京都大学防災研究所年報 第29号 B-2 昭61. 4
Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.29B-2, 1986

階段状河床波上における流砂機構

芦田 和男・江頭 進治・西本 直史

SEDIMENT TRANSPORT MECHANISM ON STEP-POOL BED FORM

By *Kazuo* ASHIDA, *Shinji* EGASHIRA and *Naoshi* NISHIMOTO

Synopsis

Step-pool bed forms are usual in mountain streams and play an important role in sediment transport phenomena. The present study discusses the transporting process of sediment particles on a step-pool system. In additions, theoretical, experimental discussions are made on the desruption condition of bed with step-pool system as well as on sediment transports in formative, deformative processes of such a bed form.

A mathematical model which calculates the sediment transport rate in time and space is developed, using an idea such as coverage rate or storage rate by sediment particles to be transported on the armoured bed of step-pool system. The results simulated by the model agree well with those from flume experiments.

The stable step-pool bed form begins to deform and the destruction occurs as soon as a largest particle composing the step sets in motion. A method to predict the critical discharge above which the destruction occurs is proposed. The critical discharges calculated by the method are compared well with data from flume experiments.

1. 緒　　言

山地部の河川には一般に階段状河床波が形成されており，これはその形成・破壊の過程を通して，またプール部における砂礫の貯留過程を通して，流砂量とその粒度分布を大きく支配している。したがって，山地河道における流砂量予測のためには，階段状河床波の形状特性値，形成・破壊条件，流水抵抗などに関する知識ばかりでなく，河床波が変形しない条件下における砂礫の輸送機構などに関する知見が不可欠となる。著者らは，このような観点より階段状河床波に関する研究を進めてきており，これまでに形成条件や形状特性値に関する重要な結果を得ている[1,2]。本研究は，これらの次の段階として，階段状河床波における砂礫の伝播過程，形成・破壊時における流砂特性ならびに破壊・変形条件等について検討しようとするものである。

現河道に存在する階段状河床波は，次の出水によって容易に変形するものや，殆どその形を変えないものなどがある。このような河床波の安定性は，出水の規模，上流域からの土砂供給条件，流路の条件に依存している。例えば，上流域の荒廃を伴うような豪雨出水時に形成された階段状河床波は，上流域から供給される土砂の粒径範囲が広いため，ステップを構成する石礫の直径が大きく，比較的安定であって，その後，中小出水を多く経験しても形成時の幾何構造を長期間維持するものと思われる。このような流路においては，その後の出水において上流域から供給された砂礫は，元の段階状河床波を構成する材料との交換をしないまま，それ自体の材料を堆積したり，侵食したりしながら下流域へ輸送される。すなわち，これは，アーマ・コートの表面を単に通過する固定床上の流砂としての挙動を示すものと思われる。本論文の第1の課題は，このような階段状河床波上の流砂過程について検討することにある。

階段状河床波は，上述のように，大きな出水ばかりでなく，中小の出水によっても形成される。ところが，

中小出水によって形成されたものは，ステップを構成する粒子や，河床表面のアーマ・コートの材料がそれほど大きくはなく，その後の出水で容易に破壊されてしまう。このとき，流路には，その時の条件に応じて新たな階段状河床波が形成される。このような河床波の形成・破壊のプロセスを考えたとき，階段状河床波は，流砂量とその粒度分布を大きく変動させる主要因になっていることが容易に理解される。このように，山地河道における流砂現象は極めて複雑であって，その解明のためには前述しているように，多くの研究の蓄積が必要である。本論文においては前述の第一の課題に引き続き，階段状河床波の形成・破壊の過程における流砂特性と破壊・変形条件についても検討する。

なお，本論文の一部[3]は，すでに著者らによって発表されているが，その後，実験データが蓄積されるとともに破壊・変形条件に関する新たな知見が得られている。そこで，既報の成果も含めてそれらを報告するものである。

2. 実　　験

実験は，深さ 40 cm, 最大幅 100 cm, 長さ 12 m の勾配可変の鋼製循環水路を用いて行われた。水路側壁の一方は，ガラス張りで固定されており，一方側は，水路幅を任意に調節できるように可変にされている。ただし，以下の実験では水路幅は 27.5 cm に固定されている。流量は，自動制御によって任意の波形や定常的に通水できるようにされている。

給砂は，特別に製作した給砂器を用いて行われている。給砂装置の見取り図を **Fig. 1** に示している。これは，砂時計の原理に基づいて設計されたものであって，給砂量の調節には通砂穴の直径と穴の数を変えることによって行われる。この装置においては，穴の直径を，13, 10, 8, 6 mm および 4 mm の 5 種類とし，通砂穴数は 3 個にされている。したがって，計15段階の給砂量を得ることができる。ちなみに，平均粒径 d_m = 0.063 cm のほぼ均一な砂を用いた場合の本装置の最小給砂量は，10 gf/sec, 最大給砂量は 80 gf/sec である。

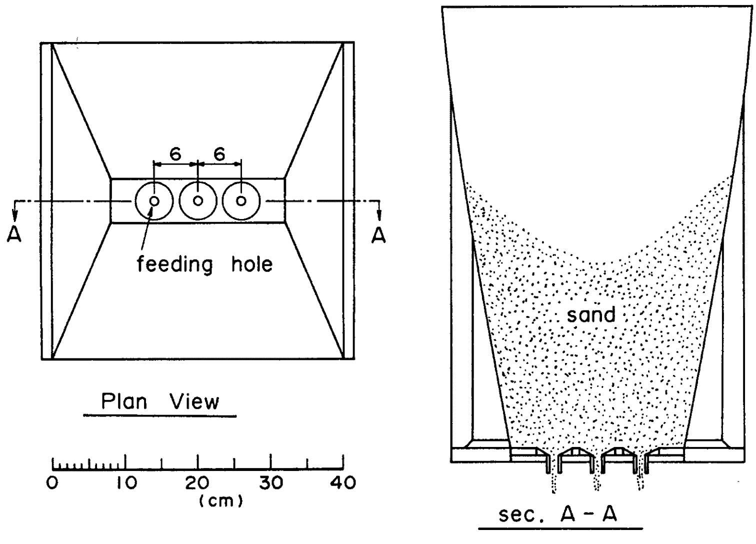


Fig. 1　Equipment for sand feeding.

