

論文

軽量・重量骨材を用いた河床変動の実験手法*

Preliminary experimental methods for bed variations using artificial light and heavy materials

伊藤 隆 郭^{*1}

Takahiro ITOH

早川 智也^{*3}

Tomoya HAYAKAWA

長山 孝彦^{*2}

Takahiko NAGAYAMA

渡邊 康玄^{*4}

Yasuharu WATANABE

貝塚 和彦^{*1}

Kazuhiko KAITSUKA

Abstract

Hydraulic model tests and flume experiments for mountainous torrents and rivers have been conducted to clarify flow characteristics for many kinds of sediment movement modes such as mud flow, debris flow and so on. Especially, in case of mud flows and sediment laden flows with wide sediment grain size distribution, there are problems to be solved for not only similarity in experimental approach, but also flow model and constitutive relationship in numerical simulation.

In flume tests, coarse sediment particles can reproduce sediment erosion/deposition in those flow regimes, focusing on that locally spatial and time averaged bed variation is formed mainly by bedloads. However, it can be quite difficult to reproduce turbulent flow with fine sediment particles in model flume. In case of mud flows, modeling and treatments for muddy flow body which is liquid-phase are still now difficult and coarse sediment particles can be regarded as particles with small specific weight in comparison to sand. Additionally, in case of sediment laden flows with non-uniform sediment, it can be important to consider how to reproduce wide grain size distribution of sediment particles in model. It can be better that artificial material is used in place of sand particles based on Froude and dimensionless bed shear stress similarity to reproduce several sediment transport modes. In present study, the applicability of light and heavy artificial material for hydraulic experimental tests is examined using experimental data such as sediment flux concentration and flow resistance in flows over erodible bed.

Key words : artificial material, similarity, flow resistance, debris flow, flume experiments

1. はじめに

急流河川を対象とした水路実験や水理模型実験は、数値解析と合わせて現在でも行われている。扇状地での勾配の小さい流れと比べて、扇頂部以遠の急流河川では、例えば、混合砂からなる土石流以外に、次のような流れを対象とすることがある。

- ①火山地域の融雪型の泥流や噴火後の火山堆積物が豪雨により流出する泥水と石礫の混合物の流れ
- ②河床材料の直径が数 1,000 mm の巨礫～0.1 mm 程度のウォッシュロード成分から成る広い粒度分布をもつ流砂の河床変動

高濃度の泥流と掃流として振る舞う石礫との混合物の流れや高濃度の泥流を対象として、水路実験による現象の素過程の把握や水理模型実験による氾濫・砂防施設の機能検証などを行う場合、粘性係数の相似を満たすためにはレイノルズ相似を満たす必要がある。しかしながら、模型実験では、フルード相似則との両立は模型と原型が

一致する場合にのみ成立し、模型実験で再現される現象の中で評価対象となる現象を抽出して、実験が行われる。

水路実験や水理模型実験を対象とした既往の研究について、①、②を念頭に置いて、着目した現象と実験方法を概観する。泥水の模擬のために、セメント、フライアッシュやベントナイトを清水に混合して用いた水理実験^{(1)～(7)}は、泥水の密度や氾濫範囲の再現に主眼をおき、粘性係数の相似を満たすことには主眼を置かない試行例であると思われる。

一方、軽量の人工材料を用いることによって流砂量の多い流れを再現し、勾配の小さい河川での小・中規模河床形態の再現を目指した大型水路実験^{(8)～(10)}、火山地域の扇状地を対象とし、計画規模相当の大量の火山灰堆積物・土砂の流下を対象とした水理模型実験⁽¹¹⁾、さらには、流れの特性把握⁽¹²⁾や研究者自身の構成則の適用性の検証を目的として軽量骨材を用いた水路実験⁽¹³⁾がある。これらの実験では、小・中規模河床形態の抵抗則の実験的關係、土石流の平衡勾配と輸送濃度の関係、固定床上の土

* 本発表の一部は、平成 22 年度砂防学会研究発表会にて発表した。 *1 正会員 日本工営株式会社中央研究所 Member, Research and Development Center, Nippon Koei Co. Ltd. (a 6556@n-koei.co.jp) *2 正会員 日本工営株式会社 流域・防災事業部河川砂防部 Member, Nippon Koei Co. Ltd. *3 正会員 日本工営株式会社札幌支店 Member, Sapporo branch office, Nippon Koei Co. Ltd. *4 北見工業大学社会環境工学科 Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

砂流の流速・圧力分布や移動床土の土石流の流速分布に関する基礎的なデータが一部得られ、珪砂を用いた実験データとは異なる流れの特性が示されている。これらのデータは、泥水と石礫の混合物を扱うことを想定すると、微細な砂粒子からなる泥水に対して石礫が浮く特性を模擬したものとも見ることもできる。

土石流やピーク流量の大きい山地河川の1出水を対象とした場合には、急激な流水・流砂移動となり、全粒径成分が移動する水理条件となることが多い。一方、砂防施設等による土砂捕捉機能の検証をみる際には、河床侵食対策や土砂堆積などの主として1方向に進む現象を対象とすることが多く、直径が数mの巨礫を含む広い粒度分布をもつ河床材料の河床変動においても、時空間的な篩い分け現象が卓越する場合がそれほど多くないため、粒径の模型値設定に対する留意点は少ない。しかしながら、中小出水による砂防施設内の流砂・河床変動や砂防堰堤堆砂域における中小出水による河床変動や河床形態を対象とする場合、砂漣 (ripples) の発生・形成を意図したもの以外では、ripplesの形成による粒径の幾何学的縮尺と流れが満たすべきフルード相似則とのアンバランスが生じやすい。また、模型実験においては、模型縮尺による幾何学的相似の制約が強く、模型の流砂成分が石礫を主体とする掃流砂流となり、原型での流砂形態と異なる場合がある。しかしながら、模型縮尺が過度に大きい無ひずみ模型を用いた模型実験は、実験効率性やコスト面等から見ると、適当でない。

本実験においては、石礫を含む泥流の砂防施設による捕捉機能や中小出水規模の流量による砂防施設の土砂堆積域からの土砂流出といった異なる流砂形態を水理実験で取り扱うことを想定し、これに対処し得る手法を見いだすために、軽量・重量骨材といった人工骨材を用いて流砂を模擬する試みを行った。珪砂を基準として、それよりも比重が大きいものを重量骨材、逆に、小さいものを軽量骨材と呼んでいる。ここでは、まず、流砂・河床変動の相似則について触れ、次いで、軽量・重量骨材を用いた水路実験を行い、流れの抵抗、輸送濃度など基本的な流れの特性値に関するデータ収集を行った。最後に、河床変動の模型実験で問題となるレイノルズ数依存性、すなわち、ripplesの発生・形成に着目した水理条件の回避と砂堆 (dunes) 等の形成に関するデータ整理を行い、珪砂を用いた既往データと比較して、人工骨材を用いた水理実験の適用性を議論し、人工骨材を用いる際の比重と水理条件の設定例を示す。

2. 人工骨材を用いた水路実験における相似則

2.1 幾何学的相似とフルード相似

水理実験では、フルード相似則^{(14),(15)}に従って水理実験条件を設定することが多い。流砂を対象とした水路模型・水理模型実験でない場合には、幾何学的に相似な河道形状と河床材料を用いれば、流れと河床変動は、フルー

ドの相似則を満足する。幾何学的、運動学的および力学的な諸量の原型に対する模型の縮尺を λ とし、模型の量には添字「 m 」、原型の量には添字「 p 」をつける。幾何学的相似における長さ L の比 λ_L や水深比 λ_h およびフルード相似による速度比 λ_v 、時間比 λ_T 、流量比 λ_Q は、次式で定義される。

$$\lambda_L = L_m/L_p, \quad \lambda_h = \lambda_L, \\ \lambda_v = \lambda_L^{1/2}, \quad \lambda_T = \lambda_L^{1/2}, \quad \lambda_Q = \lambda_L^{5/2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

模型の水平・鉛直縮尺が異なる際には、水平・鉛直縮尺 λ_{LH} 、 λ_{LV} を用いた勾配比 $\lambda_i (= \lambda_{LV}/\lambda_{LH})$ を用いる。

