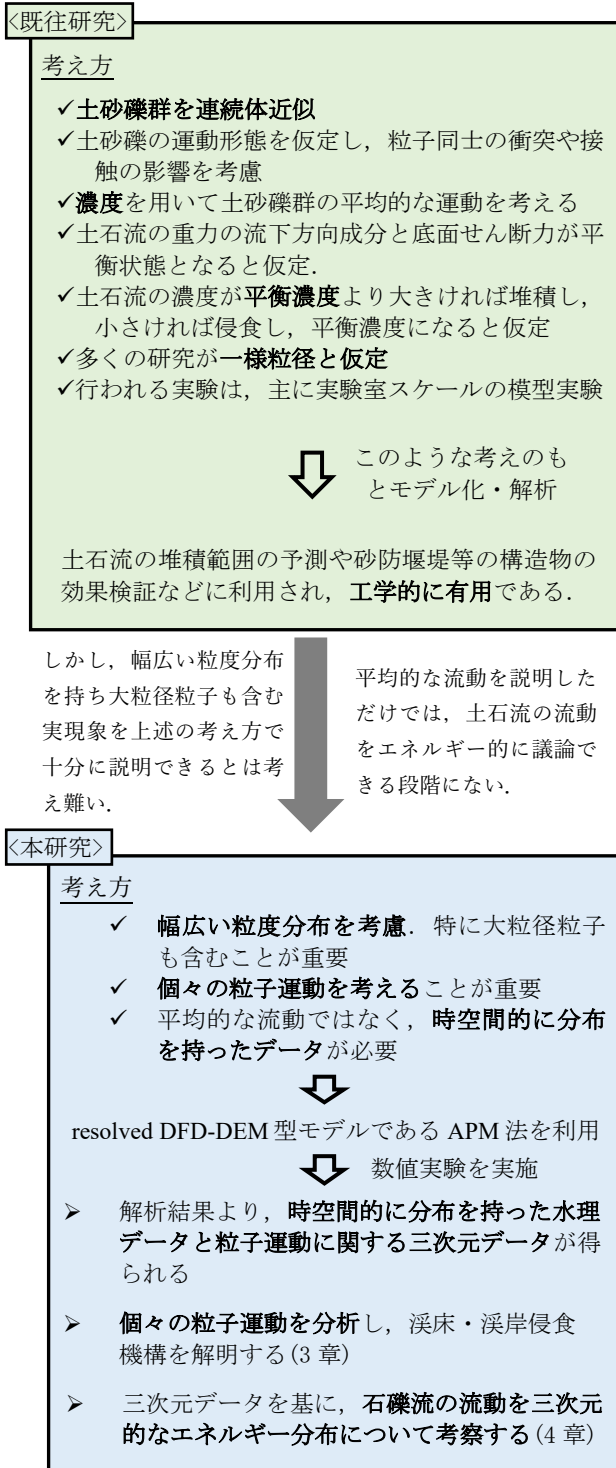


溪岸・溪床侵食を伴う石礫流の流動機構に関する研究

Study on the flow mechanisms of debris flow with valley beds and banks erosion

21N3100014L 加藤 宏季 (河川工学研究室)
Hiroki KATO/ Fukuoka Lab.

Key Words : debris flow, APM method, banks and beds erosion, energy of debris flow



1. 序論

土石流は、土砂と水の混合物が重力の作用を受け巨大なエネルギーを持ち、エネルギー勾配により流動する現象であり、土石流が堰堤や家屋等を破壊し多大な被害を与えることも少なくない。このような破壊は、土石流の持つ巨大な破壊エネルギーによるものと考えられる。このようなことから、土石流の流動機構をエネルギー的に正しく理解することが重要である。土石流は土砂礫と水とが相互に影響を及ぼしながら流下する運動であり、その流速分布や圧力分布が複雑となる。

溪床や溪岸を侵食しながら流下し発達する土石流の侵食機構の解明は重要な課題の一つである。既往研究¹⁾では平衡状態や等流状態を仮定し、侵食・堆積速度式を導出している。しかし、大粒径粒子が存在する溪流において、このような平衡状態が成立する保証はなく、特に、大粒径粒子は連続体ではなく離散体として運動することが本質的であり、離脱や堆積の要因を粒子レベルで明らかにすることが重要であると考えられる。また、溪岸侵食に関する研究は著者の知る限りLyu et al.²⁾による模型実験による検討のみであり、本格的には検討されていないのが実状である。