Fig. 2 は，実験用材料の粒度分布を示したものである。図中材料 A の最大粒径は 3.81 cm，平均粒径は 1.31 cm，$\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ は 2.77 である。材料 B の最大径は 0.12 cm，平均粒径は 0.063 cm，$\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ は1.32である。材料 C は，最大径 0.360 cm，平均粒径 0.178 cm，$\sqrt{d_{84}/d_{16}}=1.29$ のようである。これらの材料は，実験目的別に使い分けられている。

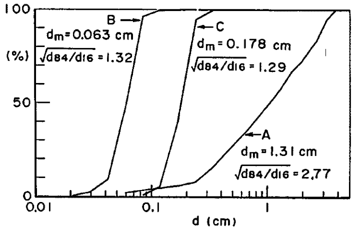


Fig. 2 Sand particle sizes used in flume experiments.

実験は，本研究の目的に応じて 3 種類に分類される。すなわち階段状河床波の形成過程，破壊時における流砂特性と破壊条件を調べるための実験，流水抵抗を調べるための実験，およびアーマ・コートの発達した階段状河床波上における流砂の伝播過程を調べるための実験である。**Table 1** は，以上における実験条件と，結果の一部を示したものである。ここに，Q は通水流量，i_i は初期河床勾配，i_e は最終状態の河床勾配，D_0 は初期河床材料の平均粒径，D_a は最終状態におけるアーマ・コート（河床表面）の平均粒径である。

Run 1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1, 6-1 は，階段状河床波の形成過程における流砂特性を調べるために行ったものである。これらの実験は，材料 A を厚さ約 10 cm に敷ならした後，給砂なし，かつ，**Fig.** 3 の case 1 のよ

Table 1 Conditions of flume experiments.

Run No.	Q (l/sec)	i_i	i_e	used sand	D_0 (cm)	D_e (cm)
1-1	6.90	0.100	0.086	A	1.31	2.62
1-2	4.90- 9.40	0.086	0.086	A		2.47
2-1	10.80	0.100	0.052	A	1.31	2.52
2-2	8.80-13.78	0.052	0.052	A		2.43
3-1	8.88	0.100	0.055	A	1.31	2.65
3-2	6.90-12.24	0.055	0.046	A		2.41
4-1	14.78	0.060	0.030	A	1.31	2.57
4-2	12.78-19.68	0.030	0.030	A		2.49
5-1	12.80	0.060	0.036	A	1.31	2.45
5-2	10.80-19.66	0.036	0.036	A		2.55
6-1	10.78	0.060	0.045	A	1.31	2.62
6-2	8.86-13.56	0.045	0.039	A		2.65
7-1	11.82	0.033	—	A	1.31	2.63
7-2	8.88	0.033	—	A		2.63
7-3	5.90	0.033	—	A		2.63
7-4	11.82	0.013	—	A		2.63
7-5	8.86	0.013	—	A		2.63
7-6	5.92	0.013	—	A		2.63
7-7	11.82	0.003	—	A		2.63
7-8	8.86	0.003	—	A		2.63
7-9	5.92	0.003	—	A		2.63
8-1	5.90	0.033	—	A, B		2.63
8-2	5.92	0.033	—	A, B		2.63
8-3	5.90	0.033	—	B, C		0.178

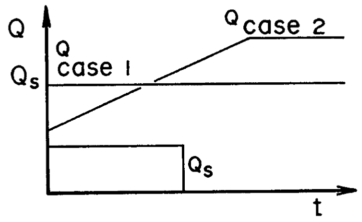


Fig. 3 Conditions of water discharge, Q, and sediment supply dischpge, Q_s.

うに定常流量の条件で行われ，通水初期には全砂礫が活発に移動して大規模な河床低下が起こるよう留意されている。これらの実験では，アーマ・コートが発達して流砂が殆どなくなった状態で通水を停止している。

Run 1-2, 2-2, 3-2, 4-2, 5-2, 6-2 は，それぞれ Run 1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1, 6-1 において形成された階段状河床波に関し，その破壊・変形条件と破壊・変形過程における流砂特性を調べるための実験である。これらの実験においても，給砂は行われていない。一方，流量は，**Fig.** 3 の case 2 のように与えられている。すなわち，流量を増加率 1 l/min で直線的に増加させていき，破壊が始まったと判断した時点において定常給水に切り換えている。定常給水に切り換えた後には，Run 1-1, 2-1, ……, 6-1 の場合と同様に河床砂礫の移動がなくなるまで通水を継続している。

Run 7-1～7-9 は流量 $Q=11.82\,l$/s, 初期河床勾配 $i_i=0.08$ の条件で形成された階段状河床波上における流れの抵抗を調べるために行ったものである。これらの実験においては予め形成された河床波の破壊・変形が起こらないように流量や勾配の条件を設定している。ただし，これらの実験については，本論文では議論せず別報[4]において詳細に報告する。

Run 8-1, 8-2, 8-3 は，アーマ・コートの発達した階段状河床波およびアーマ・コートのみを有する平坦床における流砂の伝播機構を調べるために行ったものである。これらの実験のうち，Run 8-1 は，$Q=11.82\,l$/s, $i_i=0.08$ の条件のもとで，材料 A を用いて作られた階段状河床波を対象として，流砂の伝播機構を調べるためのものである。この実験では給砂用材料として **Fig.** 2 に示す材料 B を用い，水路下流端から 4 m の地点において，給砂量 44.6 gf/sec を定常的に21分間与えている。一方，Run 8-2 においては，Run 8-1 の階段状河床波のステップ部分を押し込んで，平坦床を作り，アーマ・コートのみが発達した平坦床における流砂の伝播過程が調べられている。この実験における給砂条件は，Run 8-1 に同じである。Run 8-3 は，アーマ・コート平坦床において，流砂の伝播現象に対するアーマ・コートの粒径の効果を調べるために行われたものである。この実験では，**Fig.** 2 の材料 C を路床にはりつけて固定床を作り，Run 8-1，および Run 8-2 と同じ給砂条件のもとで流砂の伝播過程が調べられている。

