同時多発する土石流に含まれる 多様な粒径砂礫の流送から堆積までを予測可能 とする数値計算モデルの開発

和田 孝志1

1鳥取大学 学術研究院 工学系部門.

近年中国地方で頻発化している同時多発的な土石流,および,それらに含まれる多様な粒径砂礫の流送から堆積過程までを予測可能とする数値計算モデルを構築した.混合砂礫材料の土石流に関する水路実験結果と構築モデルによる計算結果を比較した結果,一様勾配および勾配変化を有する水路上での土石流先頭部の粒度偏析傾向が再現可能であることを確認した.同時多発的に土石流が発生した平成23年9月和歌山県那智川の土石流災害の再現を試みた結果,土石流および洪水流の合流に伴う周辺地域への氾濫拡大などが表現可能となったことを確認した.

キーワード: 土石流, 数値計算, 同時多発的, 粒度偏析

1. はじめに

近年、我が国では、集中豪雨発生の頻発化によって土 砂災害の発生リスクや発生規模が増大している. 中でも 土石流による災害は、谷筋を高速で流下した土石流が谷 出口の扇状地で氾濫することで広範囲の建物を破壊・埋 没させるため、その被害は斜面崩壊や地すべりによる災 害よりも大きい. 中国地方では、平成26年8月豪雨によ る広島市の土砂災害^{例えば1)}、平成30年7月豪雨による広島 県・岡山県を中心とする土砂災害^{例えば2)}などにおいて甚 大な人的・物的被害をもたらす十石流災害が発生してい る. これは、中国地方が地形的・地質的な観点から潜在 的な土石流災害リスクを抱える地域であることに起因し ている. しかしながら、これら全ての箇所に砂防堰堤等 のハード対策を早急に施すことは時間的・費用的な制約 により困難である. このような背景から、土石流災害に 対する即応的な防災対策として警戒避難対策などのソフ ト対策が重要であり、これらをより効果的に実施するた めには土石流の氾濫範囲や被災規模の予測(シミュレー ション) 技術を向上させることが必要不可決となる.

土石流には数mmから数mの多様な粒径を持つ砂礫が 混在しており、土石流の流下に伴って先頭部では大きい 石礫、後続部では小さい細粒土砂が集積するという土石 流特有の現象(粒度偏析)が発生する^{例えば3)}. 土石流が 谷筋(山地渓流)を流下する間に、粒度偏析によって先 頭部に大きな質量を持つ巨礫が集中することで、建物の 破壊だけでなく、水路や建物間などの狭窄部での巨礫閉 塞による氾濫範囲の拡大など、被害をさらに激甚化させる要因となる。また、後続部の細粒土砂は水路や道路を埋没させ、氾濫水の排水や災害時緊急車両の通行を阻害する要因となる。これらのことから、土石流に含まれる巨礫や細粒土砂といった多様な粒径砂礫の流送から堆積までの過程を予測可能とする数値計算モデルの開発は、土石流の物理的性質に即したより厳密な土石流氾濫予測を可能とし、より効果的な土石流ソフト対策の確立において必要不可欠なステップである。

これまで土石流中の粒度偏析を考慮した土石流計算モデルがいくつか提案されている^{例えば切り}が、多様な勾配変化を有する谷筋での粒度偏析形成から扇状地での堆積範囲の粒径別偏在性を統合的に予測可能とする計算モデルは現時点では存在しない。さらに、既存の計算モデルでは、平成26年の広島市土砂災害で見られた複数の谷筋からの同時多発的な土石流流出とそれらの氾濫過程が考慮できない。

以上を踏まえ、本研究では、複数の谷筋での土石流流下とその内部で形成される粒度偏析、さらに、これらの土石流の同一氾濫場への同時流入・氾濫・堆積過程を連続的にシミュレート可能とする数値計算モデルの構築を目的とした。また、開発したモデルを用いて、一様勾配または変勾配条件下での混合砂礫土石流に関する水路実験、および、同時多発的に土石流が発生・氾濫した既往土石流災害を対象とした再現計算を行い、実現象との比較により開発したモデルの妥当性を検証した。

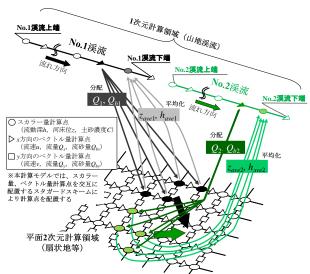


図-1 開発モデルの概要 (複数の1次元計算領域と2次元計算領域の任意地点接続)

2. 「混合砂礫土石流複数流入計算モデル」の開発

開発する数値計算モデルは、著者らがこれまでに開発した「土石流1次元・2次元結合モデル」のを基礎モデルとして、基礎モデルの1次元計算部分(山地渓流部に対応)を複数化し、2次元計算領域(扇状地や平野部に対応)に複数の1次元計算領域を任意地点で接続可能とするものである(図-1参照、当該部分の詳細および基礎式は参考文献のを参照されたい).