電子計算機や解析モデルの向上により固液混相流の三次元的な流れと個々の粒子の運動を解析的に扱うことが可能である。本研究では、石礫流をresolved CFD-DEM型モデルであるArbitrary Particle Multiphase(APM)法³⁾を用いた数値実験より得られた三次元データを用い、最初に溪岸を構成する粒子と溪床を構成する粒子1個1個に作用する力の分析を行い、溪岸粒子と溪床粒子が離脱する要因を考察する。次に、石礫流の流動機構をAPM法による解析結果を用い、エネルギー方程式で検討する。図-1は、上記の事項をまとめ、本研究の位置づけを示す。なお、本研究で扱う粒子群は非常に粗い粒子群からなるため「石礫流」と呼ぶこととする。

2. 数値計算法³⁾の概要と数値実験条件

APM法³⁾では、流れ場は連続式とLES、粒子群はDistinct Element Method(DEM)により解析される。また、粒子に働く流体力は粒子周りの流れ場を詳細に解くことで粒子周りの圧力分布、流速分布より算出する。粒子

が流体に及ぼす影響は一流体固液混相流解析により流れ場を解くことにより考慮されている。自由水面はVOF法により解析される。解析法の詳細は文献³⁾を参考にされたい。

数値実験水路は、水路長60m、幅8m、勾配20°の直線水路である。溪谷の粒度分布は最大粒径が1.0m、最小粒径が0.1mの粗い非球形粒子群を用いた。すべての粒子の形状と密度は等しく、その密度は2650 kg/m³である。数値実験水路床と平行にx軸、y軸をとり、垂直上向きにz軸をとる。図-2に、数値実験水路の初期状態(通水開始前)を示す。通水を開始すると、上流端付近の粒子が水流の作用を受け運動を開始し、石礫流として流下し溪床・溪岸を侵食・堆積しながら流下した。

3. 溪岸・溪床粒子の離脱機構

石礫流フロントが通過した区間(16 ≤ x ≤ 22)における溪岸粒子で、縦断方向に5m以上移動した粒子に着目した。着目粒子の標本数は全部で52個であり、図-3における青色の粒子が溪岸の着目粒子(38個)、黄色の粒子が溪床の着目粒子(14個)である。また、縦断方向に働く力を摩擦力(μ(ρ_s - ρ_w)Vg cos θ)で無次元化をしている。μは静止摩擦係数、ρ_sは石礫の密度、ρ_wは水の密度、Vは石礫の体積、gは重力加速度、θは水路勾配である。また、本研究では、図-4に示すように、流下方向に働く接触力を正の接触力、その逆向きに働く接触力を負の接触力と定義する。

(1) 溪岸粒子の離脱機構

溪岸を構成する粒子の標本数38個に対して離脱する主な要因が、流体力は1個、正の接触力は5個、負の接触力の減少は23個、その他は9個であった。これより、負の接触力の低下が溪岸粒子の離脱に特に寄与していることがわかる。図-3に示す粒子A、Bに働いた縦断方向の力の時間変化を図-5に示す。図-5(a)の粒子Aに着目すると、石礫流フロント到達に伴って正の接触力や流体力は大きくなっている。しかし、負の接触力も増加しており合力はゼロとなり動き出していない。その後の約18秒時点になって、石礫流フロントが到達した時よりも小さな力であるが粒子Aは動き出している。

(2) 溪床粒子の離脱機構

溪床を構成する粒子に対しても、溪岸を構成する粒子と同様に分析を行った。標本数14個に対して縦断方向に移動を開始する主な要因が、流体力は2個、正の接触力は1個、負の接触力の低下は11個、その他は0個であった。すなわち、溪岸を構成する粒子と同様に、溪床を構成する粒子においても、粒子が離脱する主な要因は負の接触力が低下したことであることがわかる。図-5(b)より、溪岸を構成する粒子Aと同様に、粒子Bは石礫流フロント到達時には正の接触力が大きくなっているも