2.2 無次元掃流力の相似

水と泥 (微細砂) が十分に混合した乱流状態の高濃度の泥流においては、泥水が、見かけ上、1つの流体として挙動⁽¹⁶⁾することが知られており、泥流中の石礫は清水に比べて浮きやすくなる。また、粗粒成分の石礫からなる高濃度流においては、流れの規模が大きくなると、固相の砂礫と水の混合物の一部が流体として振る舞う (相変化)⁽¹⁷⁾ことも知られている。しかしながら、現象の再現として、これらを模擬させることは困難であり、水理実験を用いて計画・設計に反映させるためには、結果として生じる現象、すなわち、流体相が泥水や砂礫と水の混合物となった流体に粗粒成分が混入した流れを模擬することになる。一方、巨礫から細粒成分を含む広い粒度分布をもつ掃流砂流を縮小模型実験で再現する場合には、冒頭に述べたように、流砂成分は巨礫から80%粒径程度の比較的粗い粒径となることが多く、広い粒度分布をもつ掃流成分を模擬できるような水理実験手法が望まれる。

流砂現象は掃流力に支配されることが多く、掃流力の相似が満たされると、1次元断面平均の河床形状の相似が満たされることが期待される。無次元掃流力の比は、摩擦速度 $u_* = \sqrt{ghi}$ を用い、砂礫の密度 σ 、清水の密度 ρ 、砂粒子の比重 σ/ρ 、勾配 i および粒径 d を用いて、次のように表される。

$$\lambda_{\tau_*} = \frac{\tau_{*m}}{\tau_{*p}} = \frac{h_m i_m}{d_m (\sigma/\rho - 1)_m} \frac{d_p (\sigma/\rho - 1)_p}{h_p i_p} \\ = \lambda_h \lambda_d^{-1} \lambda_i \lambda_{\sigma/\rho-1}^{-1} \quad \dots\dots\dots(2)$$

従って、掃流力相似は次のように示される。

$$\lambda_h \lambda_d^{-1} \lambda_i \lambda_{\sigma/\rho-1}^{-1} = 1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 λ_d : 粒径比、 λ_i : 勾配比、 $\lambda_{\sigma/\rho-1}$: 比重比である。例えば、水深比 $\lambda_h = \lambda_L$ (模型縮尺)、勾配比 $\lambda_i = 1$ の時には、次式が得られ、比重比 $\lambda_{\sigma/\rho-1}$ 、粒径比 λ_d の組合せで、無次元掃流力の相似が満たされる。

$$\lambda_L \lambda_d^{-1} \lambda_{\sigma/\rho-1}^{-1} = 1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(4)を用いると、幾何学的なひずみ模型を対象としない時には、左辺の積の3項目の比重比や2項目の粒径比を満たす適切な模型材料の有無が重要となる。ひずみ模

型 ($\lambda_i \neq 1$) を用いた取り扱い方については、ここでは、試算に用いるが、本論の主眼としない。

2.3 流砂・河床変動の相似則

軽量骨材を用いた水理実験では、中規模河床形態の発生・形成を再現し、軽量骨材の河床形態と流れの抵抗を議論した研究^{8)~10)}や、1次元的な河床変動における流砂の時間縮尺に関する研究¹⁸⁾がある。しかし、軽量・重量骨材を対象として、粒子の比重比や粒径比に着目した河床変動の時間縮尺に関する研究はほとんど見られないため、ここでは、まず、粒子の比重比や粒径比に着目して、河床変動の時間縮尺を示し、既往例と比較する。

掃流・土砂流として流下し、浮遊状態にならない砂礫粒子を粗粒成分と呼ぶものとし、その1次元的な河床変動を扱うと、河床変動は次式の河床の連続式に従う。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{c_*} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q_b}{B} \right] = 0 \quad (5)$$

式(5)より、流砂の時間縮尺について、次式が成り立つ。

$$\lambda_T = \lambda_h \lambda_{c_*} \lambda_B \lambda_{LH} \lambda_{Q_b}^{-1} \quad (6)$$

ここに、 z_b ：河床位、 c_* ：土砂の静止堆積濃度、 B ：流砂の流れ幅、 x ：流れ方向成分、 Q_b ：粗粒成分の全幅流砂量、 λ_{c_*} ：静止堆積濃度の比、 λ_{Q_b} ：粗粒成分の流砂量比である。式(6)において、流砂量式を無次元掃流力の関数として代入し、無次元掃流力の相似 ($\lambda_{c_*} = 1$) を適用する。例えば、アインシュタイン型、すなわち、 $\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}$ を用いて基準化した無次元流砂量比 λ_{Q_b*} を用いると、流砂の時間縮尺は次式のようになる。

$$\lambda_T = \lambda_{Q_b*}^{-1} \lambda_{c_*}^{-1/2} \lambda_{LH} \lambda_i^{-3/2} \lambda_{(\sigma/\rho - 1)} \quad (7)$$

急な勾配での粗粒成分の流砂量は、流砂量が多く、相対水深 h/d によって土砂輸送濃度が変化しない流れでは、流砂量式の代わりに土砂濃度を用いることが多く、流砂量とその縮尺を清水流量 Q_w と輸送濃度 c_f ¹⁹⁾ を用いて表す。

$$Q_b = Q_w c_f / (1 - c_f) \quad (8)$$

$$\lambda_{Q_b} = \frac{Q_{bm}}{Q_{bp}} = \frac{c_{fm}}{c_{fp}} \left[\frac{1 - c_{fm}}{1 - c_{fp}} \right]^{-1} \frac{Q_{wm}}{Q_{vp}} \quad (9)$$

式(9)を式(6)に代入し、清水流量比に対してフルード相似則を適用する前と適用した後の流砂の時間縮尺を示すと、それぞれ次式のようなである。

$$\lambda_T = \lambda_{c_*} \lambda_B \lambda_{LH} \left[\frac{c_{fm}}{c_{fp}} \right]^{-1} \frac{1 - c_{fm}}{1 - c_{fp}} \left[\frac{Q_{wm}}{Q_{vp}} \right]^{-1} \quad (10)$$

$$\lambda_T = \lambda_{c_*} \lambda_B \lambda_{LH}^{-3/2} \left[\frac{c_{fm}}{c_{fp}} \right]^{-1} \frac{1 - c_{fm}}{1 - c_{fp}} \quad (11)$$

移動床における平衡濃度に対する輸送濃度を対象とす

る場合、輸送濃度 c_f と断面平均濃度 \bar{c} や勾配との関係は、便宜的に次式のように記述することも可能である²⁰⁾。

$$c_f = \alpha \bar{c}^\beta, \quad c_f = \alpha i^b \quad (12)$$

ここに、 $\bar{c} = \tan \theta / (\sigma/\rho - 1) / (\tan \phi_s - \tan \theta)$ 、 ϕ_s ：粒子の内部摩擦角、 θ ：河床勾配 ($i = \tan \theta$ 、 $i = \tan \theta$)、 α 、 β 、 a 、 b ：定数であり、粗粒成分の砂粒子が層流で移動する流れにおいては、ほぼ一定値をとるが、粒子比重や摩擦角等に依存する定数である。式(11)などに見られる輸送濃度の模型・原型の比は、式(12)を用いると次のように書き換えられ、密度比、摩擦角・勾配比で決まる。なお、 $a(\sigma/\rho, \phi_s)$ 、 $b(\sigma/\rho, \phi_s)$ は、定数 a 、 b が比重、摩擦角の関数であることを示す。

$$\begin{aligned} \frac{c_{fm}}{c_{fp}} &= \frac{a_m}{a_p} \left\{ \frac{\tan \theta_m}{\tan \theta_p} \frac{(\sigma/\rho - 1)_p}{(\sigma/\rho - 1)_m} \frac{\tan \phi_{sp} - \tan \theta_p}{\tan \phi_{sm} - \tan \theta_m} \right\}^\beta, \\ \frac{c_{fm}}{c_{fp}} &= \frac{a_m(\sigma/\rho - 1, \phi_s \dots)}{a_p(\sigma/\rho - 1, \phi_s \dots)} \left[\frac{i_m}{i_p} \right]^{b(\sigma/\rho - 1, \phi_s \dots)} = \frac{a_m}{a_p} \left[\frac{\tan \theta_m}{\tan \theta_p} \right]^b \end{aligned} \quad (13)$$

原型と模型が共に移動床流れの場合には、原型と模型の内部摩擦角の違いがなければ、比重比を設定して所定の平衡勾配を与えると、輸送濃度や土砂体積濃度が決まる。

図-1 は、式(10)、(11)に含まれる土砂輸送濃度比について、砂礫 (比重：2.65) を原型とし、模型の固体比重が 1.55、3.60 の材料を模型とした場合の計算値を示したものである。土砂輸送濃度は、江頭らのモデル¹⁹⁾を用い、定常・等流の移動床流れのもとで求めた。モデル定数は、江頭らのモデルのものをを用いた。図-1 の結果は、後述の図-6 と対応するが、比重の違いによる輸送濃度比は、図中の縦軸の値の組み合わせで得られ、 $10^0 \sim 10^{-1}$ のオーダーであり、ほぼ一定値をとるようである。

