河川砂防技術研究開発

【成果概要】

	氏名(』	ふりがな)		所属	役職		
①研究代表者	福田朝生(ふく)	だともお)	中央大	学研究開発機構	機構准教授		
 ②技術研究 開発テーマ 	流木と石礫を効果的に捕捉する 砂防堰堤の鋼製フレーム構造に関する研究						
③研究経費 (単位: 万円) 平成30年		令和元年度		令和 年度	総合計		
※端数切り捨て。	251万円	2	48万円	万円	499万円		
④研究者氏名(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜 追加下さい。)							
氏名所属機			関・役職(※平成 年3月31日現在)				
高鍬裕也	中央	中央大学大学院博士課程後期課程					

⑤研究の目的・目標(様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。) 鋼製フレームを持つ透過型砂防堰堤による流木の捕捉事例より,堰堤で捕捉可能な流木量は,流 木に接する鋼製フレームの範囲に強く依存しているといえる(図 1上図).従来の鋼製フレームは 堤軸上に直線的に並ぶ配置となっているが,上流に向かって凸形状(図 1下図)とすることで流木 と鋼製フレームの接する面積を大きくでき,これによりフレーム近傍で広範囲に水位を低下させ, より多くの土砂と流木を捕捉できる可能性がある.本研究ではこのような形状の構成フレームを持 つ砂防堰堤の効果の検討をより実際に近い条件で検討するため,現地の地形を流れる土石流を対象 として検討する.しかし,実験では実際の渓流地形で検討することは容易ではなく,土石流の詳細な 計測も困難である.このため,本研究では鋼製フレームをもつ砂防堰堤の捕捉効果を適切に考察で きる新しい数値解析モデルを開発する.

著者らはこれまでの研究で、個々の粒子とその周りの水の三次元運動を詳細に推定できる固液混 相流解析モデルを構築し、このモデルで土石流の流動を適切に説明できることを確認してきた¹⁾.本 研究では、流木のモデルを構築して従来のモデルに組み込み、さらに複雑地形となる現地渓流の大

規模な固液混相流の土石流の解析に適した効果的な並列計算 法を構築する.これにより現地土石流を対象とし,流木と石 礫を効果的に捕捉する砂防堰堤の鋼製フレーム構造について 数値計算で検討することを可能とする.

現地土石流の流動や砂防堰堤に作用する衝撃力の計測は容 易ではなく、現地土石流の力学は必ずしも実用上十分理解さ れているとは言えない.このため、本研究では、まず、この 数値解析モデルで2014年8月の広島で発生した土石流を解析 し、分級やこの土石流で破壊された不透過型治山堰堤周辺の 土石流の三次元流動、および土石流が堰堤に及ぼしたと推定 される衝撃力を解析結果から詳細に分析する.続いて、鋼製 フレームが堤軸上に直線に並ぶ透過型堰堤と、上流側に凸形 状となる鋼製フレームを持つ砂防堰堤を数値的に構築し、同 ー土石流を対象に解析する.これらの結果を考察し、土砂と 流木を捕捉する上で、本研究で提案する上流側に凸形状とな る鋼製フレームを持つ砂防堰堤の有効性を明らかにする.



⑥研究成果

検討の流れ 1.

本研究の検討の流れを図 2に示す.本研究では現地土石流を解析できる固液混相流モデルを構築し その後、まず、治山堰堤が破壊された2014年8月に広島の安佐南区八木地区の307渓流で発生した土石 流を解析対象として再現計算を行っている. 検討対象渓流の航空写真を図 3に示す. また, 破壊され た治山堰堤の近景を図 4に示す. 当該土石流により, 堰堤上部がすべて破壊されている. この再現計

算は、本研究の鋼製フレームの検討における外力の 妥当性を確認するだけでなく,計測が困難な現地土 石流の流動や、堰堤に作用する衝撃力の理解も狙っ たものである.この再現計算の後に,同一土石流を 対象とし, 土砂と流木を適切に捕捉する効果的な鋼 製フレームの構造検討を実施している.

