

大規模土石流荷重の評価

堀口 俊行

近年の異常気象に起因するとされる集中豪雨により大規模土石流が発生している。土石流被災事例を調査すると、鋼製透過型砂防堰堤の損傷が発生しており、計画規模を大きく上回る土石流が流下していることがわかった。しかし、発生規模の不確定要因が多くある土石流の設計荷重を推定することは難しく、砂防構造物を設計するための作用外力を決定することができない。そこで、第一段階として大規模土石流が発生した被災事例を基に再現した個別要素法の解析結果からその土石流荷重を推定し、過去の被災事例の作用外力と比較した。その結果、大規模土石流の作用荷重を推定することができた。また、対象とした災害が統計データにおいて 99% 予測線を上回るものであることがわかった。

キーワード：土石流荷重、個別要素法、土石流流体力、実規模、災害調査

1. はじめに

近年、局地的な集中豪雨や台風が直撃して、山間地では洪水や土砂災害が頻発している。ここ最近の災害事例として、令和元（2019）年東日本台風では、土砂災害は 953 件と報告され、豪雨により生活地域を流れる水路の水は溢れ住家は浸水し、運搬された土砂により交通手段が途絶えた。また、死者は 16 名、住宅被害は 383 戸と甚大な被害を及ぼした [1]。一方で、平成 16（2004）年度における土砂災害と比較すると、災害発生件数に対して被害は減少傾向にあり、総合的な土砂管理として進められてきた防災対策の効果が発揮されていると考えられる [2]。

土石流の流下形態の中で見ると、石礫型土石流（先頭部に巨礫が集中している土石流）は、段波を発生させ、大きな破壊力を保有しているといわれている。石礫型土石流は勾配が急な地域や山間地から近い保全地区で発生しやすく、そのための対策構造物の設置が求められている。その一つとして、図 1 に示すような鋼製透過型砂防堰堤（以下、透過型という）が建設されている。透過型は、通常時は自然に流下する土砂の流下を維持し、土石流が発生していないときは土砂をせき止めないように環境を考慮している。土石流が発生したときは、巨礫が捕捉工間隔を塞ぎ、土砂全体を捕捉する効果をもっている。しかし、保有耐力の大きい鋼材でできている透過型の部材が高強度の降雨に伴う大規模な土石流の発生で損壊した事例が報告されてい



図 1 鋼製透過型砂防堰堤

る [3, 4]。これらの事例では、現行の設計荷重に対しての耐力は保有していたものの、大規模な土石流が流下したことで損壊に至り、想定より大きな荷重が作用したことがわかっている。一方で、土石流・流木対策設計技術指針 [5] の記述では、設計荷重を超えた想定していない土石流の荷重は不明確な部分が多くある。構造物の設計上、適切な作用荷重を想定することは不可欠であり、想定内の荷重として検討する必要がある。そのため、土石流における荷重評価の研究は多くなされている [6-8]。しかし、想定されている荷重を推定する手法には検討の余地があり、被災後の大規模な土石流荷重の推定手法が望まれている。

そこで本稿は、大規模災害における被災事例を基にして被災データとの比較を行い、砂防堰堤が受けた荷重評価について個別要素法で推定するものである。さらに、現存する砂防堰堤の設計データを基に対象としている大規模土石流の発生頻度について整理する。

