

高速循環実験水路を使用した粗粒径河床材料の掃流砂実験

Experimental study on bed load transportation using high-speed hydraulic channel

独立行政法人 北海道開発土木研究所 河川研究室 ○正員 小川 長宏 (Takehiro Ogawa)

独立行政法人 北海道開発土木研究所 河川研究室 正員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)

1. はじめに

近年河道内における土砂の侵食・堆積作用に伴う洪水流下能力の変化、上・下流における土砂収支のアンバランス等の課題が指摘されており、土砂の水系スケールでの管理に向けた取り組みが行われつつある。その中で増水時の土砂移動実態を測定するため濁度やSS、掃流砂等の測定がおこなわれている。しかしながら河川上流域においてはこれらの測定は困難であり、増水時の河川上流域での粗粒径の土砂移動実態については不明である部分が多い。

本報告では高速循環水路を用いて河川上流域を想定した河床を水路内に形成し、増水時の流況を再現した実験を行った。実験結果を使用し既存の代表的な掃流砂量式を用いて現象の検証と考察を行う。

2. 実験概要

北海道開発土木研究所が所有する延長 24.0m、水深 1.0m、幅 1.0m の高速循環実験水路を用いて粗粒径河床材料の掃流砂実験を行った。実験水路の最大流量は $3.0\text{m}^3/\text{s}$ である。高速循環水路の写真を図-1 に示す。実験は河床材料及び流量を変えた 3 例を行った。実験の諸元を表-1 に示す。なお、通水中は河床材料と同じものを上流から給砂して行った。

実験 1 と実験 3 で用いた河床材料の粒径分布は十勝川水系札内川とその支川戸蔭別川の合流点での河床材料粒径分布を再現したものである。用いた材料は砕石であり、平均粒径 d_{50} は 37.3mm である。実験 2 で用いた河床材料は実験 1 及び 3 で用いた河床材料のうち、粒径の大きいものの基礎的な移動状況の把握と実験 1、3 との比較のため、粗粒径の割合を多くして単一粒径に近い分布とした。平均粒径 d_{50} は 30.01mm で材料は玉石である。

3. 測定

3-1. 河床・水位縦断分布

水路上流端からの縦断距離 0.05m、8.45m、16.85m の測点において、通水開始 5 分後、15 分後、25 分後を各々通水開始、中間、終了時として各測点における水位、河床高の測定を行った。測定結果を図-2、3 に示す。また測定された水面、河床勾配の平均値を表-2 に示す。

3-2. 流速分布

水路上流端からの縦断距離 16.1m の地点にレーザー

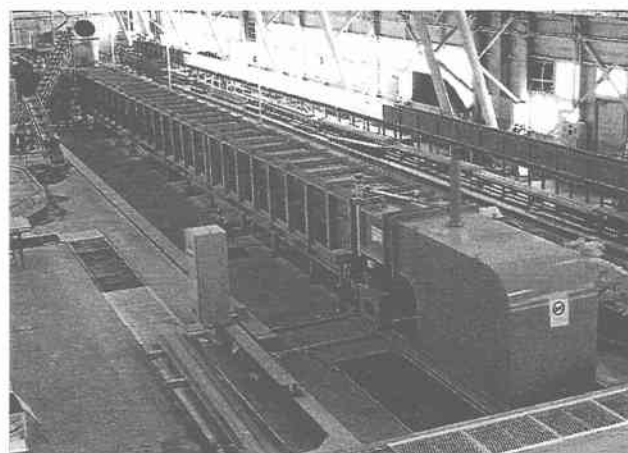


図-1 高速循環実験水路

表-1 実験諸元

	実験 1	実験 2	実験 3
流量	$1\text{m}^3/\text{s}$	$1\text{m}^3/\text{s}$	$0.75\text{m}^3/\text{s}$
初期河床勾配	1/214	1/214	1/214
通水時間	30min	30min	30min

表-2 平均水面・河床勾配

	実験 1	実験 2	実験 3
平均水面勾配	1/189	1/169	1/192
平均河床勾配	1/194	1/654	1/184

流速計を設置し、通水開始から終了までの 30 分間流速分布を計測した。測定高さは初期河床高から鉛直方向に 50cm の高さまで測定した。通水開始から終了まで 30 分間の平均流速分布測定結果を図-4 に示す。図-4 より粒径分布と河床材料の違いにかかわらず、 $1\text{m}^3/\text{s}$ の流量である実験 1 と 2 でほぼ同様の流速分布となっている。