これらの実験における測定項目は，実験の種類によって少しづつ異なるが，水位，河床位，下流端流砂量とその粒度分布，河床表面の粒度分布，断面平均流速などである。水位は触針式の水位計を用いて測定され，河床位は光反射式の河床位計を用いて測定されている。下流端流砂量は，箱形の金網を用いて捕獲計量され，その粒度分布は篩分析によっている。河床表面の粒度分布は写真解析によって調べられた。断面平均流速は，塩分法を用いて測定されている。

3. 階段状河床波および平坦床上の流砂過程

3.1 流砂過程の概要

アーマ・コートの発達した階段状河床波や，アーマ・コートのみを有する平坦床上における供給砂の流砂過程について調べてみよう。**Fig.** 4 は，Run 8-1 および8-2における下流端流砂量の時間変化を示したもので，**Fig.** 5 は，Run 8-3 におけるそれを示している。まず，**Fig.** 4 において Run 8-1 と8-2を比較すると，河床構成材料は同じであっても，河床波の有無によって流砂特性が異なり，河床波を有する路床の伝播速度が遅くなっているのがわかる。つぎに，平坦床で河床表面の粒径の違う Run 8-2 と8-3を比較すると，平均粒径が 0.178 cm と 1 オーダー小さい Run 8-3 における流砂の伝播速度が速くなっている。

上述の結果は，砂粒子の流砂過程において，河床波の有無や表面の凹凸の果たす役割の重要性を示すもの

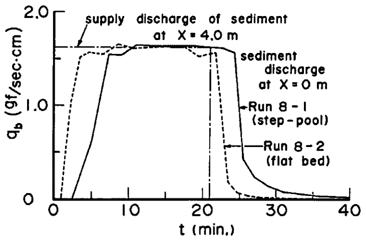


Fig. 4 Sediment discharges transported on the armoured flat bed (Run 8-2) and on the armoured bed with step-pool (Run 8-1).

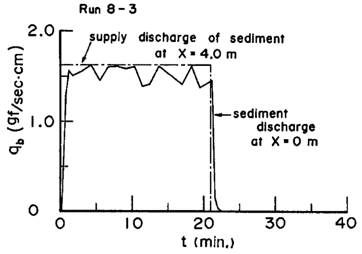


Fig. 5 Sediment discharge transported on the armoured flat bed. The grain size of the armour coat in this case is smaller than that of Run 8-2 shown in fig. 4.

であるが，このような流砂過程の相違は，河床波の crest 下流に形成される剝離領域や，河床表面の粒子間隙への粒子貯留現象に起因するとともに，それに伴う流れの変化に起因していることが推察される。粒子貯留量による流れの抵抗変化を間接的に調べるために，Run 8-1 と8-2において供給砂が定常的に流下している状態，および供給を停止した後流砂がなくなった状態における水面形を示すと **Fig. 6** のようである。これによれば，階段状河床波および平坦床の場合ともに流水の抵抗変化がみられ，いずれも流水抵抗が減少している。この傾向は，階段状河床波においてとくに顕著である。これは流水の抵抗を支配している剝離領域すなわちプールの一部に砂粒子が貯留されるためであろう。

3.2 流砂過程のモデル化

前節の結果に基づけば，アーマ・コート表面の礫の間隙やプール部における流送砂の貯留量の変化は，土

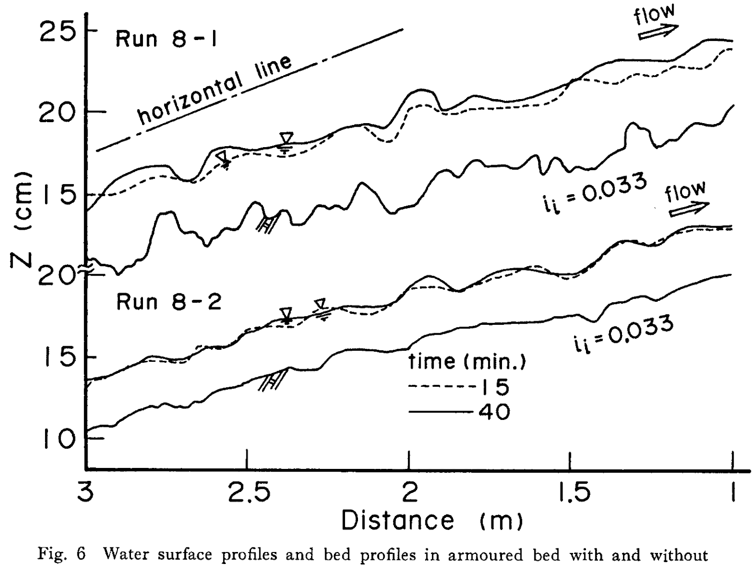


Fig. 6 Water surface profiles and bed profiles in armoured bed with and without step-pool configuration.

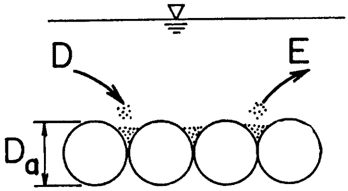


Fig. 7 Sediment transport process on armoured flat bed.

