

岩露出河川の土砂流出特性に関する 流域模型を用いた実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON SEDIMENT DISCHARGE CHARACTERISTICS OF THE ROCK BEDDED RIVER APPLYING THE BASIN MODEL

長谷川祐治¹・竹林洋史²・藤田正治³

Yuji HASEGAWA, Hiroshi TAKEBAYASHI and Masaharu FUJITA

¹正会員 博(環) 京都大学防災研究所研究員(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

²正会員 博(工) 京都大学防災研究所准教授(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

³正会員 工博 京都大学防災研究所教授(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

In this research, we conducted laboratory experiments using a basin model and artificial rainfall equipment and the characteristic of sediment discharge time duration were considered. An experiment using a basin model and rainfall equipment was made and the special quality of the change was considered time of the sediment yield by this research. Experiments results are as follows. Seeing small rainfall intensity condition, large sediment discharge happened and clear peak sediment discharge showed in the case setting sediment on one main river, comparing to the case setting sediment on multiple branch streams. Seeing large rainfall intensity condition, clear peak sediment discharge showed in the case setting sediment on multiple branch streams and also in the main stream case. From experiment results, we found that the sediment yield location and volume relating to sediment discharge runoff were influenced by rainfall intensity.

Key Words : Hydraulic experiment, Basin model, Artificial rainfall, Artificial material

1. はじめに

地球温暖化に伴う極端な気象条件の変化によって、土砂災害の規模や発生頻度も変化することが懸念されている。H.25～26には伊豆大島¹⁾や広島市²⁾で前例のない甚大な被害の土砂災害が発生した。近年の災害の傾向から、このような気象条件の変化が土砂災害の規模や頻度の増大に影響していることは容易に推測できる。

土砂災害は、比較的上流の位置で発生することが知られている。一方で土砂移動は、不連続的・長期的な現象で、その影響が即座に広い範囲にわたって現れない特性を持つ。そのため、上流で土砂災害が発生しない流域においても、土砂流出が生じる下流域では河床変動が生じ、将来的に災害に繋がる可能性が懸念される。将来予測には、流域からの土砂流出量を把握することが重要である。土砂の生産源となる山地流域では、豪雨により斜面崩壊、裸地斜面では侵食が生じ、河道に堆積した土砂が侵食されて、下流に土砂が流出する。移動形態は土石流や土砂流、掃流砂など、勾配により多様である。また、河道は

樹枝状に分布しており複雑に合流や分流する箇所を有することから、予測が非常に難しい。

既往検討では^{例えは3)～5)}、流域からの土砂流出特性は、実河川での観測と流域土砂動態モデルを組み合わせで検討されている。江頭・松木³⁾は、河道の合流点に着目し、上流の合流点から下流の合流点までを単位河道として扱い、流域からの土砂流出量を算出するための合理的な手法を提案している。しかし、現状では観測結果には様々な現象が影響するため、土砂流出特性のメカニズムの把握が十分に進んでいない。特に、日本の河川の上流域や中流域には、岩が河床から露出した区間が多くあり⁶⁾、このような河川での土砂流出特性についてはあまり知られていない。また、降雨強度の違いや土砂生産の発生場所や規模が流出土砂量の時間変化に及ぼす影響についても十分な知見が得られていない。

本研究では、岩露出河川の流域模型と降雨装置を用いた土砂流出室内実験を行い、流出土砂量の時間変化の特性を検討した。

2. 実験概要

実験には、写真-1に示す滋賀県・杉野川流域を縮尺1/1,500にしたコンクリート製の流域模型を使用した。一般に縮尺模型を使用する実験では、相似則に則り現地スケールを模型スケールに換算して現象を把握するが、本実験は流域からの流出過程の把握が主目的であることから、一つの小さな実物模型として取扱うこととした。最大幅6.5m×4.5m、延長12.5mである。模型から約6m上空に設置された降雨装置により、模型全体に一定量の降雨を供給する。実験砂には粒度分布がほぼ様な0.8mm、比重1.6の土砂（アンスラサイト）を使用し、十分に水を含ませて状態で流域内の河道に敷き詰めた。実験は、3種類の降雨強度（79.5、141.2、185.8（mm/h））を設定して、下流端に設置した三角堰のある量水槽の水位を超音波センサ（E4C、OMRON製）により流出量の時間変化を計測した。ここでは、降雨を一定に与えているため、流出土砂量の時間変化を計測できる。土砂は、大規模な崩壊を想定して1つの河道（本川）と、小規模な崩壊が複数の河道（支川）で発生した場合を想定して、同量の土砂を3つの河道（支川）に分散させて置いた。土砂は、上流の合流点から下流の合流点までの単位河道となる区間に敷き詰めた。なお、それぞれの支川は、模型内で集水面積が大きい3つの流域を抽出し、土砂は一樣な厚さに敷き詰めた。図-1に対象流域および単位河道を、表-1に各河道の集水面積、延長、勾配を、表-2に実験ケース一覧を示す。