ほりぐち としゆき

防衛大学校建設環境工学科

〒 239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

htoshi@nda.ac.jp

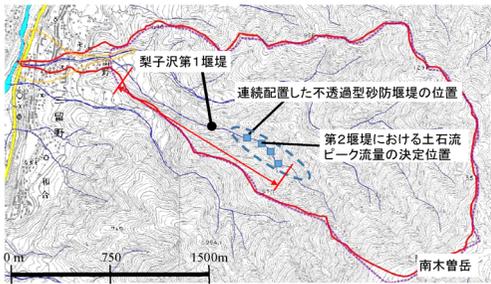


図2 被災地区の地図



図4 押し込み座屈の景況

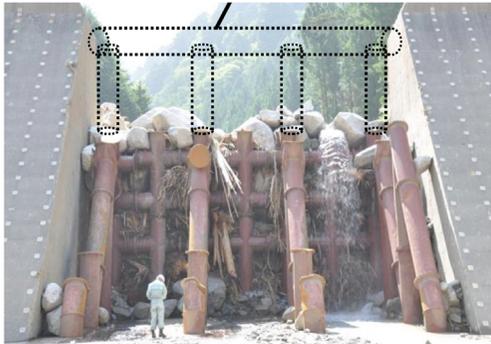


図3 梨子沢第1砂防堰堤の被災状況

2. 大規模土石流の被災例と設計荷重

2.1 南木曾土石流の概要

2014年7月9日17時41分、長野県南木曾町読書地区の梨子沢で大規模な土石流が発生し、死者1名、軽傷者3名、住宅全壊10棟・一部損壊3棟などの被害が生じた[3]。梨子沢流域に設置された三つの砂防構造物は、巨礫によって大きな被害を受けた。木曾地区では床上・床下浸水の被害や交通事故などが発生した。図2は、梨子沢地区全体を示した地形図である。西側を流れる木曾川と東側の木曾山脈に連なる南木曾岳の間に、被災現場である溪流がある。土石流は、木曾山の源流である木曾川地区で発生した。損傷のあった梨子沢第1砂防堰堤は、航空機観測では被災前には捕捉した土砂はほぼなく、土石流の発生で堰堤の上部は流されたが、被災調査によると約5,000m³の土砂を捕捉していた。なお、図3に、そのときの堰堤が被災した状況を示している。さらに、図4に中段部分に発生した押し込み座屈について示している。これより、前から受けた荷重が中段付近のある中空鋼管を押し込んでいるのがわかる。

2.2 対象地区における設計荷重と推定式との比較

土石流の計画規模の推定は、大きく三つの手法で行

表1 土石流流体力の設計値と推定値

	設計時	現地調査	石川式
			99%予測
河床勾配	1/5	1/5	1/5
最大礫径 D_{95}	1.1 m	2.1 m	—
ピーク流量	168 m ³ /s	733 m ³ /s	200 m ³ /s
土石流流速	7.01 m/s	9.7 m/s	9.0 m/s
動水深	1.99 m	3.3 m	3.0 m
土石流流体力	164 kN/m	523 kN/m	407 kN/m

われており、その中で最も大きい設計外力を砂防構造物の作用力として用いている。これらの方法は、1) 降水量に基づく方法、2) 設計における流出堆積物の量に基づく方法、3) 現地調査（礫系調査も含む）から推定する方法である[9, 10]。本調査では、被災後において再度現地調査を行ったものを比較した方が、大規模な土石流を推定できると考えられるため現地調査に基づくものを採用した。

まず、土石流の流速と動水深の計算方法については、連続方程式とマンニングの式を使用する。

$$Q_{sp} = BhU \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{n}(h^{2/3} \cdot \sin^{1/2} \theta) \quad (2)$$

$$h = \left(\frac{nQ_{sp}}{B \cdot \sin^{1/2} \theta} \right)^{3/5} \quad (3)$$

ここで、 h ：土石流動水深 (m)、 n ：粗度係数（設計時では0.1）、 B ：河床幅、 θ ：勾配である。

さらに、土石流の規模については土石流流体力の式から推定する。

$$\rho_d = \sigma \cdot C_d + \rho(1 - C_d) \quad (4)$$

$$F = K_n \frac{\rho_d}{g} hU^2 \quad (5)$$

ここで、 ρ_d ：土石流の単位荷重 (kN/m³)、 C_d ：土石流

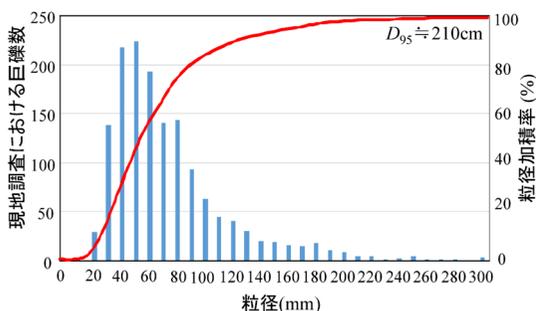


図5 粒径分布

係数（設計時は $C_d = 0.34$ ）， F ：単位は場当たりの土石流流体力， U ：土石流の流速， g ：重力， K_h ：安全率（1.0）である。

上記の式と現地調査のデータを用いて算出すると，土石流ピーク流量は梨子沢第1砂防堰堤で $733 \text{ m}^3/\text{s}$ となり，表1の結果となった。

さらに，砂防便覧 [11] のデータを用いて土石流ピーク流量－流域面積の関係から推定する石川らの式 [12] を基に統計データから算出すると，99%予測線を上回っており，ほかの砂防構造物で用いられている設計荷重よりはるかに大きいと考えられる。

