

階段状河床形の形成機構と形状特性に関する研究 Origin and Geometry of Step-pool Bed Form

京都大学防災研究所 正員 芦田 和 男
京都大学防災研究所 正員 江頭 進 治
京都大学大学院 学生員 安東 尚 美

1. 緒 言

山地河道は、それ自体土砂の供給源となるばかりでなく、上流域から供給された土砂を一時的に貯留して、河川下流部へ流送する遷移的な場でもある。また、勾配が急で、河道構成材料の粒度分布も広く、しかも流量の変動が大きい。そのため、一般の沖積地河川には見られない極めて複雑な河床変動や流砂特性を示す。山地河道の縦断形について見ると、写真-1(a), (b)に示すように、一連のステップとプールからなる階段状の河床形が形成されており、河床表面には顕著なアーマー・コートがみられる。アーマー・コートは、どんな出水でも破壊されるというものではないが、一旦破壊されるような出水があれば、流砂量とその粒度分布は大きく変化する。一方、階段状の河床形もアーマー・コートと同様、その構造を永続的に保持するものではないが、ステップが破壊されるような出水があれば、それは変形して、流砂や流路変動に大きな影響を及ぼす。また、写真-1(a)に見られるようなステップ間隔の小さい河床形は、その形状・規模に応じて流水抵抗を支配する。さらに、写真-1(b)に見られるように、規模の大きなプールは、供給土砂の貯留機能を有しており、流出土砂量に直接的な影響を及ぼす。このように、山地河道におけるアーマー・コートと河床形の動態は、土砂水理現象における重要な役割を担っているのである。

階段状河床形については、実態の調査研究成果¹⁾が各方面において発表されているが、最近、形成・形状特性などに関する実験的研究も行われるようになってきた。高橋²⁾は、水路実験によって、プール間隔が川幅に支配されることを示した。Whittaker・Jaeggi³⁾は、河床形の発生が反砂堆の発生と分級現象に起因することを推察するとともに、ステップ間隔は反砂堆のそれに対応することを見い出した。さらに、明瞭な階段状河床形が形成されるためには、勾配が0.075以上でなければならないことを述べている。著者ら⁴⁾は、これらの研究を総合して、階段状河床形にも波長の長い中規模のものと水深スケールに対応する小規模のものが混在することを推察し、それを実験的に確かめた。

階段状河床形に関するこれらの知見は、いまだ定性的な考察の段階にあって、その土砂水理現象に関する十分な情報が得られる段階には至っていない。そこで、本研究は、とくに小規模階段状河床形に着目し、その発生・発達機構および形状特性に関する実験的考察を行うものである。

2. 実 験

実験は、階段状河床形の形状特性を調べるために行ったものと、

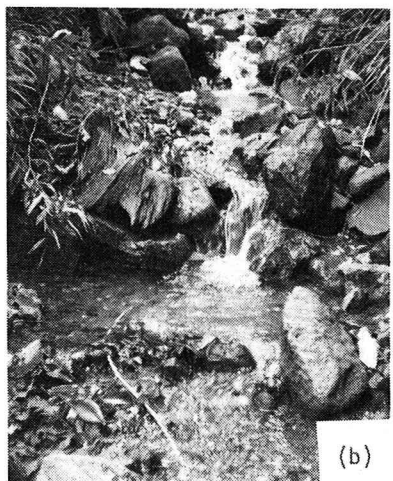
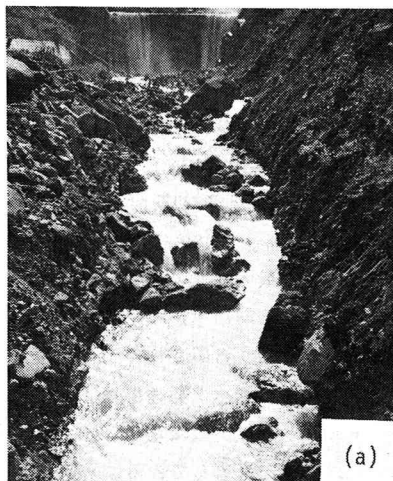