3. 実験結果

(1) 流出流量

図-2に3種類の降雨強度を与えた時の模型下流端からの流量の時間変化を示す。降雨強度に関係なく、通水初期では流量が若干小さく、時間とともに一定の流量になる。降雨強度が79.5 mm/hの場合、流量は0.55 l/s、



写真-1 流域模型（杉野川）。

141.2 mm/hでは0.98 l/s、158.8 mm/hでは1.32 l/sである。流域模型の流域面積は25.19 m²であり、合理式からも同じ流域面積であれば降雨量に対して流量は1対1の関係を示す。

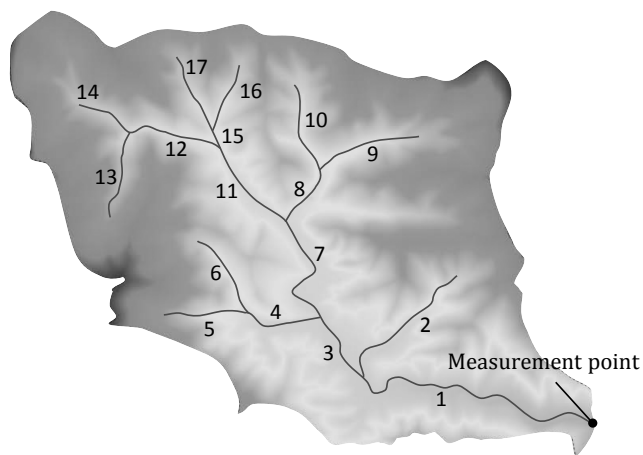


図-1 杉野川流域および単位河道。

表-1 各河道の条件。

No.	Catchment area(m ²), Length(m), Slope	No.	Catchment area(m ²), Length(m), Slope
1	25.2, 4.0, 1/66.6	10	1.5, 1.5, 1/21.5
2	1.8, 2.2, 1/19.6	11	7.8, 1.5, 1/88.2
3	19.6, 1.7, 1/67.4	12	4.3, 1.4, 1/33.9
4	3.1, 1.6, 1/65.2	13	2.0, 1.8, 1/9.2
5	0.8, 1.3, 1/5.9	14	1.6, 1.3, 1/9.8
6	1.2, 1.4, 1/12.5	15	1.7, 0.2, 1/12.8
7	15.5, 2.1, 1/142.8	16	0.7, 1.1, 1/10.4
8	6.2, 1.0, 1/32.6	17	1.0, 1.3, 1/11.1
9	2.6, 2.1, 1/8.0		

表-2 実験ケース一覧。

Case	Intensity of rainfall lmm/h	土砂を敷き詰めた位置
1	79.5	No.7とNo.11 1つの溪流に土砂を敷き詰めた場合
2	141.2	
3	185.8	
4	79.5	No.4, No.8, No.12 集水面積が大きい3つの溪流に土砂を敷き詰めた場合
5	185.8	

