

# 狭窄部における河床変動に関する研究

京都大学防災研究所 正員 菅田和男

同 上 正員 道上正規

京都大学 大学院 学 〇江頭進治

1. 概説 断面変化部の河床変動は、一様砂礫を対象として Laurence<sup>1)</sup>、菅田<sup>2)</sup>、混合砂礫を対象として河村<sup>3)</sup>、平野<sup>4)</sup>と数多くの人によって研究されてきた。しかし、混合砂礫の場合には、河床変動に砂礫の混合特性が顕著にあらわれるが、これについての従来の取扱は十分でない。最近、菅田・道上は、混合砂礫の限界掃清力に関する Egiazaroff の理論を若干修正し、さらにその後、その理論がほぼ妥当なものであることを確かめた。図-1は修正した Egiazaroff の理論曲線と実験値(○印)との比較である。本論は、この混合砂礫の限界掃清力の一つの適用例として、狭窄部における静的平衡縦断形状について検討を加え、砂礫の粒度分布特性と初期の摩撓速度ならびに消路の縮小率に応じて、河床形状に種々の場合が生じることを明らかにするとともに、その算定法を示し、これを実験によって確かめようとするものである。

2. 実験方法と実験結果 幅1m、長さ16mの実験用水路の中央部に幅20cmの狭窄部を長さ2mの区間に備えつけ、その上下流部にそれぞれ1.5mの approach をつけた水路も使用した。本実験では平均粒径  $d_m = 2.5\text{mm}$ 、90%粒径  $d_{90} = 6.1\text{mm}$ 、 $\sqrt{d_m/d_{10}} = 3.58$  の混合砂礫が水路全長にわたって敷きならされ、河床砂礫の粒度分布、水位、河床高および下流端での消砂量の測定がなされた。なお、上流端からの結砂は行っていない。実験の初期条件は表-1に示す通りであるが、添字2は狭窄部での、1はその上下流部での諸量である。なお本論で用いる記号は、  
 $U_{*cmax}$ :  $d_{90}$  あるいは  $d_{max}$  の移動限界摩撓速度、 $U_{*cm}$ 、  
 $U_{*cmin}$ :  $d_m, d_{min} = 0.4d_m$  の移動限界摩撓速度、 $i$  にう配、  
 $l_{cmax}$ :  $d_{90}$  あるいは  $d_{max}$  が移動限界になるこう配を示している。他の記号は慣用表現に従う。

初期の河床粒子の移動状況は狭窄部において、Exps. 1, 2  
 とともに、 $U_{*cmax} < U_{*0}$ 、上下流部において、Exp. 1 は

$U_{*cmin} > U_{*0}$ 、Exp. 2 は  $U_{*cm} \approx U_{*0}$   
 程度である。図-2にはエネルギー、水位、  
 河床の縦断形状の時間的变化が示されて

いる。狭窄部の上流において、Exp. 1 の

方がせき上げが顕著である。これは掃清力が小さいため、消路の形成が防げられたためであると推定される。上流部においては両実験とも顕著な河床変動はなく、初期状態を保っていることを見なしてよい。狭窄部では通水開始から60分を経過すると armor coat が形成され、河床低下がほぼ完了している。Exp. 2 において逆こう配を程しているのは、狭窄部が短いため、水端の局所的な変動の影響が現われたためであると考えられる。狭窄部が十分長ければ、混合砂礫の  $d_{90}$  で規定されるようなこう配になることが推測される。

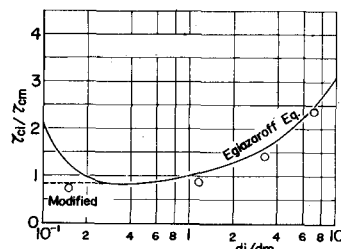


図-1 混合砂礫の限界掃清力

| Exp. No. | $q(\frac{\text{cm}^3}{\text{cm} \cdot \text{sec}})$ | $i_0$ | $h_0(\text{cm})$ | Manning's $n_0$ | $U_{*0}(\frac{\text{cm}}{\text{sec}})$ | $B_1/B_2$ | TIME |
|----------|-----------------------------------------------------|-------|------------------|-----------------|----------------------------------------|-----------|------|
| 1        | 100                                                 | 0.005 | 2.96             | 0.0201          | 3.81                                   | 5         | 300  |
| 2        | 240                                                 | 0.005 | 5.00             | 0.0201          | 4.95                                   | 5         | 360  |

表-1 実験条件 (○印は初期の値)