さらに、開発モデルでは、1次元計算部分を土石流の 粒度偏析を考慮した『砂礫上下移動を考慮した多層モデル』に組み替える。本モデルでは、Middleton⁸が提唱する『砂礫間隙を通過する小さい砂礫粒子の土石流流動層 下層への落ち込み(動的ふるい効果)』が粒度偏析の主 要機構と考え、その機構を計算モデル内に反映させるために、従来の1次元土石流計算モデルを同じ厚さを持つ 層に分割し、「動的ふるい効果」を表す粒子の落ち込み 量np (添え字iは計算点番号、kは粒径階番号、pは分割 層番号)を考慮したものである(図-2参照)。npは対象 層直下の層(p-1番目層)の粒子間隙si,p1と対象砂礫径dx の比(3次元的な落ち込み運動を想定して3乗と仮定)および上下層の流速勾配Δu/Δzに比例するとし、以下のように表すものとした。

$$r_{ikp} = \alpha \left(\frac{S_{i\square p-1}}{d_k}\right)^3 \frac{\Delta u}{\Delta z} C_{ikp} D_i$$

$$= \alpha \left[\frac{d_{im\square p-1}}{d_k} \left\{ \left(\frac{\sum_{k=1}^{k_e} C_{ik\square p-1}}{C_*}\right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\} \right]^3 \frac{\Delta u}{\Delta z} C_{ikp} D_i$$
(1)

ここに、 α : 粒子落ち込み量に関する係数、 $s_{i,p}$: i 番目 計算点のp番目層内部における Bagnold⁹が想定した高濃

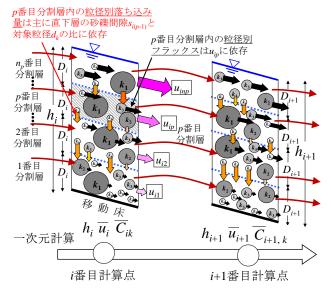


図-2 開発モデルの概要 (1次元計算に適用する『砂礫上下移動を考慮した多層モデル』)

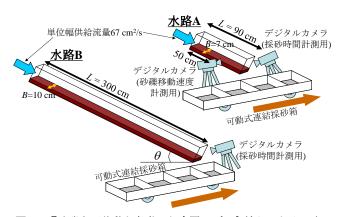


図-3 『砂礫上下移動を考慮した多層モデル』検証のための水 路実験概要

度粒子を含む流れ中の粒子配列における粒子間隙, d_k : k 番目粒径階粒子の粒径, d_{inp} : i 番目計算点の p 番目層内の砂礫平均径, C_{kp} : i 番目計算点の p 番目層内の k 番目粒径階粒子の土砂濃度, D_i : i 番目計算点の分割層厚, $\Delta u/\Delta z$: 上下層の流速勾配である。この他の基礎式については参考文献 10 を参照されたい。

本モデルにより、複数の山地渓流から様々なタイミングで発生する様々な性状(土砂濃度,ハイドログラフ,縦断的な粒度分布の偏り等)を持った土石流・洪水流と、それらの合流に伴う複雑な水位変化や河床変動を同一時間軸上でより正確にシミュレートすることが可能となる.

