

階段状河床波と流砂の挙動
THE ROLE OF STEP-POOL BED FORM IN SEDIMENT TRANSPORT

京都大学 防災研究所 正 江 頭 進 治
京都大学 防災研究所 正 芦 田 和 男
京都大学 大学院学 西 本 直 史

1. 緒 言

山地部においては、勾配が大きく、かつ河床材料の粒度組成が広範な広がりをもつため、沖積地河道にはみられない様々な現象が現われる。いま、掃流砂と浮遊砂の問題のみに限定してみても、これらは、上流域や溪岸領域における土砂の供給条件に依存したり、あるいは、アーマ・コートの形成・破壊のプロセスに支配されることが多い。さらに、アーマ・コートの形成・破壊は、一般には階段状河床波の形成・破壊を意味している。そのため、山地部河道における流砂量とその質的变化の機構は極めて複雑になっている。

山地部における流砂現象を解明するためには、階段状河床波と流砂の問題を究明することが不可欠である。著者らは^{1), 2)}、このような観点からこの問題の究明に努めてきているが、これまでに階段状河床波の形成条件や形状特性値などに関する知見を得ている。本研究は、これらの次の段階として、河床波の破壊は、どのような条件で起こるのか、また、破壊・変形に伴う流砂の挙動はどのような機構に支配されるのか、さらには、流砂が上流域の土砂供給条件のみに依存するような現象を想定し、河床波の破壊が起こらないような条件では、流砂がどのように伝播するのかといった問題について考察したものである。

2. 実 験

実験は、深さ 40 cm、長さ 12 m、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固定されており、一方は最大幅 100 cm まで任意に調節できるようにされているが、ここでは水路幅を 27.5 cm に設定している。流量は自動制御装置を用いて任意に調節され、給砂は、独自に設計・製作した装置を用いて行われた。実験に用いた材料の粒度分布は、図-1 に示すもので、材料 A の最大径 3.81 cm、平均粒径 1.31 cm、 $\sqrt{D_{84}/D_{16}} = 2.77$ のようである。一方、材料 B は、給砂用材料として用いたもので、最大径 0.12 cm、平均粒径 0.063 cm、 $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.32$ のようである。

表-1 は、各実験ケースの条件を示したものである。Run 1-1、2-1 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、給砂なし、かつ図-2 の case 1 のような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。なお、これらにおいては、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 は、それぞれ 1-1 および 2-1 で形成された河床波の破壊・変形条件と破壊・変形過程の流砂機構を調べるために行ったものである。これらの実験では、流量は図-2 の case 2 のように与えられ、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替え、河床砂礫の移動がなくなるまで給水を継続している。したがって、これらの通水においても大規模河床変動が起こり、アーマ・コートの粒度分布も変化することになる。ちなみに、表中の i_i, i_o はそれぞれ通水初期および最終状態の河床勾配で、 D_o は使用砂の平均粒径、 D_a は最終状態におけるアーマ・コートの平均粒径である。

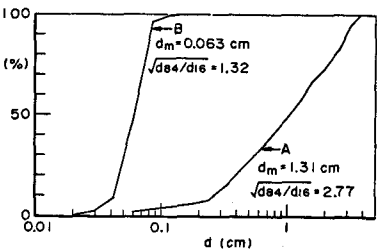


図-1 実験用材料

表-1 実験条件

Run No.	Q (l/sec)	i_i	i_o	used sand	D_o (cm)	D_a (cm)
1-1	8.88	0.100	0.055	A	1.31	2.65
1-2	6.90 - 12.24	0.055	0.046	A		2.41
2-1	14.78	0.060	0.042	A	1.31	2.57
2-2	12.78 - 19.68	0.042	0.026	A		2.49
3-1	11.82	0.033	---	A	1.31	2.63
3-2	8.88	0.033	---	A		2.63
3-3	5.90	0.033	---	A		2.63
3-4	11.82	0.013	---	A		2.63
3-5	8.86	0.013	---	A		2.63
3-6	5.92	0.013	---	A		2.63
3-7	11.82	0.003	---	A		2.63
3-8	8.86	0.003	---	A		2.63
3-9	5.92	0.003	---	A		2.63
4-1	5.90	0.033	---	A, B		2.63
4-2	5.92	0.033	---	A, B		2.63