次に、既往の研究と比較して、式(11)の適用性についてみる。板東・水山⁶⁾の桜島・野尻川河口の土砂堆積を対象とした水理実験において、模型給砂時間が試算された例があり、それを比較の対象とする。砂防分野における水理実験では、模型上流端の河床勾配に対する平衡輸送濃度を与えることが多いが、多量の土砂量を対象とするため、結果として、原型の土砂濃度よりも小さい濃度を模型で与え、給砂時間を調整することになるが、彼らの成果は、その試算を定式化した一例である。模型の泥水流量は、原型の土石流全体の流量との間にフルード相似を満たすように与えられた。混合物流量と泥水の関係、模型の清水流量と原型の土砂流全体の流量の比およびその比を示すと次式のようなである。

$$Q_{mix} = \frac{1}{1 - c_f} Q_{mud} \quad (14)$$

$$\frac{Q_{mud m}}{Q_{mix p}} = \frac{Q_{mud m}}{Q_{mix p} / (1 - c_{fp})} = (1 - c_{fp}) \frac{Q_{mud m}}{Q_{mud p}} \quad (15)$$

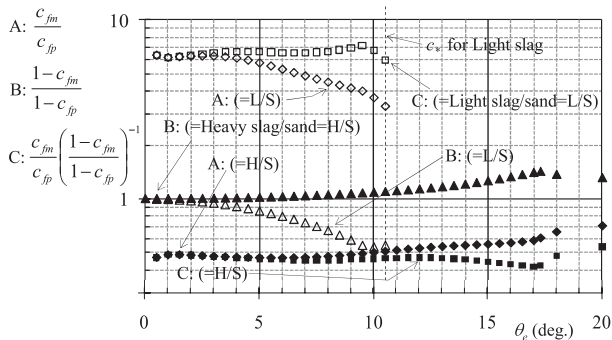


図-1 移動床流れにおける模型・原型の輸送濃度比

Fig.1 Ratio of model for proto-type sediment flux concentration in the flow over erodible bed

$$\frac{Q_{mud\ m}}{Q_{mix\ p}} = \lambda_B \lambda_h^{3/2} \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 Q_{mix} ：泥水と粗粒成分の混合物流量、 Q_{mud} ：泥水の流量である。なお、泥水流量 Q_{mud} を清水流量 Q_w に置き換えれば、式(8)は式(14)と等しくなる。

式(14)および式(16)を用いて、粗粒成分の流砂量比 λ_{ob} を求め、それを式(6)に代入して、粗粒成分の流砂量比および流砂の時間縮尺を求めると、それぞれ次式のようになる。

$$\frac{Q_{bm}}{Q_{bp}} = \frac{c_{fm}}{c_{fp}(1-c_{fm})} \lambda_B \lambda_h^{3/2} \dots\dots\dots (17)$$

$$\lambda_T = \lambda_{c^*} \lambda_h^{-1/2} \lambda_{LH} (c_{fm}/c_{fp})^{-1} (1-c_{fm}) \dots\dots\dots (18)$$

式(11)と式(18)を比較するために、水平・鉛直成分のひずみ・無ひずみ模型を対象とし、流砂の時間縮尺に関する試算を行う。模型縮尺 λ_L には、水理実験に用いられる値の一例として $\lambda_L = \lambda_{LH} = \lambda_{LV} = 1/100$ 、ひずみ縮尺の模擬には、 $\lambda_{LH} = 1/100$ 、 $\lambda_{LV} = 1/75$ を用いた。次いで、移動床河床勾配の平衡濃度（原型）とそれより小さい土砂濃度（模型）について、扇頂部付近の河床勾配の平均的な代表値（4.0～5.0 deg.）⁴⁾ を参考にして、5.8 (deg.) とした。これに対応する平衡輸送濃度は、 $c_f = 0.05$ となる。模型の給砂に相当する輸送濃度は、これより小さい値として $c_f = 0.01$ とした。

表-1 は、流砂の時間縮尺に係る試算値の比較である。式(11)の計算値は式(18)のものよりも時間縮尺が大きく、砂防堰堤内の土砂堆砂・堆積現象を再現する際には、給砂時間や河床変動に対する模型時間が大きくなる。また、式(18)は、ひずみ模型に対する感度が鈍いことが分かる。

3. 土砂の粒度分布

図-2 a), b) は、実験で用いた土砂の粒度分布である。本実験では、直接的には模型縮尺を対象としないが、幾何学的縮尺 $\lambda_L = 1/100$ を想定し、原型想定 ($\lambda_L = 1/1$) の粒度分布も示している。原型想定（粒度分布は、通常、巨礫調査法²¹⁾ による巨礫と現地・室内の篩分法による粒度分布を砂礫の質量密度を用いて、質量を合成すること

表-1 流砂の時間縮尺の比較

Table 1 Time scale of model to proto type for bed deformations

Parameters	Eq. (11)	Eq. (18)	Froude Similarity
c_m	0.01		
c_p	0.05	λ_T	$\lambda_T = 0.1$
λ_{LH}	1/100	= 0.451 (= 1/2.22)	(= 1/10)
λ_{LV}	1/75	= 0.429 (= 1/2.33)	
λ_{LH}	1/100	0.521	$\lambda_T = 0.1$
λ_{LV}	1/100	(= 1/1.92) (= 1/2.02)	(= 1/10)

によって得られる。ここでは、原型質量密度には、2.75 (g/cm³) を想定した。

同図には、比較のために、後述する掃流力相似を用いて得られる粒径比：1/31.4 の軽量骨材（図 a）と粒径比：1/149 の重量骨材（図 b）の原型値および模型値（図 a）の(3)、図 b) の(4)）を示し、それぞれ、実線の四角枠で囲んで示す。また、原型粒度分布と模型実験で用いる粒度分布の原型値想定（破線の四角枠で囲んで比較している。例えば、図-2 a）を見る。図中の原型粒度分布（(1)と表示）に対して掃流力相似を適用し、原型粒度分布の 60% 粒径が一致するような一様材料（(4)と表示）を設定した設定例である。原型粒度分布を模型縮尺 ($\lambda_L = 1/100$) に従って変換し、粒径が約 0.6 mm 以下の浮遊砂が卓越して、かつ、ripples が形成されるような成分（Region A）を除けば、模型実験に使用され得る実験材料候補（(2)と表示）が得られる。式(4)を用いて、模型縮尺（1/100）と比重比（1/3.18）を代入すれば、粒径比が決定され、模型実験に必要な材料の粒度分布（(3)と表示）が得られる。一方、図-2 b) は、図-2 a) と同様に、原型粒度分布（図中(1)と表示）に対して式(4)の掃流力相似を適用し、比重比（1/0.673）を用いて、原型の混合粒径の粒度分布を設定したものである。模型値の掃流力相似の粒度分布（図中(3)と表示）と通常の砂礫で微細成分（図中 Region A）を除去したものを比べると、模型で再現される細粒成分は粒径 0.3 mm 程度まで小さくすることが可能となっている。

4. 水路実験

4.1 軽量・重量骨材の材料特性と水理条件

軽量骨材や重量骨材を用いた水路実験を行う。軽量骨材を用いた水理実験では、小・中規模河床形態の形成に対する既往研究^{8)~10)} も行われているため、土石流による土砂移動形態を対象として、泥流と粗粒成分の混合物の流れにおける粗粒成分の挙動を清水と軽量骨材の流れで模擬する可能性を検証する。着目するパラメーターは、単純な流れ場を想定し、等流・移動床流れにおける輸送能力、すなわち、平衡勾配と輸送濃度とした。

一方、重量骨材を用いた実験では、まずは、軽量骨材のケースと同様に、等流の土石流による平衡勾配と土砂輸送濃度に着目して、重量骨材を用いた流れ場による模

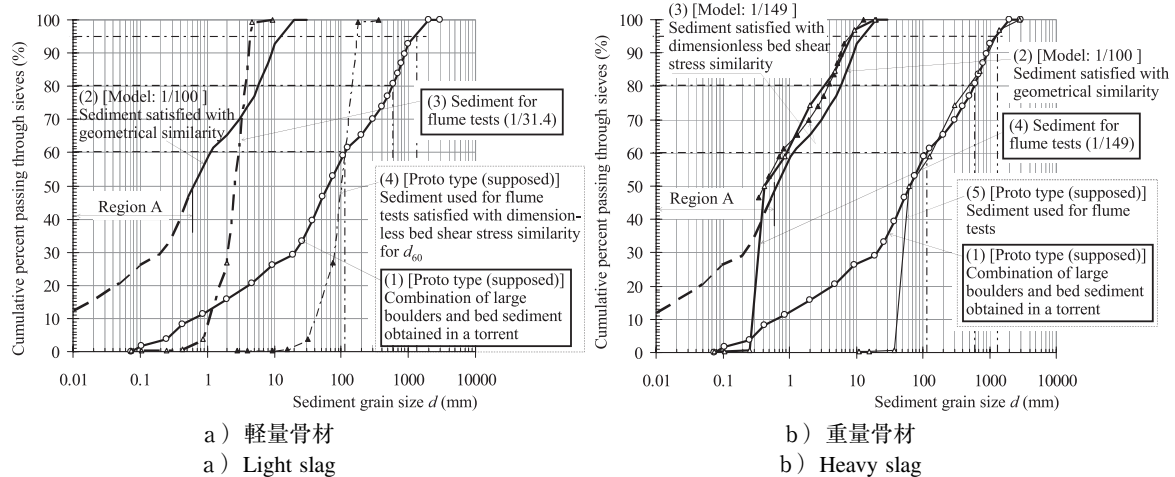


図-2 実験に用いた材料（模型）と原型想定材料の粒度分布
Fig.2 Sediment grain size distributions used in flume tests and supposed as proto type

