

軽量・重量骨材を用いた急流河川における河床変動実験とその適用性

国土交通省北海道開発局旭川開発建設部 塚本博紀, 野嶽秀夫 (現: 札幌開発建設部)
 日本工営 (株) 砂防室 長山孝彦, 日本工営 (株) 中央研究所 貝塚和彦
 日本工営 (株) 中央研究所 伊藤隆郭, 北見工業大学 渡邊康玄

1. 結論: 急流河川を対象とした水理実験は、数値解析と合わせて現在でも活発に行われている。ここでは、山地河川の平均的な河床変動が掃流砂成分で決定されることに着目し、火山泥流や広い粒度分布をもつ山地河川における河床変動に対して、軽量骨材や重量骨材といった人工材料を用いた水理実験の可能性について議論する。原型に対する模型の水理条件は、フルード相似則と掃流力相似を用いて求められる。本研究では、その端緒として、軽量・重量骨材による流砂の抵抗則、輸送濃度など基本的な流れの特性値を調べ、それらの骨材を用いた水理実験の適用性について検討する。

2. 軽量骨材を用いた水路実験: 火山地域の泥流による泥水と掃流成分の混合物の流れや微細粒子を多く含む泥流の流れを模擬する場合、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が、フルード相似則との両立が困難である。例えば、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がある¹⁾⁻⁴⁾。これらは、泥水の密度・汜濫範囲の再現に主眼を置いて、粘性係数や相似則を満たすことには主眼を置かない試行例と思われる。勾配の小さい河川⁵⁾や河床上での計画土砂量の流下⁶⁾や流れのモデル(構成則)の検証⁷⁾のために、軽量骨材を用いた水路実験が行われ、珪砂とは異なる流れの特性が得られている。これらは、泥水に対して石礫が浮く特性を模擬したものと解釈できる。

仮に、これらの成果を参考にすれば、泥水に浮きやすい石礫成分のみの平均的な河床変動は、軽量骨材を含む清水流で再現可能と思われる。すなわち、土砂流・土砂流の移動形態で石礫の流下を対象とする場合、軽量骨材の土砂輸送能力に対して従前の研究成果と比較すれば、軽量骨材を用いた急な勾配における河床変動に対する水理実験の適用性が確認できる。

定常・等流の移動床土の土石流実験を行い、輸送濃度と平衡勾配の関係を調べた。実験方法は、後述する重量骨材に関する実験と同様であるため、ここでは省略して水理条件と材料特性のみを示す。実験では、メサライト・中骨材(日本メサライト工業(株))を用いた。ほぼ様な粒度分布をもち(図-1)、材料特性値は次の通りである。 $d_{60}=0.298$ (cm), $\phi_s=38.0$ (deg.), $c_s=0.537$, $\sigma/\rho=1.45$ (絶対乾燥状態, 2.00:真比重), 沈降速度: 12.8 (cm/s)(粒径階の平均値)。個々の粒径(図-1)に対する沈降速度特性は図-2に示す。メサライトは粒子内部に気泡が含まれると共に吸水性が良いため、含水比を14~16%に調節し、見かけ比重を1.55とした。水理条件を表-1に示す。得られた輸送濃度のデータおよびその特性については後述する。

3. 重量骨材を用いた水路実験: 山地の急流河川を対象とした水理実験において、土砂流やピーク流量の大きい1出水を対象とした場合には、全粒径成分が移動する水理条件を対象とすることが多く、広い粒度分布(最大礫径が数mの巨礫~ウォッシュロード成分)をもつ河床材料の河床変動に対して、模型値の粒径に対して留意すべき点は少ない。しかしながら、中小出水による砂防えん堤内の流砂・河床変動や堆砂域での中小出水による河床形態の形成などを対象とする場合、河床材料や流砂成分の縮小模型実験で再現される粒径が小さくなり、フルード相似則を満足することが難しくなる。一方、幾何学的な模型縮尺の制約のため、対象とする流砂成分(流砂形態)は、石礫を主体とする掃流砂が主体となる。さらに、河床形態に関連して、模型と原型との抵抗の相似を満足することも望まれる。

