

混合砂礫の河床変動 armouring 現象について

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 道上 正規

1. 緒言

河川の河床材料は大小様々の砂礫から構成されているが、われわれは土砂水理学の諸問題を力学的に考察していく上にあたって、現象の単純化をはかるために、均一粒径あるいは代表粒径という考え方でそれらの問題をしばしば処理してきた。しかしこうした混合砂礫では均一なものと何らかの相違が生じるのではないかと考えられ、実験や現地観測によって、流砂量における遮蔽係数の導入、均一砂と混合砂礫の移動限界の相違およびダム下流部または河床低下域における armouring 効果などの点が指摘されてきた。したがって、これらの現象の正しい理解がなければ、河道に対処する適確な方法を見出すことは困難なものになるであろう。

著者らは、armouring 現象と混合砂礫の流砂量について検討するために、系統的な実験を行ない、その特性をできるだけ明確に把握することを目的とした。さらに本文ではその結果に基づいて、混合砂礫と均一砂礫の流砂力学上の相違点、混合砂礫の流砂量に対する考え方および河床変動（河床低下）と armour coat の関連について若干の考察を試みようとしたものである。

2. 実験の概要

実験水路は巾 0.8 m、長さ 20 m のコンクリート水路で、河床砂として使用した砂礫は図-1 に示すような混合砂礫である。下流端には採砂装置を設置し、流出土砂の測定ができるようになっている。まず通水を開始する前に、河床砂がむらなく一様になっていることを確認してから実験を始めた。

実験の境界条件はすべての場合、上流端の給砂量を 0 とし、下流端は堰によって河床を固定した。初期の水理量は流砂量が少ない場合、かなり活発にある場合、および非常に多い場合の状態になるように設定して、各状態における河床砂、河床変動、水理量および流出土砂の時間的変化を測定した。実験条件は表-1 に示すとおりである。

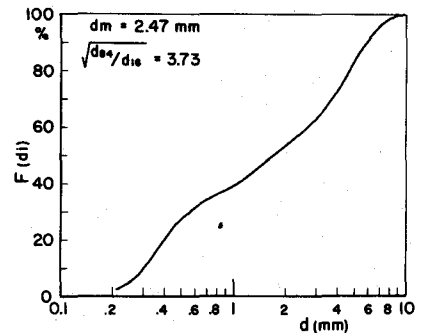


図-1 使用砂の粒度分布

表-1 実験条件

EXP	粗度係数 n	初期摩擦速度 (cm/s)	流量 q (cm ² /s)	初期河床こう配	通水時間 (分)
1	0.018	4.65	250.0	0.0040	360
2	0.017	5.13	375.0	0.0044	600
3	0.024	3.44	62.5	0.0048	240
4	0.023	3.80	93.8	0.0049	360
6	0.020	7.14	392.5	0.0100	600

3. 混合砂礫の流砂量

EXP. 6の粒径別の流砂量をプロットした結果および平野の実験値を示したものが図-2である。この図から明らかなように粒径別の流砂量は均一砂のそれとはかなり相違しているようである。ここでは、均一砂礫を対象にして誘導された佐藤・吉川・芦田式を混合砂礫の流砂量に修正して適用してみることにしよう。上述の流砂量式は、

$$\frac{q_B}{u_* d} = \varphi \cdot F\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right) \cdot \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) g d} \quad (1)$$

で与えられる。EXP. 6の実験では、Manningの粗度係数は0.02であるにもかかわらず、平野の実験値（ $n = 0.0155$ ）と同じような性状を示したので、 φ の値としては、 $n = 0.015$ を用いることにした。これは均一砂の流砂量においても数倍の誤差を現状では認めざるをえない状態なので、やむをえないことであろう。

つぎにEgiazaroff²⁾によって提案された、混合砂礫の粒径別の移動限界を表わす式は次式で与えられる。

$$\frac{u_{*ci}}{(\sigma/\rho - 1) g d_i} = \frac{0.1}{(\log_{10} 19 d_i/d_m)^2} \quad (2)$$