擬可能性を検討する。次いで、広い粒度分布をもつ掃流砂流による河床変動に着目し、断面平均河床の縦断河床分布の1次元的な河床変動を模型実験で再現して、流れが多価性をもたない dunes 形成や移動限界状態での粗度、抵抗則といった基本的な流れの特性を見る。なお、珪砂を用いた模型実験と同様に、レイノルズ数の影響の有無を ripples の発生・形成によって確認し、珪砂の小規模河床波の形成領域区分図と比較することによって、重量骨材を用いた模型実験で模擬される現象の妥当性を検証する。

4.1.1 軽量骨材の特性

ほぼ一様な粒度分布をもつメサライト・中骨材（日本メサライト工業㈱製）を用い、図-2 a) (1)の原型想定60% 粒径を合わせるような模型粒径とした（図-2 a) (3)参照）。材料特性値は次のとおりである。60% 粒径 $d_{60} = 0.298$ (cm), $\phi_s = 38.0$ (deg.), $c_* = 0.537$, $\sigma/\rho = 1.45$ (絶対乾燥状態, 真比重: 2.00), 沈降速度: 12.8 (cm/s) (各粒径階の平均値)。個々の粒径に対する沈降速度について、レイノルズ数と抗力係数 c_D を用いて示したデータを図-2 に示す。なお、比較のために、Rubey 式^{22), 23)} も示している。メサライトは粒子内部に気泡が含まれ、吸水性が良いため、含水比を 14~16% に調整し、見かけの比重を 1.55 に設定した。

4.1.2 重量骨材の特性

粒径がほぼ一様な電気炉酸化スラグ（エコスター、㈱星野産商製）を用いた。混合砂を用いる実験では、一様な材料を混合させて、図-2 (1)および(4)に示すような原型想定および模型の粒度分布を得た。一様材料のうち、土石流実験に用いた4号（図-5 参照）の材料特性値を示すと次のとおりである。 $d_{60} = 0.153$ (cm), $\phi_s = 38.1$ (deg.), $c_* = 0.485$, $\sigma/\rho = 3.60$ (絶対乾燥状態, 真比重: 3.85), 沈降速度: 46.3 (cm/s) (混合材料の平均値)。図-5 に示す各粒径の抗力係数は、レイノルズ数と抗力係数の平面で整理し、図-3 に示す。

4.1.3 水理条件

軽量骨材を用いた実験では、図-4 に示す木製水路を用いて、給水・給砂を行い、定常・等流の移動床上の土石流を形成させ、水深、輸送濃度および平衡勾配の計測を行った。水理条件を表-2 に示す。同表において、 θ_0 : 水路勾配, θ_e : 平衡勾配, T : 水温 (°C), q_m : 混合物の単位幅流量, c_f : 輸送濃度, h_t : 全水深, h_s : 粒子移動層の厚さである。粒子の河床でのスリップの有無を確認した上で、河床は無塗装のベニヤ製の粗度無し河床とした。水深は、ポイントゲージによる計測と水路側壁から撮影したビデオカメラ映像による解析によって得た。水路下流端から流出する清水流量・流砂量はバケツ採水によって計測した。平衡勾配は、水路側壁より水面の位置に印を付けて求めた。得られた輸送濃度のデータについては後述する。

重量骨材を用いた実験では、等流の土石流の輸送濃度と平衡勾配の関係と掃流における抵抗則に関する実験を行った。表-3 は、土石流実験における水理条件である。抵抗則に関する実験では、給水を定常的に行い、河床には、一様材料（エコスター4号）、混合材料を 10 cm 敷き詰め、無給砂での実験を行った。河床初期勾配は 1/500 に設定し、水路下流には砂止め用の堰を設置した。清水流量は、平均粒径の移動限界流量（Run 006, 008）、巨礫成分の移動限界流量（Run 007）とした。水理条件を表-4 に示す。同表において、 Q : 清水流量, B : 川幅, h : 水深, R : 径深, i_e : エネルギー勾配, τ_* : 無次元掃流力, u_τ : 摩擦速度 ($=\sqrt{gh i_e}$), ϕ : 流速係数, k_s : 相当粗度, R_* : 粒子レイノルズ数 ($=u_\tau d/\nu$) である。粒径 d には d_{60} を用い、 k_s/d は粗面對数則から逆算した値である。流れが常流のため、水路下流端の堰による背水の影響を消去するために、Yalin²⁴⁾ と同様に木製の細い堰を設置した（図-4 参照）。

抵抗則の実験では、 $R_* = 20$ 程度よりも小さい流れで形成する ripples が模型実験で形成されないことを確認

すると共に、Lower regimeのもとでの平坦河床および dunes の形成を想定して、それらの抵抗を実験データから求め、珪砂を用いた実験データと比較することによって、掃流力相似を用いて設定した重量骨材の抵抗のズレを把握しようとしている。実験において、通水は9～10時間とし、2時間毎にポイントゲージを用いた水面形、金網を用いて流砂量の計測を行い、各通水時に通水を停止して流心の河床位を計測した。通水最後には、下流から1.5 m 地点の流心で河床形が変化しないように、プロベラ式流速計で流速分布を計測した。いずれのケースにおいても、長時間の通水後には、写真-1に示すような dunes が形成された。なお、長時間通水の停止時刻(9～10時間)は、水路下流端で計測される流砂量の時間変化がほぼ見られない時刻とした。

4.2 土石流の土砂輸送濃度と掃流の抵抗則

4.2.1 土砂輸送濃度

図-6は、平衡勾配と輸送濃度の関係である。比較のために、珪砂²⁵⁾や他の軽量骨材¹³⁾のデータも示した。一方、既往の土石流のモデルで数多くの輸送濃度の実験データを説明している計算値²⁵⁾と比較したところ、軽量・重量骨材共に計算値とデータの一致は良い。すなわち、軽量・重量骨材共に、内部摩擦角は珪砂と大きい違いがないため、主として、粒子比重の違いについて見れば良い。比重の違いによる輸送濃度の違いが現れ、比重が大きくなると輸送濃度が小さくなっている。これは、既往研究¹³⁾に示されるように、粒子比重の違いに起因した静的摩擦応力の違いによる土砂濃度分布の違いによるものである。

模型実験において、泥水の模擬を避けて、粗粒成分のみの河床変動を扱う場合には、粗粒成分の輸送濃度を一

致させると、土砂輸送能力の相似が得られ、一方、原型と模型で異なる材料を用いる時には、式(11)を用いて、図-1に示すような土砂輸送濃度比を見れば良いため、河床変動の相似が成り立つことが分かる。大規模流れにおける固相の砂礫と水の混合物の一部が流体として振る舞う相変化¹⁷⁾や高濃度泥流などの現象を扱う場合には、その現象を模擬するような実験^{16), 26)}を行う必要があるが、河川・砂防分野の施設配置計画に関する模型実験においては、固相・流体相の配分に対する幾つかのシナリオを設定して、固相(砂礫、石礫)に関する河床変動を模擬することになる。本実験では、後者の立場での現象の再現であるため、土砂輸送濃度の再現性について見れば良い。土砂輸送濃度は、両材料共に、平衡勾配に対して一意的に決まり、粒子群が層流で挙動する範囲においては、土砂輸送濃度の再現性は良い。