写真-1 (a), (b) 山地河道における
階段状河床形の一例

河床形を総合的に検討するために行ったものがあって、前者をRunⅠ、後者をRunⅡのように区別する。RunⅠは、長さ4 m、幅20 cmの循環式水路を用いて行い、RunⅡは、長さ6 m、幅20 cmの循環式水路を用いて行った。

河床材料を図-1に示す。図中、Material-Aは、RunⅠに用いたもので、最大径 $d_{max} = 38\text{ mm}$ 、 $d_{90} = 24\text{ mm}$ 、 $d_m = 7.7\text{ mm}$ 、 $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 4.47$ である。Material-Bは、RunⅡに用いたもので、 $d_{max} = 38\text{ mm}$ 、 $d_{90} = 23\text{ mm}$ 、 $d_m = 7.7\text{ mm}$ 、 $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 4.28$ である。また、Material-Cは、 $d_m = 6\text{ mm}$ 、 $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.24$ のほぼ一様砂で、これによるステップ形成の成否を調べるために用いた(RunⅡ-6)。

実験は、上述の河床材料を上記水路に厚さ約10 cmに敷きならし、いずれのケースも給砂なしの条件で行った。種々の段階において、流砂量、河床表面と流砂の粒度分布の測定を行うとともに、水路の側面および上面から写真撮影を行った。なお、河床表面の粒度分布は主として写真解析により、流砂は篩法により求めた。通水の条件は、図-2に示すように、小・中・大流量、 $Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3$ を階段状に与えたものと、最初から Q_3 を与えたものとがあって、それぞれの通水は河床における流砂の移動が殆んどなくなるまで継続された。

実験条件は表-1に示す通りである。ここに、 d_{m0} ：河床材料の平均粒径の初期値、 I_{b0} ：初期河床勾配、 Q ：流量、 Δt ：通水時間である。 Q_{cm} 、 Q_{c90} 、 Q_{cmax} ：Egiazaroff⁵⁾の式を用いて推定される、平均粒径、90%粒径および最大粒径の移動限界流量である。本表から明かなように、通水流量は、初期河床において種々の段階の粒子の移動がみられるよう考慮されている。

3. 河床形の発生・発達機構

RunⅡ-4の実験に基づいて、階段状河床形の発生・発達機構を考察してみる。写真-2(a),(b),(c),(d)は、水路側面から見た水位および河床表面の状態を撮影したものである。(a),(b)は $Q_1 = 1.8\text{ l/s}$ の通水初期および最終状態のもので、(c)および(d)は、それぞれ $Q_2 = 4\text{ l/s}$ 、 $Q_3 = 7.5\text{ l/s}$ において河床がほぼ安定した時点のものである。図-3,4は、下流端流砂量およびその粒度分布の時間変化を示したものである。写真-2(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、図-3,4から推察されるように、量的には多くはないにしても、1 cmよりも小さい砂礫が流出し、河床表面にはアーマー・コートが形成され、大きな礫が露出して水面波はその凹凸に支配されるような形状を呈す(写真-2(b))。この段階において、礫同士の咬み合いが局所的に形成されているようである。しかし、それほど明瞭ではない。 Q_2 の最終段階である写真-2(c)を見ると、河床には反

