

混合粒径水路における拡幅を伴う河床変動実験

Experiment on bed evolution with bank erosion of a straight channel in the case of sediment diameter of mixture

北海道大学工学部土木工学科
北海道大学大学院工学研究科
財団法人河川環境財団
独立行政法人土木研究所

学生員 阿部祐太 (Yuta Abe)
学生員 高橋圭吾 (Keigo Takahashi)
フェロー 長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)
正会員 中西哲 (Satoru Nakanishi)

1. はじめに

総合的に河川環境を維持管理する上で、河川の変貌過程を解明することが必要不可欠である。しかし、この課題を解き明かすことは非常に困難である。なぜなら、改修や開発などによる河川環境変化が幾度となく繰り返され、あらゆる要因が絡み合い複雑化した結果が現在の河川だからである。中西ら¹⁾、高橋ら²⁾はこのような問題の解明を目指し、側岸浸食を伴う河床変動実験と1次元解析を行い、単一粒径砂で構成された水路の河床変動過程を明らかにし、変動パラメータの評価を行った。しかし、実際の河川環境は洪水、流量変動、生態系変化、そして砂礫の粒度変化などの様々な要素が影響を及ぼし合った結果、現在の形状に至っている。そこで、今回我々は河床材料の粒度分布に注目することとした。

本論では拡幅を伴う水路における粒度分布の時間的、空間的变化と、河床横断形状、河床縦断形状との相互作用現象を実験的に解明することを目的とする。

2. 実験条件と概要

2.1 粒度分布

Talbot 分布は山地河川の河床材料の粒度分布をよく表現することが知られている³⁾が、下流部における粒度分布に対してはあまり高い適合性を示さない。しかし今回は、粒度分布の時間的、空間的变化を問題視し、厳密な粒度分布の算定を目的としてはいないので Talbot 分布を用いることとした。

$$P = \left(\frac{d}{d_{\max}} \right) \quad (1)$$

式(1)は Talbot 分布曲線を表す式である。図-1 にグラフの例を示す⁴⁾。ここで、 d は砂礫の粒径、 d_{\max} は河床材料の最大粒径、 P は砂礫の通過重量割合である。Talbot 分布は χ の累乗によって規定される関数であり、この χ を時間 t および縦断方向距離 x の関数として扱うことで、粒度分布の時間的、空間的变化を表すことができる。一般に χ は 0~1 の間の値をとり、 χ の値が大きいく程粗粒化することを意味する。

なお、実験値における χ は測定値に最小二乗法を用いることで求めた。

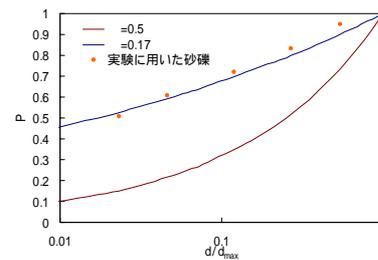


図-1 Talbot 分布曲線

2.2 実験概要

実験に用いた水路は、水路長 15m、幅 80cm、側壁高さ 20cm の可変勾配水路である。この水路の上流端から $d_{\max}=13\text{mm}$ 、 $\chi=0.2$ の混合砂を敷き詰め、上流端から 1m 下流の位置を測定開始地点とし、実長 $L_0=11\text{m}$ の流路を形成した。 x, y, z を図-2 のように定義する。その他の実験条件は表-1 のように設定した。ただし、単一粒径の実験条件は高橋らが行ったものである。

このような実験条件を用いた理由は、単一粒径の場合と混合粒径の場合とで、流砂量つまり砂礫の流れ易さを表す無次元掃流力 τ_* が極力等しくなるようにし、両者の河床変動特性を比較できるようにしたいと考えたためである。

初期横断形状は台形断面であり、側壁勾配は 1:1 とした。また実験中上流端からの給砂は行わない。これは、今回は混合粒径砂礫が河道形態に及ぼす水理的な効果を見ることが重要であると共に、実際の河川はもっと複雑であることから厳密な境界条件を与えられないと判断したためである。下流端は堰を設けて等流が保たれる条件とした。

計測ではレーザー変位計を用い、縦断方向の 1m 毎に河床横断形状を測量した。計測時間を Case7 では通水開始から 1分、5分、15分、30分、60分、120分とし、Case8、Case9 は通水開始から 1分、5分、15分、30分、60分、120分、240分とした。それぞれ停水後に計測を行った。Case7 通水開始から 240分の計測を行わなかった理由は、120分通水した時点で十分粗粒化し、河床形状が安定したと判断したからである。ちなみに単一粒径の場合は通水開始から 1分、5分、15分、30分、60分を計測時間としている。