3-3. 通水開始・終了時の粒径分布

通水開始・終了時に河床・水位測点と同じ縦断距離 0.05m、8.45m、16.85m の各測点において、長さ 30.0cm × 幅 30.0cm × 深さ 5.0cm の試料を河床から採取し、ふるい分け試験を行った。図-5 にその結果を示す。また表-3 に通水開始・終了時の平均粒径と空隙率を示す。各実験とも通水開始時よりも終了時に平均粒径が下がる結果となった。また空隙率については河床材料が砕石である実

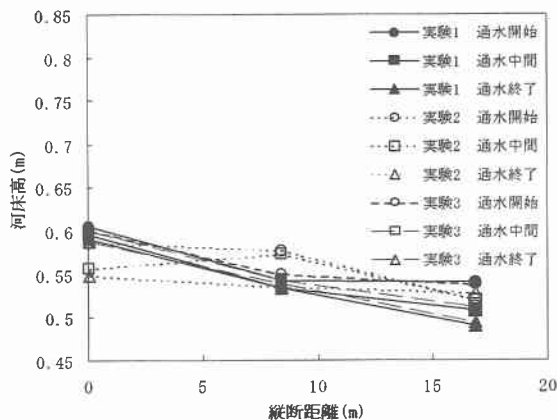


図-2 定点水位測定結果

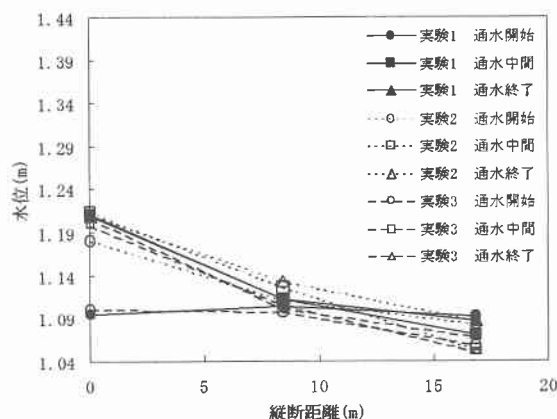


図-3 定点河床高測定結果

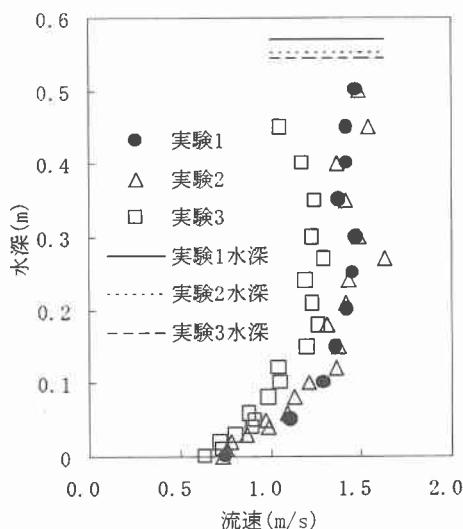


図-4 流速分布測定結果

験 1、3 が、通水開始時よりも終了時に空隙率が下がり、河床材料が玉石である実験 2 では、逆に通水開始時よりも終了時に空隙率の数値が上がっている。

3-4. 実験前・後 河床高

実験 1、2、3 の実験前後の河床高を横断方向中央において縦断方向に計測間隔を 0.5m で計測した。結果を図-6 に示す。給砂を行った実験であったが、給砂の不足のた

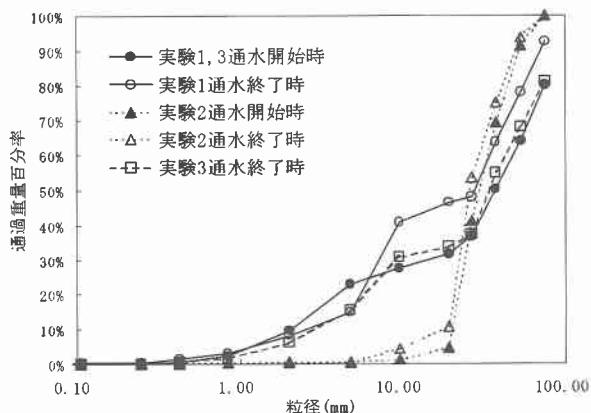


図-5 通水開始・終了時粒径分布

表-3 通水開始・終了時 平均粒径、空隙率

	平均粒径		空隙率	
	通水開始	通水終了	通水開始	通水終了
実験 1	37.32mm	21.17mm	59.25%	28.92%
実験 2	30.01mm	28.43mm	28.82%	37.55%
実験 3	37.32mm	36.13mm	59.25%	34.51%