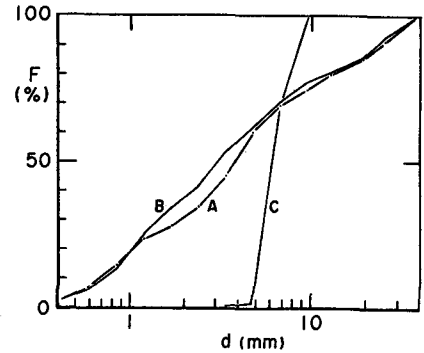


図-1 河床材料の粒度分布

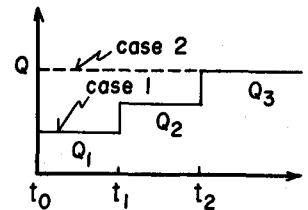


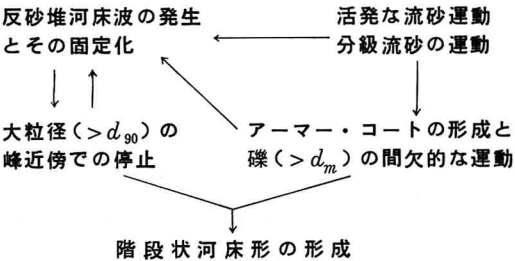
図-2 通水条件

表-1 実験条件

Run No.	d_{m0} (mm)	I_{b0} ($\sin\theta$)	Q (cm^3/s)	Δt (min.)	Q_{cm} (cm^3/s)	Q_{c90} (cm^3/s)	Q_{cmax} (cm^3/s)
I - 3	7.7	0.1	1760 1760	16.0 13.0	497	1360	2220
I - 4	7.7	0.1	663 650	14.7 36.9	497	1360	2220
I - 5	7.7	0.1	663 1760	49.5 34.6	497	1360	2220
I - 6	7.7	0.15	530 827	16.7 28.6	240	720	1200
I - 7	7.7	0.15	827 827	33.7 160.9	240	720	1200
I - 8	7.7	0.15	1500	51.5	240	720	1200
II - 1	7.1	0.02	1300 4400 5950	113.6 31.4 43.7	4610	11400	18500
II - 2	7.1	0.03	2670 5250 8020	44.0 34.5 39.5	2670	6750	11000
II - 3	7.1	0.03	7700	50.7	2670	6750	11000
II - 4	7.1	0.05	1800 4000 7500	25.0 29.9 20.0	1290	3400	5600
II - 5	7.1	0.05	7400	24.6	1290	3400	5600
II - 6	6.0	0.05	1500 4000	235.8 56.7	1000		
II - 7	7.1	0.10	350 1300 2500	38.3 33.9 40.0	440	1260	2160
II - 8	7.1	0.10	2500	30.0	440	1260	2160

砂堆あるいは定常波が固定化され、それと同位相の水面波が形成されている。図-3, 4の結果によれば、 Q_2 の通水初期には最大径に近い礫も若干流出しており、それよりも小さい砂礫はかなり活発に移動して反砂堆が形成され、分級の進展とともにこれが固定されたものと思われる。この段階では、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る。写真-2 (d)は、通水流量 Q_3 の最終段階のものである。図-3, 4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、砂礫の移動も活発で、河床には(a)と同様の河床波が形成されている。河床低下による掃流力の減少に伴って、河床表面には顕著なアーマ-・コートが形成されるとともに、河床波の峰付近には巨礫の集中がみられる。また、水路横断方向あるいは斜め方向には、巨礫同士の咬み合いによるステップ構造が形成されている。

このような実験事実に基づけば、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の平均粒径よりも大きい成分が移



動し、かつ反砂堆が形成されるような条件のもとにおいて、まず、反砂堆が形成される。このような条件では、大きな礫も間欠的な運動をする。しかし、反砂堆の峰の上流側では河床勾配が局所的に小さくなっているため、その近傍において大きな礫の停止機会が多くなる。同時に、河床表面の分級が進み、流砂運動が減衰し、反砂堆は固定化されていく。また、間欠的に移動する比

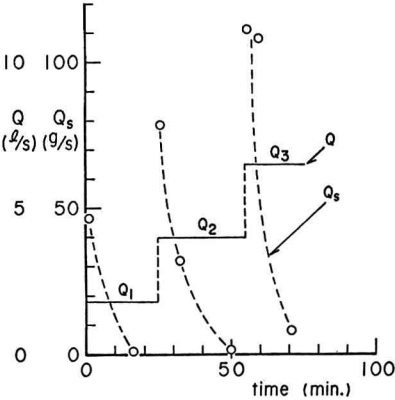


図-3 流砂量の変化 (Run II - 4)