Exp. 1 の下流部では狭窄部の直下流部にかなりの堆積部が見られるが、これは輸送されてきた砂礫が、下流部の輸送力が小さいためそのまま堆積したものと考えられる。Exp. 2 の下流部は  $d_{90}$  で規定されるようなこう配になっている。この事実は第3節で説明する。Exp. 1 の河床砂礫の粒度分布の場所的・時間的变化を示したものが図-2 である。本図から上流部においては砂礫の移動はなく、狭窄部において洗掘された砂礫が、そのまま下流部に堆積していることがわかる。なお印は armour coat の計算理論より求められた計算値であるが実測値とかなりよく一致している。Exp. 2 のものは本文には記載していないが、上流部においてもかなりの armouring 現象が認められ、狭窄部と下流部においてはほぼ同様の粒度分布を示したことを付記しておく。

3. Armouring 現象を伴う静的平衡河床形状 擬似等流を仮定して、Manning の抵抗則と、河床の砂礫が移動限界にある時の掃清力の表現式の2式を基本式として、エネルギーこう配に影響を及ぼすと考えられる諸因子について検討する。両式は

$$Q/Bh = 1/n_b \cdot i^{1/2} (\xi h)^{2/3} \quad \text{----- (1)}$$

$$U_{*c}^2 = g \xi h i \quad \text{----- (2)}$$

と書かれる。ここに  $\xi$  は Einstein の shear 分割法によって側壁効果を除去するための係数で、 $\xi = \{1 + 2h/B \cdot (n_w/n_b)^{3/2}\}^{-1}$  であり、 $n_b$  は河床粗度、 $n_w$  は側壁の粗さより決定される Manning の粗度係数である。式(1),(2)より  $h$  を消去すると、

$$i = (B/n_b Q)^{6/7} \cdot (U_{*c}^2/g)^{10/7} \cdot \xi^{-1} \quad \text{---- (3)}$$

となる。式(3)を用いて静的平衡河床こう配を相対形式で書くと、

$$i_1/i_2 = (B_1/B_2)^{6/7} \cdot (n_{b1}/n_{b2})^{-6/7} \cdot (U_{*c1}^2/U_{*c2}^2)^{10/7} \cdot (\xi_1/\xi_2)^{-1} \quad \text{--- (4)}$$

となる。 $n_b$  の代わりに平担河床の粗度を与える Strickler 形式の  $n_b = a d^{1/6}$  を用いると、式(4)は、

$$i_1/i_2 = (B_1/B_2)^{6/7} \cdot (d_{901}/d_{902})^{-1/2} \cdot (U_{*c1}^2/U_{*c2}^2)^{10/7} \cdot (\xi_1/\xi_2)^{-1} \quad \text{--- (5)}$$

となる。最大粒径が水路全域にわたって洗掘に

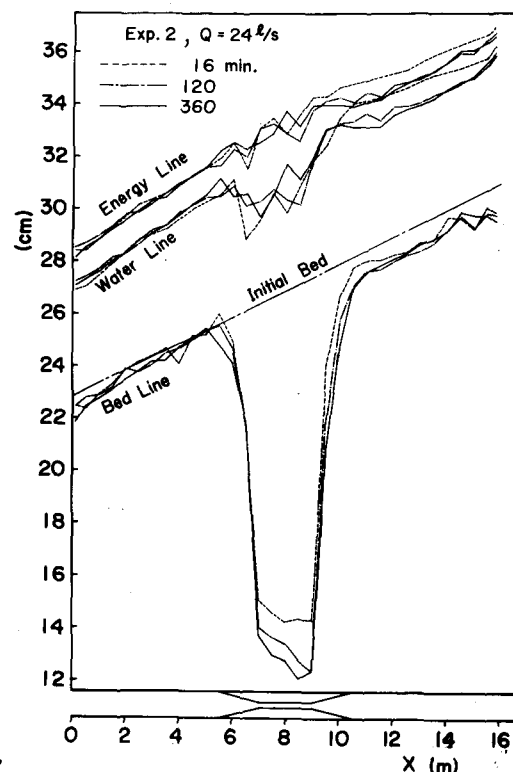
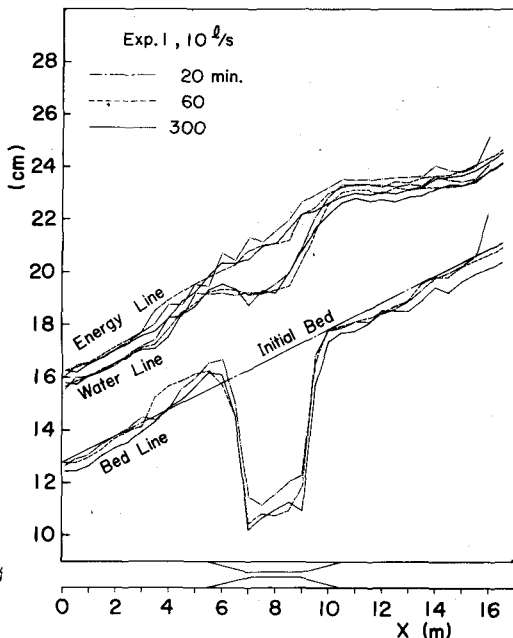