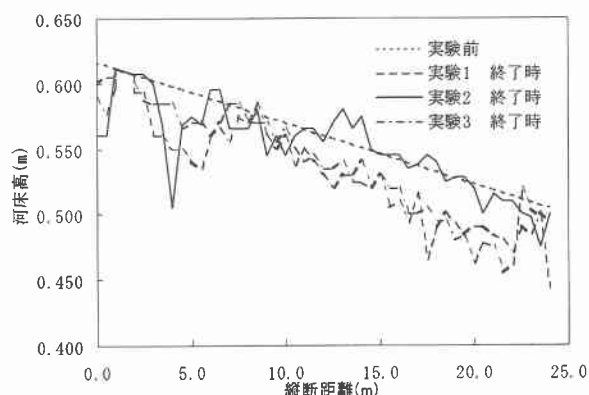


図-6 実験前・後 河床高

め実験 1 で平均 2.79cm、実験 2 で平均 0.81cm、実験 3 で平均 2.27cm の河床低下をおこしている。

4. 流速検討

得られた実験結果をもとに対数則によって流速 u の分布を再現した。その結果を図-7 に示す。この時の平均流速 u 、摩擦速度 u_* 、摩擦係数 C_f 、レイノルズ数 Re を表-4 に示す。

表-4 を見ると u については実験 1、2 より流量の少ない実験 3 のほうが低い値を示しているが、 u_* については大きな相違は見られない。レイノルズ数 Re については各実験とも大きな値をとっている。例として山地河川である北海道鶴川支川のパンケシュル川で、1999 年 7 月 31 日に観測された洪水でピーク時のレイノルズ数が $Re=1.94E+06$ であり、平水時は $Re=2.0E+05$ 程度であることを考えると、各実験においてレイノルズ数がどちらも洪水時ほどではないがそれに近い値であった。

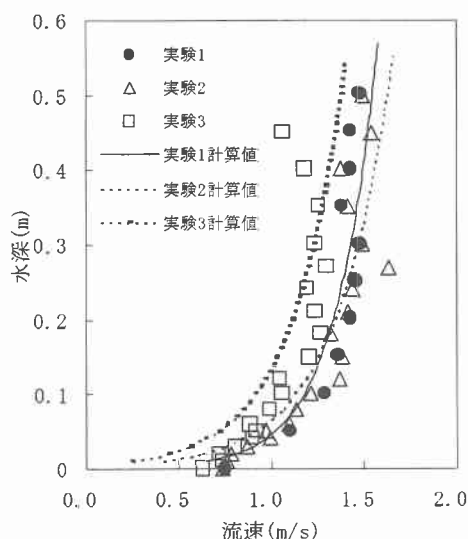


図-7 流速再現計算結果

表-4 各実験の u 、 C_f 、 u_* 、 Re

	実験 1	実験 2	実験 3
u	134.6cm/s	134.8cm/s	107.2cm/s
C_f	0.0163	0.0176	0.0242
u_*	17.2cm/s	17.9cm/s	16.7cm/s
Re	7.68E+05	7.45E+05	5.84E+05

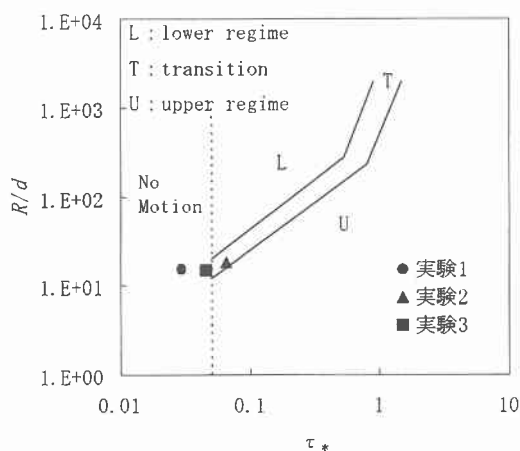


図-8 芦田・道上の方法による領域区分図

5. 河床形態の検討

河床がどのような形態をとっているかにより掃流砂量に変化するため、河床形態の判定を行った。判定には図-8に示す芦田・道上の方法¹⁾を用いた。

図-8の芦田・道上の方法による領域区分図によると、各実験とも河床波が発生しない領域となっている。よって本実験における掃流砂量の評価では、河床波が発生していないものとして取り扱うこととした。