3. 水路実験による開発モデル (1次元部分)の 妥当性検証

(1) 一様勾配水路による土石流の先頭部粒度偏析に関する水路実験およびその再現

「動的ふるい効果」を考慮した『砂礫上下移動を考慮

表-1	十石流の先頭部粒度偏析に関する水路実験条件。

		粒度構成	: (大粒子	: 小粒子)	実験水路	水路勾配
Case		砂礫径 (mm)	配合割合	平均粒径 (mm)	关級小路 (水路長(cm))	
Case 1.1	[A]	10.7:7.1	1:1	8.90	A(90)	15, 20, 25
Case 1.2	[A]	10.7 : 7.1	1:4	7.82	A(90)	15, 20, 25
Cusc 1.2	[B]	10.7 . 7.1	1.4	7.62	B (300)	15
Case 2.1	[A]	10.7:3.0	1:1	6.85	A (90)	15, 20, 25
Case 2.2	[A] 10.7 : 3.0	1:4	4.54	A (90)	15, 20, 25	
Case 2.2	[B]	10.7 . 3.0	1.4	4.34	B (300)	15
Case 3.1	[A]	10.7:1.4	1:1	6.05	A (90)	15, 20, 25
Case 3.2	[A]	[A] 10.7:1.4	1:4	3.26	A (90)	15, 20, 25
Case 3.2	[B]	10.7 . 1.4			B (300)	15
Case 4.1	[A]	7.1 : 3.0	1:1	5.05	A (90)	15, 20, 25
	[A]		1:4	3.82	A (90)	15, 20, 25
Case 4.2	[B]	7.1 : 3.0			B (300)	15
Case 4.2	[C]	7.1 : 3.0			変勾配水路	15→9
	[C]					(150→150)
Case 5.1	[A]	7.1 : 1.4	1:1	4.25	A(90)	15, 20, 25
Case 5.2	[A]	7.1 : 1.4	1:4	2.54	A(90)	15, 20, 25
Case 3.2	² [B]	/.1 . 1.4	1:4	2.34	B (300)	15
Case 6.1	[A]	3.0 : 1.4	1:1	2.20	A (90)	15, 20, 25
Case 6.2	[A]	[A] 3.0 : 1.4 1	1:4	1.72	A (90)	15, 20, 25
Case 0.2	[B]	5.0 . 1.4	1.4	1./2	B (300)	15

した多層モデル』の妥当性検証および土石流内部の粒子落ち込み量なに関する係数α((1)式参照)を同定するため水路実験を行った。実験では、図-3に示す2本の水路A,Bの水路床に厚さ5 cmで実験砂を敷き詰め、上流端より給水(単位幅流量67 cm²/s)し、敷き詰めた混合砂を侵食させることで土石流を発生させ、水路下流端でその先頭部を連結採砂箱により4つの部分に分けて採取した。実験砂は、平均粒径10.7 mm、7.1 mm、3.0 mmおよび1.4 mmのほぼ一様な砂礫から2粒径を混合して作成した。実験条件は、実験水路(流下距離)、混合する2種類の砂礫径、混合割合および水路勾配の組み合わせにより表-1に示す計43ケースを設定した。

水路側方からの撮影動画より作成した図-4をみると、 土石流内部では大粒子A~Dの存在高さが比較的一定であるのに対し、小粒子①~④の存在高さは流下とともに下層に遷移していることがわかる。このことから、Middleton⁸が提唱する「動的ふるい効果」によって下層に落ち込んだ比較的小さい砂礫粒子が河床付近の相対的に遅い流速で移動することで先頭部での存在割合が減少し、結果的に先頭部には大粒子が残存するという過程が先頭部粒度偏析形成の主な機構であると推察され、本開発モデルのコンセプトが妥当であることを確認した。

図-5にCase 4.1[A]水路勾配20°、図-6にCase 2.2[A]水路勾配15°における土石流先頭部の粒径別存在割合の時間変化に関する実験結果と計算結果を示す。これらの図より、 α = 50とした場合の計算結果が実験における土石流先頭部付近の大小粒子存在割合の縦断的な傾向を概ね再現していることから、開発モデルが土石流先頭部の粒度偏析傾向を再現可能であることが確認された。

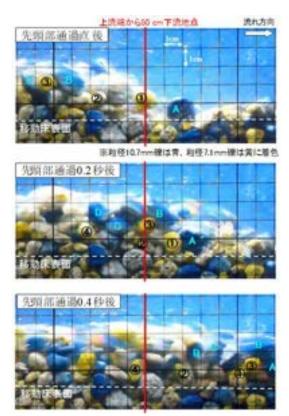


図4 土石流先頭部における砂礫移動の様子 (Case 1.1[A]水路勾配20°)

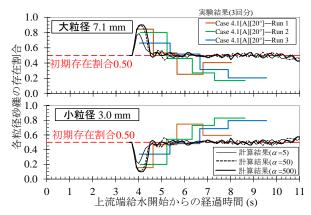


図-5 土石流先頭部の粒径別存在割合に関する実験結果と計算 結果 (Case 4.1[A] 水路勾配20°)