本研究は混合粒径を用いた実験であるので、粒度分布の時間変化を計測することが必要不可欠である。そのため、各停水時間中

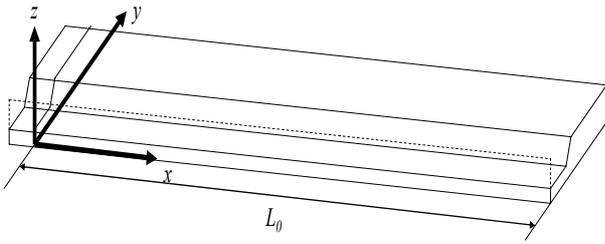


図-2 実験水路と座標軸の定義

	河床勾配	側岸天端高 (cm)	低水路幅 (cm)	流量 (l/sec)
Case7	1/100	8.5	15	6.7
Case8		7.5		
Case9		8.5		
単一粒径 (Case1)	1/200	10.5	20	6.0

表-1 実験条件

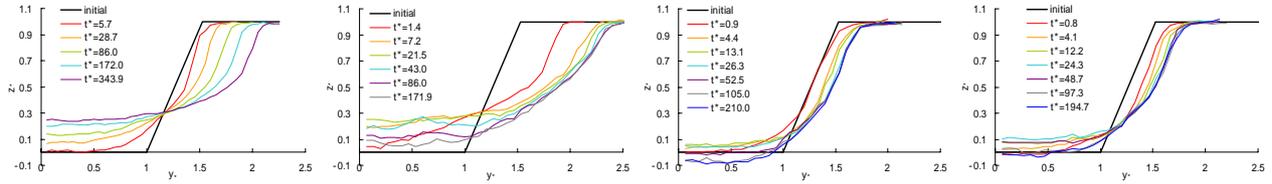


図-3 河床横断形の時間変化(左から順に単一粒径(Case1), Case7, Case8, Case9)

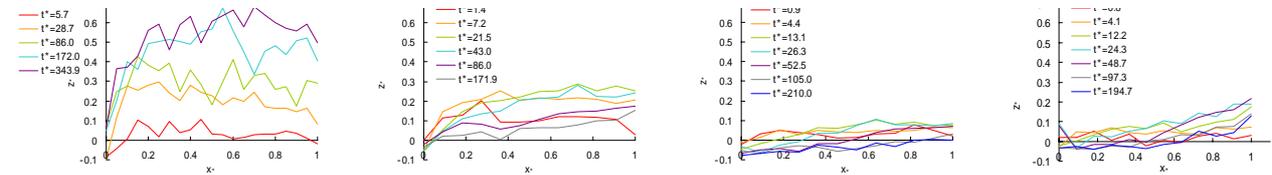


図-5 河床縦断形の時間変化(左から順に単一粒径(Case1), Case7, Case8, Case9)

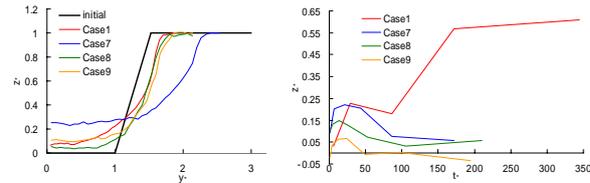


図-4 $t=25$ での横断形

図-6 $L=5m$ 地点における
河床高時間変化

に上流から 0m, 5.5m, 11m の地点で河床表層の河床材料を採取した。採取した河床材料は十分に乾燥させた後、ふるいにかけて、組成比を測定した。

なお、実験番号は高橋ら²⁾による単一粒径の場合の Case1 ~ 6 に続けて、今回の実験を Case7 ~ 9 とした。

3. 実験結果

3.1 実測値の無次元化

異なる条件下の流路及び粒度分布の変動過程を比較するためには、適切な無次元化表示が必要である。本論では以下の表示を用いた。

$$x_* = x/L_0, \quad y_* = y/B_0, \quad z_* = z/iL_0, \quad t_* = \frac{q_{Bx}}{(1-\epsilon)H_0^2} t$$

$$H_* = H/H_0$$

ここで B_0 は低水路幅, i は河床勾配, q_{Bx} は流下方向の粒別流砂量, ϵ は河床材料の空隙率(ここでは $\epsilon=0.6$ とする), H_0 は初期水深, t は実際の時間である。 q_{Bx} を求めるにあたって以下の芦田・道上式(2)を用いた。

$$q_{Bx} = 17 \frac{3}{2} \left(1 - \frac{c_*}{*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{c_*}{*}} \right) \quad (2)$$

