

透過型砂防堰堤における前面形状が土石流荷重に与える影響

Effect of a front inclination angle of open sabo dam on debris flow load

堀口俊行[†], 嶋川理^{*}, 小松喜治^{**}, 香月智^{***}

Toshiyuki Horiguchi, Osamu Shimakawa, Yoshiharu Komatsu, Satoshi Katsuki

[†]博(工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)^{*}防衛大学校, 理工学研究科前期課程(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)^{**}防衛大学校, 理工学研究科後期課程(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)^{***}工博, 防衛大学校教授, 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Key Words: debris flow load, open sabo dam, distinct element method

キーワード: 土石流荷重, 鋼製透過型砂防堰堤, 個別要素法

1. 緒言

我が国は, 土砂災害に対して総合的な土砂管理を基準とし, 砂防構造物を複合的に活用することで, 流砂系を組織的に管理することを目指している. そのため, 主たるハード対策として, 鋼製透過型砂防堰堤が設置されている. しかし, 近年の気象変化の影響で局所的な豪雨をもたらし, 想定した設計をはるかに超えるような土石流が高頻度で発生している. このため, 透過型砂防堰堤の損傷事例として, 平成 26 年 7 月長野県南木曾町で発生した土石流では, 図-1 に示すように梨子沢第 1 砂防堰堤が設置されており, 一部が土石流の衝撃力によって破損した¹⁾. 一方, 近くにあった梨子沢第 2 砂防堰堤は, 大きな破損を受けることなく, 直接 6 m を超える巨礫を捕捉していた. この 2 つの堰堤の違いは, 衝突した土石流の水深, 流速といった条件が異なったために生じたとも考えられるが, 2 つの堰堤の前面形状が, 第 1 堰堤では直立, 第 2 堰堤では下流側に傾斜を有していた. このことから, 形状の違いで衝突荷重に与えた影響があると考えられる.

砂防構造物の土石流外力においては, 土石流の衝突荷重に関することが多く, 圧縮性流体と非圧縮性流体に分けて衝撃荷重を算定していることが通例である²⁾. 大同ら³⁾, 水山ら⁵⁾は, この現象論を整理し, 土石流の設計流体方式を提案した. 一方で, 個々の巨礫における衝撃荷重は, 接触理論を基に固体による集中荷重としている⁶⁾. しかし, 現行法では安全係数を 0.1 以下とすることを推奨しており, 不確かな部分が多くある.

著者ら⁷⁾は, 透過型の前面傾斜角による土石流の衝突荷重低減効果を実験的に検証した. そのうえで, 柔性構

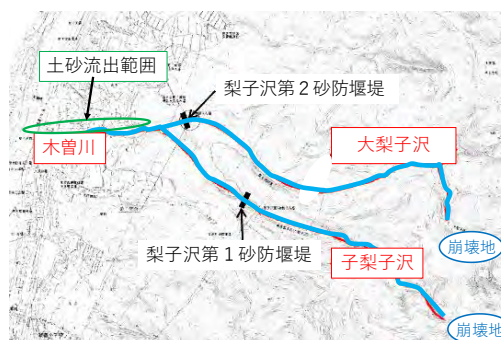


図-1 被災事例河川略図

造物が土砂を捕捉したのち, 減速・停止した土砂(デッドゾーン⁸⁾)と同様に先行して停止した礫の影響が, 衝突荷重に影響を与えることを指摘している. しかし, 定性的もしくは実験的な分析であり, 解析に基づく定量的な解明をした研究は見当たらない.

そこで本研究は, 流速分布モデルを用いた個別要素法を利用して事前実験における荷重~時間関係を再現し, 透過型砂防堰堤の前面傾斜角の土石流衝突荷重の低減効果であるデッドゾーンのメカニズムを解析的に検討するものである.