図-2 エネルギー・水位・河床高の時間的变化

移動するような水流量であれば、最終状態において  $d_{90,1} = d_{90,2}$ ,  $U_{*c1} = U_{*c2}$  の假定が成立する。更に側壁効果が無視できるなら、 $\xi_1 = \xi_2$  となり、式(4)(5)は、 $l_1/l_2 = (B_1/B_2)^{1/2}$  ----- (6)

となる。式(6)は一樣砂礫の理論と同形式のものであるが、相違点としては、左辺の未知数と混合砂礫の理論を用いて求めねばならぬことである。次に他者の研究と比較するため相対水深の形式で表現すると、

$$\begin{aligned} h_1/h_2 &= (B_1/B_2)^{1/2} (U_{*c1}/U_{*c2})^{-1/2} (n_{b1}/n_{b2})^{1/2} (\xi_1/\xi_2)^{-1/2} \\ &= (B_1/B_2)^{1/2} (U_{*c1}/U_{*c2})^{-1/2} (d_{90,1}/d_{90,2})^{1/2} (\xi_1/\xi_2)^{-1/2} \end{aligned} \quad \text{---- (7)}$$

となる。式(9)において、 $d_{90,1} = d_{90,2}$ ,  $\xi_1 = \xi_2$  とおくと Laursen<sup>1)</sup> のものと類似の結果を得る。

図-4は掃流力の縦断分布の模式図で、 $\tau_{cmax}$ ,  $\tau_{cmin}$  は図-1に考へてあるような混合砂礫の限界掃流力の理論より求まるが、それぞれ  $d_{90} = d_{max}$ ,  $0.4d_m = d_{min}$  の限界掃流力である。初期において破線-1のような掃流力の分布ならば、河床砂礫が全区間で活発に移動するので、静的平衡河床こう配は式(6)によつて求まる。破線-2のような分布ならば、上流側では初期こう配を保持しながら、armouringのために若干低下するが、破線-3のような分布ならば変化しない。下部部においては狭窄部からの輸送砂礫のため河床形状に局所的な影響が現われる。これは狭窄部での洗掘量と下部部の長さによつて規定されるだろうと考えられる。すなわち、式(4)または(5)において、 $U_{*c1} = U_{*c0}$  として洗掘量を略算し、これを初期河床に  $l_{cmax}$  のこう配で堆積させると、だいたいの影響長を知ることが出来る。

図-5は著者らの実験で、図-6は平野<sup>2)</sup>のデータを式(4)または(5)に基づいて解析したものである。Exp.1, Exp.2, 平野の実験の初期の掃流力の分布はそれぞれ破線-3, 2, 1のような分布をしている。Exp.1においては狭窄部での洗掘量は下部部の中央より下流へは影響しないので、 $l_1 = l_0$ ,  $U_{*c1} = U_{*c0}$ ,  $U_{*c2} = U_{*cmax}$ ,  $d_{90,1} = d_{90,2}$  として計算し、Exp.2においては、下部部の河床こう配が  $l_{cmax}$  となるに十分の輸送砂礫があることも前記した略算法から求め、 $l_1 = l_{cmax}$ ,  $d_{90,1} = d_{90,2}$ ,  $U_{*c1} = U_{*c2} = U_{*cmax}$  として計算した。なお平野のデータは、 $l_1 = l_{cmax}$ ,  $d_{90,1} = d_{90,2}$ ,  $U_{*c1} = U_{*c2} = U_{*cmax}$ ,  $\xi_1 = \xi_2$  と

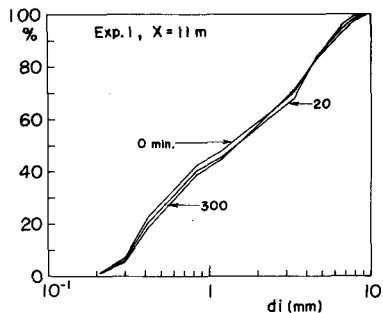
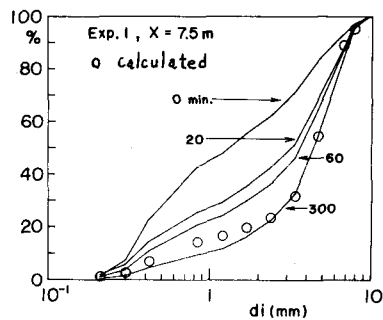
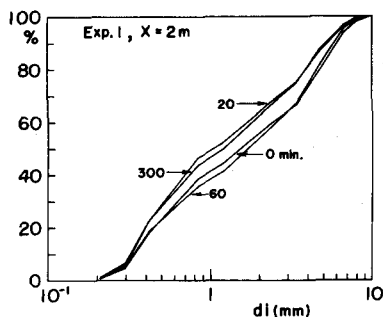