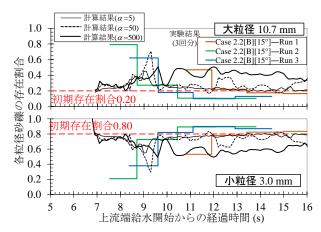


図-6 土石流先頭部の粒径別存在割合に関する実験結果と計算 結果 (Case 2.2[B] 水路勾配15°)

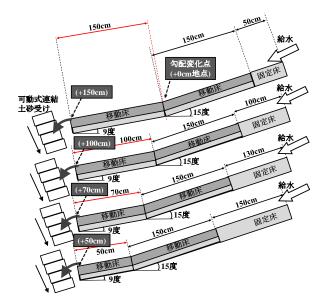


図-7 変勾配水路を用いた実験概要 (Case 4.2[C], 流量2.0 L/s)

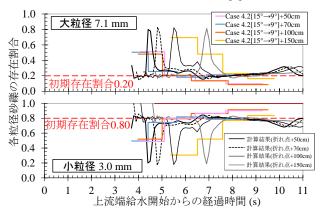


図-8 土石流先頭部の粒径別存在割合に関する実験結果と計算 結果 (Case 4.2[C], 流量2.0 L/s)

(2) 変勾配水路による土石流の先頭部粒度偏析に関する 水路実験およびその再現

『砂礫上下移動を考慮した多層モデル』が多様な縦断勾配変化を有する谷筋での土石流流下時の粒度偏析を再現し得るかどうかを検証するため、勾配変化を有する水路(変勾配水路)を用いた水路実験を実施した。使用水路は図-7に示す水路長350 cm, 水路幅10 cmの変勾配水路であり、当該水路の下流から150 cm地点を境界として上下流の勾配をそれぞれ別個に設定可能である。本実験では、水路上流側を土石流が発生・流下する急勾配(15°)、水路下流側を掃流状集合流動となる緩勾配(9°)にそれぞれ設定し、下流側の流下距離を50 cm, 70 cm, 100 cm, 150 cmの4種類に変化させ、それぞれの下流端でその先頭部を連結採砂箱により4つの部分に分けて採取した。

土石流の粒度構成はCase 4.2, すなわち平均粒径7.1 mm と3.0 mmの割合を1:4で混合したものとした. なお, 供給流量は2.0 L/s, 1.0 L/sの2種類である. (ケース名は表-1に示すCase 4.2[C]とする.)

図-8に供給流量2.0 L/sにおける勾配変化点(折れ点)からの流下距離(+○cmと表記)別の土石流先頭部の

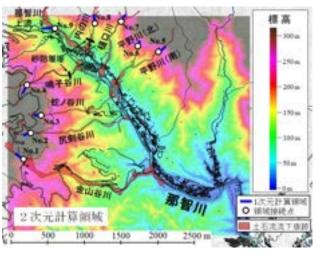


図-9 那智川土石流災害の再現計算における計算領域および初期地盤高(土石流流下痕跡は参考文献¹¹による)

粒径別存在割合に関する実験結果と α = 50とした場合の計算結果を示す.この図に示されるように、実験結果では勾配変化点から150 cm離れた地点で先頭部の粒度偏析が顕著になっているのに対し、計算結果では最先頭部の粒度偏析傾向は変化がないものの先頭部直後の大粒子存在割合が勾配変化点から離れるほど増加し、勾配変化点から100 cm離れた地点で最大となっていた.両者の傾向はやや異なる部分もあるものの、勾配変化点よりある程度距離が離れた地点において先頭部粒度偏析が顕著になるという傾向は計算で再現可能であることが確認された.

4. 開発モデルの現地スケールでの適用可能性検証

開発モデルの現地スケールでの適用可能性を検証する ため、同時多発的に土石流が発生・氾濫した平成23年9 月和歌山県那智川の土石流災害の再現を試みた.