2. 実験の概要⁹⁾

実験で使用した可変勾配型直線水路は, 水路長 4 m, 幅 30 cm, 深さ 30 cm である. 図-2 に, 堰堤モデルを示す. 堰堤モデルは, 木製円筒の内部に鉄ボルトを入れて部材を組み, 高さ 27 cm, 幅 23 cm の模型である. 堰堤モデルは, 表-1 に示す異なる 4 つの前面形状を変化させている. なお, その前面形状を前面傾斜角 θ_{LS} と呼ぶ

表-1 実験ケース

ケース	礫	水
$\theta_{LS}=0^\circ$	A : 15 mm 以下 B : 16 mm-25 mm C : 25 mm-35 mm	計 35 kg 0.06 m ³ /s
$\theta_{LS}=10^\circ$		
$\theta_{LS}=20^\circ$		
$\theta_{LS}=30^\circ$		

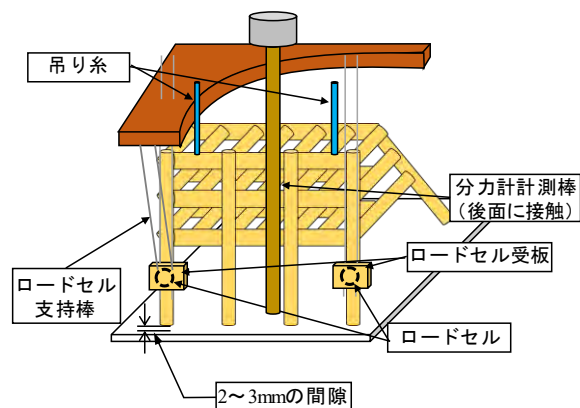


図-3 堰堤の固定および荷重測定要領

表-2 解析パラメータ

項目		値	
流水	初期流速(m/s)	2.0	
	初期水深(m)	0.15	
	抗力係数	0.49	
堰堤モデル	円柱形要素(個)	26	
	球形要素(個)	8	
水路	平面要素(個)	4	
	円柱形要素(個)	51	
礫モデル	球形要素 (個)	10~15mm	2552
		15~25mm	1101
		25~35mm	190
要素間ばね	ばね定数 (N/m)	法線方向 K_n	1.0×10^6
		接線方向 K_s	3.5×10^5
摩擦係数 $\tan\phi$		0.404	
計算条件	時間刻み Δt (s)	1.0×10^{-6}	

こととする。その堰堤モデルを水路の下流部に設置して、土石流を衝突させることで、荷重を計測している。図-3 に示すようにモデルの設置要領は、上部から吊り下げて底面摩擦を受けない機構になっている。全ての荷重は、後方に接触させた分力計と2つのロードセルに伝達されるように工夫している。なお、後述する衝突荷重は、これらの荷重計による測定値の総和である。これに、上方3mの位置から、盛土状に置いた3種類の礫モデルに後方から0.06 m³/sの流量で水を一気に流して流下させる。その結果、図-4 に示すように、前面傾斜角が大きくなるにつれて最大荷重が小さくなることが示された。また、衝突してから最大荷重に至るまでの時間的な遅れが生じることで、荷重が低減していることを示した。