ここに、 d_m : 河床砂の平均粒径である。(2)式を変形して計算した値が図-3である。これから明かなように、 d_i/d_m が0.4以下では、 u_{*ci}/u_{*cm} の値が増加している。これは(2)式を導くにあたって流速分布として対数法則を底面まで適用したことによるものであり、実験値によっても確認されていないので、ここでは、図-3に示す破線の状態になるものと仮定して、(2)式を取り扱うものとする。このような修正を行なった(2)式を(1)式に適用して、次式の関係を用いる。

$$\frac{q_{Bi}}{u_* d_i f_0(d_i)} = \varphi F\left(\frac{\tau_0}{\tau_{ci}}\right) \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) g d_i} \quad (3)$$

ここに、 $f_0(d_i)$: 粒径 d_i の河床砂に占める割合である。(3)式を d_i/d_m をパラメーターにして示したものが図-2である。(3)式によって各粒径ごとの流砂量の変化が理解され、 d_i/d_m をパラメーターとして導入する必要性が理解されよう。しかし、 $d_i/d_m > 1$ では実験値は(3)式と相違するが、その傾向はよく類似している。

以上のことから、つぎのことが結論されよう。(2)式の関係を用いて各粒径ごとの限界掃流力を

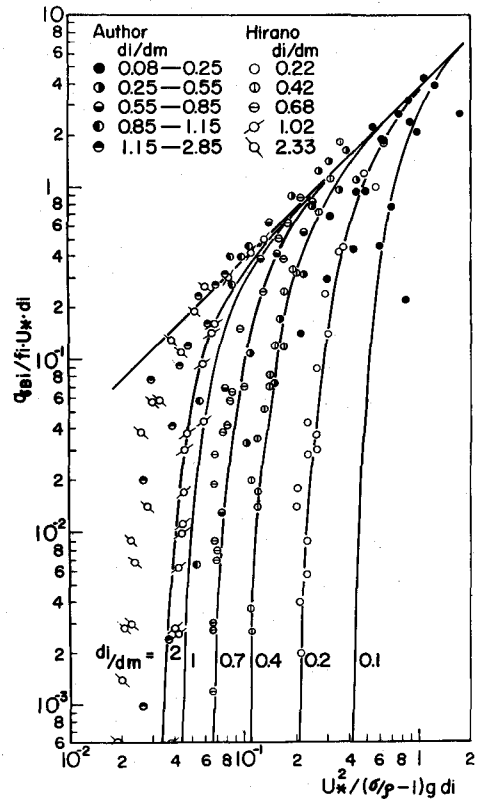


図-2 混合砂礫の流砂量

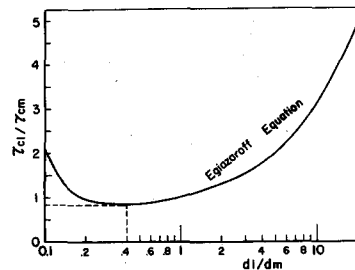


図-3 混合砂礫の粒径別の限界掃流力

適用すれば、混合砂礫の遮蔽効果の物理性がよく理解される。したがって、遮蔽係数という考え方は流砂現象にそくして考えれば適当なものではなく、遮蔽効果は各粒径ごとの限界掃流力が均一砂と相違することによって生じるものである。それ故に限界掃流力の流砂量に及ぼす影響が小さい範囲、 $\tau/\tau_{ci} > 2 \sim 3$ 、では混合砂礫の流砂現象は均一砂のそれと同一になるものと考えられる。この実験範囲では、 $u_* / (\sigma/\rho - 1) g d_m$ が 0.1 程度で混合効果は認められなかったし、また平野によって同様な値が指摘されている。しかし、この値は粒度の標準偏差によって相違するので、上述の τ_0/τ_{ci} で評価する方が適当であろう。今後の課題としては、粒径別の限界掃流力はほぼ (2) 式の関係で説明されるようであるが、 $d_i/d_m > 1$ 以上の範囲についてさらに精度を高める必要があるとともに、標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ の値が大きい場合についても検討する必要がある。