ここで, $*$ は無次元掃流力, c_* は無次元限界掃流力(ここでは $c_*=0.05$ とする)である。また $*$ は以下の式(3)で与えられる。

$$* = \frac{H_0 i}{s d_m} \quad (3)$$

s は水中比重(ここでは $s=1.65$ とする), d_m は河道構成材料の平均粒径(ここでは $d_m=2.17mm$ となった)である。

3.2 形状の変化

(1) 河床横断形

図-3に河床横断形形状の時間変化を示す。単一粒径の場合、河床は徐々に高くなり、側岸は徐々に浸食されている。それに対し、混合粒径の場合、始めのうちは河床が徐々に高くなるが、河床高のピークを迎えた後は徐々に浸食されていく。また、すべての場合について側岸が浸食傾向にあると言えるが、混合粒径の場合は、無次元時間 $t_*=25$ 程度で浸食がほぼ停止している。

次に不動点に着目すると、単一粒径の場合は一点で交わっているが、混合粒径の場合は徐々に低下していることが分かる。

図-4は $t_*=25$ での横断形状の比較である。Case7, 8, 9を比較すると、側岸浸食についてはCase7の変化が圧倒的に大きい。しかし、河床浸食についてはCase8, 9の変化の方が大きく、特にCase8, 9で河床高が初期値よりも低くなることは注目すべき点である。

(2) 河床縦断形

図-5に河床縦断形形状の時間変化を示す。前項でも述べたように、混合粒径の場合には河床が一旦堆積上昇してから、時間と共に浸食低下する。また、掃流砂が下流に向けて波状に堆積していることが分かる。さらに、それぞれの時間における河床高のピークの位置に着目すると、すべての場合に共通して河床高のピークが時間と共に下流側へ移動していることが分かる。河床高のピーク

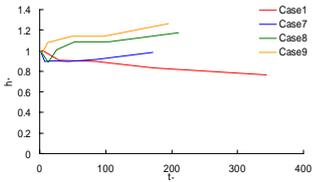


図 - 7 川幅の時間変化

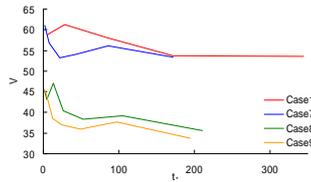


図 - 8 平均流速の時間変化

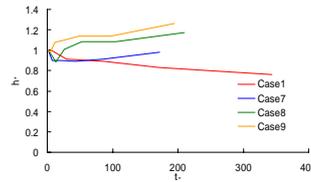


図 - 9 水深の時間変化

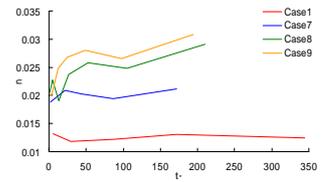


図 - 10 Manning の粗度係数の時間変化

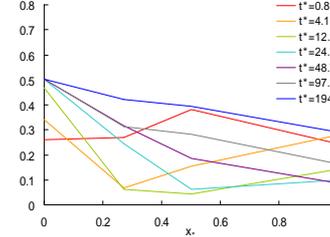
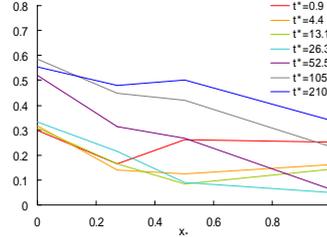
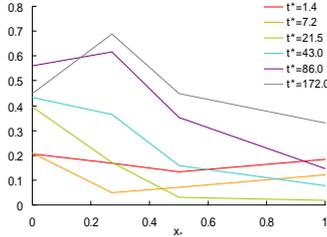


図 - 13 の変化 (左から順に Case7, Case8, Case9)