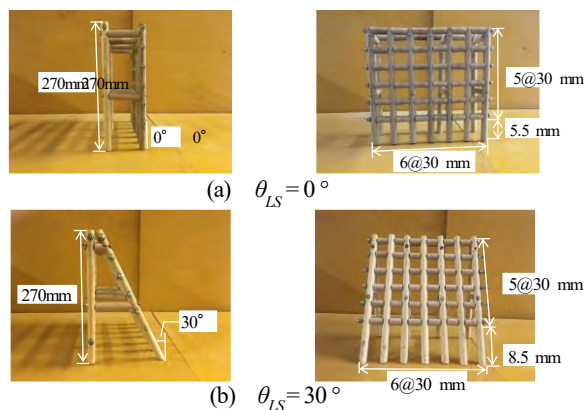


図-2 堰堤モデル

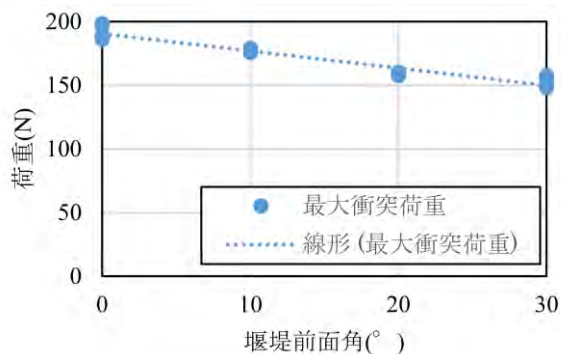


図-4 最大荷重～前面傾斜角関係 (実験)

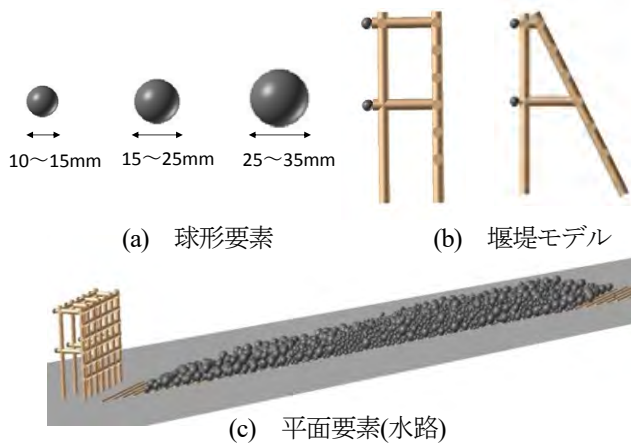


図-5 解析モデルの概要図

3. 荷重評価と荷重低減メカニズム

3.1 解析条件

本解析では、前面傾斜角の低減効果メカニズムについて顕著な差異について分析するものである。よって、直立堰堤 $\theta_{LS}=0^\circ$ と前面傾斜角が最も大きい $\theta_{LS}=30^\circ$ の2ケースについて解析を行った。

表-2 に解析諸元を示す。初期の水深は、実験の映像から0.15mとし、流速は2.0m/sとした。図-5に、解析で使用した礫要素、堰堤および水路の底面粗度を円柱形要素、水路に平面要素を用いてモデル化した。球形要素の粒径は、実験で用いた礫の粒径分布に基づき、