6. 掃流砂の検討

6-1. 実測値の整理

実測の掃流砂量と既存の代表的な掃流砂量式による計算値を比較・検討するため、各実験の粒径別の全掃流砂

量 V_i を次式によって求めた。交換層厚は通常最大粒径の1倍から2倍程度とされるため、最大粒径の2倍とした。

$$V_i = p_{1,i} \left(\frac{z_1 BL}{1 - \lambda_1} \right) - p_{2,i} \left(\frac{z_2 BL}{1 - \lambda_2} \right) \cdots (1)$$

ここに添付文字 1 を通水開始時、2 を終了時として、 $p_{1,i}$ 、 $p_{2,i}$ ：通水開始・終了時の河床に粒径 d_i の占める割合、 z_1 ：交換層からの初期河床高、 z_2 ：交換層厚、 λ_1 、 λ_2 ：通水開始・終了時の河床表面空隙率、 B ：幅、 L ：延長。(1)式より求めた全掃流砂量を単位長、幅、時間あたりの掃流砂量に変換し、粒径別実測掃流砂量 q_{bi} とした。

6-2. 掃流砂量式による計算

掃流砂量式については現在まで多くの計算式が提案されている。それら掃流砂量式は複雑な流水中の土粒子の運動をモデル化、または次元解析的手法、実測値等に基づき構築されたものでありその推定手法が異なるため、各々の掃流砂推定値に差がある。今回実験を行った粗粒子の運動・掃流砂量については不明な部分が多いと考えるため、ここではいくつかの式を使い実測値との比較検討を行うこととし、掃流砂推定式のうちで代表的な式、Meyer・Peter-Muller²⁾の式と芦田・道上の式³⁾、佐藤・吉川・芦田の式⁴⁾を用いて計算を行った。

実験水路上に河床波は形成されていないとして粒径別に計算を行う。Meyer・Peter-Muller の式は

$$q_{bi*} = p_i \cdot 8(\tau_{*i} - \tau_{*ci}) \cdots (2)$$

芦田・道上の式は

$$q_{bi*} = p_i \cdot 17 \tau_{*i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}} \right) \cdots (3)$$

また佐藤・吉川・芦田の式は

$$q_{bi*} \cdot \sqrt{sgd^3} = p_i \cdot \frac{u_*^3}{sg} F \left(\frac{u_*^2}{u_{*ci}^2} \right) f(n) \cdots (4)$$

ここで

$$F \left(\frac{u_*^2}{u_{*ci}^2} \right) = \frac{1}{1 + 8(u_{*ci}^2 / u_*^2)^4}$$

$$n \geq 0.025 : f(n) = 0.623$$

$$n \leq 0.025 : f(n) = 0.623(40n)^{-3.5}$$

q_{bi*} ：粒径 d_i に対する無次元掃流砂量、 p_i ：粒径 d_i の河床に占める割合、 τ_{*i} ：粒径 d_i に対する無次元掃流力、 τ_{*ci} ：粒径 d_i に対する無次元限界掃流力、 s ：砂粒の水中比重。

無次元掃流力は混合砂礫であることを考慮して、(5)式で表される Egiazaroff の式⁵⁾と、 d_m を平均粒径として平野⁶⁾と芦田・道上³⁾が、 $d_i/d_m \leq 0.4$ の範囲において提案した(6)式で表される式を用いて導いた。

$$\frac{d_i}{d_m} > 0.4 : \frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_i/d_m)} \right]^2 \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \cdots (5)$$