砂流出過程においても重要な役割を果たしていることが理解される。このことに着目して流砂過程のモデル化を試みる。

(1) アーマ・コート平坦床

Fig. 7 は，流送過程にある砂が，礫の間隙に貯留されながら流送される過程を模式化したものである。いま，砂粒子による被覆面積を A_s，平衡流砂が達成され，河床表面が砂粒子に覆われてしまった状態のそれを A_{se} とすれば，単位面積当たりの砂粒子の貯留量 V は，次のように表される。

$$V=\alpha D_a \cdot A_s/A_{se} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，D_a はアーマ・コートの平均粒径，$\alpha D_a A_s$ は，間隙にある砂粒子の量である。ここで間隙の容量として深さ $D_a/2$ の円すい形を考えれば，α は $1/2\times1/3=1/6$ 程度の係数になる。上の関係より，間隙貯留量の時間変化は，次のように表される。

$$\alpha D_a \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{A_s}{A_{se}}\right)=\frac{1}{1-\lambda_p}(D-E) \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，λ_p は砂粒子の間隙率，D, E は単位時間，単位面積当たりの砂粒子の堆積量および侵食量である。一方，流砂量の縦断変化は次式で与えられる。

$$\partial q_b/\partial x=E-D \quad \cdots\cdots(3)$$

E が単位面積当たりの砂粒子存在面積に比例するものとし，砂粒子の離脱率 P_s を用いれば，これは次式のように表示される。

$$E=(k_2/k_3)(A_s/A_{se})dP_s \quad \cdots\cdots(4)$$

ここに k_2, k_3 は砂粒子の形状係数で粒子が球形の場合には，$k_2=\pi/4,\ k_3=\pi/6$ である。d は流砂過程にある砂粒子径である。また，D は，その地点の流砂量 q_b に比例し step length Λ に反比例するものとすれば，

$$D=q_b/\Lambda \quad \cdots\cdots(5)$$

のように表わされる[5,6]。ここで，式(4)，(5)を式(2)，(1)に代入した後次のような諸量を導入する。

$$\left.\begin{array}{l} t=\sqrt{d/\{(\sigma-1)g\}}\,t',\ x=\Lambda x' \\ A_s=A_{se}A_s',\ q_b=q_{be}q_b' \end{array}\right\} \quad \cdots\cdots(6)$$

ここに，σ は砂粒子の水中比重，A'_s は流砂過程にある砂粒子による表面被覆率である。さらに，

$$\Lambda=\Lambda' d \quad \cdots\cdots(7)$$

$$q_{be}=(k_3/k_2)P_s\Lambda' d^2 \quad \cdots\cdots(8)$$

として，式(2)，(3)を変形すれば，被覆率および無次元流砂量についてそれぞれ次式を得る。

$$\frac{\partial A_s'}{\partial t'}=\frac{k_3}{k_2}\frac{\sqrt{d/\{(\sigma-1)g\}}}{(1-\lambda_p)\alpha}\left(\frac{d}{D_a}\right)P_s(q_b'-A_s') \quad \cdots\cdots(9)$$

$$\frac{\partial q_b'}{\partial x'}=A_s'-q_b' \quad \cdots\cdots(10)$$

P_s に関して，中川・辻本の結果[7]を用いると，式(9)は次のようになる。

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{\partial A_s'}{\partial t'}=K_a(q_b'-A_s') \\ K_a=\dfrac{k_3}{k_2}\dfrac{F_0}{(1-\lambda_p)\alpha}\left(\dfrac{d}{D_a}\right)\tau_*\left(1-\dfrac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^3 \end{array}\right\} \quad \cdots\cdots(11)$$

ここに，τ_* は d に関する無次元掃流力，F_0[7] は0.030～0.035の値をもつ係数である。式(10)，(11)より q_b' および A_s' に関する微分方程式（双曲型）がそれぞれ，次式のように得られる。

$$\frac{\partial^2 q_b'}{\partial x'\partial t'}+\frac{\partial q_b'}{\partial t'}+K_a\frac{\partial q_b'}{\partial x'}=0 \quad \cdots\cdots(12)$$

$$\frac{\partial^2 A_s'}{\partial x'\partial t'}+\left(1-\frac{1}{K_a}\frac{\partial K_a}{\partial x'}\right)\frac{\partial A_s'}{\partial t'}+K_a\frac{\partial A_s'}{\partial x'}=0 \quad \cdots\cdots(13)$$

式(13)において，$1/K_a \cdot \partial K_a/\partial x'$ は，一般に1に比較すると微小量であり，

$$1-\frac{1}{K_a}\frac{\partial K_a}{\partial x'}\doteqdot 1 \quad \cdots\cdots(14)$$

として差しつかえないものと思われる。

なお，式(12)，(13)によれば，K_a は流砂の伝播速度を支配するパラメータであることが明らかであって，式(11)を合わせ考えると，τ_* が大きい程，また，d/D_a が大きい程，流砂の伝播が速いことが理解される。

(2) 階段状河床

階段状河床においては，流水が剝離する領域すなわちプール部の砂粒子貯留と，いわゆる平坦床とみなされる領域における粒子間隙貯留を考える必要がある。**Fig.** 8 はこのような河床の i 番目の階段状河床波における砂粒子の流送過程を模式的に示している。図において区間 λ_2 における流砂過程は，上述のアーマ・コート平坦床のモデルによって表わされる。したがって，ここではプール部の区間 λ_1 についえ考える。いま，プール部の貯留量を V_i，流入量を q_{bi}，流出量を q^0_{bi} とすれば，貯留量の変化は次式で与えられる。

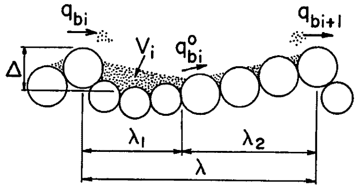


Fig. 8 Sediment transport process on step-pool bed form.

$$\frac{\partial V_i}{\partial t}=\frac{1}{1-\lambda}(q_{bi}-q^0_{bi}) \quad \cdots\cdots(15)$$

ここで，砂粒子 d がプールを埋めてしまい，流砂量が平坦床のそれに等しくなると考えたときの仮想的なプール貯留量の概念を導入して，これを平衡貯留量 V_{ei} と呼ぶことにすれば，q^0_{bi} は現在貯留量，平衡貯留量および平衡流砂量に依存するものと考えられる。これに関する厳密な考察が必要なところであるが，ここでは，最も単純な関数を仮定して，q^0_{bi} が次式のようにおけるものとする。

$$q^0_{bi}=(V_i/V_{ei})q_{be} \quad \cdots\cdots(16)$$

ここで，$V_i=V_{ei}V_i'$，$q_b=q_{be}q_{bi}'$，$q^0_{bi}=q_{be}q^{0'}_{bi}$ として，式(15)を無次元化すれば次式のようになる。

$$\frac{\partial V_i'}{\partial t'}=K_p(q_{bi}'-V_i'),\quad K_p=\frac{q_{be}}{V_{ei}(1-\lambda_p)}\sqrt{\frac{d}{(\sigma-1)g}} \quad \cdots\cdots(17)$$