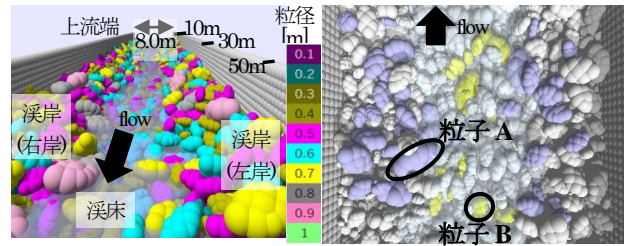


図-2 数値実験水路の初期状態 図-3 着目粒子群の初期状態
(青色：溪岸粒子，黄色：溪床粒子)

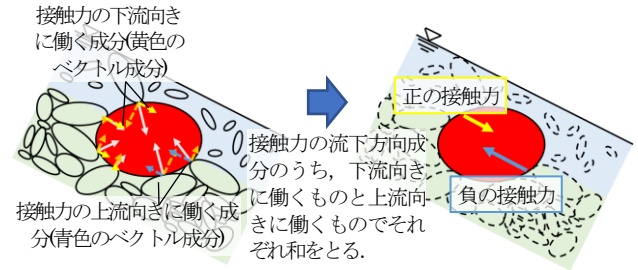


図4 正の接触力と負の接触力の定義
接触している粒子からうける接触力ベクトル
接触力の方向に応じて和をとった結果をそれぞれ「正の接触力」、「負の接触力」と定義

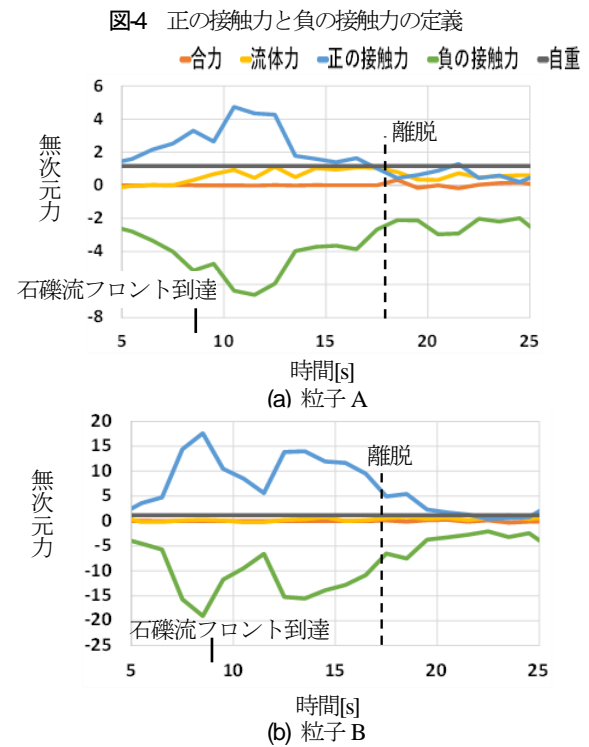


図-5 粒子に働く無次元力の時間変化

の、負の接触力もそれに応じて大きくなっているため合力はゼロとなり動き出していない。その後、石礫流フロントが到達した時よりも小さな力で離脱している。

4. 石礫流の流動に関するエネルギー的考察

3章で示したように、石礫流の流動機構を粒子レベルで明らかにすることは重要である。しかし、工学的には、石礫流(土石流)の流動を断面平均や水深平均スケールで正しく理解することも重要である。本章では、APM法を用いた数値実験より得られた石礫や流速、圧

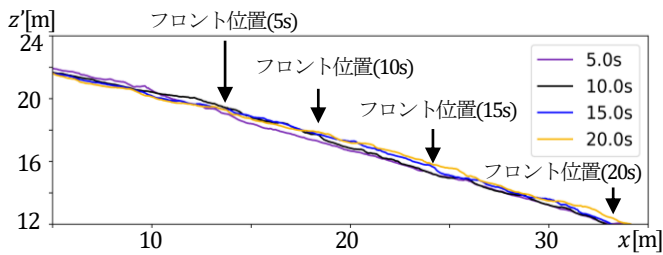


図-6 横断平均した水位の時間変化

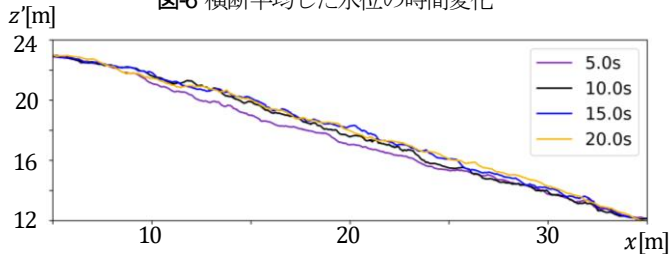


図-7 断面平均全エネルギー水頭の時間変化

力の三次元的な分布を持ったデータを基に、石礫流の流動をエネルギー方程式で考察する。本研究では、数値実験水路の下流端の高さを $z' = 0$ とする z' 軸を鉛直方向にとり、位置エネルギーを考える。