4. armour coat

EXP. 1, 2 では初期に与えた摩擦速度 u_* は時間的に全然変化しないことを実験的に確認することができた。しかしながら、河床は初期河床にほぼ平行に若干低下するとともに、河床砂の粒度分布もかなり大きく変化することが明らかにされた。

このような水理条件のもとでは、armour coat を発生させるために、若干河床低下が生じるだけであり、この状態は Gessler³⁾ の言葉を借りれば pararell degradation の領域であると考えられる。したがって、この領域における armour coat の粒度分布を求める式はつぎのように考えることができる。

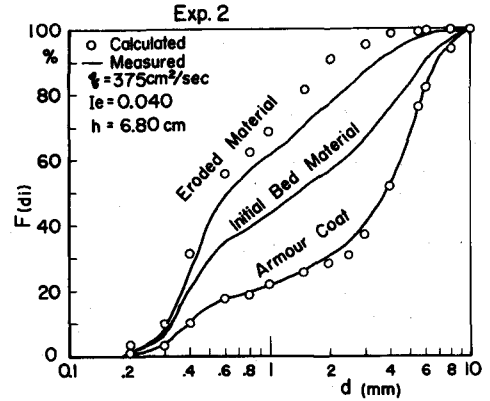


図 - 4 armour coat

この状態では流砂量に混合効果が生じるので、流砂量としては、(3) 式の関係を変形して用いることにしよう。

$$q_{Bi} = \frac{\varphi u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) g} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} f_0(d_i) F(\tau/\tau_{ci}) dd_i \cdot p(d_i) \quad (3')$$

ここに、

$$p(d_i) = \frac{f_0(d_i) F(\tau/\tau_{ci})}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} f_0(d_i) F(\tau/\tau_{ci}) dd_i} \quad (4)$$

であり、 τ/τ_{ci} としては図-3の結果を用い、 $F(\tau/\tau_{ci})$ としては佐藤・吉川・芦田式の関係を用いる。ただし添字 i は各粒径ごとの砂礫を表わし、 m は平均値を表わすものとする。またそのときの河床低下量 Δz を nd_0 と表わすことにすれば、終局的には $nd_0 \times$ 単位面積の量が (4) 式に比例して流送されることになるので、この関係を式で表示すればつぎのようになる。

$$f_n(d_i) = (n+1)f_0(d_i) - np(d_i) \quad (5)$$

あるいは、

$$F_n(d_i) = \int_{d_{\min}}^d f_n(d_i) dd_i \quad (6)$$

ここに、

$$d_0 = \frac{\int_{d_c}^{d_{max}} d_i f_0(d_i) d d_i}{\int_{d_c}^{d_{max}} f_0(d_i) d d_i} \quad (7)$$

で表わされる。しかしながら、図-3の結果は平均粒径が変化した状態では、各粒径ごとの限界掃流力が変化するを意味しているの、ステップごとに(5)式を計算して、すべての河床砂が移動しない状態になるまで計算をくり返すことにした。その結果が図-4に示されている。このような単純なモデルで計算したにもかかわらず、実験値と計算値は非常によく一致しているようである。また、(4)式の関係ステップごとに計算したものを加え合せ、その平均をとることによって流出した土砂の粒度分布を求めることができる。