上式において，V_{ei} は一次的には，プール部の幾何学的な貯砂容量に依存するものと思われる。さらに，この貯砂容量は，剝離領域の容積と密接な関係があることが予想される。そこで，ステップによる流水の剝離領域の長さを $a\Delta$ として，V_{ei} を次式で与えるものとする。

$$V_{ei}=(k/2)a\Delta^2 \quad \cdots\cdots(18)$$

ここに，k は1に近い係数である。

以上，プール部における流砂過程が議論されたので，アーマ・コートの発達した階段状河床波上においては，式(17)と平坦床における式(12)を組み合わせることによって流砂の伝播過程が議論できる。すなわち，任意の地点における流砂量の時間変化に関する議論が可能である。

3.3 計算値と実験値の比較

上述のモデルを適用していくためには，プール部における貯留量や砂粒子間隙における粒子貯留量の変化に応じた掃流力の推定など，今後に究明しなければならない問題が多く残されている。ここでは，掃流力に関しては，村本・河田・布村の研究[8] などを参考にして，相当粗度 k_s を被覆率 A_s' の関数と考えて，次式

でこれを推定する。

$$\left.\begin{aligned} \frac{v}{u_*}&=6.0+2.5\ln\frac{\bar{h}}{k_s} \\ k_s&=(1-A_s')D_a+A_s'd \end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(19)$$

ここに，$\bar{h}$ は平均水深である。さらに，計算に必要な掃流力以外の諸量として，$k_3/k_2=2/3$，$F_0=0.035$，$\lambda_p=0.4$，$\alpha=1/6$ などを用いるとともに，階段状河床波の波長 λ，波高 Δ には，実験値に基づいて $\lambda=30$ cm，$\Delta=3$ cm とし，プールの平衡貯留量は，$V_{ei}=22.5\,\mathrm{cm}^2$ (∵ $k=2$, $a=2.5$) とする。

Fig. 9 は，階段状河床波 (Run 8-1) および平坦床 (Run 8-2) における下流端流砂量に関する実験値と計算値を比較したものである。さらに，**Fig.** 10 においてはアーマ・コートの粒径の小さい Run 8-3 の結果と計算値を比較している。**Fig.** 9 の図中には，参考のため $x=1, 2, 3$ m 地点の流砂量変化に関する計算値も示さ

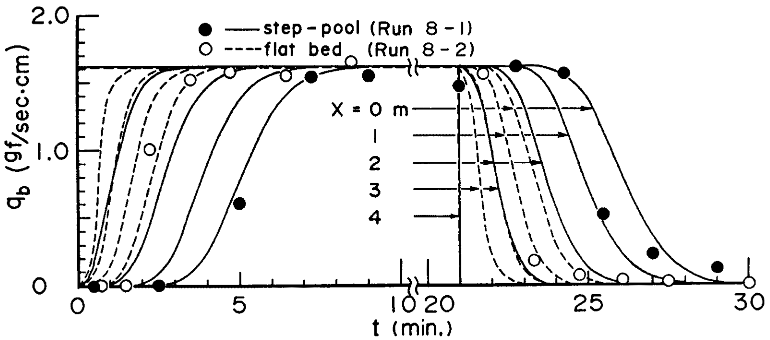


Fig. 9　Comparison between sediment discharges at downstream end. Black and open circles are data from experiments, and on the other hand curves are simulated from the present theory.

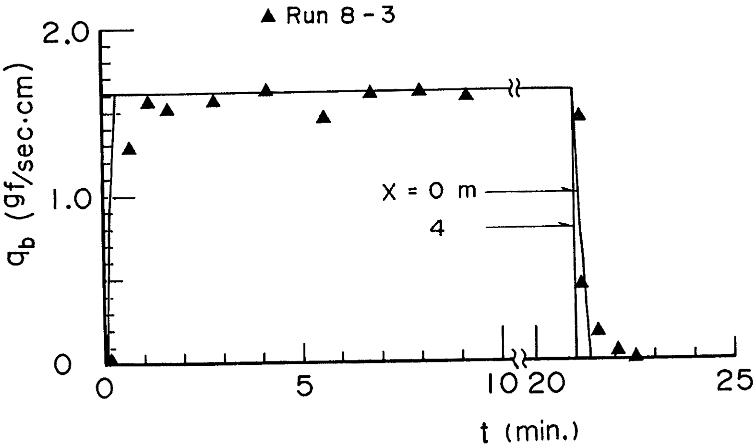


Fig. 10　Comparison between sediment discharges at downstream end. In this case the particle size of armoured flat bed is smaller than that of Run 8-2 shown in Fig. 9.

れている。これらの図において，$x=0$ m 地点すなわち下流端流砂量に関する計算値と実験値を比較すると，両者はかなりよく一致しており，現状では十分に満足すべき結果が得られているようである。

4. 形成，破壊・変形過程における流砂特性と破壊・変形条件

4.1 流砂特性

階段状河床波の形成および破壊・変形過程における流砂特性を調べるために，それぞれ6ケースの実験を行っている。ここでは，形成過程については Run 3-1, 破壊・変形過程については Run 3-2 のデータに着目して流砂特性を調べてみよう。**Fig. 11** には，それぞれの実験における最終状態の水位と河床位を示し，**Fig. 12**(a), (b) には流砂量と流砂径，および **Fig. 13, 14** には流砂の粒度分布が示されている。