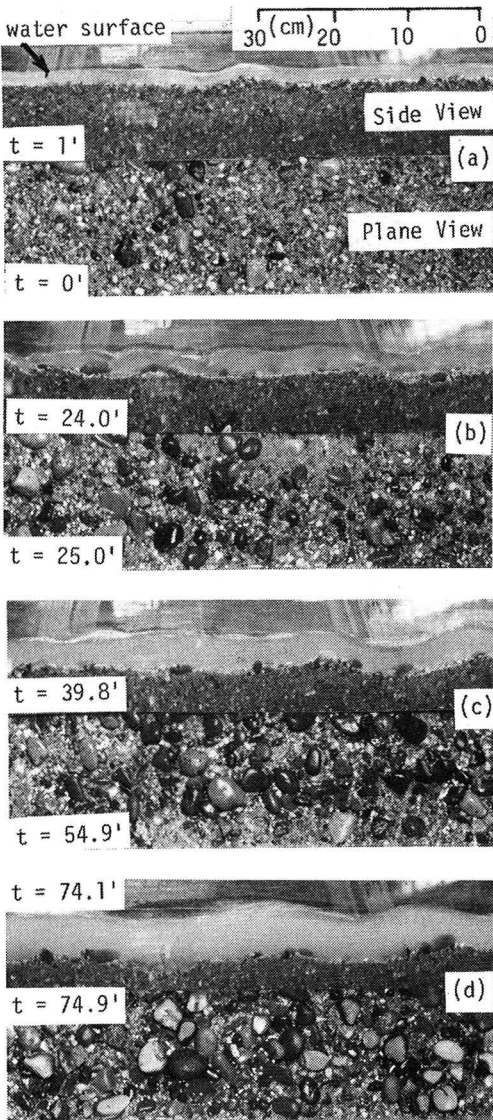


写真-2 階段状河床形の発生・発達過程 (Run II - 4)

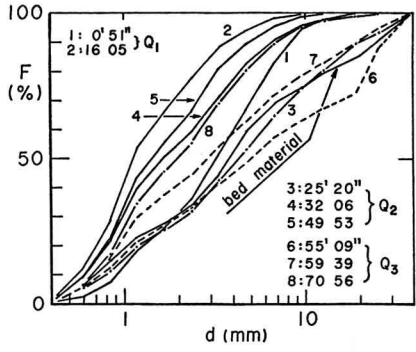


図-4 流砂の粒度分布 (Run II - 4)

較的大きい礫は、先に停止している大きい礫に接触して停止するか、局所的な河床勾配の影響を受けて停止する。このような過程で、階段状の河床形が形成されることが推察される。

上述の考察は、反砂堆の発生が階段状河床形形成の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が必要である。lower flow regime においてもある程度の砂礫の移動があれば、砂澁か砂堆が形成される。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、ある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なくなる。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、前面の剥離領域に捕獲され、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。このように、lower flow regime においては、階段状河床形は、きわめて形成されにくい条件になっていると言えよう。

これらのことを総合すると、階段状河床形の形成条件として、(i) 混合砂であること、(ii) upper flow regime であること、(iii) 初期河床の平均粒径あるいはそれよりも大きい粒径 ($d_m \leq d_i < d_{max}$) が移動して、分級現象がかなり活発に起こること、の三つが考えられる。また、発生した階段状河床形が完全に安定化するためには、(iv) 最大径程度の礫が移動しないことも必要である。ここで、相当粒度を $\kappa_s = \alpha d_m$ とし、さらに限界粒径を $d_i = \beta d_m$ とすれば、条件(ii)は $F_r \geq 1$ 、条件(iii)は、 $u_*^2 \geq \beta u_{*cm}^2$ と書ける。さらに、これらは次のように表示される。

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

$$\tau_{*m} = \frac{u_*^2}{sgd_m} \geq \beta \tau_{*cm}, \quad (\beta \geq 1) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 h : 水深、 $s = \rho_s/\rho - 1$ 、 u_* : 摩擦速度、 τ_{*cm} : 平均粒径の無次元限界掃流力である。

