 大貫博史・森田英男・吉川秀夫：河床波上の流れについて，第28回水理講演会論文集，1984，pp. 729-734.
- 7) Kennedy, J. F.: The Mechanics of Dunes and Untidunes in Erodible-bed Channels, J. Fluid Mech., Vol. 16, Part 4, 1963, pp. 521-544.
- 8) Hey, R. D.: Flow Resistance in Gravel-Bed Rivers, Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY-4, 1979, pp. 365-379.