ここでは、フルード相似、掃流力相似を用いて砂防えん堤堆砂域の土砂移動現象の再現を想定し、実験手法と使用材料について検討した。すなわち、粗度や土砂輸送能力といった基本的な流れの特性に関する評価ができれば良いが、これらの相似則を満たした場合、平均的な河床変動をある程度再現するとしても、流れの抵抗の相似が満たされないことが予想され、そのズレを把握する必要がある。一方、粒子レイノルズ数からみれば、ripplesの形成を避ける必要があり、現地の広い粒度分布の

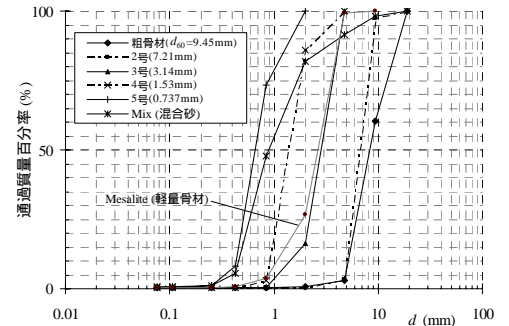


図-1 人工骨材の粒度分布

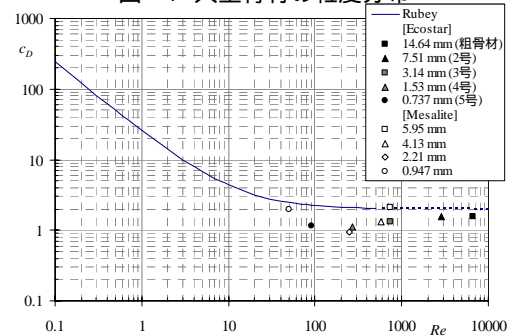


図-2 沈降速度(軽量材料, 重量骨材)

表-1 土砂流実験における水理条件(実験結果も含む)

(Ecostar)		θ_0 (deg.)	θ_e (deg.)	T (deg)	q_m (cm ² /s)	c_f	h_t (cm)	h_s (cm)	h_t/h_s	Fr
Run										
001		6.2	3.71	7.8	106.6	0.0160	1.39	0.195	0.14	2.08
002		6.2	4.32	7.9	105.1	0.0197	1.29	0.25-0.292	0.194-0.250	2.29
003		6.2	5.03	8.2	105.9	0.0252	1.32	0.34-0.44	0.258-0.333	2.23
(Mesalite)		θ_0 (deg.)	θ_e (deg.)	T (deg)	q_m (cm ² /s)	c_f	h_t (cm)	h_s (cm)	h_t/h_s	Fr
Run										
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

ここに、 θ_0 : 水路勾配, θ_e : 平衡勾配, T : 水温, q_m : 清水と土砂の混合物の流量, c_f : 輸送濃度, h_t : 水深, h_s : 土砂の移動層厚, Fr : フルード数である。

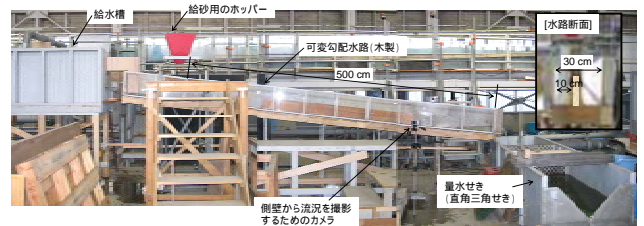


図-3 水路実験に用いた可変勾配式矩形断面水路(全景)

再現を考慮すると、掃流力相似を適用して適切な比重比・粒径比を与えれば良い。本研究では、比重の大きい重量骨材の使用可能性について試みた。

実験では、エコスター（粒径がほぼ一様な電気炉酸化スラグ、(株)星野産商）を用いた。混合砂を用いる実験では、原型値での所定の粒度分布を得るために、一様な材料を混合させた。一様材料のうち、土石流実験に用いた4号の材料特性値を示すと次の通りである。 $d_{60} = 0.153$ (cm), $\phi_s = 38.1$ (deg.), $c_s = 0.485$, $\sigma_f = 3.60$ (絶対乾燥状態, 3.85: 真比重), 沈降速度: 46.3 (cm/s) (混合砂材料の平均値)。各粒径(図-1)に対する沈降特性は図-2に示す。