Run 3-1 のデータに着目すれば，**Fig. 11** に示すように，河床低下のために，勾配は，$i_i=0.10$ から $i_e=0.055$ まで低下する。このとき，河床表面には顕著な階段状河床波が形成されている。この過程において，**Fig. 12(a)** にみられるように，通水初期に流砂量は最大値を示し，その後，変動しながら次第に逓減していき，大規模河床低下の終了する17～18分以後において，流砂量はさらに小さくなる。ここで，大規模河床低下の終了時点は，固定点における水位の連続記録に基づいて判定している。**Fig. 13** によれば，大規模変動が起こっている間においては，流砂の粒度分布は初期河床材料（材料A）のものと大差なく，この周辺で変

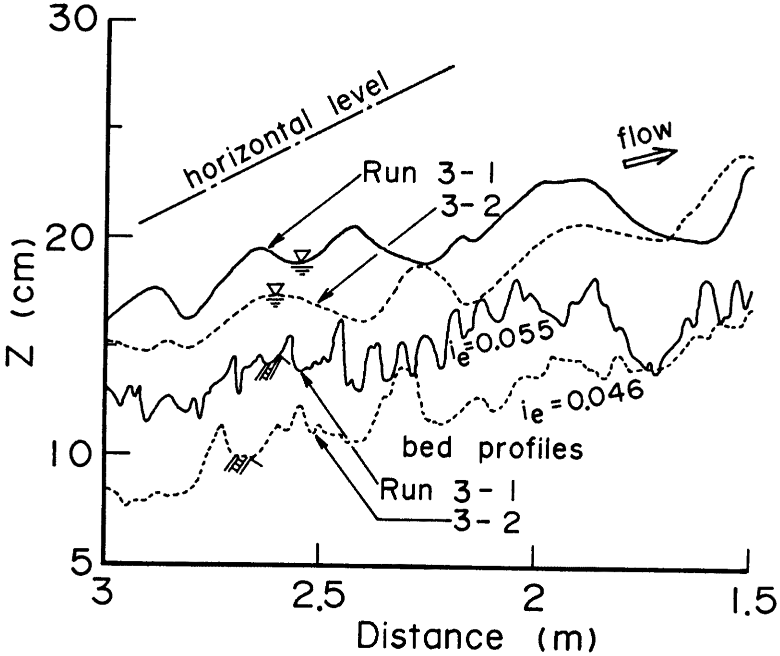
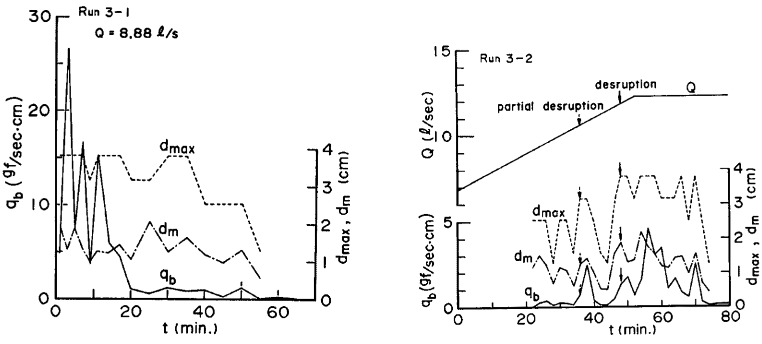


Fig. 11 Bed and water surface profiles appeared in the final stages of armouring processes. The profiles of Run 3-1 shows the final stage in the formative process of step-pool bed form, and on the other hand those of Run 3-2 indicates the final stage in the recreating process after the destruction of armour coat in Run 3-1.



(a)　　(b)

Fig. 12 (a), (b)　Changes of sediment discharge, meam and maximum diameters in transported materials.

動するが，20分以後，材料Aよりも小さくなっていくのが理解される。このような傾向は，**Fig. 12(a)** の流出砂礫の最大径の逓減傾向とも一致している。

つぎに，破壊・変形過程における流砂特性についてみてみよう。**Fig. 12(b)** の流砂量および流砂の最大径についてみれば，流量が小さい間は，河床材料の移動はみられないが，Run 3-1 において分級現象の終了した 8.88 l/s を少し越えた時点から流砂が始まっている。流量がさらに増加し，通水後36分，流量にして 10.5 l/s 程度になったとき，最も弱いと思われる河床波の一部が破壊し，流砂が瞬間的に増加している。この時点における流砂の最大径をみると，これは 3.18 cm 程度であって，まだアーマ・コートを構成している最大径の礫の移動はみられない。流量がさらに増加し Q=11.48 l/s (48分) 程度になると，流砂量は変化しながら急激に増加し，流出砂礫にも最大径の礫が含まれるようになり，流砂の平均粒径もかなり大きくなっていることが理解される。この時点においては，ステップを構成しているもののうち，かなりの部分が移動し，あるものは下流側のステップに捕獲されて停止し，再びステップの構成要素となるか，あるいは，下流端まで流出してしまうものもある。この時点において流出する砂礫は，河床表面を構成しているもののみに限られるため，流砂の平均粒径は大きくなっている。その後，実験は，通水流量を一定に (Q=12.24 l/s) して，

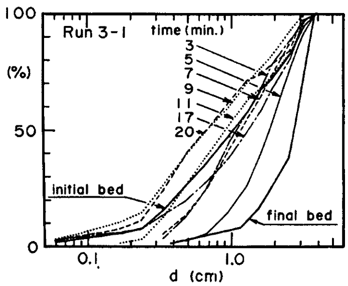


Fig. 13　Changes of sediment particle size in the formative process of step-pool bed form.

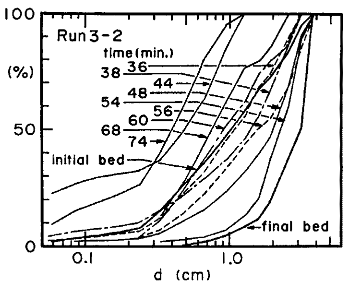


Fig. 14　Changes of sediment particle size in the recreating process of step-pool bed form.