Run 3-1 ~ 3-9 は、 $Q = 11.82 \text{ l/s}$ 、初期勾配 0.08 の条件で形成された河床形を対象にして、河床波上の流水抵抗を調べるために行ったものである。Run 4-1 および 4-2 は、安定な階段状河床波やアーマ・コート有する河床上の流砂過程を調べるために行った実験である。これらの実験における初期河床の条件は、 $Q = 11.82 \text{ l/s}$ 、初期勾配 0.08 の条件のもとで作られた階段状河床である。Run 4-1 では、水路下流端から 4 m の地点において、図-2 の Q_s のように材料 B を給砂し、下流端流砂量が調べられている。一方、Run 4-2 は、階段状河床波のステップ部分を押し込んで滑らかにした後、4-1 と全く同じ条件で行われている。なお、以上の実験においては、可能な範囲において水位、河床位、流砂量、流砂の粒度分布、塩分法に基づく流速測定、最終状態における河床表面の粒度分布などの測定を行っている。

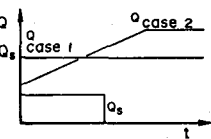


図-2 給水・給砂条件

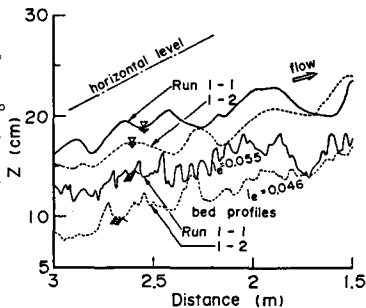


図-3 最終状態の水位・河床位

3. 形成および変形過程における流砂特性

3.1 流砂の変動特性

Run 1-1 および 1-2 のデータに基づいて階段状河床波の形成過程および破壊・変形過程における流砂特性を調べてみよう。図-3、図-4(a)、(b) および 図-5(a)、(b) は、それぞれ水位と河床位、流砂量と流砂径および流砂の粒度分布などを調べたものである。まず、Run 1-1 のデータに着目すれば、図-3 に示すように、河床低下のため勾配は $i_e = 0.10$ 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。この過程において図-4(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通減していき、大規模河床低下の終了する 17 ~ 18 分以後では、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。図-5(a) によれば、大規模変動が起きている間は、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、図-4(a) の流出砂礫の最大径の通減傾向とも一致している。

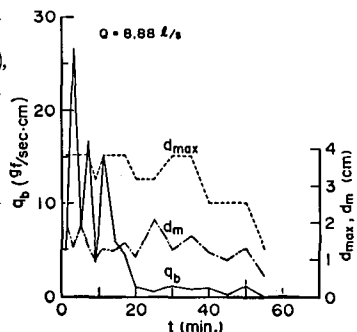


図-4(a) 流砂量 (Run 1-1)

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。図-4(b) の流砂量、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 1-1 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 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、 $Q = 11.48 \text{ l/s}$ (48 分) 程度になると、流砂量は変動しながらも増加し、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 ($Q = 12.24 \text{ l/s}$) にして、再び河床が安定するまで継続

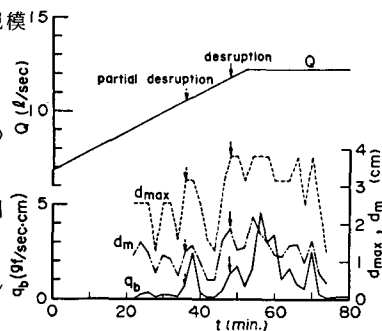


図-4(b) 流砂量 (Run 1-2)

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。図-3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・コートの平均粒径から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6.6 m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常流条件が達成されるまでには至っていない。

つぎに、図-5(b)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、最大の礫は移動していないため、粒度構成は粗くはならない。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、図-5(a)の場合と同様の変化がみられる。