また、両材料共に得られた実験データを用いて、式(11)を適用して時間縮尺 λ_T を試算したものを表-5に示す。計算においては、模型縮尺は、 $\lambda_h = \lambda_{LH} = 1/100$ として、1を仮定した。式(11)の模型および原型の輸送濃度には、それぞれ、各ケースの平衡勾配に対する人工材料の輸送濃度および珪砂の輸送濃度を用いて算定した。重量骨材を用いた模型実験では時間縮尺は大きくなり、さらに、フルード相似則による時間縮尺(=1/10)の約1.42～1.52倍となる。一方、軽量骨材を用いた模型実験では、フルード相似則による時間縮尺の約1/4程度となり、時間縮尺が小さくなる。人工骨材を用いた模型実験では、フルード相似則による模型時間と異なるため、流水の模型時間とのアンバランスが生じる。定常流実験では、時間縮尺に応じた模型時間の設定は容易であるが、非定常実験においては流水と流砂の時間縮尺のバランスを考える必

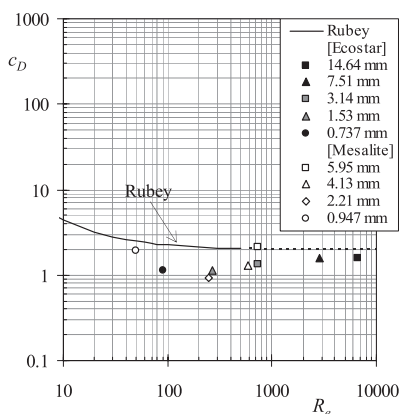


図-3 粒子の抗力係数

Fig. 3 Relationship between Reynolds number and drag coefficient, c_D

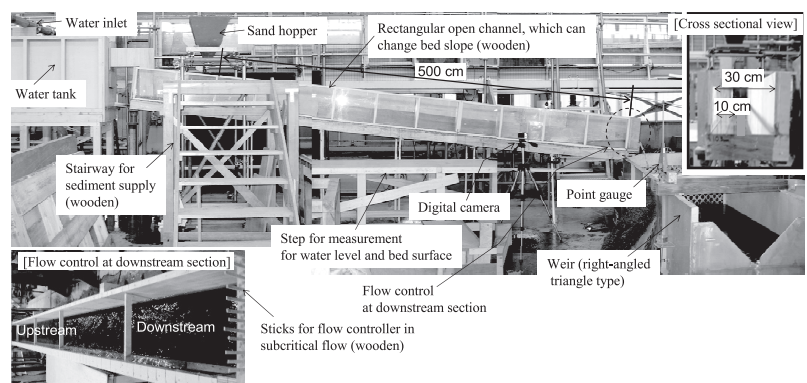


図-4 実験水路の模式図(写真に加筆)

Fig. 4 Schematics of experimental flume

表-2 軽量材料を用いた土石流実験の水力条件(実験結果も含む)

Table 2 Hydraulic conditions for flume tests of debris flows using light materials

Run	θ_0 (deg.)	θ_c (deg.)	T (deg)	q_m (cm ² /s)	c_f	h_t (cm)	h_s (cm)	h_t/h_s	Fr
001	6.20	2.94	11.2	106.2	0.0515	1.95	1.03-1.2	0.525-0.615	1.25
002	6.20	3.99	11.4	113.7	0.0900	1.88	0.882-1.32	0.469-0.702	1.41

表-3 重量材料を用いた土石流実験の水理条件（実験結果も含む）
Table 3 Hydraulic conditions for flume tests of debris flows using heavy materials

Run	θ_0 (deg.)	θ_e (deg.)	T (deg)	q_m (cm ² /s)	c_f	h_i (cm)	h_s (cm)	h_i/h_s	Fr
003	6.2	3.71	7.8	106.6	0.0160	1.39	0.195	0.14	2.08
004	6.2	4.32	7.9	105.1	0.0197	1.29	0.25–0.292	0.194–0.250	2.29
005	6.2	5.03	8.2	105.9	0.0252	1.32	0.34–0.44	0.258–0.333	2.23

表-4 重量材料を用いた抵抗則実験の水理条件（一部、実験結果も含む）
Table 4 Hydraulic conditions for flow resistance experiments using heavy materials

Run	Q (l/s)	B (cm)	h (cm)	R (cm)	i_e	d_{60} (cm)	h/d	R/d	τ_* (h)	τ_* (R)	u_τ (cm/s)	$\phi = v/u_\tau$	k_s/d	Fr	Re_*
006	5.28	30.0	4.65	3.55	0.00255	0.126	36.9	28.2	0.0362	0.0276	2.98	12.7	2.00	0.561	37.5
007	17.3	30.0	9.98	5.99	0.00132	0.126	79.2	47.6	0.0403	0.0242	2.79	20.7	1.50	0.584	35.1
008	13.1	30.0	7.51	5.01	0.00248	0.153	49.1	32.7	0.0468	0.0312	3.49	16.7	2.00	0.677	53.4

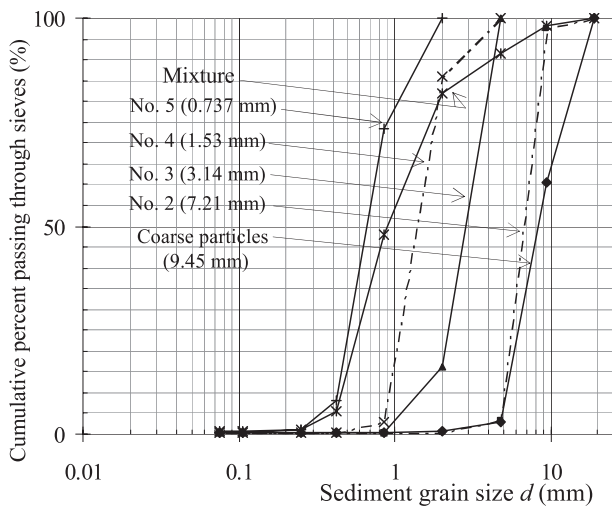


図-5 重量骨材の粒度分布（模型値）

Fig. 5 Grain size profiles of heavy material particles

要がある。

4.2.2 抵抗則

(1) 水面形・河床縦断分布と流砂量

図-7は、通水最後の時刻における流心での水面形および河床位の縦断分布、図-8は、通水最後における流心での流速分布、図-9および図-10は、水路下流端での流砂量の60%粒径、平均粒径および流砂量の時間変化である。水面形と縦断分布によれば、各流量において、dunesの形成が確認できる。粗面上の対数則を仮定して相当粗度を算定すると、それぞれ、 $1.5 \times d_{60}$ (Run 007), $2.0 \times d_{60}$ (Run 006, Run 008) となり、平坦床からdunesの形成領域における相当粗度の範囲 ($= (1 \sim 2) \times d_{60}$)²⁸⁾にある。図-9によると、水路下流端での流砂量の60%粒径は時間的な変化が少ないが、平均粒径は通水時間の経過とともに若干小さくなっている。Run 006では流砂量が小さく移動限界近傍であるため、粒径の時間的な変化が見られず、dunesと平坦床の形成の区別が難しいが、Run 7では巨礫成分以外の粒径の流砂の移動性が活発であり、dunesが形成されている。

(2) 流速係数・流れの形態

図-11(a)–(c)は、流速係数と河床形態に関する領域区

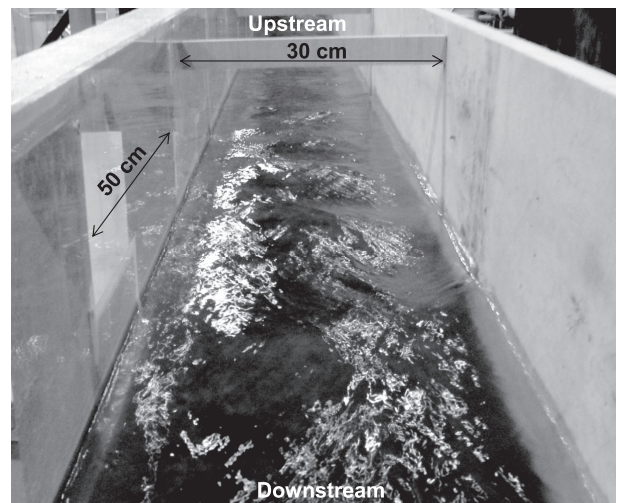


写真-1 dunes形成の一例（Run 007：下流端から撮影した水面の斜め写真）

Photo 1 An example of formation of dunes (Run 007)

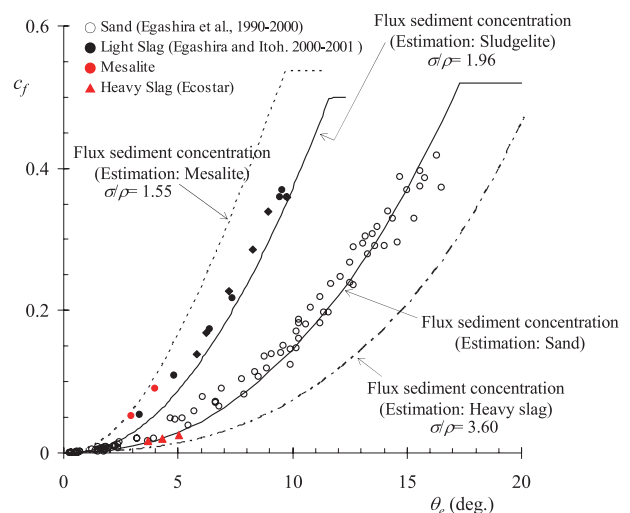


図-6 平衡勾配と輸送濃度の関係

Fig. 6 Relationship between equilibrium bed slope and flux sediment concentration