再び河床が安定するまで継続されている。そのため，50分から70分の間では，流砂運動も比較的活発である。**Fig. 11** の最終河床形からも理解されるように，図示の範囲における河床低下量は，アーマ・コートの平均粒径ないし最大粒径程度になっている。このような砂礫の移動のため，最終状態にみられる階段状河床波は元の形状を大きく変えて，新たな形状特性値を示している。なお，本実験における移動床区間長は6.6mであり，図示の区間の上流側の河床低下量はもう少し大きくなっている。しかし，河床低下が大きく起こり，低下の過程において，河床波の消滅する常流条件が達成されるまでには至っていない。

つぎに，**Fig. 14** に示す流砂の粒度分布をみると，局所的な破壊・変形が起こるような条件（36分，44分）では，最大礫は移動していないため，粒度構成は粗くならない。ところが，最大礫が移動する時点になると，アーマ・コート全体の材料が移動するため，一時的に粒度分布は粗くなっている。その後，河床が安定するまでの過程においては，**Fig. 13** の場合と同様の変化がみられる。

4.2　破壊・変形条件

階段状河床波の破壊・変形過程における流砂現象を理解していくためには，破壊・変形がどのような条件で起こるのかを調べておく必要がある。なぜならば，前節に示す結果にも見られるように，流量がその階段状河床波の形成流量を越えても河床波は安定であって，この間，流砂量も少なく，流量がさらに増加して河床波の破壊が始まると，流砂量が急激に増加するような現象が起こるからである。ここで，前節の考察より，ステップを構成する最大礫の移動開始をもって階段状河床波の破壊が始まると考えるのは妥当であり，これを破壊・変形条件とみなし，以下の議論を行う。

Fig. 15 は，形成流量と破壊・変形流量の違いをみるため，Run 1-1～6-1 における形成流量 Q_1 と，これに対応する Run 1-2～6-2 における破壊・変形流量の実測値 Q_{cmeas} とを比較したものである。図の結果によれば，Q_{cmeas} は Q_1 よりもかなり大きくなっており，破壊・変形は，形成流量よりもかなり大きいところで起こることが分かる。このような傾向は，形成流量 Q_1 が大きいほど顕著になっている。これは，形成時において，河床表面にアーマ・コートが形成されるが，アーマ・コートの粒度分布は Q_1 が大きいほど一様分布に近くなることに起因するものと思われる。

形成流量に対する破壊・変形流量の予測法について検討しよう。これを議論していくためには，階段状河床波表面における掃流力の縦断分布，およびアーマ・コートの移動限界に関する知見が必要である。掃流力の縦断分布については，これまで殆ど研究例は見当たらず，これに関する知識の蓄積が必要であるが，著者らが行った人工階段河床波上における掃流力分布の測定例[9]を示すと **Fig. 16** のようである。これは，全区間射流域の測定例であり，図には河床形状，水面形状，水流の再付着点および河床波の波長 λ，波高 Δ，および粗度として使用されたビー玉の直径も示されている。これによれば，再付着近傍において掃流力は0か負の値を示し，これより下流域では，crest へ向かってほぼ直線的に増加している。この例を参考にして，階段状河床波上における掃流力の分布を **Fig. 17** のように考えてみよう。すなわち，crest 下流の剝離領域の平均掃流力は τ_Δ であり，再付着点から crest の区間では図の破線で示すように直線分布を考え，その平均値を τ_s とする。しかも，τ_s は対数型抵抗則で与えられるものとする。このように考えれば，

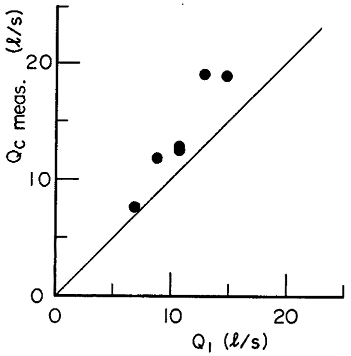


Fig. 15　Comparison between the critical discharges for the destruction of the bed form. Q_{cmeas} indicated the critical discharge above which the destruction of armour coat occurs. The armour coat is formed under the flow condition of constant discharge, Q_1.

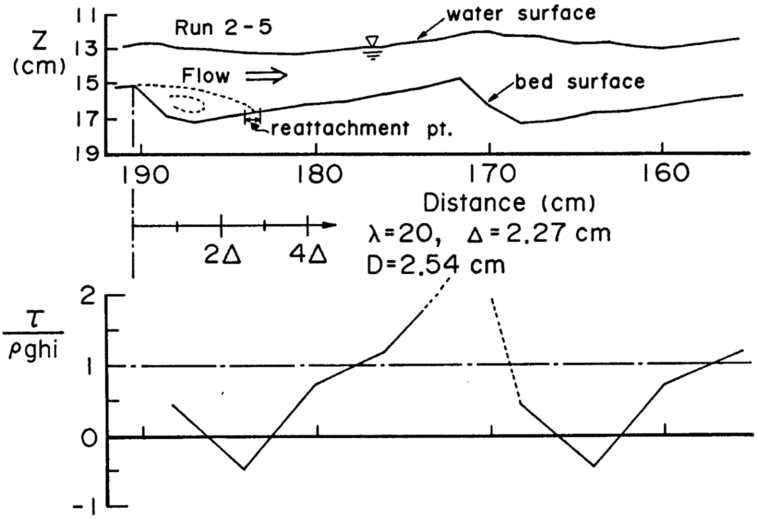


Fig. 16 Shear stress distribution on an artificial step-pool bed surface.