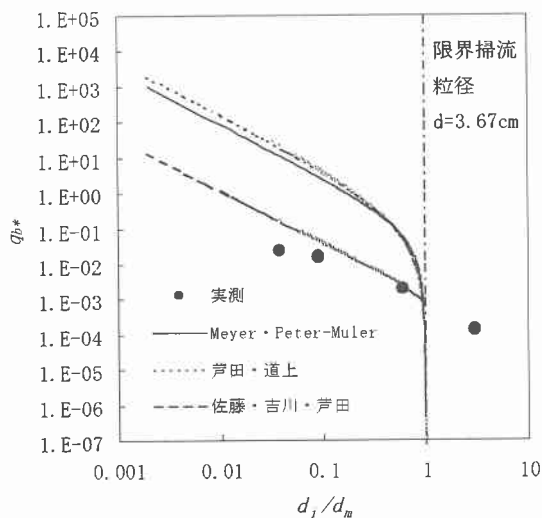


図-9 実験1 実測値と各計算値

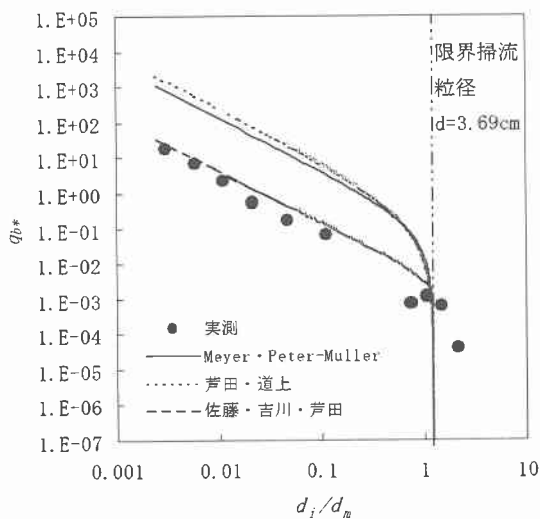


図-10 実験2 実測値と各計算値

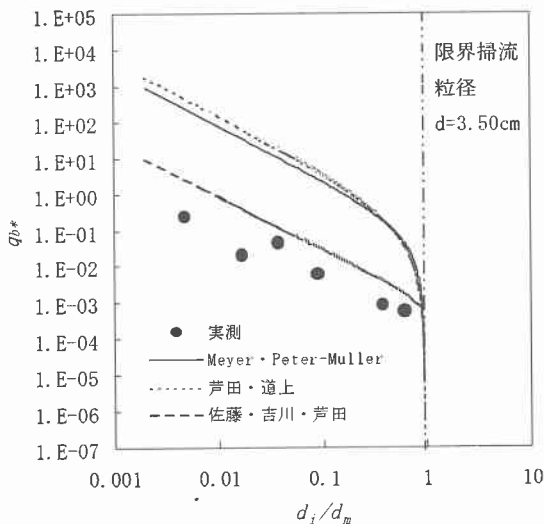


図-11 実験3 実測値と各計算値

$$\frac{d_i}{d_m} \leq 0.4 : \frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = 0.85 \cdots (6)$$

ここに u_{*cm} : 平均粒径 d_m に対する摩擦速度。

各実験における実測掃流砂量を無次元化したものと、掃流砂量式による計算値の無次元掃流砂量 q_{bm} を図-9、10、11 に示す。ここで実測掃流砂量のうち掃流砂量が負、すなわち全体として掃流砂量よりも堆積量の方が大きかったものについては除外した。

図-9、10、11 を見ると、各実験の実測値は佐藤・吉川・芦田の式で良く表現される結果となった。

また実験1、2において掃流力よりも、混合砂礫を考慮した Egiazaroff の式より算出した限界掃流力が大きい粒径の河床材料が掃流されている。このことについては今後の検討課題としたい。

7. 結果

本報告では、高速循環実験水路を使用し通常の実験水路では実験することが困難である、粗粒径の河床材料を用いた実験及び実河川の河床状況を再現した実験を行い、代表的な掃流砂式のうち3式を使い検討を行った。

結果として比較した3式のうち佐藤・吉川・芦田の式による計算値が実測掃流砂量に最も近似していた。また理論上では移動しないとされる粒径の土粒子が移動していることが実測された。

課題としては、実験例が3例と少なく、今後より多くの実験例を必要とすること、理論上移動しない粗粒径の移動現象の説明があげられる。

今回の実験は実測例の少ない粗粒径の実測データとして貴重な一例であると考ええる。今後前述の課題を踏まえ高速実験水路を用いた実験とそのデータの実河川との適合性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 水理委員会研究小委員会：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究，土木学会論文集，第345号/Ⅱ-1，土木学会，pp.41～52，1984
- 2) Meyer-Peter, E. and Muller, R: Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd Cong. ITAH, Stockholm, Sweden, pp.39～64, 1948
- 3) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp59～69，1972
- 4) 佐藤清一，吉川秀夫，芦田和男：河床砂礫の掃流運搬に関する研究(1)，建設省土木研究所報告，第98号，1958
- 5) Egiazaroff, I. V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY4, pp225～247, 1965
- 6) 平野宗夫：Armoringをともなう河床低下について，土木学会論文報告集，第195号，pp.55～65，1971