(1) 土石流実験: 図-3に示す木製水路を用いて、給水・給砂(エコスター4号: 図-1参照)を行い、定常・等流の移動床土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-1に示す。河床は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。流れが平衡に達した後、水路下流端から流出する清水流量・流砂量を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。図-4は、平衡勾配と輸送濃度の関係である。比較のために、砂^{8), 9)}や他の軽量材⁷⁾のデータも示した。輸送濃度に及ぼす比重の違いは明瞭に現れ、一方、流れのモデルに関する適用性の確認のために、輸送濃度に関する計算値^{8), 9)}と比較したところ、軽量・重量骨材共に計算値とデータの一一致は良い。

(2) 抵抗則実験: 給水を定常的に与え、河床には、一様砂(エコスター4号)、混合砂を敷き詰め、無給砂での実験を行った。河床勾配は1/500に設定し、清水流量は、平均粒径の移動限界流量(Run 1, 3)、巨礫成分の移動限界流量(Run 2)を対象とした。水理条件を表-2に示す。通水は、9~10時間とし、2時間毎に水面形、流砂量を計測し、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1.5m地点の流心で河床形が変化しないように、プロペ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、長時間の通水後に移動限界状態になるが、duneが形成された。図-5は、流速係数と河床形態に関する領域区分図¹⁰⁾に一例としてRun 2の実験データを示したもので、図-6は、通水最後における流心での流速分布である。相当粗度は、 $1.5 \times d_{60}$ (Run 2), $2.0 \times d_{60}$ (Run 1, Run 3)であった。図-7は、有効掃流力 τ_{*e} と掃流力 τ_* の関係¹¹⁾であり、小規模河床形態の形成区分図の1つである。 τ_{*e} の算定においては、文献¹¹⁾と同様の方法で算定した。これらによると、小規模河床形態はdune形成領域にあり、珪砂のデータで提案されているものとほぼ同じであることが示された。一方、図-7以外の領域区分¹²⁾⁻¹⁴⁾を用いても、珪砂実験のLower regimeのdune形成領域であった。さらに、抵抗則をみると、流速係数は若干大きい、掃流力に対する変化率は珪砂のものと同様である。すなわち、流速(流量)の相似がフルード相似を満たさないように小さく設定すれば、河床形態および抵抗則の相似が満たされることが分かる。

図-5 無次元掃流力と流速係数(Run 2)

4. 結論: 火山泥流や広い粒度分布をもつ山地河川の河床変動に対して、軽量骨材や重量骨材といった人工材料を用いた水理実験の可能性について、抵抗則や土砂輸送能力に関するデータを用いて検討した。重量骨材は従前の水理実験で用いられることが少ないが、本実験で得られた結果によれば、比重・粒径比に留意すれば、急流河川の流れに関する水理実験への適用性が示された意味は大きい。今後、更なるデータ収集と抵抗則の相似などについて検討する予定である。

参考文献: 1) 柿 徳市: 新砂防, 26, 1-6, 1955, 2) 村野義郎: 新砂防, 59, pp. 14-23, 1965, 3) 鬼木幹男ら: 第31回水理講演会論文集, 755-760, 1987, 4) 小田 晃ら: 砂防学会誌, 50, No.2, 32-35, 1997, 5) 山本晃一ら: 土木研究所資料, 第3111号, 1992, 6) 石川芳治ら: 平成8年度砂防学会研究発表会概要集, 179-182, 1994, 7) 伊藤隆郭ら: 平成13年度砂防学会研究発表会概要集, 94-95, 2001, 8) 江頭進治ら: 水工学論文集, 41, 789-794, 1997, 9) 芦田和男ら: 21世紀の河川学, 京大出版会, 2008, 10) 岸 力ら: 北海道大学工学部研究報告, 67, 1-23, 1973, 11) F. Engelund: Jour. Hydraulic div., Vol. 93, HY4, 287-296, 1967, 12) 芦田和男ら: 土木学会論文報告集, 206, 59-69, 1972, 13) 中川博次ら: 新体系土木工学 23, 技報堂, 1986, 14) Yalin, M. S.: Mechanics of Sediment Transport (2nd Edition), 1977.