3.2 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考察する上では、どのような条件において河床波の破壊が始まり、河床形全体が変形するのかを明確にしておく必要がある。そのためには、河床波上の流れの抵抗に関する知見が必要である。まず、抵抗評価に関する大まかな見通しを得ておこう。図-6は、各ケースの最終段階における水位と河床位の測定から得られた抵抗係数を示したものである。これによれば、階段状河床波を伴う流れの粗度は、 $k_s = (4 \sim 5) D_a$ (D_a : アーマ・コートの平均粒径)程度になっている。一方、アーマ・コートの砂粒粗度を見積もるため、ステップを砂層の中へ押し込み河床を滑らかにした場合のものをみると、図示のように、 $k_s \div D_a$ 程度になっている。前報で報告したデータについても $k_s \div D_a$ 程度の値が得られていることから考えて、階段状河床波の表面粗度は

$$k_s \div D_a \dots\dots\dots (1)$$

程度に推定されるものと思われる。

前節の考察に基づけば、アーマ・コートの最大礫が移動するような条件になると、ステップは一時的に破壊され、次に現われる階段状河床波の形状特性値は、元の河床形のものとはかなり異なっていることが判明している。したがって、破壊・変形の条件として、元の河床表面におけるアーマ・コートの最大礫の移動開始に相当するものを考えるのが妥当であろう。そこで、それぞれ次に示すような流水の連続式、式(1)に基づく対数則、および Egiazaroff の式⁸⁾による最大礫の移動限界式、

$$q = vh \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{v}{u_{*c}} = 6.0 + 5.75 \log \frac{h}{D_a} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{u_{*c}^2 D_{a \max}}{u_{*c}^2 D_a} = \left\{ \frac{\log 19}{\log 19 D_{a \max} / D_a} \right\}^2 \frac{D_{a \max}}{D_a} \dots\dots (4)$$

を用いて破壊・変形の流量を推定してみる。この方法によれば、破壊・変形の限界流量の実験値に対する推定値は次のようになる。Run1-2: $Q_m = 11.85 (\ell/s) \rightarrow Q_c = 14.29$; Run2-2: $Q_m = 19.68 \rightarrow Q_c = 19.92$ のようになる。ここに、 Q_m : 実測流量、 Q_c : 推定流量である。流れの抵抗、特に河床せん断力の問題に

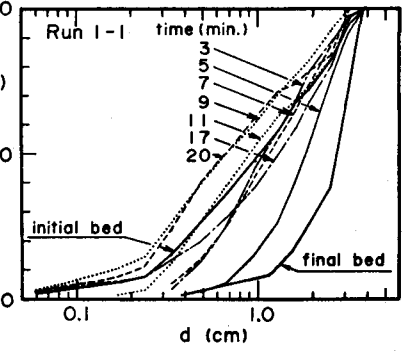


図-5(a) 流砂の粒度分布 (Run 1-1)

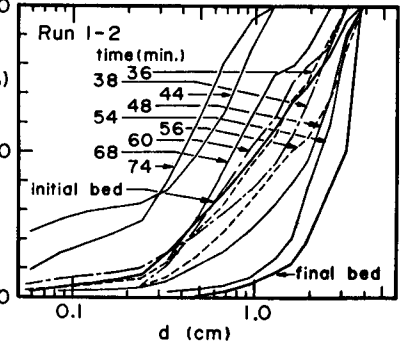


図-5(b) 流砂の粒度分布 (Run 1-2)

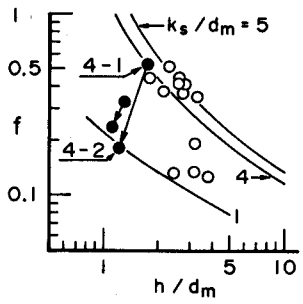


図-6 抵抗係数

については、もう少し詳細な検討が必要ではあるが、先の方法は、破壊・変形の限界流量をほぼ適切に評価しているようである。なお、破壊・変形の限界流量が、対象となる河床波の形成流量を大きく越えているのは注目に値する。これは、初期粒度分布とアーマ・コートの粒度分布に大きな違いがあるからである。