- 2. 現地土石流を対象とした固液混相流解析モデル の構築
- 2.1. 既往の研究で構築している固液混相流解析法 の概要

著者らは、既往の研究1)において、種々の形状の 石礫(図5)の個々の運動とその周りの水流の三次 元運動を詳細に推定することができる固液混相流 の解析モデルを構築してきた. このモデルにおける 流体解析では, 粒子よりも小さい流体計算格子を使 って粒子周りの流れをEuler的に詳細に解く(図 6). この際、粒子部分は粒子の密度を有する流体とし、 |全体を非圧縮流体として解く. 流体解析における石 礫部分に作用する力を流体力とする. 石礫の運動解 析は個別要素法により, 流体力と接触力を考慮して Lagrange的に並進と回転運動を解析する. そして, 解かれた石礫の運動を次の時間ステップの流体の 密度と速度として与えることで, 石礫運動が流体の 解析に反映される.解析法の詳細は.文献¹⁾を参照され たい.

2.2. 木のモデルの構築

本研究では、木の変形や破壊を適切に説明すること ができる個別要素法の接触力のモデルを構築した.こ の接触力のモデルは、木や、木と衝突する石礫の失う 力学的エネルギーを考察し、これが増加すると引張力 を発揮できなくなるようにするものである. このよう な接触力のモデルを用いて、木は図 7のように小球を 各々が接する様に組み合わせて構築した. 解析法の詳 細は,本研究報告書⁵⁾を参照されたい.







図 3 対象渓流の土石流後の航空写真





った. 図 9 解析領域のブロック分割

図 8 曲げ試験の荷重-変位曲線

図 8は、浅葉らによってなさ

れた杉の曲げ試験を対象に,構築した木のモデルで解 析した結果である.変位が8mm付近で本モデルは荷重-変位曲線に振動がみられるものの,本モデルで実際の 木の荷重-変位曲線を良好に再現しているといえる.本 研究では,この木のモデルを既往の固液混相流解析モ デルに導入することで,石礫と,変形・破壊する流木, 及び水の三相の詳細な相互作用を考察できる数値解析 が可能となった.

2.3. 並列計算法

本研究の並列計算は, MPI と OpenMP のハイブリ ッド計算である.本並列計算法は, 図 9のように空間 を立方体の計算領域ブロックで分割し,このブロック 内の解析を複数のプロセス(Processing Element (PE)) に割り当てる(図 10).また各プロセスは複数ブロッ クを計算できるようにしている.そして通信時間の削 減と,プロセス間の負荷バランスの均等化の両者を考 慮して全体の計算時間が小さくなるように,ブロック

のプロセスへの割り当てを自動的に入れ替える.本稿では,紙 面の都合上,並列計算方法の詳細は割愛する.詳細は文献^{4),5)} を参照されたい.

3. 現地土石流の再現計算

3.1. 解析条件

図 11 には、構築したモデルで土石流解析を行った領域を示 す.構築したモデルは計算負荷が大きく、現地点では源頭部か らの解析は難しい.このため破壊された堰堤の上流 200m 区間を対象範囲とした.図 12 には、解析に用いた 粒子の粒度分布と災害後の現地の粒度分布を示す.解析量(m³/s では砂などの小さな粒子を直接解析することは難しい. このため、0.4m 以上の粒子を対象に解析し、それ以下の 粒子を流体解析で考慮するため、流体は密度を 1,600kg/m³とした.なお、流体計算格子は0.1mである. また、固液混相流解析の上流端には石礫と土砂を与える 必要があるが、これらは、固液混相流解析に先立ち実施





図 10 並列計算の概念図







した平面二次元解析を行い,その結果を基に固液混相流解析上流端の土砂と水の量を与えた(図 13).

3.2. 再現計算(不透過堰堤)

3.2.1. 解析結果の概要および実測と解析の流出量の比較

図 14 に再現計算の結果のスナップショットを示す.土石流は,解析開始から 30s 後に治山堰堤に 衝突している.ほぼ衝突した直後の図 14 のt = 35sの様子を見ると,土石流は,堰堤上流にポケット があるにも関わらず,堰堤地点で上昇流が生じ,流出している様子がわかる. 土石流前後の LP データの差から求めた,堰堤上流地点までの土砂の流出量は,10,014m³ であるのに対し,平面二次元解析区間も含む土砂の流出量は,6,526m³ であり,解析結果の流出量は,35%

ほど実測よりも小さくなっている.解析結果の土砂流出量は,実際 と比較して小さく見積もっているものの,実際の土砂流出量を概ね 捉えていると評価できる.このため,以降ではこの解析結果を用い て土石流の流動や堰堤に作用する衝撃力を考察する.