図-9に再現計算で設定した1次元・2次元計算範囲を示 す. 本再現計算では土石流が発生・流出した8つの渓流 (No.1~8) と1つの本川(No.9) からの洪水流の流入を 対象とする. 2次元計算範囲の初期地盤高は10 m×10 m の正方メッシュで与え,国土地理院が発行している5 m メッシュ基盤地図情報数値標高モデルより作成した. 那 智川本川以外の各渓流の流入ハイドログラフ(図-10) は、土石流を表す三角形ピーク部(ピーク流量は流入点 付近の通過土砂量推定値より算出)と一定量の後続流部 (合理式により算出) から成るものとし、住民への聞き 取り結果を踏まえて各渓流の流入のタイミングを設定し た. なお、計算期間は降雨強度が最も大きかった2011年 9月4日AM0:00~AM7:00の7時間とした. 計算Case (表-2) は、本川または山地渓流からの流入がどのよう に被害に寄与したのかを検証するため、那智川本川上端 (No.9) からの流入の有無, 山地渓流 (No.1~8) から

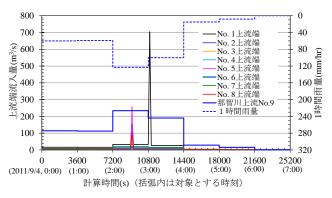


図-10 那智川土石流災害の再現計算におけるNo.1~9流入ハイドログラフ

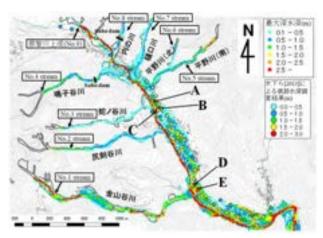
表-2 那智川土石流災害の再現計算条件.

	流入条件			
Case名	No.1-8山地渓流上端	那智川本川上端(No.9)		
Case 1	考慮	考慮		
Case 1 Case 2	考慮 考慮なし	考慮 考慮		

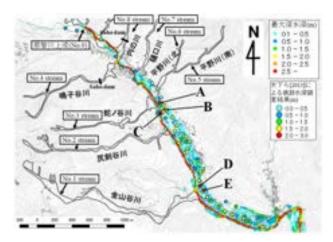
の流入の有無を組み合わせて設定した.

図-11(a)~(c)は、Case 1~3における計算期間内最大浸水深の平面分布を示したものである. なお、図には、木下ら口による災害後の那智川谷底平野における痕跡浸水深も合わせて示している. 那智川本川洪水と各渓流からの流入を合わせて考慮したCase 1ではほとんどの地点で計算浸水深が木下らの痕跡浸水深と一致した. 点A~C付近では計算浸水深が痕跡浸水深よりやや低くなっているが、これは2次元領域設定において橋脚などの河川部の局所的な地形が考慮されていないことが原因であると考えられる. 一方、Case 2では全ての地点で計算値が実測値よりも低くなり、Case 3の計算浸水深も多くの地点で痕跡浸水深より低くなった. これらの結果から、No.1~8渓流からの土石流、河川洪水流それぞれを単独で流入させるだけでは、今回の災害の激甚化に寄与していなかったことがわかる.

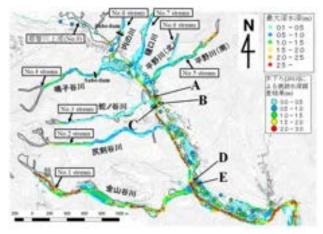
図-12は、Case 1における点A~Eの計算浸水深の時間変化を示したものである。各点の計算浸水深の時間変化は、降雨強度の時間変化と類似しており、降雨量に依存して那智川上流からの流入量を算定していることを考慮すると、点A~Eにおける計算浸水深に影響を与える主な要因は、那智川本川の洪水流であると考えられる。一方、点DとEの計算浸水深ピークは顕著に現れているが、これはNo.1渓流からの土石流が合流点付近の洪水氾濫に直接的または間接的に寄与したためと考えられる。直接的な寄与とは、合流点付近で土石流そのものが氾濫して浸水深を増加させたことを意味し、間接的な寄与とは、合流地点の土石流堆積物によって河床が上昇したことで河川洪水が氾濫したことを意味する。このように、本モ



(a) Case 1における計算期間内の最大浸水深



(b) Case 2における計算期間内の最大浸水深



(c) Case 3における計算期間内の最大浸水深

図-11 那智川土石流災害の再現計算における計算期間内の最 大浸水深

デルによって土石流および本川洪水流の合流やそれに伴 う周辺地域への氾濫拡大など複合的な流れを表現可能と なり、複合的災害に対する浸水メカニズムや災害に寄与 する主要外力を推察可能となったことが確認された.