4. 砂粒子の流砂過程

4.1 流砂過程の概要

図-7は、Run 4-1、4-2における流出土砂量の時間変化を示している。図示のように、河床波の有無によって、流出特性が異なり、河床波を有する路床の伝播速度が遅くなっているのが分かる。図-8は、2つの実験における河床形を示すとともに、河床表面に流砂がない場合の水位（図-7の40分）および流砂の縦断分布がほぼ一様に分布（図-7の15分）しているときの水位に示したものである。2つのケースとも、流水抵抗は流砂の有無によってかなり影響を受けているのがわかる。特に階段状河床波の場合には顕著である。これは、流出過程にある砂が、アーマ・コート砂礫の間隙を埋めながら流送されたり、プール部に一部貯留されることによって、流水抵抗が減少するためである。

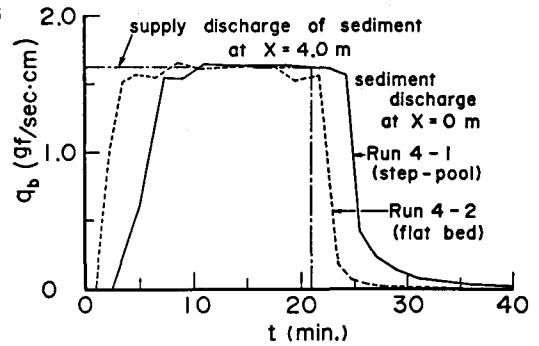


図-7 下流端流砂量の時間変化

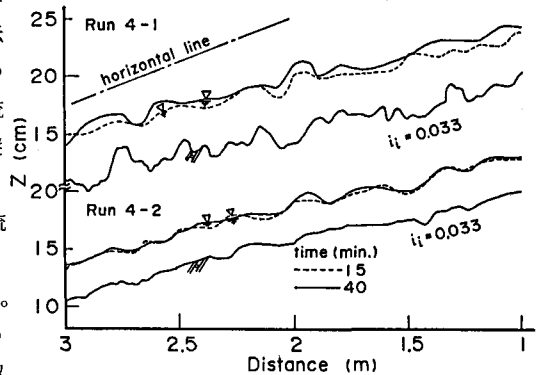


図-8 流砂の有無による水位の変化

下流端流砂量の変化特性は、アーマ・コート砂礫床の粒子間隙の粒子貯留やプール部における貯留過程の結果として、また、流水の抵抗変化の結果として現われていることが予想される。一例として、流砂によるアーマ・コート砂礫床の被覆状態の時間的変化を示すと写真-1のようである。これは、給砂時間を4分として、他は Run 4-2 と同じ条件で行われた実験において水面上方より撮影されたものである。写真で白く見える部分は、上流より給砂された砂である。

4.2 流砂過程のモデル化

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、土砂流出過程において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出過程のモデル化を試みる。まず、アーマ・コートの発達した河床における砂粒子の伝播を考える。図-9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、礫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、 $V = \alpha D_a A_s / A_{se}$ のように表わされる。したがって、間隙貯留量の時間変化は、

$$\alpha D_a \partial (A_s / A_{se}) / \partial t = (D - E) / (1 - \lambda) \quad (5)$$

のようになる。ここに、 D, E : 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。

$$\partial q_b / \partial x = E - D \quad (6)$$

E は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、

$$E = (k_3 / k_2) \cdot (A_s / A_{se}) d P_s \quad (7)$$

のように表わされる。ここに k_2, k_3 : 形状係数で粒子が球形の場合には $k_2 = \pi/4$, $k_3 = \pi/6$, d : 砂粒子径である。 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るれば、

$$D = q_b / A \quad \dots\dots\dots (8)$$

のように表わされる。ここで、式(7)、(8)を式(5)、(6)に代入した後、次のような諸量を導入する。

$$t = \sqrt{d/(\sigma-1)g} t', \quad \alpha = \lambda x', \quad A_s/A_e = A'_s, \quad q_b = q_{be} q'_b \quad \dots\dots\dots (9)$$

さらに、

$$A = A'd \quad \dots\dots\dots (10) \quad q_{be} = (k_3/k_2) p_s A'd^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

として、式(5)、(6)を変形した後、これらを無次元表示すれば、それぞれ、

$$\frac{\partial A'_s}{\partial t'} = \frac{k_3}{k_2} \frac{\sqrt{d/(\sigma-1)g}}{(1-\lambda)\alpha} \left(\frac{d}{D_a} \right) p_s (q'_b - A'_s) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\partial q'_b / \partial x' = A'_s - q'_b \quad \dots\dots\dots (13)$$