3.2.2. 堰堤近傍の分級の様子

図 15には、堤体近傍の土石流の様子を示す. 土石流が堰堤に到 達する前の t = 20.0 sと土石流が堰堤に到達した直後のt = 29.2 sの 図を見比べると、黄色で示す 1.2 m の最も大きな粒子の割合が多 くなっている. このことから、土石流の先端付近では、流木が最先 端に集積し、その後ろには巨石が続くといえる. また、t = 33.05 s の時刻の図を見ると上昇流によって石礫も堤体を乗り越えている が、t=29.2 s の時刻の図と比較すると、巨石の数が減少している. 巨石は流木に続いて堤体に到達するものの上昇流では容易には堰 堤を越流しないといえる. この時刻では、容易に持ち上がる小さな 材料が巨石を追い抜かし先に流出している. t = 45 s の図に示すよ うに、堤体上流に土砂が十分に貯まった段階では、上流から流下し

てくる土砂は巨石も含めてそのまま堤体を越流 している.このように土石流が堰堤へ衝突し,そ の後土砂が十分に貯まって越流する時刻にかけ ての各時刻の通過材料や,分級の鉛直構造特徴を 本解析によって推定することができた.

3.2.3. 堰堤に作用する衝撃力

図 16 には、堤体の各部位に作用する平均的な 衝撃力の時間変化を示す.これより、衝撃力が最 も大きくなるのは、衝突初期(Fr=1.2)ではなく、 堰堤上流に多くの土砂を貯めながら越流する (Fr=0.5)時間であることがわかる.また、図 18, 図 17 には、本体部で衝撃力が大きかった右岸側 と、袖部について衝撃力の大きさごとの確率密度 を調べたものである.図 16 より、平均的な衝撃 力は袖部よりも本体右岸の方が大きいが、局所的

に大きな衝撃力の頻度は袖部の方が大きい.これらの結果 より、大きな衝撃力は袖部に作用し、これを推定するため 堰堤上流に土砂を貯めながら流れる状態の推定が重要び あることが明らかとなった. ¹⁸⁰



図 14 再現計算の様子 (不透過)



図 15 堰堤付近の分級の時間変化様子



4. 上流側に凸形状となる鋼製フレームを持つ砂防堰堤の土 砂捕捉効果

図 19には、直線フレームと、凸フレームの解析結果を示





(b) 凸フレ· -ム 図 19 直線フレームと凸フレームの解析結果

す.凸フレームの長さは 15m とし,堤軸に垂直かつ上流に向 表 1 堰堤上流 100m 区間の堆砂容量 かって 15°の角度で上昇するようにした.表 1には,各ケー スの土石流前と最終段階(*t=*50s)の地盤高の差から求めた堰堤 上流 100m 区間の堆砂容量を示す.これより,不透過型と直 線フレームの透過型の堆砂容量は、どちらもほぼ 3,000m³の 堆砂容量となっているが, 凸フレームの透過型は, 約 4,000m³ と約 1.000m³ も多く堆積しており、堆砂容量比で約 1.3 倍程 度も堰堤上流に土砂を貯めることができている.

表 2に各ケースに対する流木捕捉量を示す. 流木の捕捉容量 は、不透過型と直線フレームでは、ほぼ同様となっており、約 9m³ほど,また,凸フレームが13m³ほど捕捉されており,凸フ レームは流木捕捉効果も大きいことが確認された. 一般に, 透 過型の堰堤は、不透過型の堰堤と比較し、流木捕捉効果が高い

ケース	堆砂容 量(m ³)	差分			
A 不透過型	3,260				
B 直線 フレーム	3,033	B–A –227m ³			
C凸 フレーム	4,284	C-A 1,024 m ³			
表 2 流木捕捉量					

ケース	捕捉容量 (m ³)	差分
A不透過型	9.3	
B 直線 フレーム	9.3	B-A 0m ³
C凸 フレーム	13.1	C-A 3.8m ³

とされているが、今回の解析結果では、不透過型と直線フレームで流木の捕捉容量はほぼ同様となっ た. これは,図 14,図 19で見られるように,不透過も直線フレームも比較的衝突の初期のt= 40s付近で,勢いのある土石流が右岸側から流出しており,このときに流木の多くが流出した ためと考えられる.このことから、逆に凸フレームの場合は、衝突初期の土石流の偏向性に伴う流 木の流出もある程度抑制できると考えられる.