階段状河床形に関する上述の考察と実験値との対応を調べよう。図-5は、 $\beta = 1$ 、 $\alpha = 2.6$ として定められる式(1)、(2)の領域と実験データを示したものである。実験値は、階段状河床形が明瞭に形成されたもの(黒丸)、局所的に形成されたもの(半黒)、および形成されなかったもの(白丸)に分類されている。

h/d_m および τ_{*m} は、各通水段階における初期の値

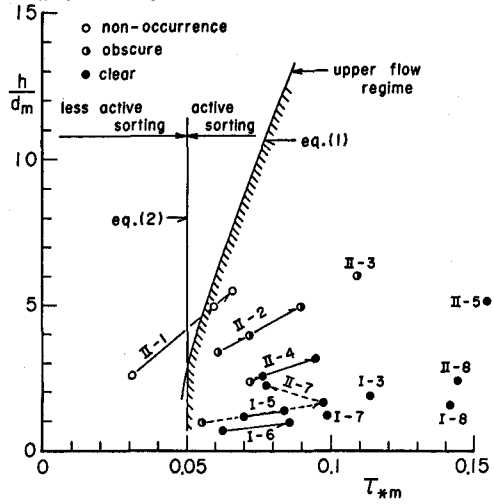


図-5 階段状河床形の発生領域

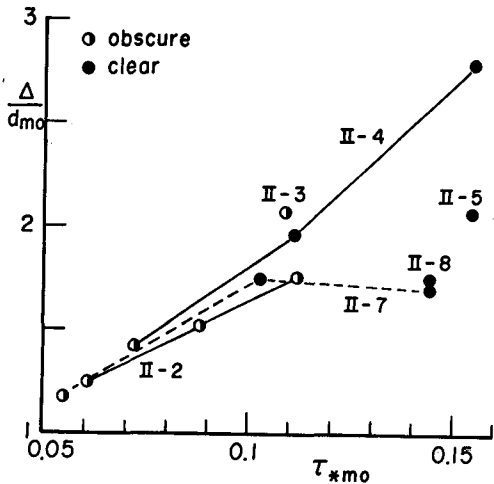


図-6 波高の発達過程

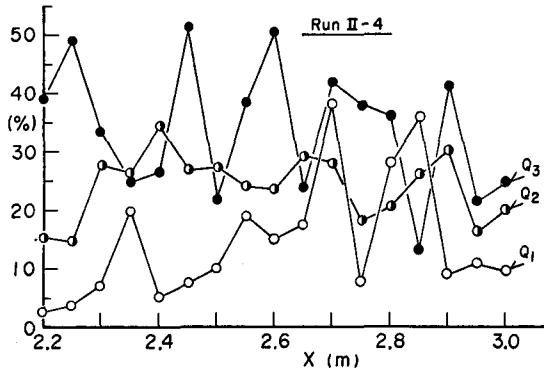


図-7 河床表面の粗粒化

で、図-10の結果を参考にして $k_s/d_m = 2.6$ を用いて推定されている。さて、この図によれば、発生領域の限界線の近傍に、河床形が発生しなかったもの、および不明瞭だったもののデータがあって、限界線から離れるにつれて明瞭な河床形を示すデータが位置しているようである。式(1)による限界は粗度の推定に支配され、式(2)の β は分級過程における礫移動の活性度を示すものであり、これらをどのように推定するかは重要な問題である。ここでは、 β をもう少し大きくとれば、発生領域がさらに明確に推定されるようである。

次に、波高および河床表面における粒度分布の変化に着目して河床形の発達過程を調べよう。図-6は、Run II について初期の平均粒径 $d_{m0} = 0.71$ cm を用いて無次元化した波高 $4/d_{m0}$ と掃流力 τ_{*m0} ($= d_{*0}^2 / sg d_m$) との関係を見たものである。これによれば、波高は τ_{*m0} にほぼ比例して増加しているのがわかる。その理由の一つとして、 τ_{*m0} が増加すると分級過程における礫の移動が活発になり、礫同士の接触機会が多くなることが考えられる。図-7は、Run II - 4 の $x = 2.2 \sim 3.0$ m 区間の河床表面の粗粒化と河床形状との関係を見るため、各通水の最終段階における粒径 2 cm 以上の礫の河床面積に占める割合の縦断分布を調べたものである。いずれの通水段階においても写真-2に見られるように、河床全面にわたって粗粒化は進むが、流量の小さい $Q = Q_1$ のデータでは、明瞭ではないが大きい粒子の集中域が不規則に現われている。これより流量の大きい Q_2 においては、全面にわたって粗粒化が進むとともに、大粒子の集中域が規則的に現われ、より流量の大きい Q_3 になると、さらにこの傾向が顕著になってくる。集中域の発生間隔をみると、 Q_2 では約 25 cm、 Q_3 では 15 ~ 30 cm となっている。これに対し、水路全区間にわたって調べられた平均波長は、前者において 26.7 cm、後者において 31.2 cm となっており、階段状河床形の波長と大粒子の集中とはほぼ一致している。