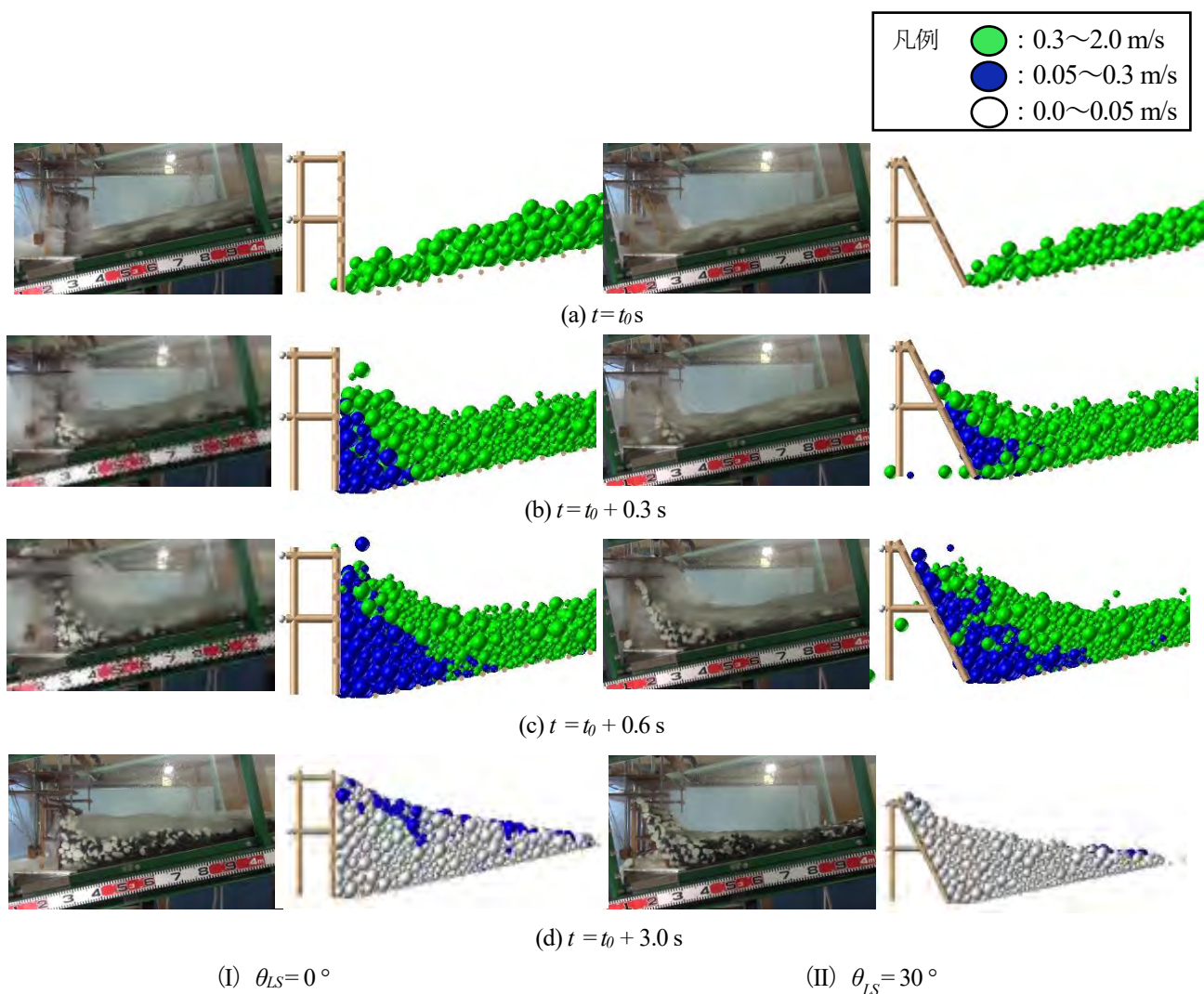


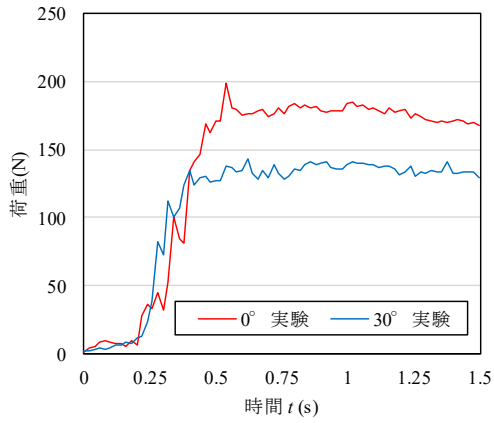
図-6 $\theta_{LS}=0^\circ$ および $\theta_{LS}=30^\circ$ 堆積形状の比較

3種類の粒径の実験と解析における礫径分布が近似するようにランダムに与え、その合計質量が実験と同じ礫質前面の形状は、実験モデルと同様に縦方向部材に沿って7本の円柱を30mmの等間隔に配している。図-5(c)に示すように礫の初期配置は、実験と同様に堰堤から上流側3mの位置に礫をランダムに配置した。そのうえで、流速分布モデル¹⁰⁾を用いた流体力を与えることで土石流モデルとして流下させている。そして、堰堤手前0.3mの位置まで流下させる解析を行った。以上のように衝突解析準備をするため、 $\theta_{LS}=0^\circ$ と 30° において堰堤に最初の1個が衝突するまでの個々の礫の位置や速度は全く同じ条件となっている。よって、同一の条件を用いることで、前面傾斜角が及ぼす影響を定量的に比較できるように設定している。なお、本解析では堰堤モデルと後方に固定された球形要素を付けて、得られたばね力を荷重としている。このばねは、連結ばねを使用しており、解析が安定する限界のばね剛性を用いた¹¹⁾。