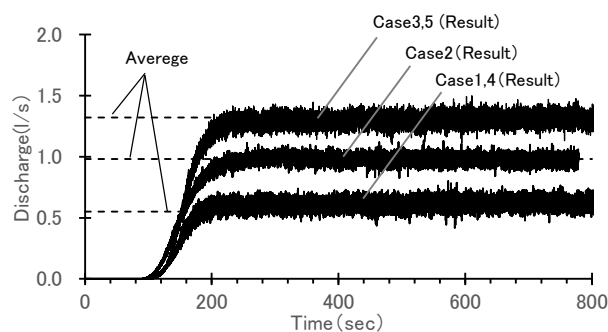


図-2 流出流量の時系列。

(2) 土砂の移動形態

水路実験の対象区間において、土砂を敷き詰めた単位河道の河床勾配は、本川のNo.7とNo.11は1/113.8、支川のNo.4は1/65.2、No.8は1/32.6、No.12は1/33.9、模型下流端に接続するNo.1は1/66.6である。これらの勾配から土砂の移動形態は掃流砂および浮遊砂となる⁷⁾。ここで、各单位河道の河道幅をレジーム則 ($\alpha=5.0$) から、流量を模型下流端の計測結果と流域面積比から、摩擦速度 u_* を勾配と水深から、実験砂の沈降速度 w_0 をrubeyの式から算出して、速度比 u_*/w_0 を求めた。レジーム則の係数は、模型下流端付近の流量と川幅から設定した。 u_*/w_0 は降雨強度に関係なく、本川のNo.1で最大値を取り、0.87～0.99の値を示す。この区間における τ_* は0.284～0.379である。これは、砂礫の浮遊限界となる0.1から0.2を大きく超えているため⁸⁾、No.1の区間は掃流砂領域であることがわかる。また、これより上流の河道では、 u_*/w_0 が0.6前後の値を示すため、下流と同様に掃流砂領域となる。実験観察からもほとんどの土砂が掃流砂で流下したことを確認した。

(3) 流域からの土砂流出特性

実験の観察により、単位河道に置いた土砂は上流から侵食して、徐々に下流に伝播することを確認した。上流側の支川 (No.8, No.12) に置いた土砂が本川 (No.7, No.11) に流出すると、堆積が生じる。これは、支川と比べて本川の方が勾配が緩く、また、本川の流れが支川に押されてその下流で渦が生じるからである。No.11の単位河道は比較的距離が長いので、下流にはこの区間の河床勾配に従い土砂が流下する。No.7では流量に関係なくNo.4との合流点直上流でせき上げが生じて、河床勾配よりも緩い水面勾配に従い土砂が流下する。No.3では、上流の単位河道より勾配が急になるため土砂がほとんど堆積しない。既存モデルにおいてNo.7の単位河道の勾配をNo.3とNo.7の最大河床高の差から設定すると、この区間の勾配が急になり、土砂が流出しやすくなる。既存モデルで計算を実施する際は、勾配の設定方法によって結果が大きく異なる場合がある。下流側の支川 (No.4) では、本川との合流点付近で勾配が緩くなるため、上流から流出した土砂がその区間に一時的に堆積する。模型下流端に接続する河道では、蛇行が生じて流れの湾曲部で若干の堆積が生じるが、ほとんど全ての土砂が下流に流出する。

図-3～7に各ケースの模型下流端からの流出土砂量と輸送濃度の時間変化を示す。流出土砂量は(流出量-流量)から、輸送濃度は(流出土砂量/流出量)から求めた。1つの河道に土砂を置いたCASE1, 2, 3の結果を比較すると、降雨強度が大きいほど、流出土砂量のピーク値が明確に現れる。輸送濃度を確認すると、Case1では最大で0.007、Case2では0.011、Case3では0.01である。本川のNo.1では、土砂がほとんど堆積せずに、流下してい