4. 河床形の形状特性

写真-3は、Run I - 6 の河床表面の最終状態であって、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。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充分でないため、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。

河床形の発達過程において、分裂・崩壊が顕著に起こらなければ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、Kennedy 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図-8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と

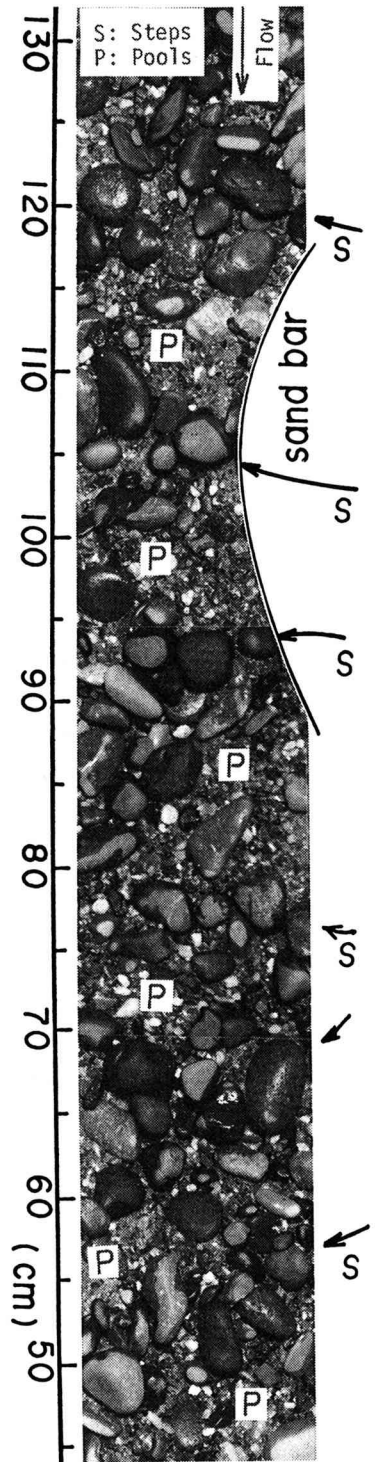


写真-3 一連のステップとプール (Run I - 6)

に区別されている。Whittaker・Jaeggiの結果にも見られるように、ステップ構造の明瞭なものに着目すれば、その波長は、反砂堆のそれにはほぼ等しいことがわかる。図-9は、無次元波高 $4/d_m$ と無次元掃流力 τ_{*m} ($= u_*^2 / sgd_m$, d_m : 最終状態の平均粒径) との関係を見たものである。前にも述べたように、波高は、通水初期の粒度分布とくに $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ および停止した礫と分級に伴って間欠的に移動する礫との接触機会の多少に支配されるものと思われる。しかし分級に伴って d_m が大きくなるため τ_{*m} にかかわらず、無次元波高は一定値に収束する可能性がある。粒度分布の影響については別の機会に議論するものとして、このような観点より図を見ると、 τ_{*m} の大小にかかわらず、 $4/d_m$ はある値の範囲に点状しているようである。しかし、データが少いこと、また、この種の実験には精度上の問題があることを念頭に置かねばならない。

これまでの議論は、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。図-10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 $k_s = d_m$ 曲線より上方にあって、 $k_s = 2.6 d_m$ の曲線の周囲に点在している。これらのデータは、礫床河川における Hey⁶⁾ の結果、 $k_s = 3.5 D_{84}$ にほぼ対応している。

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

一連のステップとプールからなる小規模階段状河床形の発生・発達機構および形状特性について実験的考察を行い、以下のような興味ある知見を得た。

(1) 河床表面において、分級流送される流砂が活発で、しかもそれによって反砂堆が形成され、分級が最終段階に近づくにつれて反砂堆は固定化される。このようなプロセスで階段状河床形が形成されることを示した。さらに、発生領域について、 $\tau_{*m} \geq \beta \tau_{*cm}$ および $F_r \geq 1$ の条件を提示し、初期の流砂の活性度を