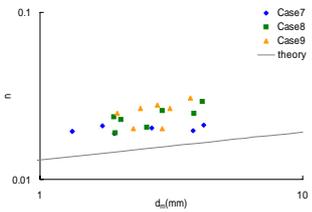


図 - 11 n と d_m の関係

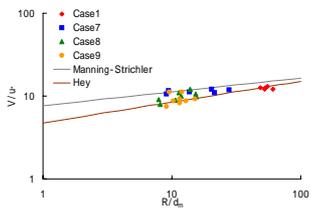


図 - 12 抵抗則の検討

クの移動速度は Case1 < Case7 < Case8 < Case9 の順で速いことが分かる。

Case7 と Case9 を比較すると、河床高は流量が多い方が上流端以外で堆積傾向を示し、流量が少ない方は上流端から中間地点まで浸食傾向を示すことが分かる。Case8 と Case9 を比較すると、側岸天端高が低い方が大きく浸食されることが分かる。

図 - 6 は $L=5m$ 地点における河床高時間変化の比較である。Case7, Case8, Case9 のグラフが一旦堆積してから浸食されるという点で共通する。

(3) 川幅

図 - 7 に川幅の時間変化を示す。Case7, Case8, Case9 では通水後非常に早い段階で拡幅が停止していることが分かる。さらにこれらの拡幅は、ほぼ等しい無次元時間で停止していることが分かる。また、Case1 では長い時間に渡り拡幅が進行している様子が伺えるが、さらに長時間通水すると、ある値に漸近するということが推測できる。

3.3 流れの変化

(1) 平均流速

図 - 8 に平均流速の時間変化を示す。流速は測定した水深、平均河床高、縦断平均から求めた流積と流量から導いた。単一粒径の場合、流速は一度速くなってからゆっくりと遅くなる。しかし、混合粒径の場合は、一度ピークを迎えてから徐々に遅くなり、さらにもう一度速まってからゆっくりと遅くなっているという流速変化をしていることが分かる。

(2) 水深

図 - 9 に水深の時間変化を示す。この水深は、上流端、5.5m 地点、下流端で計測した水深の平均である。単一粒径の場合、水深は低下し続ける。それに対して混合粒径の場合は、通水直後に一旦低下した後は上昇し続けるという結果となった。

(3) 抵抗係数

図 - 10 に Manning の粗度係数 n の時間変化を示す。 n は Manning 式に流速、河床勾配、径深の値を代入することで求めた。粒度変化のない Case1 では時間によらず一定の値を示すグラフとなった。これは、この実験で河床波の発生が微弱であったことを示す。混合粒径の場合、 n は Case8 だけは $t=20$ で小さな値をとるが、すべての場合において $t=100$ 程度で一時的に小さくなる以外は、基本的に大きくなり続けていることが分かる。これは、流路全体で粗粒化が進行したことを表している。

Manning 式から今回実験で使用した流路に対して流速、水深、Manning の粗度係数の間に相関関係が存在することはよく知られている。本研究でも流速、水深、Manning の粗度係数のグラフが似た形状を示した。

図 - 11 に n と d_m の関係を示す。 x 軸と y 軸は共に対数軸である。理論値は以下の式(4)より求めた。

$$n = 0.0131d_m^{1/6} \quad (4)$$

それぞれの d_m に対し、実測値が理論値よりも大きな値となっていることが分かる。

図 - 12 に抵抗側の検討結果を示す。図中の 2 本の線はそれぞれ Manning-Strickler 式(5)及び Hey 修正式(6)を示す。

$$\frac{V}{u_*} = 7.66 \left(\frac{R}{d_m} \right)^{1/6} \quad (5)$$

$$\frac{V}{u_*} = 6.5 \left(\frac{R}{3.5d_{84}} \right)^{1/4} \quad (6)$$

ここで V は流速、 u_* は摩擦速度、 R は径深、 d_{84} は測定した砂礫の 84% が通過するふるい目の大きさであり以下の式(7)から導ける。

$$d_{84} = 0.84 \frac{1}{d_{max}} \quad (7)$$

実測値は Hey 式に近いものとなっている。

3.4 粒度分布の変化

図 - 13 に χ の変化を示す。すべての場合で $t=20$ 程度までは細粒化し、それから徐々に粗粒化する結果となった。また χ が最小となる部分と最大になる部分が、時間経過と共に下流側へ移動していることが分かる。これは、細粒化した部分（細粒部）及び粗粒化した部分（粗粒部）の移動を表している。Case7 と Case9 を比較すると、細粒部及び粗粒部の移動速度は流量の多い方が大きいことが分かる。Case8 と Case9 を比較すると、側岸天端高が低い方が細粒部及び粗粒部の移動速度は大きい。