分図²⁷⁾に実験データを示したものである。Run 006では、掃流力が一様材料の移動限界²⁰⁾よりも若干小さいため、参考例として示した。また、図において、水深、径深お

表一5 流砂の時間縮尺 (重量・軽量骨材)

Table 5 Time scale for bed deformations using heavy/light slag

Parameters	$(\lambda_{LH}, \lambda_h = 1/100)$	λ_T obtained by Eq.(11)
		Light slag
C_{fm}	0.0515	(Run 001) $\theta_e = 2.94$ deg.
C_{fp}	0.0128	0.0239 (= 1/41.8)
C_{fm}	0.0900	(Run 002) $\theta_e = 3.99$ deg.
C_{fp}	0.0235	0.0243 (= 1/41.2)
Parameters	$(\lambda_{LH}, \lambda_h = 1/100)$	heavy slag
C_{fm}	0.0160	(Run 003) $\theta_e = 3.71$ deg.
C_{fp}	0.0203	0.127 (= 1/7.87)
C_{fm}	0.0197	(Run 004) $\theta_e = 4.32$ deg.
C_{fp}	0.0276	0.141 (= 1/7.09)
C_{fm}	0.0252	(Run 005) $\theta_e = 5.03$ deg.
C_{fp}	0.0376	0.151 (= 1/6.62)

よび図-9に示す各時刻における流砂成分の60%粒径を用いた。比較のために、掃流力に通水初期の河床材料の粒径を用いた計算値も示した。図-12は、小規模河床形態の形成について、掃流力と相対水深²⁹⁾の平面で本実験データを加えて比較したものである。図には、各ケースの時間変化を示している。これらの図より、重量骨材の河床形態と底面摩擦の関係は、一部は平坦河床に含まれるが、主として dunes が形成される領域区分に含まれ、流れは lower regime に含まれ、一様砂を用いた既往データの示す結果と同じである。なお、図-11以外の領域区分^{24), 27), 30)}を用いても、流れと河床形態の区分は同じであった。

なお、珪砂では、摩擦速度に依存するが、 $R_{*} = 20$ 程度を基準として、粒径が0.6 mm以下で ripples が形成されるといわれている。図-2b)に示すように、重量骨材を用いた実験では、石礫の混入した混合砂の影響もあるが、表-4の水理条件において、Run 006, Run 007では $R_{*} = 8.94 \sim 8.37$ であり、粒径が0.3 mm程度の骨材の ripples の形成は見られなかった。図-11(b), (c)において、一様な珪砂を用いた抵抗則は、初期河床材料の60%粒径を用いた径深・粒径比のデータと酷似しているが、ここでは、一様材料・混合材料の流砂成分の代表粒径を用いた掃流力によって整理する。

(3) 河床形態と抵抗の相似

模型実験における抵抗や河床形態の相似について、図-11に示す抵抗則について見る。流速係数の掃流力に対する変化率は、ほぼ一様な珪砂のデータと同様であるが、流速係数が若干大きく算定される傾向にある。そこで、一例として、次のような試算を行った。岸らの dunes における抵抗則²⁷⁾(後述の式(19))を用い、水深と流速を変化させて、図-11の一様砂の dunes の抵抗則に合うように計算を行った。この一連の計算で得られたデータを「Modified」として示している (Run 007, Run 008)。その結果、流速は、フルード相似則で得られた値の0.795倍 (Run 007) ~0.859倍 (Run 008) になった。模型実

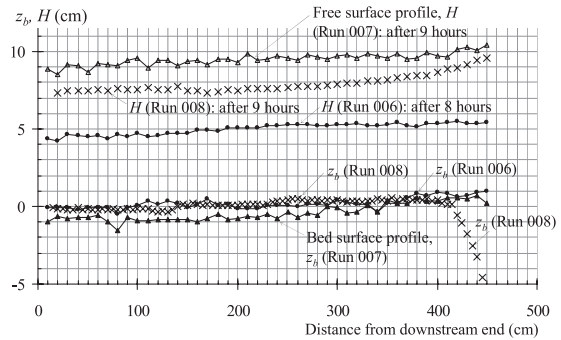


図-7 流心での水面形 (長時間通水後)
Fig. 7 Longitudinal free surface profiles along main flow

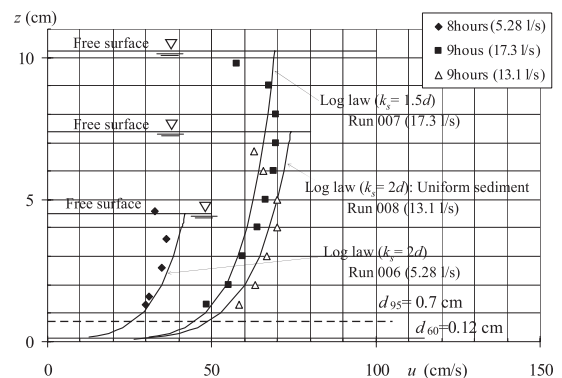


図-8 流心での流速分布 (長時間通水後)
Fig. 8 Velocity distributions along main flow

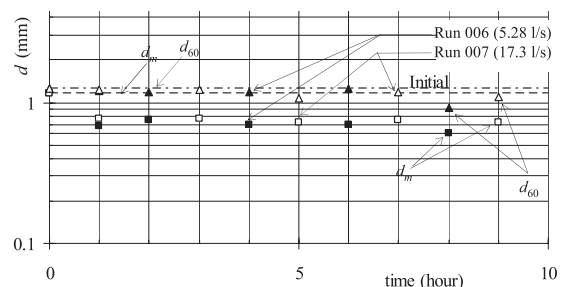


図-9 水路下流端での流砂量の平均粒径の時間変化
Fig. 9 Temporal changes of mean diameter of sediment discharge at the downstream end of a flume

験において、平坦床もしくは dunes が形成されるような河床変動を扱う場合、掃流力相似が満たされ、流れの抵抗をある程度みた時には、フルード相似則で設定される流速や流量よりも若干小さく設定すれば良い。すなわち、水位の相似よりも河床形状の相似に主眼を置くような模型実験では、流速 (もしくは、流量) は、フルード相似を満たす必要がないことが分かる。

次に、抵抗則相似と河床変動の時間縮尺について見る。流れの抵抗の相似は、流速係数 ϕ が満たされると、1次元的な平均流れに対して抵抗の相似が満たされる。

$$\lambda_\phi \equiv \frac{\phi_m}{\phi_p} = \frac{v_m}{u_{*m}} / \frac{v_p}{u_{*p}} = 1 \quad \dots\dots\dots (19)$$

dunes の抵抗則に対して、次式の岸らの抵抗則²⁷⁾を式(19)に代入して、流速係数の相似に関する式(21)が得られる。

$$\phi = 2.4(h/d)^{1/6}\tau_*^{-1/3} \dots\dots\dots(20)$$

$$\lambda_h\lambda_d^{-1}\lambda_i^2\lambda_{\sigma/\rho}^{-2}=1 \dots\dots\dots(21)$$

なお、式(20)における相対水深と無次元掃流力のべき乗について、図-11に示したデータを用いて確認したところ、同一であった。

式(21)を掃流力相似から得られる式(3)と比較すれば、両者は、無ひずみ模型で、かつ、幾何学的相似および粒径・比重比が1でない限り一致しない。また、河床変動の時間縮尺に関する式(10)に式(21)を代入すると、dunes 河床に対する抵抗則が相似となる時間縮尺が得られる。

$$\lambda_T = \lambda_{cs}\lambda_B\lambda_h^{-3/2}\lambda_{LH}\lambda_i^{-1/2}\left(\frac{C_{fm}}{C_{fp}}\right)^{-1}\frac{1-C_{fm}}{1-C_{fp}} \dots\dots\dots(22)$$