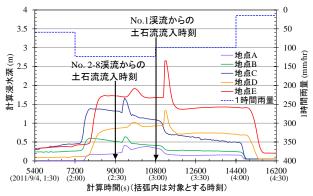


図-12 点A~Eにおける計算浸水深の時間変化 (Case 1)

5. おわりに

開発モデルにより、谷筋での土石流流下に伴う粒度偏析が考慮可能となり、実験規模において広範囲の粒度構成条件を有する土石流の粒度偏析傾向を再現可能であることが示された。さらに、渓床勾配が変化する条件においても、勾配変化点より距離が離れるほど先頭部粒度偏析が顕著になるという傾向が再現可能であることも確認された。

開発モデルを用いて既往の土石流・洪水流複合的氾濫 災害の再現を行った結果、開発モデルによる計算水深と 痕跡浸水深が概ね一致し、開発モデルの現地スケールで の妥当性が確認された.また、本モデルを活用すること で、土石流および本川洪水流による複合的災害に対する 浸水メカニズムや災害に寄与する主要外力を推察可能と なったことが確認された.

今後は、土石流に含まれる多様な粒径砂礫の挙動に関する現地スケールでの検証として、既往土石流災害における大小粒径砂礫の移動実績・堆積分布について開発モデルによる計算結果と実現象との比較を行い、本開発モデルにおける妥当性および有用性をさらに高める必要がある.

謝辞:本研究は、一般社団法人中国建設弘済会の「2019年度技術開発支援事業」の助成を受けて行われました。また、鳥取大学工学部水工学研究室の前田純平(現JR東海建設)、小林和希(現アサヒコンサルタント)、小谷 諒(現鳥取市役所)、大石直希(現大鉄工業)、竹村 仁(現和歌山県庁)、廣地星太(現東和建設)、丸

堂真輝(現兵庫県庁),三島大侃,虫明寛人の各氏を始め院生,学部生に水路実験や数値解析で協力頂きました. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1)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,Vol.67,No.4,pp.49-59,2014.
- 2)海堀正博,長谷川祐治,山下祐一,崎田博史,中井真司,桑田志保,平松晋也,地頭薗隆,井良沢道也,清水 収,今泉文寿,中谷加奈,柏原佳明,加藤誠章,鳥田英司,平川泰之,吉永子規,田中健路,林 拙郎:平成30年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害,砂防学会誌,Vol.71,No.4,pp.49-60,2018.
- 3) 奥田節夫, 諏訪 浩, 奥西一夫, 仲野公章, 横山康二: 土石 流の総合的観測その3. 1976 年焼岳上々堀沢, 京都大学防 災研究所年報, Vol.20, B-1, pp.237–263, 1977.
- Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T. and Yamashiki, Y.: Routing debris flows with particle segregation, J. Hydraul. Eng., Vol.118, pp.1490– 1570, 1992.
- Gray, J. M. N. T., and A. R. Thomton: A theory for particle size segregation in shallow granular free-surface flows, Proc. Math. Phys., Vol.461, pp.1447–1473, 2005.
- 6) 和田孝志, 里深好文, 水山高久: 土石流計算における1次元・2次元シミュレーションモデルの結合, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.36-40, 2008.
- 7) Wada, T., Nakatani, K., Satofuka, Y., Mizuyama, T., Kosugi, K. and Miwa, H.: Development of a Numerical Model for Deposition and Flood Propagation by Multiple Inflows of Debris Flows and River Floods, Int. J. Eros. Control Eng., Vol.14, No.2, pp.20–30, 2021.
- Middleton, G. V.: Experimental studies related to problems of flysch sedimentation, Lajoie, J. ed., Geol. Assoc. Canada, Spec. Paper 7, pp.253– 272, 1970
- Bagnold, R. A.: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. R. Soc. Lond, Series A, Vol.225, pp.49–63, 1954.
- 10) 和田孝志, 前田純平, 三輪 浩: 土石流内部の小粒子の落ち込みを考慮した先頭部大粒子集積割合の推定手法, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.76, No.2, pp.I_1105-I_1110, 2020.
- 11) 国交省紀伊山地砂坊事務所:平成24年度第3回那智川土砂 災害対策検討委員会討議資料,2012.
- 12) 木下篤彦, 北川眞一, 大山 誠, 河部長志, 内田太郎, 里深好文, 久保 毅, 島田 徹, 郡 典宏, 笠原拓造, 渡辺隆吉, 岩田幸泰, 清水幹輝: 平成23年台風12号時の那智川流域の土砂流出・堆積機構に関する研究, 平成25年度砂防学会研究発表会概要集, pp.B-6-B-7, 2013.