5. まとめ

本研究では、固液混相流解析により、流木と石礫を含む現地土石流の固液混相流解析を実現した. この技術を用いることで, 異なる鋼製フレーム形状の土石流の捕捉効果を数値的に考察することが可 能となった.また、本研究で提案した上流側に凸型となるフレームを持つ砂防堰堤は、通常の直線フ レームと比較し、土砂と流木をより多く捕捉できることを確認した.

参考文献

1) Tomoo Fukuda, Shoji Fukuoka: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, Advances in Water Resources, 129:297-310, 2019.

中国地方整備局:令和元年度流木と石礫を効果的に捕捉する砂防堰堤の鋼製フレーム構造に関する研究報告書、受注者中央 2) 大学研究開発機構,令和2年3月 3)

浅葉将之, 西村尚: 圧縮木材の曲げ強度に及ぼす加工条件の影響, 日本機械学会論文集A編, 67巻, 654号, pp.267-272, 2001.

4) 福田朝生、福岡捷二:複雑境界形状の大規模固液混相流解析のための動的負荷分散を考慮した並列計算法、土木学会論文集 田1(水工学), No.5, pp.I_703·I_708, 2018. 福田朝生, 福岡捷二:複雑境界形状の固液混相流解析のための各プロセスに複数の計算領域ブロックを割り当てる動的負荷分

5) 散手法,第 32 回数値流体力学シンポジウム,F11-4 2018.12.

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。) (以下記入例)

【論文】

- Fukuda, T., Fukuoka, S.: Interface-resolved large eddy simulation of a field debris flow with large stones and woods, Proceedings of the 4th symposium on two-phase modelling for sediment dynamics in geophysical flows THESIS-2019, Newark, Delaware, USA, USB Memory, 2019.9.
- Takakuwa, Y., Fukuoka, S.: Structures of flow with particles saltating over the permeable fixed rough bed, Proceedings of the 4th symposium on two-phase modelling for sediment dynamics in geophysical flows THESIS-2019, Newark, Delaware, USA, USB Memory, 2019.9.
- ・ 福田朝生. 澁谷慎一, 福岡捷二: 改良された袋詰玉石工の洪水時の安定性評価技術の開発とこれを活用した袋 詰玉石工の構造・配置の技術的検討, 河川技術論文集, 第25巻, pp.463-468, 2019.6.
- ・ 福田朝生,福岡捷二:複雑境界形状の大規模固液混相流解析のための動的負荷分散を考慮した並列計算法,土 木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I 703-I 708, 2018.
- ・ 福田朝生, 澁谷慎一, 福岡捷二: 帯工袖部の侵食対策としての袋詰玉石工の構造・配置検討, 土木学会年次学術 講演会講演概要集 第II部, Vol.74, pp.II-148, 2019.9.
- ・ 福田朝生,福岡捷二:複雑境界形状の固液混相流解析のための各プロセスに複数の計算領域ブロックを割り当 てる動的負荷分散手法,第32回数値流体力学シンポジウム,F11-4 2018.12.
- ・ 高鍬裕也,福岡捷二:浸透性粗面境界を有する乱流への固液混相の一流体モデルの適用性に関する検討,第32 回数値流体力学シンポジウム,E11-2,2018.
- ・ 福田朝生,福岡捷二,澁谷慎一:堤防前面河岸に土丹が露出する帯工袖部に設置された袋詰玉石工による侵食 対策の効果検討,第6回河川堤防技術シンポジウム,pp.55-58,2018.12.
- ・ 福田朝生,福岡捷二: 複雑境界の解析のために1プロセスに複数立方体領域を割り当てる並列計算法,土木学 会年次学術講演会講演概要集 第2部門, Vol.73, pp.301-302, 2018.