$$\bar{p}(d_i) = \frac{1}{n} (p_1(d_i) + \dots + p_n(d_i)) \quad (8)$$

(8)式と下流端で採集した実験値の比較も図-4に示されているがこれらも比較的良好に一致しているように思われる。

5. 河床移動と armour coat の関連

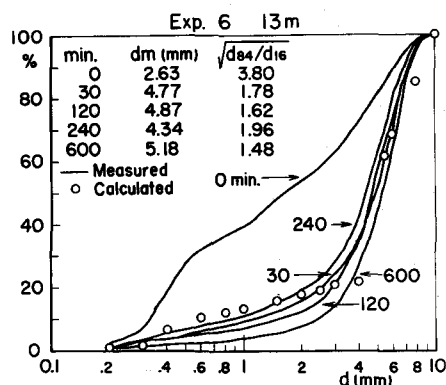


図-5 粒度分布の時間的変化

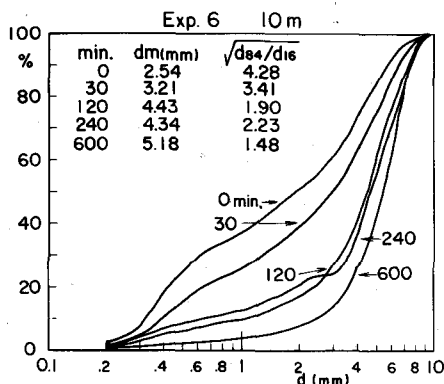


図-6 粒度分布の時間的変化

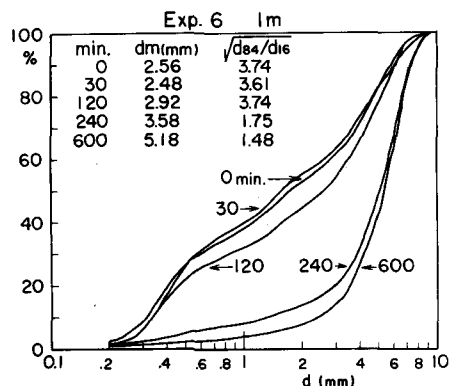


図-7 粒度分布の時間的変化

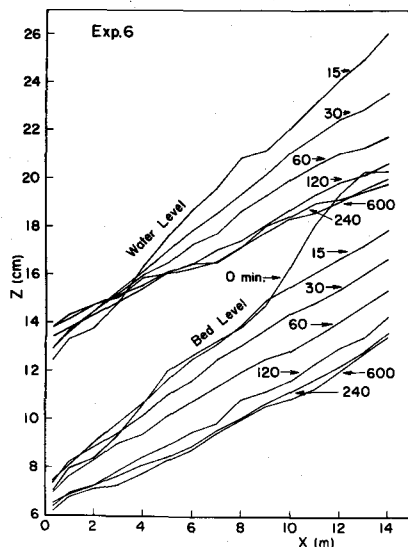


図-8 河床低下

EXP. 6に関する河床砂の粒度分布の時間的および場所的变化が図-5～7に示されている。これらの図は上

流端では短時間に armour coat が形成されており，その影響が下流に伝ばんしていくにしたがって，下流側の粒度の変化が生じ，この実験のように有限区間の領域では，600分を経過したあとでは水路全体が上流端で形成された armour coat によっておおわれることを示したものである。また，河床変動の時間的な変化を示したものが図-8であり，これによっても上流端では初期に形成された河床こう配を一定に保持しながら河床が低下していく様子が理解されよう。上述した armour coat が下流に伝ばんしていくことおよび上流端で形成された河床こう配を下流に伝ばんしていくことは両者が非常に密接な関係にあることを示した興味深い実験結果であると考えられる。

したがって，armour coat の項で考察した現象とこれらの実験結果に基づいて，図-9のような模式図を書くことができる。図-9では，与えられた摩擦速度に対応した移動限界の粒径を図-3から求めて，その粒径のところに $u_{*1} \sim u_{*3}$ の矢印が示されている。この図において， $u_{*1} \geq u_{*2}$ では河床砂礫は移動しない状態にある。つぎに， $u_{*1} < u_{*2} \leq u_{*3}$ では， u_{*2} の変化は認められないが，河床には armour coat が形成され，河床低下は初期河床に平行に若干起こる程度である。このような状態の領域を porarell degradation と名づけることにしよう。つぎに， $u_{*1} < u_{*2}$ の状態すなわち u_{*1} の場合には， u_{*1} の値が u_{*3} の状態になるように上流端において河床低下が生じる。河床低下が生じたあとは， u_{*3} の状態を上流端で保持しながら，それを下流に伝ばんさせていく。一方，上流端の河床砂の粒度分布は u_{*3} によって決定される armour coat になり，その影響が河床変動に伴なわれて下流に伝ばんしていくことを示したものである。このような領域を rotational degradation と名づけることにしよう。