4. 考察

4.1 河床形状及び縦断形状の変化

河床横断形状の変化から、単一粒径の場合、側岸は徐々に浸食され続け、それによる砂の供給によって河床が堆積し続けると考えられる。一方、混合粒径の場合、通水開始直後は単一粒径の場合と同様の現象が観測できる。しかし、側岸にある比較的粒度の小さい砂礫が下流に流された後は、水流の掃流力では残された比較的大きな砂礫を流すことが出来なくなるため、浸食が徐々に停止するものと考えられる。これは、Case8、Case9 で見られた河床の浸食が停止する現象についても当てはまる。

また、Case7 に比べ流量の少ない Case8、9 の方が河床の浸食が激しいという結果を得たが、これは、水深が大きく関わっていると考えられる。つまり、流量が少ない場合、水流によって浸食される側岸の高さが低くなるため、浸食によって生じる側岸からの砂の供給が少なくなると共に、河床への堆積も少なくなる。その結果河床浸食が早い段階で進むものと考えられる。このことは図 - 4 で Case7 の側岸浸食だけがかなり激しいことから裏付けられる。

池田・Parker⁵⁾は流路が動的に安定であるためには、側岸部で限界掃流状態となり、河床部では流下方向の流砂が存在しなければならぬことを明らかにした。今回の研究でも河道形態が安定化していくに連れ、側岸浸食が停止し河床浸食も弱まるという点で、この理論が成り立つ事を確認できた。

4.2 流れ・粒度分布の変化

平均流速は全体的に減少する傾向にある。これは、河床波の形成による抵抗が増加したことや、図 - 5 に示したように、細粒部の下流方向への移動によって河床勾配がやや緩くなったことが原因であると考えられる。しかしこの流速は単調に減少し続けるのではなく、一旦増加するという結果を得た。この結果の解明には、流速算出時に用いた流積の値が小さくなった原因を考える必要があるが、これについては未だ不明である。一つの可能性として、流積計算時に用いた水深、河床高が全て平均値であることが問題であると考えられる。つまり、地点ごとの水深、河床高を基に流積を求め、その値から地点ごとの流速を求めることが、必要なかもしれない。また、Manning 式によると流速が Manning の粗度係数に対して反比例することが知られているが、図 - 13

からは $t=100$ 程度の時点で顕著な細粒化があったことは確認できない。よって、図 - 10 で見られる Manning の粗度係数の変化が流速変化に大きな影響を与えているとは考えにくい。

n と d_m の関係について、実測値が理論値よりも大きな値となったのは、河床に多くの dune が発達したため、粗度係数に影響を及ぼしたからであると考えられる。同様に図 - 12 で実測値が Manning-Strickler 式の理論値に対し適合性を示さなかったのも、この式が河床波の発達がない場合に有効な式だからであると考えられる。計算に側壁の補正を無視しない R を用いれば適合性の高い結果が得られたであろう。一方、Hey 修正式は河床に礫列が発生した場合に適合性を示すので、今回の実測値と比較的誤差が小さかったものと考えられる。

5. 結論

本研究から得た知見を以下に示す。

- 1) 流量が少ない方が河床を浸食し易い。
- 2) 単一粒径の場合、河床は堆積し続けるのに対し、混合粒径の場合の河床は一時的に堆積した後、浸食される。
- 3) 単一粒径の場合、側岸は浸食し続けるのに対し、混合粒径の場合は、側岸浸食がある程度続いた後、徐々に停止する。
- 4) 粗粒部が河床上を下流側に移動する。
- 5) 粗粒部の移動に伴って流速、水深、粗度係数が変化する。

参考文献

- 1) 中西哲・長谷川和義・高橋圭吾： 振幅を伴う直線流路の河床変動1次元解析，水工学論文集，第49巻，pp. 985-990，2005.
- 2) 高橋圭吾・長谷川和義・中西哲： 勾配急変部を含む直線流路の側岸浸食と河床変動に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集，第61号，-18，2005.
- 3) 滝澤宏昌・林日出喜・長谷川和義： 溪流河川における河床砂礫の混合特性と階段状河床形の形状特性，水工学論文集，第42巻，pp. 1075-1088，1998.
- 4) 長谷川和義・藤田豊彦・目黒嗣樹・滝澤宏昌： 河床不安定および分級不安定をともなう急勾配混合砂礫河床の形態，水工学論文集，第44巻，pp.157-162，2000.
- 5) 池田駿介・Gary PARKER・千代田将明・木村善好： 直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール，土木学会論文集，第375号，pp.117-126，1986.