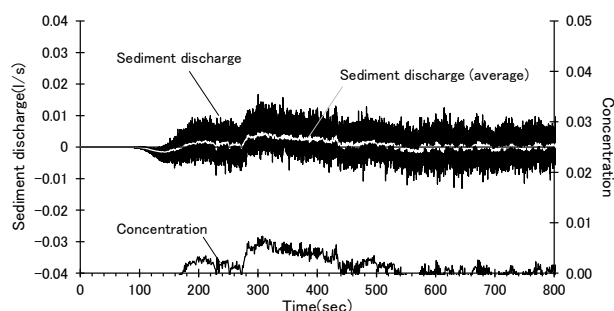


図-3 流出土砂量と輸送濃度の時間変化 (Case1)。

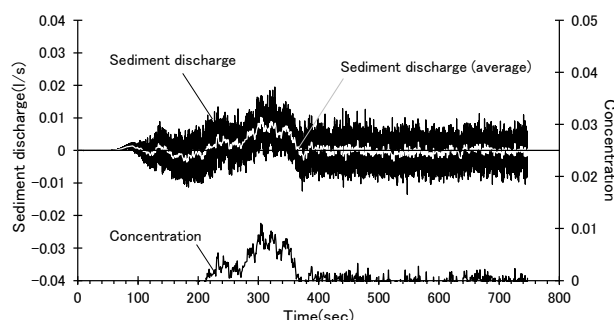


図-4 流出土砂量と輸送濃度の時間変化 (Case2)。

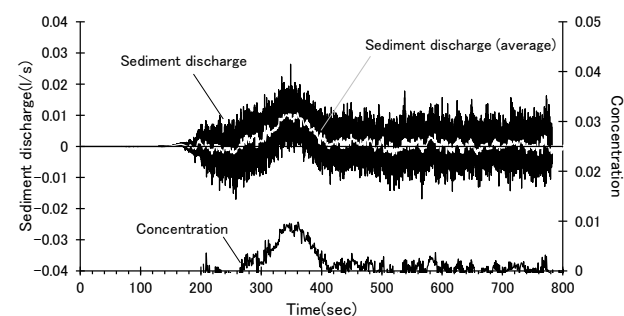


図-5 流出土砂量と輸送濃度の時間変化 (Case3)。

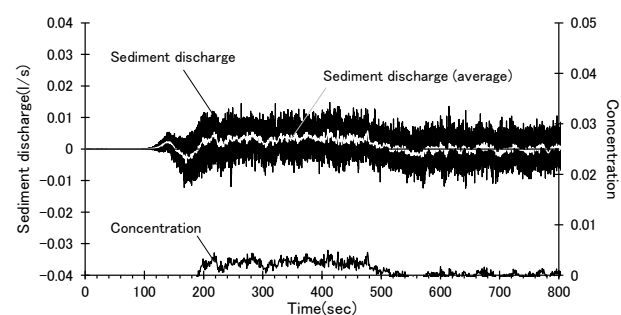


図-6 流出土砂量と輸送濃度の時間変化 (Case4)。

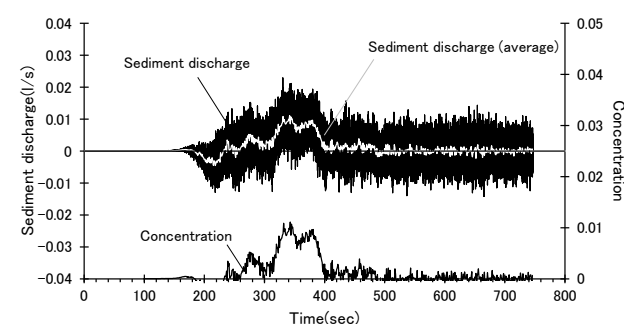


図-7 流出土砂量と輸送濃度の時間変化 (Case5)。

た。これは、その上流の単位河道であるNo.7に土砂が堆積して、この区間の勾配見合いの濃度の土砂が供給されたからである。No.7の河道は、上流よりも勾配が緩く、No.4との合流点付近でせき上げが生じて、河床勾配よりも水面勾配が緩くなり土砂が堆積しやすい条件となる。ここで、芦田・道上式および固定床滑面領域に適用するように修正された岩垣式を用いると⁹⁾、この単位河道の平衡濃度は0.029～0.031である。実験ではそれよりも小さい濃度で流下したこととなる。複数の河道に土砂を置いたCase4, 5の結果から、1つの河道に土砂を敷き置いた条件と同様に降雨強度が大きくなるとピーク値が明確に現れる。輸送濃度はCase4では最大0.004、Case5では0.009である。前述した1つの河道に土砂を置いた場合よりも流量の違いによる輸送濃度の差が大きくなる。