【発表】

発表者 福田: 現地渓流を対象とした流木を含む土石流の固液混相流解析,京都大学防災研究所 一般研究集会 気候変動下の新たな形態の豪雨災害(土砂・洪水・流木連動災害)予測の要素研究の統合化,2019/11/16

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新 聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

本研究の成果は, 下記URLの中央大学の研究室のHPで公開し, 常に情報発信している. (URL: http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~sfuku/index.html)

中央大学の学園祭 (開催日 : 2018年11/2~11/4, 2019年11/2~11/4) およびオープンキャンパス (開催日 : 2018年 8/5~8/6, 2019年 8/4~8/5) にて来室した一般の方および学生に研究成果の情報を発信した.

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

- 2019年11月 土木学会令和元年度全国大会第74回年次学術講演会優秀講演者
 「福田朝生, 澁谷慎一, 福岡捷二: 帯工袖部の侵食対策としての袋詰玉石工の構造・配置検討, 土木 学会年次学術講演会講演概要集 第2部門, Vol.74, pp.II-148 - II-149, 2019.」
- 2019年6月 河川技術に関するシンポジウム優秀発表者賞
 「福田朝生, 澁谷慎一, 福岡捷二: 改良された袋詰玉石工の洪水時の安定性評価技術の開発とこれを
 活用した袋詰玉石工の構造・配置の技術的検討, 河川技術論文集, Vol.25, pp.463-468, 2019.」
- 2018年11月 土木学会平成30年度全国大会第73回年次学術講演会優秀講演者
 「福田朝生,福岡捷二:複雑境界の解析のために1プロセスに複数立方体領域を割り当てる並列計算法,土木学会年次学術講演会講演概要集 第2部門, Vol.73, pp.301-302, 2018.」

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究では、現地渓流を対象とし、土砂と流木及び水流の三相の運動を高精度に推定することがで きる解析技術を構築した.このような解析技術は、これまでに例がなく、この技術の活用により、土 石流の力学の理解及び、透過型の砂防施設の効果検討が可能となる.また、この数値解析技術の活用 することで、鋼製フレームを従来のように堤軸上に並ぶ直線型ではなく、上流側に凸形状とすること で、土砂と流木の捕捉量を大幅に増加できることを確認した.一方で、本研究では、限られた期間内 の検討であり、複数の砂防施設の鋼製フレームの形状の検討は行えていない.このため、差砂防施設 の土砂と流木の捕捉効果を高めるさらに効果的な鋼製フレームの形状もあることが考えられ、今後も 本研究で構築した解析モデルを活用し、より効果的な新しい構造の砂防施設について継続して検討し ていくことが重要である.

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。) 本研究で提案した凸形状フレームの砂防堰堤は、従来の直線フレームの砂防堰堤と比較して、わず かな構造の変更で実現できまた、土砂と流木の捕捉効果を大幅に向上させることが可能となる(本研 究の場合、凸フレームにすることで、土砂の捕捉量は、従来の直線フレームに対し1.3倍増加した). 本研究で提案したこのような砂防堰堤は、上流側に凸となる鋼製フレーム部分を除けば、従来の直線 フレームをもつ透過型の砂防堰堤と同様である.このため直線フレームから凸フレームにすることで 外力に対し、下流の安全性を低下させる要素はほぼないと考えられ、現場に直ちに導入すべき砂防施 設の構造と判断される.

また、本研究では、これまでに類を見ない、石礫と、変形・破壊する流木、及び水流の三相の運動 と、鋼製フレームをもつ砂防堰堤との相互作用を考察可能な数値解析技術を構築している.本研究で はこの活用により、鋼製フレームの検討のみならず、現場や実験では計測が困難な土石流の衝撃力等 も考察し、現地土石流の力学特性についても分析している.このように、本モデルは、衝撃力や、個々 の石礫の運動まで容易に数値的に計測できるため、特に計測面で実験よりも優れていることも多い. そのため、河川砂防行政としてこの解析技術をより活用し、土石流の力学のさらなる理解、ひいては 種々の土石流対策に役立てていくことが重要と考えられる.