図5に，礫径調査における粒径分布を示している。設計時に使用する礫径は，建設現場における地域から100ないし200個の巨礫を調べて最大礫径 D_{95} を算出する。これは，鋼製透過型砂防堰堤の捕捉工間隔にもなる。最も大きい礫は6.0 mを超えるが， D_{95} とすると約2.1 m程度となった。

3. 個別要素法 (DEM)

3.1 概要

個別要素法は，まず各要素が接触状態にあることを判定する。接触したならば，要素間に設定した要素間ばねの接触力を算定し，時々刻々，運動方程式を解くことにより変位を求め，個々の要素の運動を追跡するものである [13, 14]。

3.2 提案手法について

提案手法である流体力を評価した個別要素法解析は，流体力を剛体要素に組み込めるものである。以下のようなモデルで解析を行っている。

- 1) 礫間は，線形ばねモデルとエネルギー散逸を表現するダッシュポットで接触力が得られる。エネルギーの消費はクーロン摩擦によっても生じる。関連する解析パラメータは，表2に示す。
- 2) 礫と中空鋼管の接触間の線形ばねは，FEM解析に

表2 解析基本値

項目	値	
流体力	流れ (m/s)	9.7
	土石流水深 (m)	3.3
	抗力係数	0.49
礫モデル	粒形 (20～60 cm)：青	4,263
	粒形 (60～100 cm)：青	3,983
	粒形 (100～160 cm)：緑	1,512
	粒形 (160～300 cm)：赤	609
要素間ばね	法線方向ばね K_n (N/m)	1.0×10^7
	接線方向ばね K_s (N/m)	3.5×10^6
	粘性力 (N)	0
	減衰定数	0.8
	摩擦係数	0.404
時間刻み (s)	1.0×10^{-6}	

おける衝突問題から推定した。

- 3) 礫の抗力は定常流から求めたものを用いている。流体力の流れの再現性は別途行った実験より算出したデータを用いている。流速と土石流動水深は，現地調査のデータを用いている。
- 4) 採用した礫径モデルは，礫径調査のデータを基にした。
- 5) 現地の粗度を基に，底面粗度モデルを決定した。
- 6) 継手モデルは断面分割法から強度評価を行い，ばね係数を算出した。

4. 土石流荷重の推定と砂防構造物の耐荷性能

4.1 解析モデル

図6に，梨子沢第1砂防堰堤を模した堰堤モデルを示す。堰堤モデルは高さ12.0 m，幅10.9 mの鋼製堰堤である。被災状況では，上流側から2列目の柱材でへこみ変形が見られたことを考慮し，実際の被災状況に近づけるために，継手部と接合部分（2列目柱材と梁部材との接合）をそれ以外の要素間ばねの剛性値と異なる値とした。図7に示す水路モデルは，現地観測のデータを参考に設定した。

4.2 鋼管継手モデルの決定法

継手部および鋼管部材のばね定数の算出には，断面分割法を用いた。断面の平面保持および完全付着を仮定し，中立軸より圧縮側では圧縮応力をボルト部およびフランジ部が負担し，図8に示すように引張側では引張応力をボルト部のみが負担するものとして計算を行った。断面分割法による曲げ剛性の算出は，断面を100分割し，各断面におけるひずみを曲率および中立軸位置から算定し，弾性係数および断面積から全断面の軸力を決定する。次に，軸力が0に近づくよう中立

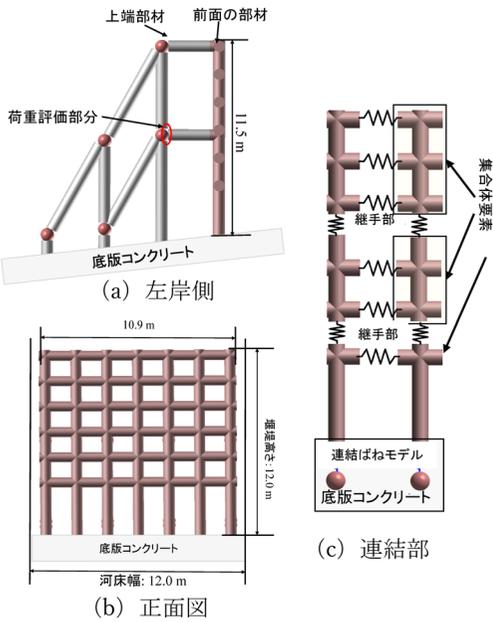


図6 堰堤モデル

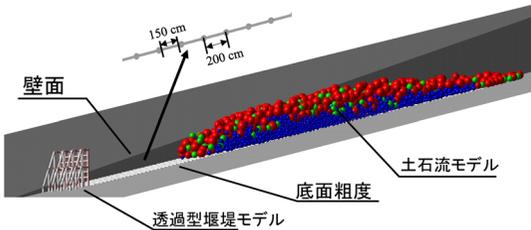


図7 河床モデル (全体図)