つぎにこのようなモデルによって河床変動を解析することにしよう。水流の運動方程式，連続式，流砂量式として (1) 式，Manning の抵抗法則および流砂の連続式を用い，疑似等流を仮定してつぎのような拡散式が導びかれている。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (9)$$

ここに，

$$K = \frac{21}{20} \frac{1}{1-\lambda} \varphi F\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right) \frac{q}{(\sigma/\rho-1)a} \quad (10)$$

であり， $a = v/u_{*2}$ ， q ：単位巾当りの流量である。(9)式の境界条件については著者の一人⁴⁾によって議論されている結果を用いることにする。すなわち，

$$z(x, 0) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial z(0, t)}{\partial x} = i_0 - i_c \quad (12)$$

を用いる。ここに， i_0 ：初期河床こう配， i_c ：移動限界の河床こう配である。このような境界条件で (9) 式を解くと，

$$z = -(i_0 - i_c) \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-T_0^2) - T_0 \operatorname{erfc}(T_0) \right] \quad (13)$$

ここに，

$$T_0 = \frac{x}{2\sqrt{kt}}, \quad \operatorname{erfc}(T_0) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{T_0} \exp(-T^2) dT$$

である。

さて i_c の決定方法であるが、図-9で示したように、 d_{max} が移動限界の状態にあると考えて、図-3を用いて決定した。ただし d_{max} としては d_{95} なども考えられるが、ここでは d_{95} として計算した。計算諸量は $k=159$ 、 $i_c=0.0055$ 、 $a=9.7$ 、 $\varphi=3.71$ 、 $F(\tau/\tau_{cm})=1$ および $q=392.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ である。計算値と実測値の比較は図-10に示すとおりであるが、下流端に上流端の境界条件の影響が到達するまでは計算値と実測値は比較的よく一致している。また、armour coat についても計算を行なったが、その様子は図-5に示されており、実験値と実測値はよく一致しているものと考えられる。

今後の研究としては、本文では $\sqrt{d_{95}/d_{10}}$ が4以下の実験であるために、もっと $\sqrt{d_{95}/d_{10}}$ の値が大きい状態について検討していきたいと考えている。

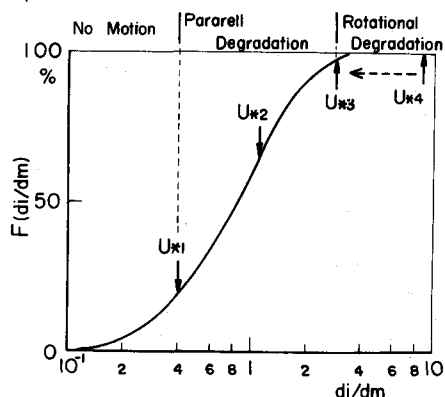


図-9 河床変動と armour coat の関連の模式図

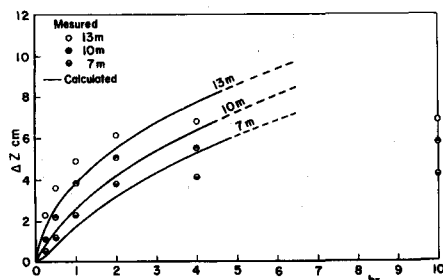


図-9 河床低下量と計算値の比較

6. 謝辞

本研究は、実験およびその資料整理にあたって、京都大学防災研究所河川災害研究室の中村行雄技官および立命館大学4回生の江頭進治君による労を惜しまない協力によって遂行されたことを付記するとともに、両氏に対して心からの感謝を表します。

参 考 文 献

- 1) 平野宗夫：貯水池下流の河床低下と Armouring 現象について、第14回水理講演会講演集，昭45.2，pp.77-82.
- 2) Egiazaroff, I.V.: Calculation of nonuniform sediment concentrations, Proc. of ASCE, HY 4, 1965, pp.225-246.
- 3) Gessler, J.: Self-stabilizing tendencies of alluvial channels, Proc. of ASCE, Water ways and Harbors Div., 1970, pp.235-249.
- 4) 芦田和男：河床変動に対する境界条件の影響，第25回土木学会年次学術講演会講演集，昭45.11，pp.263-266.