のようになる。 p_s に関して中川・辻本⁴⁾の結果を用いて、さらに変形すれば、無次元被覆率 A'_s および無次元流砂量 q'_b に関する次式(双曲型)を得る。

$$\frac{\partial^2 A'_s}{\partial t' \partial x'} + \frac{\partial A'_s}{\partial t'} + K_a \frac{\partial A'_s}{\partial x'} = 0 \quad \dots\dots\dots (14) \quad \frac{\partial^2 q'_b}{\partial t' \partial x'} + \frac{\partial q'_b}{\partial t'} + K_a \frac{\partial q'_b}{\partial x'} = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$K_a = \frac{k_3}{k_2} \frac{F_o}{(1-\lambda)\alpha} \left(\frac{d}{D_a} \right) \tau_* \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right)^3, \quad (F_o = 0.03 \sim 0.035) \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 $\tau_* : d$ に関する無次元掃流力である。以上は、アーマ・コート河床における流砂過程である。

つぎに、階段状河床波上における流砂過程について考える。図-10は、プール部およびアーマ・コートの隙間に貯留されながら流送され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 L_2 の流砂過程は上述のモデルによって表わされる。そこで、プール部の区間 L_1 について考える。プール部の貯留量を V_i 、流入量 q_{bi} 、流出量 q_{bi}^0 とすれば貯留量の変化は次式で与えられる。

$$\partial V_i / \partial t = (q_{bi} - q_{bi}^0) / (1-\lambda) \quad \dots\dots\dots (17)$$

いま、平衡貯留量を V_{ei} とし、 q_{bi}^0 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て、次式のように置けるものとする。

$$q_{bi}^0 = (V_i / V_e) q_{be} \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 $V_i = V_e V'_i$ 、 $q_b = q_{be} q'_b$ 、 $q_{bi}^0 = q_{be} q'_{bi}$ として、式(17)を無次元化すれば次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V'_i}{\partial t'} &= K_p (q'_{bi} - V'_i) \\ K_p &= q_{be} \sqrt{d/(\sigma-1)g} / \{ V_{ei} (1-\lambda) \} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (19)$$

上式で、 V_{ei} は1次的にはプール部の貯砂容量に依存するから、 $V_{ei} \propto k D_a^2$ のように考えておく。

以上、アーマ・コート河床および階段状河床における砂粒子の流出過程のモデル化を行った。村本・河田・布村⁵⁾の研究や図-8の結果にもみられるように、 A'_s による掃流力の変化や、アーマ・コートの貯留パラメータ α を始めとして、用いられた仮定についての詳細な検討が必要であるが、このモデルの可能性を調べるため、Run 4-1、4-2の結果と数値解析とを比較してみよう。なお解析においては、 $k_s = d = 0.063$ cmとして有効掃流力を推定するとともに、計算に必要な諸量として、次のような数値を用いる。 $k_3/k_2 = 2/3$ 、 $F_o = 0.035$ 、 $\lambda = 0.4$ 、 $\alpha = 1/6$ ($\because 1/2 \times 1/3$)、 $\tau_{*c} = 0.04$ 、 $\sigma = 2.65$ 、 $D_a = 2.5$ cm、 $V_{ei} = d L_1 / 2 = 3.6 D_a^2$ 。

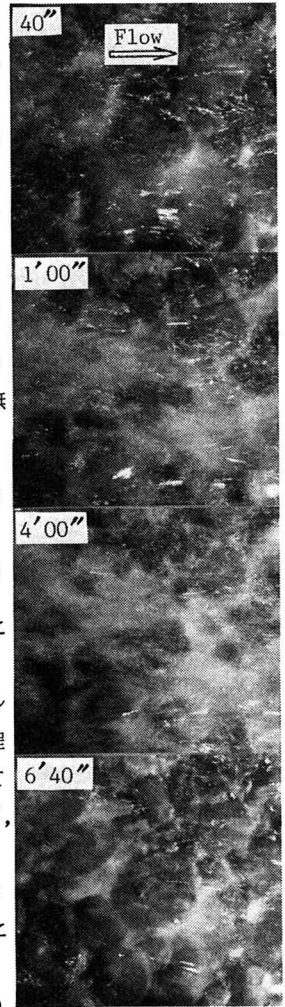


写真-1 供給砂によるアーマ・コートの被覆状態の変化

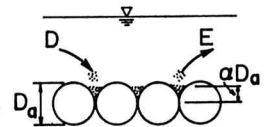


図-9 流砂モデル (アーマ・コート河床)