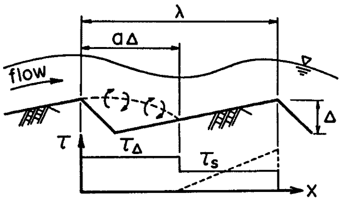


Fig. 17 Schematics of shear stress distribution along the step-pool bed surface.

crest における掃流力は，τ_s の2倍となる。したがって，ステップ頂部における摩擦速度 u_{*step} は次のようにあらわされる。

$$u^2_{*step}=\frac{2v^2}{\{6.0+2.5\ln(h/D_a)\}^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

ここに，h は平均水深，D_a はアーマ・コートの平均粒径，v は平均流速である。

ステップを構成する最大礫 D_{max} の移動限界については，アーマ・コートを構成する混合砂礫のうちの最大礫の移動限界を考えることにし，一般の混合砂礫床の移動限界予測のためによく適用されている Egiazaroff の式[10]を使うことにすれば，これは次式で与えられる。

$$\frac{u^2_{*cDmax}}{u^2_{*cDa}}=\left\{\frac{\log 19}{\log\left(19\cdot\frac{D_{max}}{D_a}\right)}\right\}\frac{D_{max}}{D_a} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

ここに，u_{*cDa} はアーマ・コート平均粒径 D_a に関する限界摩擦速度である。

破壊・変形流量を知るためには，上述の条件以外に，階段状河床波における流水抵抗の推定式も必要である。これに関しては，著者ら[9]による次式を採用しよう。

$$f=f_\Delta\frac{a\Delta}{\lambda}+f_s\left(1-\frac{a\Delta}{\lambda}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

ここに，$a\Delta$ は，それぞれ剝離長，λ は波長，f_Δ, f_s は剝離域の抵抗係数および再付着点と crest 区間の抵抗係数である。これらはそれぞれ次式のようである。

$$f_\Delta=4KE\Delta/h \quad (K=6,\ E=0.08) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(23)$$

$$f_s=8/\{6.0+2.5\ln(h/Da)\}^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

掃流力の分布などに若干大胆な扱いを行っているが，以上の方法によれば，階段状河床波の破壊・変形流

量の予測が可能である。**Fig. 18** は，Run 1-2～Run 6-2 の破壊・変形流量に関し，式(20)～(24)を適用して算定される流量 Q_{cpre} と実測値 Q_{cmeas} を比較したものである。図より明らかなように，両者はかなりよく一致しており，この方法は，階段状河床波の破壊・変形流量をかなり的確に評価しているものと思われる。

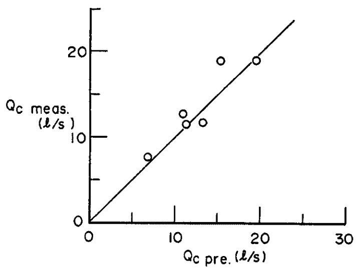


Fig. 18 Comparison between the critical flow discharges, which are predicted from the present method and obtained from experiments, respectively.

5. 結 語

本研究においては，アーマ・コートの発達した階段状河床波上における供給砂の伝播過程，ならびに階段状河床波の形成，破壊・変形過程における流砂過程と破壊変形条件に関する実験的，理論的研究を行った。本研究によって得られた成果を要約すれば次のようである。

(1) アーマ・コートの発達した階段状河床波ならびにアーマ・コートのみを有する平坦床における流砂の伝播に関する実験を行い，階段状河床波上においては，プール部における砂粒子の貯留やステップ背面における河床表面の間隙における砂粒子貯留現象が流砂の伝播過程を支配していることが示された。さらに，河床表面材料の異なる2ケースの平坦床実験から，表面を構成する材料が大きいほど，すなわちアーマコートの粒径が大きいほど，砂粒子貯留容量が大きくなり，砂粒子の伝播速度は遅くなることが示された。

(2) 上述のような流砂の伝播過程をモデル化するため，まず平坦床については，砂粒子による表面被覆率の概念を導入し，これをもとにして表面被覆率および流砂量分布に関する表示式を導いた。階段状河床波に関しては，平衡貯留量の概念を導入することによって，プール貯留量の表示式を導き，これと平坦部の伝播モデルを合成することによって，流砂量分布の推定式を導いた。これらの式は，実験によってその妥当性が確認されている。

(3) 階段状河床波の形成過程，破壊・変形過程における流砂特性について実験的検討を行った。形成過程においては，多くの研究者によって一般に認められている流砂特性を示し，破壊・変形過程においては，流砂量が急激に増加し，その粒径も大きくなることが示された。

(4) 階段状河床波の破壊・変形は，ステップを構成する最大礫の移動によって起こり，そのときの流量，すなわち破壊・変形流量は，形成流量よりもかなり大きいことが判明した。その原因として，階段状河床波の形成過程におけるアーマ・コートの形成，およびその粒度分布の一様化に伴う砂礫の移動限界の増加を考えた。ついで，階段状河床波上における掃流力の縦断分布を仮定して，破壊・変形流量の予測法を提案し，その妥当性が実験的に検証された。

以上，階段状河床波と流砂現象との関連性について，興味あるいくつかの知見が得られたが，河床波上におけは掃流力分布の問題など，いくつかの大胆な仮定のもとに議論を行っている部分もある。今後，こうした面の再検討を行うとともに，3章において提案している流砂モデルの一般化を図るつもりである。

本研究を進めるに当たり，文部省科学研究費の補助を受けている。さらに，実験その他で京都大学防災研究所吉田義則技官に御協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) 芦田和男・江頭進治・安東尚美：階段状河床の発生機構と形状特性，京大防災研究所年報，27号B-2, 1984, pp. 341-353.

2) 芦田和男・江頭進治・沢田豊明・西本直史：山地河道における階段状河床波の構造，京大防災研究所年報，28号B-2, 1985, pp. 325-335.

3) 江頭進治・芦田和男・西本直史：階段状河床波と流砂の挙動，30回水理講演会論文集，1986，pp. 223-228.
4) 芦田和男・江頭進治・西野隆之：階段状河床波上の流れの構造，京大防災研究所年報，29号B-2 pp. 391-403.
5) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂礫床の侵食と流砂機構，17号B-2，pp.
6) 芦田和男・江頭進治・加本　実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1)，25号B-2，1982，pp. 348-360.
7) 中川博次・辻本哲郎：水流による砂礫の移動機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，206号，1972，pp. 59-69.
8) 村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦：砂礫河川の掃流砂に関する基礎的研究，京大防災研究年報，20号B-2，1977，pp. 451-474.
9) 江頭進治・芦田和男・西野隆之：階段状河床波の流水抵抗と掃流力分布，土木学会，41回全国大会，II，1986.
10) Egiazaroff, I. V： Calculation of Non-uniform Sediment Cencentration, Proc. ASCE, Vol. 91, No. Hy 4, 1965, pp. 225-247.