軸を修正し繰返し計算を行った。したがって、得られた荷重 P からひずみ ε 関係、曲げモーメント M から曲率 ϕ 関係を示す。また、接合部のへこみ変形は、修正エリナス式を用いて、ばね定数を決定した。これより、表3に示す接合部における軸剛性 EA と曲げ剛性 EI を得ることができる。なお、ばねモデルについては、図6(c)に示すように集合体要素間を連結ばねでつなぎ、鋼材間の継手モデルを表現している。鋼材間は破断まで表現しているが、破断エネルギーが満足するように設定している。

4.3 再現シミュレーション

図9は、現地調査と損傷した部材の痕跡から推定されたものと再現解析について示している。図9左側が被災報告時に推定された堰堤の崩壊の状況である。まずは、流下してきた土石流が下端部の方で捕捉されている。その後、捕捉された土石流の部分から第2波として土石流の主流が到達して堰堤の天端部分まで到達

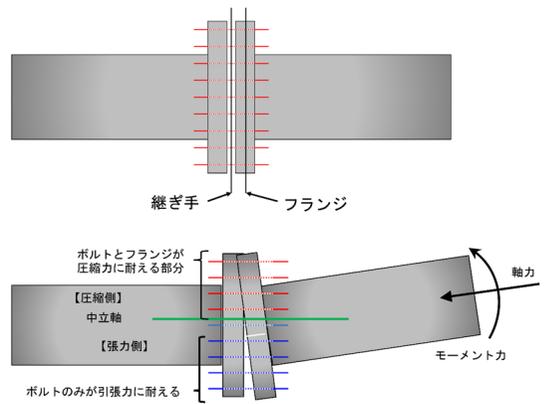


図8 継手部の変形イメージ

表3 中空鋼管、継手部のパラメータ

	項目	値
継手部	軸力剛性, $EA(N)$	1.04×10^{10}
	曲げ剛性, $EI(N \cdot m^2)$	4.38×10^7
	ポアゾン比	0.3
	破断伸び率 (%)	18
中空鋼管 ($t=22.0$ mm) t :板厚	軸力剛性, $EA(N)$	4.06×10^9
	曲げ剛性, $EI(N \cdot m^2)$	3.50×10^8
	ポアゾン比	0.3
	破断伸び率 (%)	21
中空鋼管 ($t=12.7$ mm) t :板厚	軸力剛性 $EA(N)$	2.38×10^9
	曲げ剛性, $EI(N \cdot m^2)$	2.12×10^7
	ポアゾン比	0.3
	破断伸び率 (%)	21

した。このことで天端付近が損傷して継手部が壊れている。さらに背面に礫が乗り、中間部分鋼材が破損している。その後、中段付近までの鋼材部分は後方に流下。一方、図9右側の解析結果を見ると、捕捉した土石流が後続の土石流によって堰堤の天端を乗り越えて、上端部の部材が破損しており、最初の衝突時に中間あたりが大きく変形しているのも再現できている。次に、後続流が一気に下流部まで流れると同時に全面中間部の継手部から破損することで、2段目に当たる部材まで土石流が一気に押し寄せ、堰堤中段付近までの中空鋼管をつなぐ継手部が破損する。このことから、継手部におけるボルト部分は外れていることがわかっていく。さらに、現地調査の破損のメカニズムは図9のように示された。

次に、水平部材による荷重評価を行い、表1に示している想定された荷重と比較することとする。図10に、推定された土石流荷重について示す。図9の作用荷重は $t = t_0 + 11.3s$ で、上段の水平部材の軸力が最大値となり $520 \text{ kN/m} (= 6,245 \text{ kN}/12.0 \text{ m})$ であった。こ