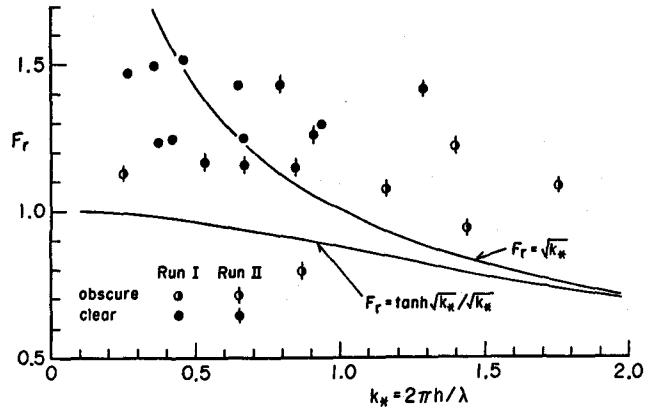


図-8 波長とフルード数

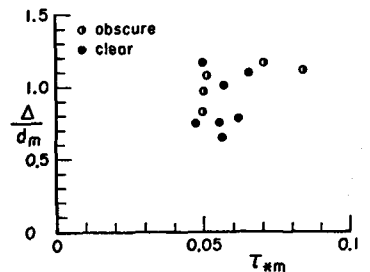


図-9 波高と無次元掃流力

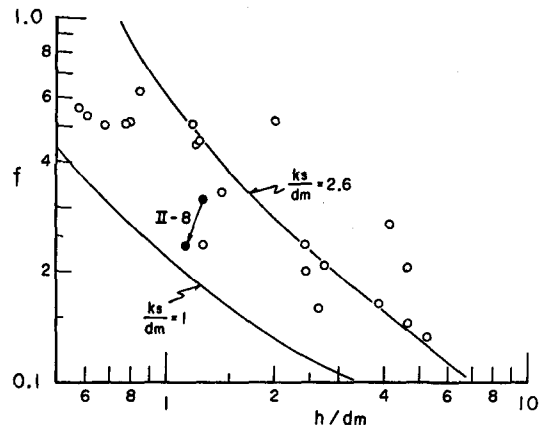


図-10 抵抗係数

表わす β を1よりも若干大きくすれば、階段状河床形の発生予測が可能であることを推察した。

(2) 階段状河床形の発達機構については、河床表面の分級に伴う礫の間欠的な運動が深くかかわっていることを示した。

(3) 安定化した階段状河床形の波長は、分級初期に発生する反砂堆のそれに一致することを示すとともに無次元波高はほぼ一定値になることを示した。

以上のように興味ある知見が得られたが、今後に検討すべき問題も残されている。とくに、河床材料の分布形と発生領域および形状特性との関係、さらに河床形上の流れの問題については今後の大きな検討課題である。また、lower flow regime における河床形の成否ならびに川幅に対応する中規模の河床形についても検討する必要がある。

最後に、本研究は、一部文部省科学研究費一般B（代表者 芦田和男）の補助を受けて行われていることを記し、関係各位に深謝する。また、実験装置や図表作成において御協力いただいた京大防災研究所吉田義則技官に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Ashida・Takahashi・Sawada : Sediment Yield and Transport on a Mountain Small Watershed, Bull. of D. P. R. I., Kyoto Univ., Vol.26, No.240, 1976.
- 2) 高橋：土石流の停止・堆積機構に関する研究(3), 京大防災研年報, 25号B-2, 1982.
- 3) Whittaker・Jaeggi : Origin of Step-Pool Systems in Mountain Streams, ASCE, Vol.108, No. Hy 6, 1982.
- 4) 安東・芦田・江頭：階段状河床形に関する実験的研究, 38回土木学会全国大会, II - 301, 1983.
- 5) Egiazaroff : Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, ASCE, Vol.91, No. Hy 4, 1965.
- 6) Hey : Flow Resistance in Gravel-Bed Rivers, ASCE., Vol.91, No. Hy 4, 1979.