式(11)と式(22)を比較すると、無ひずみ模型 ($\lambda_i=1$) であれば、両者は一致する。

4.3 相似則を満たす人工骨材の選定方法

本研究で扱った dunes の形成する水理条件や勾配の大きい土石流・土砂流に対しては、人工骨材を用いた模型

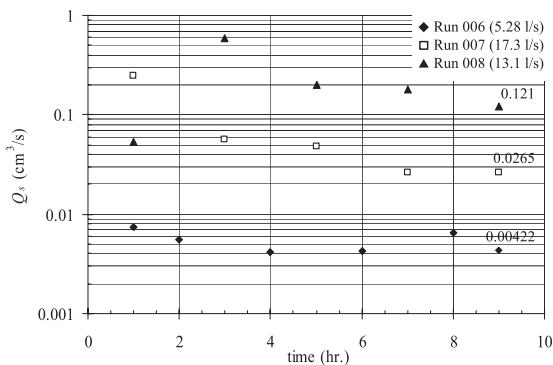


図-10 水路下流端での流砂量の時間変化

Fig. 10 Temporal changes of sediment discharge rate at the downstream end of a flume

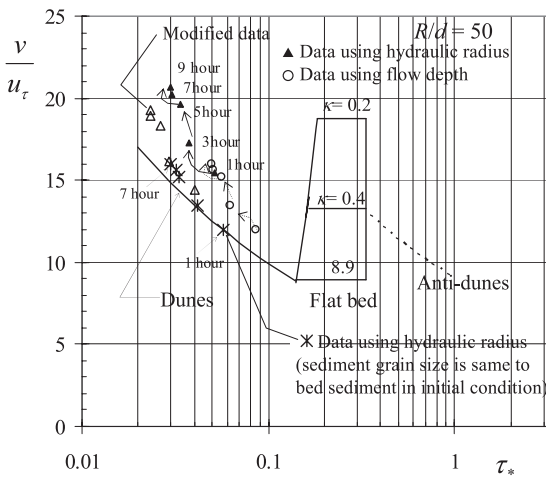


図-11(b) 流速係数の時間変化 (Run 007)

Fig. 11(b) Temporal changes of flow resistance (Run 007)

実験が適用可能であると考えられる。図-11に示すような、流れが多価性をもつ、勾配の小さい流れにおける掃流砂流の平坦河床流れにおいては、今後、多くの検討が必要であるが、anti-dunes における流れにおいても、流れの抵抗が水深・粒径比と無次元掃流力で決まる²⁷⁾ため、本研究と同様の議論が可能であると思われる。

図-13は、岸らの小規模河床形態の領域区分図に重量骨材のデータ (Run 006~008) のうち、通水初期および通水最後のデータを示したものである。通水初期のデータには、Ini.と示している。さらに、原型の砂礫流れを基準として、軽量・重量骨材を用いた模型実験を行う際に、掃流力相似を用いて模型実験材料の比重や相対水深を予測する過程を示している。(A)は Lower regime で dunes の形成領域、(B)は遷移領域、(C)は Upper regime で anti-dunes の形成領域、(D)は移動限界より小さい領域である。ここでは、dunes の流れや土石流の模型実験の条件を決定する例を示すために、清水流量の大小、河床勾配の大小に着目して、5 パターンの試算例を示した。図中に「1」～「5」の番号を附している。図中の赤色の破線は、掃流力相似が成立する線であり、青色の破線は抵

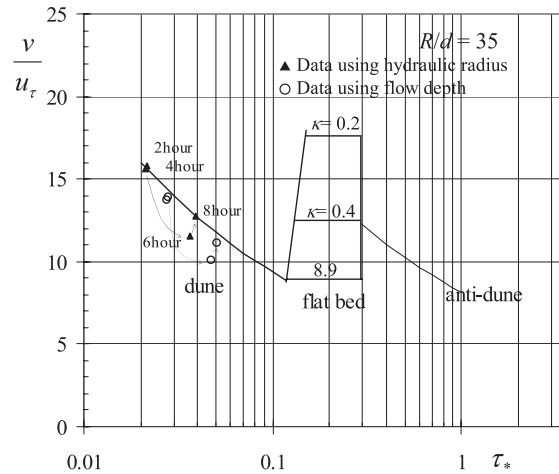


図-11(a) 流速係数の時間変化 (Run 006)

Fig. 11(a) Temporal changes of flow resistance (Run 006)

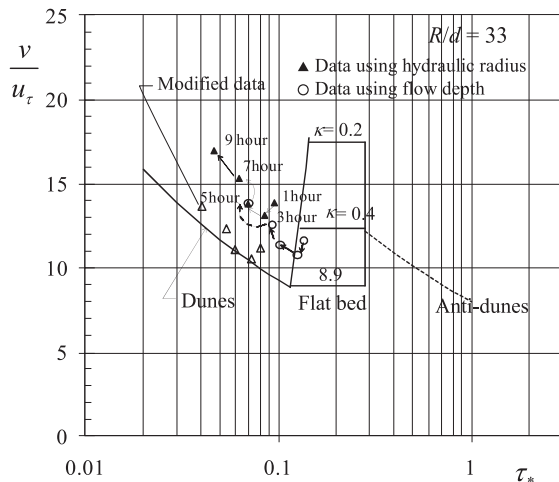


図-11(c) 流速係数の時間変化 (Run 008)

Fig. 11(c) Temporal changes of flow resistance (Run 008)

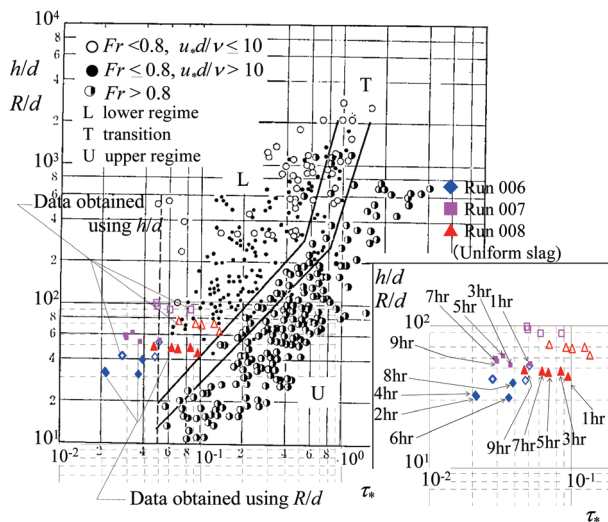


図-12 無次元有効掃流力と水深粒径比, 径深粒径比の関係 (文献²⁹⁾のデータに加筆)

Fig.12 Relation between dimensionless bed shear stress and relative depth

抗則の相似が成立する線である。「1」,「2」では, 河床形態が原型と模型で一致するためには, 「1」~「1'」, 「2」~「2'」区間のみであり, 本研究で用いた重量骨材での模型再現が困難である。「3」,「4」では, 赤色破線区間が, 原型と模型で掃流力・河床形態の相似が成り立つ。また, 「3」では「3'」, 「4」では「4'」において, 本研究で用いた重量骨材での模型再現が可能である。また, 「3」, 「4」は, 河床形態と抵抗則の相似を満たした場合に, 本研究で用いた重量骨材が適用可能であることを示している。一方, 「5」は, 本研究で用いた軽量骨材による土石流の再現であり, 河床形態の相似は満足し, 模型実験での再現が可能であることを示す。

原型値の流量, 粒径や河床勾配などの実験条件が与えられ, 原型と模型で河床変動に関する模型実験の条件を設定する際には, 次のような手順となる。手順①: フルード相似則で水理量を仮定する。手順②: 図-12, 図-13で Upper regime, Lower regimeの確認をする。手順③: 図-12, 図-13や文献³⁰⁾等を用いて河床形態の形成を確認する。手順④: 流れの抵抗の相似は完全には満たさないが, ある程度の相似を満たすように, 図-11を用いて水理量を変化させる。手順⑤: 図-1および式(11)を用いて, 土砂輸送濃度に対する模型値を設定する。手順⑥: ②から④の手順を繰り返し行い, 水深などの水理量, 土砂輸送濃度の模型値および模型時間を設定し, ripplesの非発生を確認する。

ここで比較した珪砂の流れの抵抗に関するデータは一樣砂のものであり, 模型値から原型値の推定を行うことを想定した場合には, 本実験の混合粒径のデータと直接的な比較は難しい。また, 図-11の類の平面で現地河川のデータが幾つか収集されている^{29), 31)}が, 混合砂を対象とした水路実験や現地観測データおよび流れの抵抗に関する研究成果を待つ必要があり, これは今後の課題で