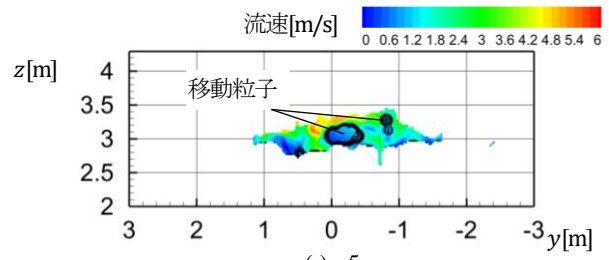
(1) 石礫流の全体的な流動

図-6 に、横断平均した水位の時間変化を示し、図-7 に断面平均した全エネルギー水頭の時間変化を示す。

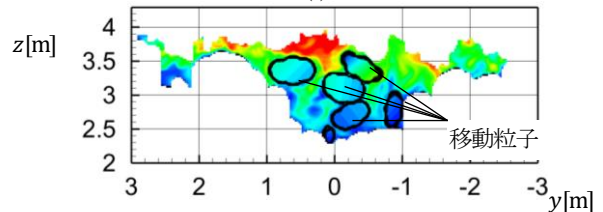
図-6 では、各時間における石礫流のフロント位置も示している。各時間において、水面勾配が大きくなっている箇所を石礫流のフロント位置とした。図-6、図-7 より、水路全体的に、横断平均水位に比べ断面平均全エネルギー水頭の時間変化が大きくなっている。図-8 には、18.5[m]地点における5秒と15秒時点の横断面内の主流速分布を示す。溪岸・溪床の静止粒子は表示していない。また、図中の楕円のようなものは移動粒子を示す。図-6 より、この地点では5秒時点では石礫流フロントは到達していないが15秒時点では通過している。図-8 より、5秒時点では流下断面面積は大きくなく移動粒子も少ないが、石礫流フロント通過後の15秒時点では断面面積は大きく移動粒子も多くなっている。また、5秒時点の流速分布は比較的複雑ではないが、15秒時点では複雑な流速分布となっている。これは、移動粒子の影響によるものと考えられる。以上のように、石礫流フロントの到達前後で、目視できる水位よりも目視できない石礫流内部の運動エネルギーが大きく変化していることにより、横断平均水位に比べ断面平均全エネルギー水頭の時間変化が大きいのと考えられる。

(2) 侵食とエネルギー

3章で着目した粒子群は平均で約18秒時点で溪床や溪岸から離脱していた。図-9 には、18秒と19秒時点における、着目粒子群を定義した区間での横断平均溪床高さの縦断分布を示す。図-9 より、18~19秒間においては約



(a) 5s



(b) 15s

図-8 $x = 18.5[m]$ における横断面内の主流速分布

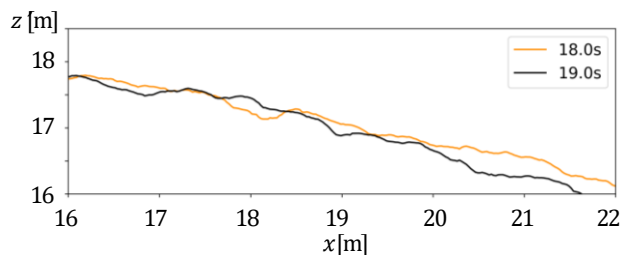


図-9 横断平均溪床高さの縦断分布

19~22mで侵食が起こっている。そこで、18~19秒間の19~22m区間の変化に着目する。図-10 には、18秒と19秒時点における、断面平均全エネルギー水頭の縦断図を示す。図-10 より、18~19秒の間において、断面平均全水頭が20.5m付近では時間的に大きくなっており、22m付近では時間的に小さくなっている。図-11 には、18秒と19秒時点における、断面平均速度水頭の縦断図を示す。20.5m付近では、断面平均速度水頭が時間的に増加しており、これにより断面平均全エネルギー水頭も大きくなっていると考えられる。図-12 には、18~23m間の移動粒子群(赤色の粒子)と水深平均全エネルギー水頭の分布、溪谷形状、20.5mと22mにおける横断面内の主流速分布を示す。水深平均の全水頭 \overline{H}_h は次式により評価した。