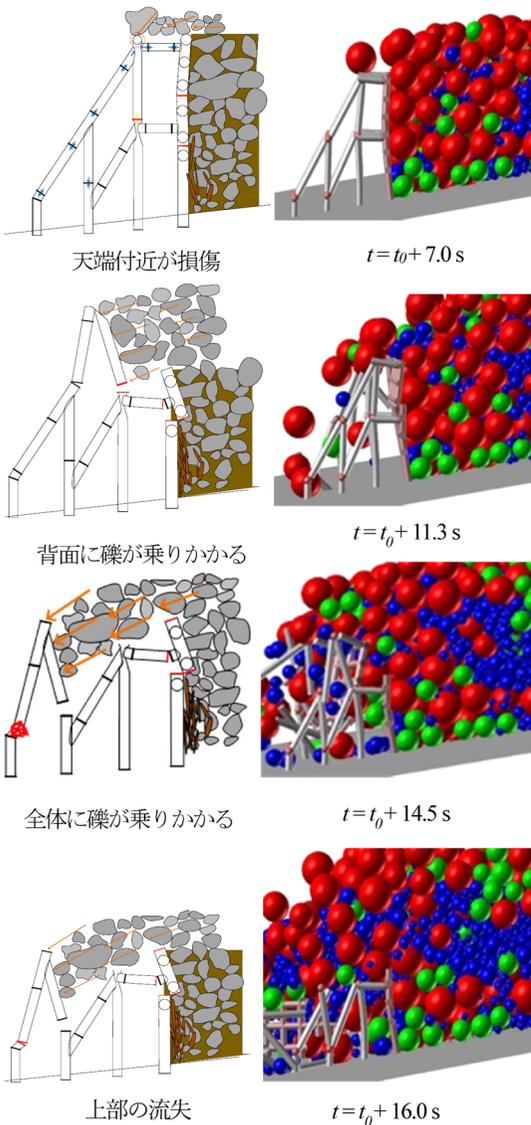


図9 損傷シミュレーション (左: 災害調査の推定)

ここで、堰堤の単位幅あたりの荷重は、当該箇所の部材の軸力の合計値を堰堤幅 (12.0 m) で除したものである。また、時系列ごとの荷重結果を見ると、天端付近まで到達した土石が堰堤を越流する時点では構造物の耐荷性能を維持していたが、上部材が破損し、中段の継手が外れ、一気に流されたことで、荷重が急速に低下している。

図 11 に、破損時における部材の拡大図を示している。図 11(a) は、上流側の部材の破損状況を表現している。巨礫が一気に流れ込むことで継手部である要素が破断している。図 11(b) は、中段に位置している部材が垂直材 (上流側と下流側の部材をつなぐもの) の

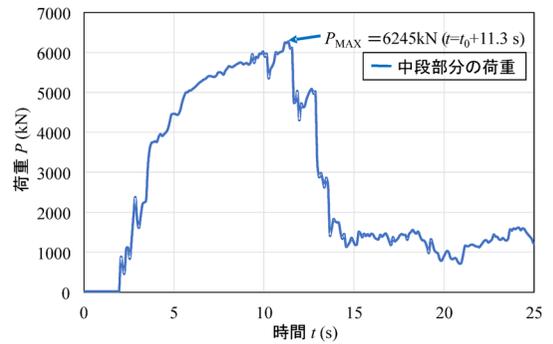


図 10 推定された土石流荷重

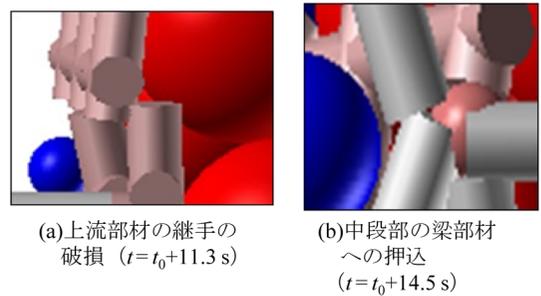


図 11 各部材の拡大図

影響により押し込まれることで変形している。これは、柱部材における押し込み座屈を表現していると考えられ、図 4 に示されている押し込み座屈の景況に近く、へこみ量も同じ値を得ることができた。したがって、現地調査のデータを使用することで破壊の現象についてはおおむね再現できている。

上記の結果から、表 1 と解析で推定された荷重 (図 10 の最大荷重) を比較すると、おおむね近い結果となった。さらに、損傷形態においても、現地で流下された部材の破損状況に近いものとなった。また、現地調査の結果と過去における被災状況からの統計データを比較しても大規模な土石流であることがわかった。文献 [12] からわかるように、石川らが示している 99% 予測線に近い結果から見ても、大規模な土石流が流下していることがわかる。