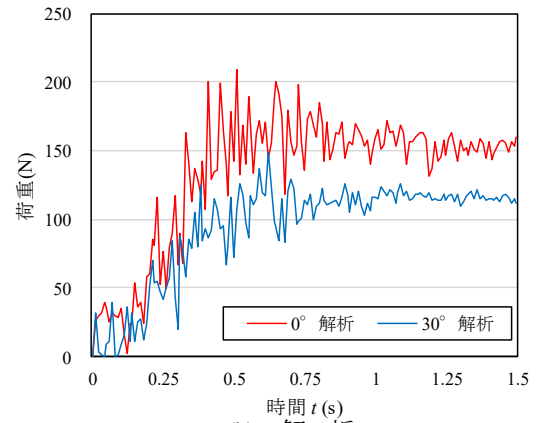
3.2 堆積過程

図-6に、実験の堆積形状と解析結果の比較を示す。

なお、解析結果の図は礫の速度について色分けしており、速度を有する要素を緑色 ($v > 0.3 \text{ m/s}$)、概ね停止している要素を青色 ($v \leq 0.3 \text{ m/s}$)、ほぼ速度を失っている要素を白色 ($v \leq 0.05 \text{ m/s}$) に、分けて表示した礫の分布状態を示している。図-6(a)の $t = t_0 \text{ s}$ は、実験と解析においてほぼ同じ状態である。この時間を荷重評価における衝突開始時間とした。図-6(b)の $t = t_0 + 0.3 \text{ s}$ 、 $\theta_{LS}=30^\circ$ で礫の堆積状況が $\theta_{LS}=0^\circ$ に比べて、礫の堆積高さが低くなっており、礫が堰堤全体を覆うまでの時間が遅れている。これは、前面傾斜角を有しているため礫が堆積するのに時間を要しているからである。解析も同様の傾向が見られる。図-6(c)の $t = t_0 + 0.6 \text{ s}$ 以降は、実験と解析の堆積過程を再現できている。図-6(d)の $t = t_0 + 3.0 \text{ s}$ は、最終的な堆積形状を比較すると、実験では下に凸となった形状で堆積し、解析の堆積形状はほぼ直線となっている。これは、礫モデルとして球形要素を使用しており、実礫に生じるかみ合わせを十分に表現できていないためと考えられる。しかし、衝突から礫全体が捕捉し、安定(堆積)するまでの所用時間や概ねの堆積形状は再現できている。