$$\overline{H}_h = \frac{1}{\bar{u}h} \cdot \int_{z_b}^{z_s} \left\{ \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right\} u dz$$

ここに、 z_b は溪谷高さ、 z_s は水位、 \bar{u} は水深平均流速、 h は水深である。また、下流側の方が水深平均全エネルギー水頭が大きくなっているように見えるが、これは水路床と平行な目線で図示していることによるものである。20.5m地点では、18秒から19秒にかけて溪床・溪岸が侵食され、断面形が大きく変化している。18秒時点では、断面がいびつな形をしていることや、水深が小さいことから水や石礫粒子群が流れにくいため断面平均速度水頭が小さくなっている。19秒時点では、溪

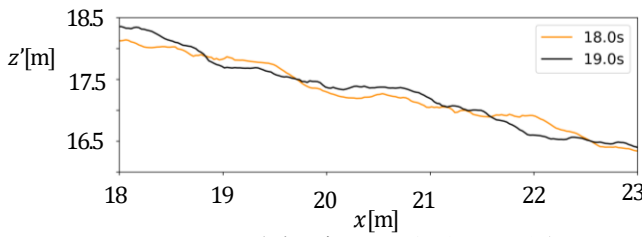


図-10 断面平均全エネルギー水頭の縦断分布

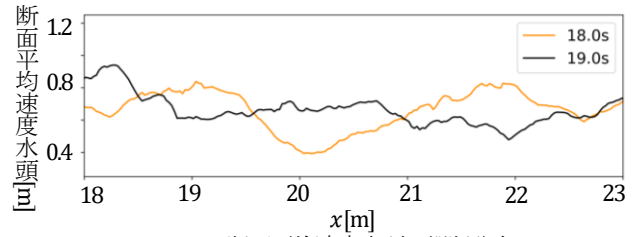
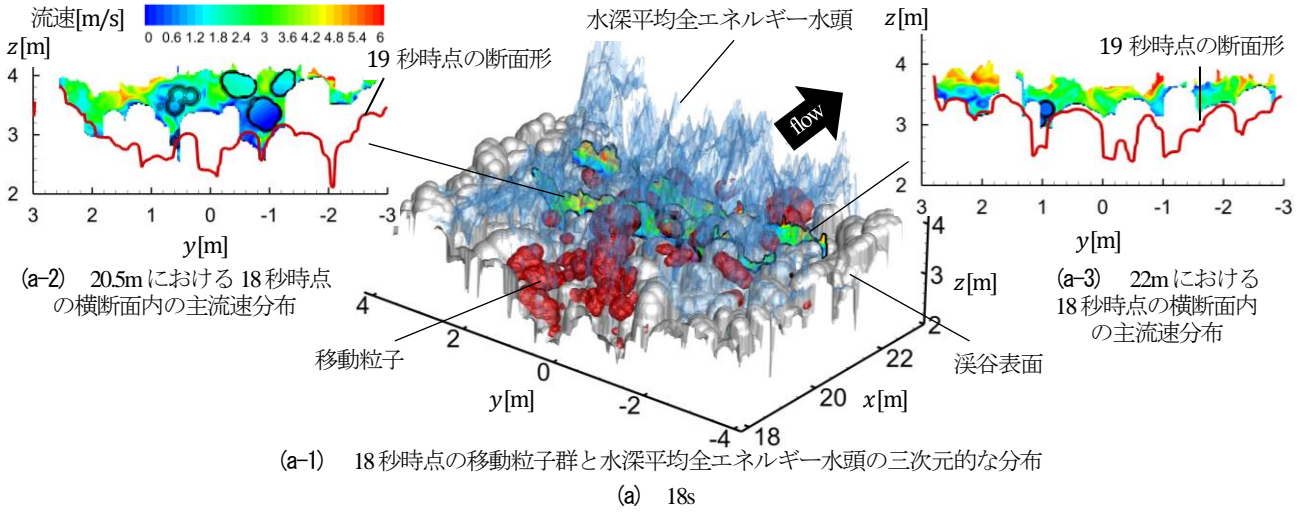
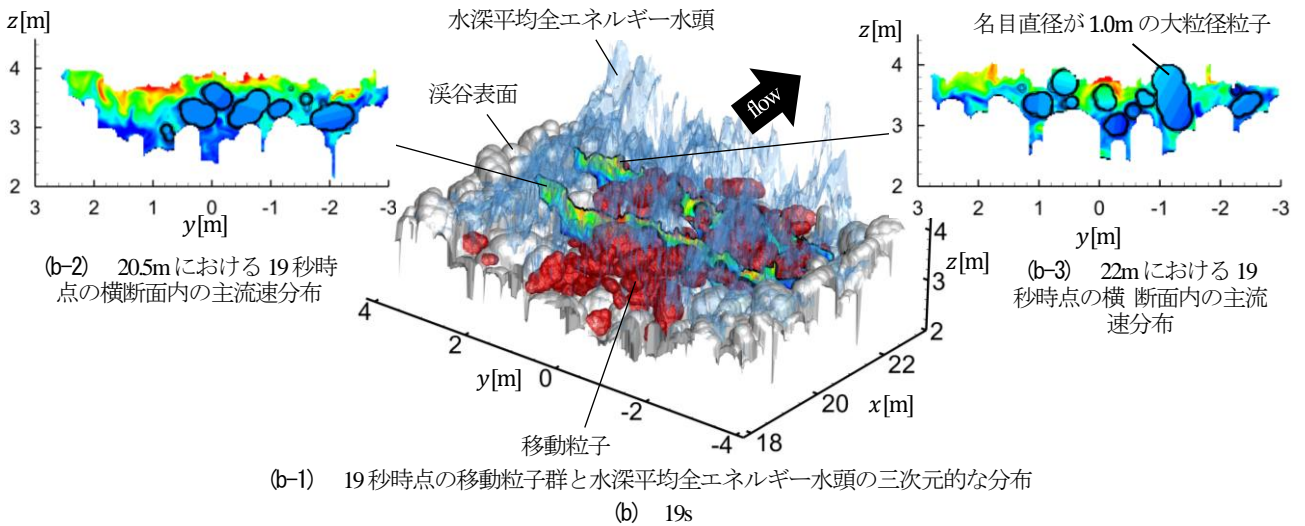


図-11 断面平均速度水頭の縦断分布



(a-1) 18秒時点の移動粒子群と水深平均全エネルギー水頭の三次元的な分布
(a) 18s



(b-1) 19秒時点の移動粒子群と水深平均全エネルギー水頭の三次元的な分布
(b) 19s

図-12 18~23m間の移動粒子群と水深平均全エネルギー水頭の分布、溪谷形状、横断面内の主流速分布