5. 今後の課題

5.1 実スケールにおける土石流荷重の予測に向けて

土石流の計画規模に合わせた構造物を設計して、耐荷性能を満足できるものを作ることは可能であるが、計画規模の土石流を予測できる手法はない。今後は、想定できない土石流を想定して、荷重を決めることが求められている。石川らの推定式を用いて、約 400 程度

のデータ数から頻度の比較を行い想定された大規模な荷重について整理する必要がある。このような荷重に対して荷重モデルを検討して、リスク評価していく必要がある。

5.2 解析手法の提案

解析手法は、設計者もしくは現場で使用する者にとってはエンドユーザ型として使用することになる。近年は、高度化された解析手法はディベロッパーとして組み立てて行うことはかなり困難であり、現場での適用性に繋げるために、使用者の立場になり作成する必要がある。今後は、適用事例を適用事例を重ねていき使用しやすい解析手法として改善・改良していくことが求められる。

6. おわりに

本稿では、大規模災害における被災事例を基にして被災データとの比較を行い、砂防堰堤が受けた荷重評価について個別要素法で推定したものである。その際に、解析で推定された荷重が、現地調査における作用荷重に近いことを示した。また、解析結果は99%予測線に近い結果となり、大規模な土石流が流下して被害を出したことを示した。

今後は、提案手法を改善していくために、実際のシーケンスを加味した構造物と土石流の連成解析について比較していき、検討していく。

参考文献

[1] 国土交通省砂防部, 「令和2年の土砂災害」, <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2doshasai>

gai.pdf (2021年5月9日閲覧)

- [2] 国土交通省, 「総合的な土砂管理とは」, <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/sougoudoshakanri/sougoudosyatowa.pdf> (2021年5月14日閲覧)
- [3] 萬徳昌昭, 「南木曾町梨沢で発生した土石流災害」, 砂防・地すべり技術センター, sabo, **116**, 2014. http://www.stc.or.jp/18examine/sabo_116.pdf (2021年5月9日閲覧)
- [4] 平松晋也, 福山泰治郎, 山田孝, 逢坂興宏, 中谷加奈, 松本直樹, 藤村直樹, 加藤誠章, 島田徹, 久保毅, 松尾新二郎, 西尾陽介, 吉野弘祐, “平成26年7月9日長野県南木曾町で発生した土石流災害,” 砂防学会誌, **67** (4), pp. 38–48, 2014.
- [5] 国土交通省国土技術政策総合研究所, “土石流・流木対策設計技術指針 解説,” 国土技術政策総合研究所資料, No. 905, 2016.
- [6] 山本彰, 山本修一, 鳥井原誠, 平岡邦興, “砂防ダムに作用する土石流の衝撃力に関する研究,” 砂防学会誌, **51** (2), pp. 22–30, 1998.
- [7] 三好岩生, 鈴木雅一, “土石流の衝撃力に関する実験的研究,” 新砂防, **43** (2), pp. 11–19, 1990.
- [8] 水山高久, “砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点,” 新砂防, **32**(1), pp. 40–43, 1979.
- [9] 水山高久, 上原信司, “土石流の水深と流速の観測結果の検討,” 新砂防, **37** (4), pp. 23–26, 1984.
- [10] 欧国強, 小橋澄治, 水山高久, “土石流ピーク流量の推定,” 新砂防, **44** (4), pp. 24–29, 1991.
- [11] (一社)全国治水砂防協会, 砂防便覧平成26年版, pp. 66–109, 2015.
- [12] 石川芳治, “流域面積, 降雨量, 地質が土石流の流出土砂量・ピーク流量に与える影響と確率的手法を用いた流出土砂量・ピーク流量の推定法,” 砂防学会誌, **73** (5), pp. 15–26, 2021.
- [13] 堀口俊行, 合田明弘, 嶋川理, 山田正, “透過型砂防堰堤に作用する流木混じり土石流荷重の検討,” 土木学会論文集 A2 (応用力学), **76**, L325–L336, 2021.
- [14] T. Horiguchi and V. Richefeu, “Post-analysis simulation of the collapse of an open sabo dam of steel pipes subjected to boulder laden debris flow,” *International Journal of Sediment Research*, **35**, pp. 621–635, 2020.