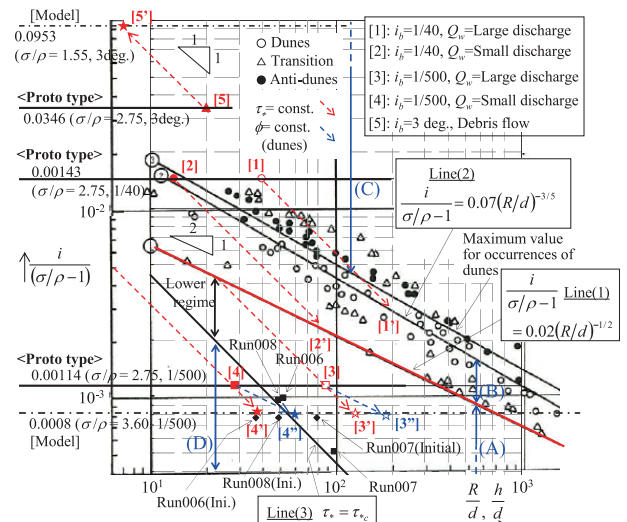


図-13 相対水深と勾配・比重比の関係 (文献²⁷⁾のデータに加筆)

Fig.13 Relation between relative depth and the ratio of bed slope for specific weight of sediment particles

ある。

5. おわりに

砂防施設による種々の流砂形態による土砂移動を制御することを想定し, 本研究では, 石礫を含む泥流や中小出水規模の流量による土砂移動に着目し, これらを水理実験で模擬するための1つの手法として, 人工骨材の軽量・重量骨材を用いた流砂現象の模擬に関する試みを行った。種々の水理条件での抵抗則や土石流に関する基本的なデータを収集し, これらによって得られた成果を列挙する。

- 1) 粗粒成分が主体となる1次元的な河床変動を対象として, 人工骨材を用いた河床変動に対して輸送濃度を用いた河床変動の時間縮尺(式(11))を示した。さらに, 過去の成果⁶⁾と比較して, 式(11)の時間縮尺に関する一般性を検証した。例えば, 河床変動の模型時間は, フルード相似則の時間の4~5倍以上になる。
- 2) 軽量・重量骨材における移動床流れの土砂輸送能力について, 等流状態の移動床土石流のデータを収集した。本研究で使用した人工骨材は, 内部摩擦角が珪砂とほぼ等しく, 比重のみが異なる材料である。比重の違いによる輸送濃度の違いが現れ, 比重が大きくなると輸送濃度が小さくなる傾向が得られた。これは, 既往研究^{13), 26)}に示されるように, 粒子比重の違いに起因した静的摩擦応力の違いによる流速分布・土砂濃度分布の違いによるものである。今後, 詳細な流れの特性を把握するには, 流速・濃度分布のデータ収集が必要であるが, 土石流の既往モデル^{19), 25)}で得られる輸送濃度の計算値と比較し, 軽量・重量骨材共に, 比重の違いに応じた輸送濃度のデ

ータの検証がなされた。

- 3) 2) に関連して、1 次元的な河床変動量に対する時間縮尺を表す式(11)を用いると、流砂量に見合った時間縮尺が得られる。定常流の水理実験では、時間縮尺に応じた給砂時間の設定が容易であるが、非定常流実験においては、式(11)を用いて設定し、予備実験を通じて、原型との相似性を確認する必要がある。
- 4) 2) に関連して、抵抗則に関するデータ収集を行った。小規模河床波のうち、ripples の発生・形成を対象としない場合には、これらの形成を避ける必要がある。その確認を行った上で、抵抗が相対水深や掃流力で一意的に求められる砂堆 (dunes) を対象とした。

重量骨材を用いた実験において、dunes が形成されるような河床では、無次元掃流力が移動限界状態近傍から約 0.1 の範囲において、一様砂を対象とした抵抗則や河床形態の領域区分^{24), 27) - 30)}と同様の結果となり、底面摩擦は珪砂のそれとほぼ一致し、模型実験において河床変動の相似が成り立つことを示す。また、掃流力相似のもとで比重・粒径比に留意して、フルード相似則により設定された流量・水深よりも若干小さくすれば、dunes 形成領域での抵抗則の相似が満たされ、重量骨材は、少なくとも、平均的な 1 次元的な河床変動を再現する水理実験への適用が可能である。

謝 辞

本研究の実験およびデータ整理において、日本工営(株)中央研究所の渡部春樹氏、大木巻夫氏ほか多くのスタッフに協力を得た。また、長谷川和義先生(現(株)北開水工コンサルタント先端技術開発センター所長)より有意義な意見を頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 柿徳市：土石流の実験的研究，新砂防，26 (通巻 19 号)，p. 1-6, 1955
- 2) 村野義郎：十勝岳の土石流について，新砂防，59, p. 14-23, 1965
- 3) 池谷浩・上原信司：桜島野尻川における泥流対策に関する実験的考察，土木技術資料，Vol. 21, No. 4, p. 24-29, 1979
- 4) 池谷浩・米沢谷誠悦：土石流危険区域設定に関する考察，土木技術資料，Vol. 19, No. 12, p. 611-617, 1977
- 5) 鬼木幹男・水山高久：泥流に関する模型実験手法，第 31 回水理講演会論文集，p. 755-760, 1987
- 6) 坂東高・水山高久：土石流の堆積に関する模型実験手法，第 31 回水理講演会論文集，p. 761-766, 1987
- 7) 小田晃・阿部彦七・水山高久・遠藤利仁：泥流を対象とした水理模型実験，砂防学会誌，Vol. 50, No. 2, p. 32-35, 1997
- 8) 山本晃一・坂野章：河川移動床模型実験材料としての石炭粉の移動特性と斐伊川模型への応用，土木研究所資料，第 1802 号，39 pp., 1982

- 9) 福岡捷二・浅野富夫・林正男：河川移動床模型実験材料としての軽量材料の水理特性[II]，土木研究所資料，第 3111 号，48 pp., 1992
- 10) 山本晃一・佐々木克也：河川軽量河床材料の流送特性と移動床模型実験の相似性に関する研究，土木研究所資料，第 2641 号，44 pp., 1988
- 11) 石川芳治・石塚忠範・前田昭浩・高濱淳一郎：軽量材料を用いた掃流状集合流動の水路実験，平成 6 年度砂防学会研究発表会概要集，p. 179-182, 1994
- 12) 松村和樹・水山高久：軽量材料を用いた土石流の流動特性に関する実験的研究，新砂防，Vol. 43, No. 1, p. 16-22, 1990
- 13) 伊藤隆郭・江頭進治・宮本邦明：土石流の流れに及ぼす固相・液相の材料特性の影響，水工学論文集，44 巻，p. 677-682, 2000
- 14) (例えば) 水山高久：土石流の実験と相似則，砂防学会誌，Vol. 46, No. 3, p. 35-39, 1999
- 15) 宮本邦明・伊藤隆郭：土石流の数値シミュレーションと相似則，砂防学会誌，Vol. 55, No. 6, p. 40-51, 2003
- 16) 芦田和男・山野邦明・神田昌幸：高濃度流れに関する研究 (1) - 粘性係数と沈降速度 -，京都大学防災研究所年報，28 号 B-2, p. 367-377, 1985
- 17) 芦田和男・江頭進治：長野県西部地震による御岳くずれの挙動，京都大学防災研究所年報，28 号 B-2, p. 263-281, 1985
- 18) 内島邦秀・早川博：交互砂州河床河川の移動床歪模型の相似則に関する研究，土木学会論文集，No. 479/II-25, p. 71-79, 1993
- 19) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，41 巻，p. 789-794, 1997
- 20) 土木学会：水理公式集 [平成 11 年版]，第 2 編河川編，丸善，1999
- 21) (例えば) 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術センター砂防研究室：土石流・流木対策設計技術指針解説，国土技術政策総合研究所資料，第 365 号，73 pp., 2007
- 22) Rubey, W. W.: Settling velocity of gravel, sand, and silt particles, American Journal of Science, Series 5 Vol. 25, p. 325-338, 1933.
- 23) 河村三郎：土砂水理学 1，第 1 章，森北出版，1982
- 24) Yalin, M. S.: Mechanics of Sediment Transport (2nd Edition), 1977
- 25) 芦田和男・江頭進治・中川一：21 世紀の河川学，京大出版会，2008
- 26) 伊藤隆郭・江頭進治：高濃度流れの相変化に関する実験的研究，水工学論文集，51 巻，p. 895-900, 2007
- 27) 岸力・黒木幹男：移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I)，北海道大学工学部研究報告，第 67 号，p. 1-23, 1973
- 28) F. Engelund: Hydraulic resistance of alluvial stream (Closure), Proc. ASCE (Jour. Hydraulic division), Vol. 93. HY 4, p. 287-296, 1967
- 29) 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，p. 59-69, 1972
- 30) 中川博次・辻本哲郎・竹東正孝：河床波を伴う非定常流れの特性，第 27 回水理講演会論文集，p. 665-671, 1983
- 31) 山本晃一：沖積地河川の河道特性に関する研究，土木研究所報告，168 号，1986

(Received 23 May 2011 ; Accepted 22 November 2011)