1つの河道と複数の河道に土砂を置いた場合について比較すると、降雨強度が小さいCase1, 4は、1つの河道に土砂を置いた場合の流出土砂量が複数の河道に土砂を置いた場合よりも大きくなり、流出土砂量のピークが明確に現れる。これは、複数の河道に土砂を置いた場合は、それぞれの土砂が順に下流に流出するためである。一方、降雨強度が大きいCase3, 5は、複数の河道に土砂を置いた場合にも明確な流出土砂量のピークは現れ、土砂の置き方の違いが土砂流出特性に影響しなかった。支川のNo.8とNo.12からの流出土砂は本川となるNo.7, No.11に堆積して、下流にはこの区間の勾配に従い土砂が流出する。支川のNo.4からの流出土砂は、本川との合流点から上流0.77 mの河床勾配は1/110で（単位河道の延長は1.6 m、河床勾配は1/65.2）、この地形条件に従い流下する。流下した土砂は下流河道で堆積せずに、下流端まで流出する。芦田・道上式を用いると、流砂量は流量の6/5乗に比例するとともに流量の増加とともに限界掃流力の影響が小さくなるため、流量の増加に伴って勾配が急な支川の流砂量が急激に大きくなり、土砂が本川にすぐに流出するためである。つまり、土砂生産の発生場所と規模が流出土砂量に与える影響は、降雨強度によって大きく変化することがわかる。また、生産土砂の分布とは無関係に、降雨強度が大きくなるにつれて流出土砂量のピーク値が高くなる。これも前述のように、流砂量は流量の6/5乗に比例するとともに流量の増加とともに限界掃流力の影響が小さくなるためである。

4. まとめ

流域モデルと降雨装置を用いた土砂流出室内実験を行い、流域からの土砂流出特性を検討した。土砂は、大規模な崩壊を想定して1つの河道に土砂を置いた条件と、小規模な崩壊が複数の河道で発生した場合を想定して同量の土砂を3つの河道に分散させて置いた条件とした。整理した結果を以下に示す。

(1) 生産土砂の分布とは無関係に、降雨強度が大きくな

るにつれて流出土砂量のピーク値が高くなることを確認した。これは、流量の増加に伴って勾配が急な支川の流砂量が急激に大きくなり、土砂が本川にすぐに流出するためである。芦田・道上式からも同様の結果を得ることができる。

- (2) 降雨強度が小さい時は、1つの河道に土砂を置いた場合の流出土砂量が複数の河道に土砂を置いた場合よりも大きくなり、流出土砂量のピークが明確に現れた。
- (3) また、降雨強度が大きい時は、複数の溪流に土砂を置いた場合にも明確な流出土砂量のピークは現れ、土砂の置き方の違いが土砂流出特性に影響しない。

これらの結果より、降雨強度が大きい時は、生産土砂の分布が関係しないため、少ない単位河道数（例えば、本川のみ）で流域からの流出土砂量を推定できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 石川芳治・池田暁彦・柏原佳明・牛山素行・林真一郎・森田耕司・飛岡啓之・小野寺智久・宮田直樹・西尾陽介・小川洋・鈴木崇・岩佐直人・青木規・池田武穂：2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害、砂防学会誌、第66巻、No.5, pp.61-72, 2014
- 2) 海堀正博・石川芳治・里深好文・松村和樹・中谷加奈・長谷川祐治・松本直樹・高原晃宙・福塚康三郎・吉野弘祐・長野英次・福田真・中野陽子・島田徹・堀大一郎・西川友章：2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害、砂防学会誌、第67巻、No.5, pp.49-59, 2014
- 3) 江頭進治、松木敬：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法、水工学論文集、第44巻、pp.735-740, 2000
- 4) 高橋保・井上素行・中川一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測、水工学論文集、第44巻、pp.717-722, 2000
- 5) 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武蔵由育・鈴木伴征・水山高久：流域管理システム（WMS）のための土砂流出計算モデルと河床変動計算モデルの作成、砂防学会誌、Vol.66, No.5, pp.3-12, 2014
- 6) 竹林洋史：河川中・下流域の河道地形、ながれ、第24巻、第1号、pp.27-36, 2005
- 7) 芦田和男・江頭進治・中川一：21世紀の河川学、第6章、京都大学学術出版会、2008
- 8) Egashira S. and Itoh T.: Paradoxical discussions on sediment transport formulas, River, Coastal and Estuarine 20 Morphodynamics Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCHEM2005, Urbana, Illinois, USA, 4-7 October 2005), pp. 33-38, 2006
- 9) 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、206, pp.56-69, 1972

(2015. 4. 3受付)