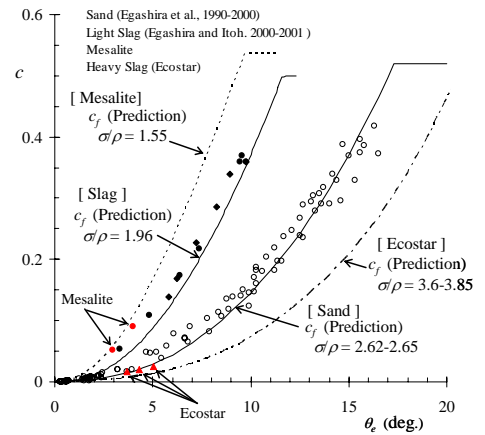


図-4 平衡勾配と輸送濃度の関係

表-2 抵抗則実験における水理条件(実験結果も含む)

Run	Q (l/s)	B (cm)	h (cm)	R (cm)	i_e	d_{60} (cm)	h/d	R/d
[Run1]	5.28	30.0	4.65	3.55	0.00255	0.102	45.5	34.8
[Run2]	17.3	30.0	9.98	5.99	0.00132	0.102	97.8	58.8
[Run3]	13.1	30.0	7.51	5.01	0.00248	0.153	49.1	32.7

Q (l/s)	$\tau_* (h)$	$\tau_* (R)$	u_{*r} (cm/s)	$\phi = v/u_{*r}$	k_s/d	Fr	Re_s
5.28	0.0447	0.0341	2.98	12.7	2.00	0.561	30.4
17.3	0.0498	0.0299	2.79	20.7	1.50	0.584	28.4
13.1	0.0468	0.0312	3.49	16.7	2.00	0.677	53.4

(Run 1, Run 2: 混合砂実験, Run 3: 一様砂実験)

ここに、Q: 清水総流量, h: 水深, R: 径深, i_e : エネルギー勾配, d: 粒径, τ_* : 無次元掃流力, u_{*r} : 摩擦速度, ϕ : 流速係数, k_s : 相当粗度, Re_s : 粒子レイノルズ数である。

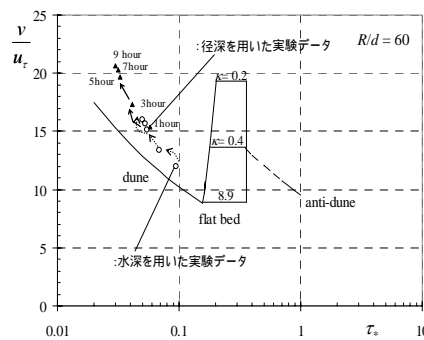


図-5 無次元掃流力と流速係数(Run 2)

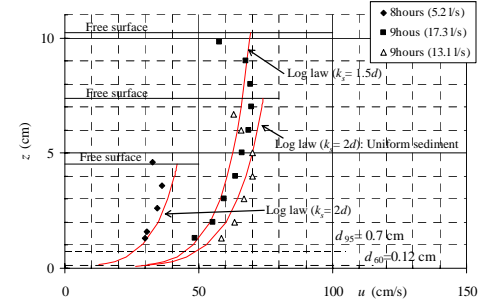


図-6 流心での流速分布(長時間通水後)

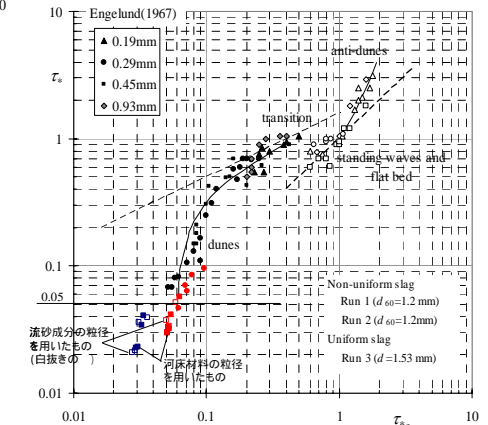


図-7 有効掃流力と掃流力の関係¹¹⁾