図-3 河床砂礫の粒度変化

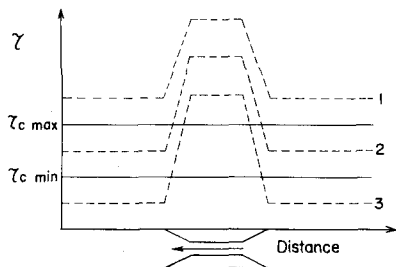


図-4 掃流力の縦断分布

して解析した。

4. 結語 本研究において著者らは式(4)または式(5)および式(6)に基づく解析によって, Approach部での形状抵抗を無視したにもかかわらず, ほぼ満足すべき結果を得た。この事実は初期の状態において移動床であることの注目すべき結果である。初期の掃流力の分布が図-4の破線-1のような分布をする場合,  $d_{90}$  と縮小率とちによって規定されるような河床形状を算することを確認した。苅田・道上<sup>3)</sup>, 更に著者らの先の研究によって, Armouring現象ともなる河床変動の場合,  $d_{90}$  または  $d_{max}$  が重要な役割を演ずることを再三指摘してきたが, その事実を本研究で更に前進させた。

初期掃流力の分布が破線-2,3のような分布をする場合, 狭窄部からの輸送砂礫が下部部へどのように影響するかを解明することは今後の重要な問題点であろう。

最後に, 本研究を遂行するに当たり, 実験データ整理に多大なる援助をしていただいた立命館大学理工学部学生, 黒田誠一君に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) E. M. Laursen: "An Analysis of Relief Bridge Scour", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 89, Hy. 3, May 1963.
- 2) 苅田和男: 「断面変化部における河床変動に関する研究(1)」, 京都大学防災研究所年報, 昭和38年7月
- 3) 河村二郎: 「ダム下流流域における河床変動に関する研究」, 昭和44年4月
- 4) 手野宗夫: 「分級作用に伴う河床変動」, 第26回年次講演会講演集, 昭和46年10月
- 5) 苅田・道上: 「混合砂礫の河床変動, Armouring現象について」, 第15日本理講演会講演集, 1971年2月
- 6) 苅田・道上・江頭: 「混合砂礫の移動限界について」, 第26日本次講演会講演集, 昭和46年10月
- 7) 苅田・道上・江頭: 「Armour coatの程度分布に関する研究」, 奥西支部年講概要, 昭和46年5月

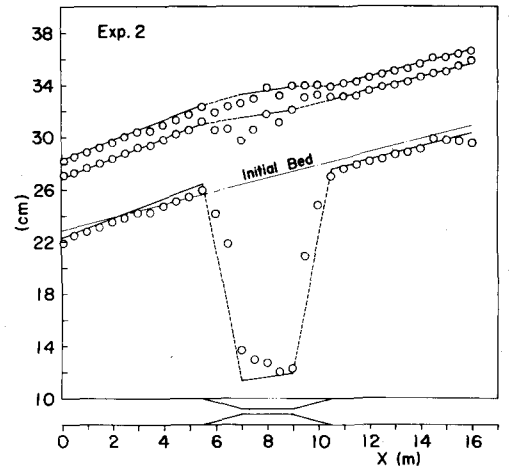
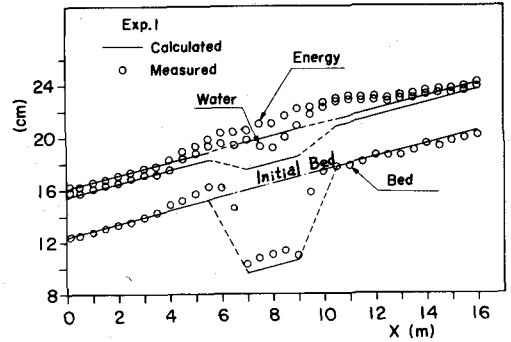


図-5 静的平衡状態の計算値と実測値の比較

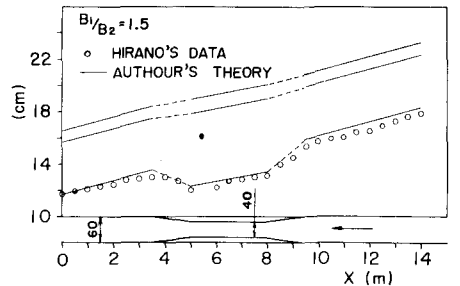


図-6 静的平衡状態の計算値と実測値の比較