床や溪岸を侵食することにより水深が大きくなり、水や石礫粒子群が流動しやすいような断面形状となったことで断面平均速度水頭が時間的に大きくなったと考えられる。

図-10,11より、22m付近では、断面平均速度水頭が時間的に減少し、断面平均全エネルギー水頭も小さくなっている。図-12より、22m地点では20.5mと同様に侵食しているものの、断面平均速度水頭が時間的に減少している。このことは、名目直径が1.0mの大粒径粒子を含む移動粒子が多いことにより流速が大きくならなかったためであると考えられる。

5. 結論と今後の課題

本研究では、APM法を用いた数値実験により得られた流速や圧力、石礫の三次元データを用い、溪岸粒子と溪床粒子が離脱する要因を考察し、さらに石礫流の流動機構をエネルギー的に検討した。今後は、石礫流の流動開始から静止し堆積するまでの一連の過程を個々の石礫粒子の運動から固液混相流としてのエネルギー的検討レベルまで総合的に明らかにする。

参考文献

- 1) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(2), 1993.
- 2) Lyu,L. et al. : The role of bank erosion on the initiation and motion of gully debris flows, 2017.
- 3) Fukuoka,S. et al. : Effects of sizes and shapes of gravel particles on sediment transports and bed variations in a numerical movable-bed channel, 2014.