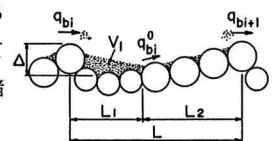


図-10 流砂モデル (階段状河床)

図-11は、それぞれRun 4-1, およびRun 4-2の実験値と数値解とを比較したものである。図には、各断面における流砂量の時間的変化も示されている。図示のように、流出土砂量に関する実験値と計算値($x=0$ m)とは、かなりよく一致しており、現状では十分に満足すべきものであろう。

いま、少し詳しくみれば、立

上り部において、両者はかなりよく一致しているが、通減期において、計算値の方が少し遅れて通減しているようである。これは図-11に示す2つのケースとも同じ傾向にあることから考えて、アーマ・コート砂礫の間隙やプール部において、一旦貯留された砂粒子が全て流出するとしているからである。このような問題点は、流出限界貯留量に対応した概念を用いれば解決されるものと思われる。

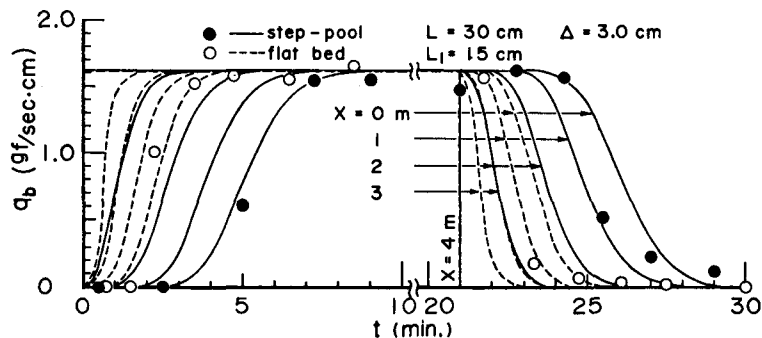


図-11 下流端流砂量に関する計算値と実験値

5. 結 語

本研究においては、階段状河床波の形成過程および破壊・変形過程における流砂特性、破壊・変形条件、アーマコート河床や階段状河床上における流砂過程について検討した。

形成および破壊・変形過程における流砂量やその粒度分布は、土砂水理学の分野でこれまでに得られてきた知見によってほぼ説明されるようである。今後、流砂量やその粒度分布、河床表面の条件を将来予測していくためには、階段状河床波上における流水抵抗や河床せん断力の評価が最も重要な課題となる。

階段状河床波の破壊・変形は、アーマ・コートの最大径の移動開始によって起こり、その条件はアーマ・コートの表面せん断力と最大径の限界掃流力によって与えられる。

アーマ・コート河床や階段状河床における流砂過程においては、砂礫間隙の間隙やプール部における砂粒子の貯留現象が重要な役割を担っていることが判明した。ついで、貯留現象を議論するため被覆率や無次元貯留量の概念を導入することにより、流砂モデルを考察した。このモデルは、実験結果を大むね説明するが、本文で指摘しているように今後改良すべき問題を含んでいる。

本研究は、一部文部省科学研究費の補助を受けて進めているものである。また、京都大学防災研究所、吉田義則技官には、実験装置や図面作成等で御協力頂いた。以上、ここに記して深謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男・江頭進治・安東尚美：階段状河床形の発成機構と形状特性，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形の構造，京大防災研究所年報，28号B-2，1985，pp. 325～335.
- 3) Egiazaroff, I. V.: Calculation of Non-uniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol. 91, No. Hy 4, 1965, pp. 225～247.
- 4) 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.
- 5) 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，京大防災研究所年報，20号B-2，1977，pp. 451～474.