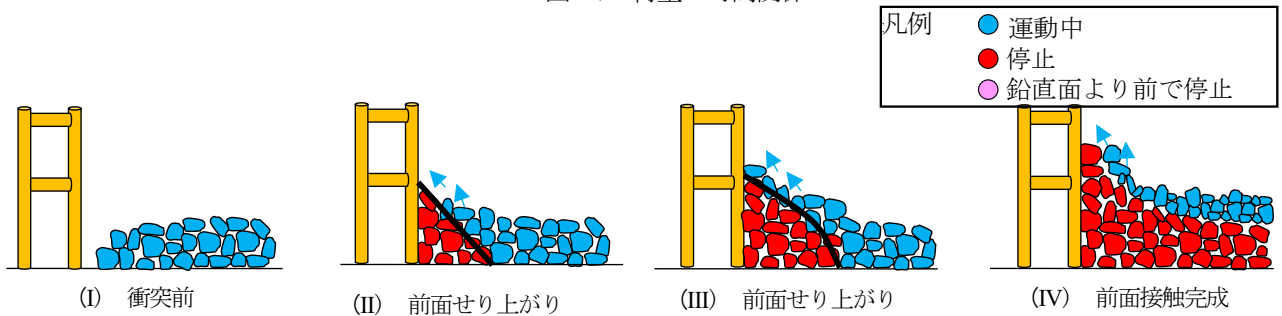


(a) 実験

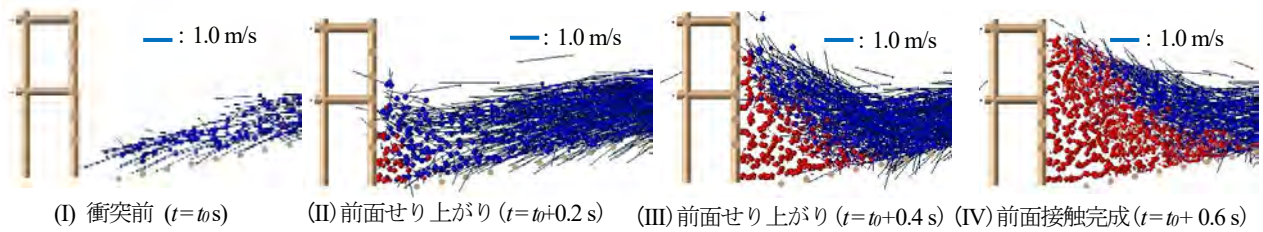


(b) 解析

図-7 荷重～時間関係

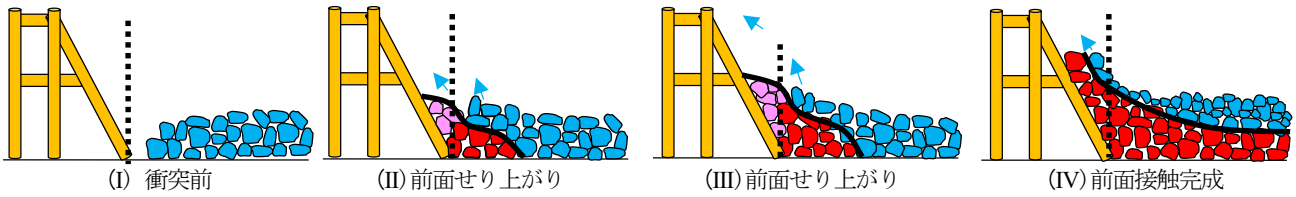


(a) 実験 (模式)

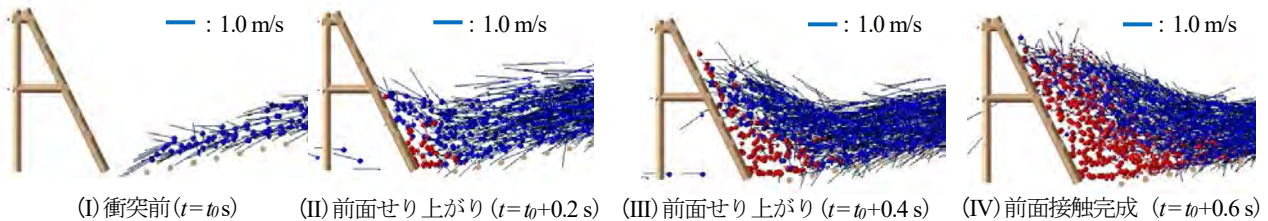


(b) 解析

図-8 $\theta_{LS}=0^\circ$ の礫塊停止メカニズム



(a) 実験 (模式)



(b) 解析

図-9 $\theta_{LS}=30^\circ$ の礫塊停止メカニズム

3.3 荷重～時間関係

図-7(a), (b)に、実験と解析の荷重～時間関係を示す。解析は、実験に比して荷重の上下が大きいが、衝突後に急上昇し、その後収束する定性的な傾向は再現できてい

る。具体的には、実験では $\theta_{LS}=0^\circ$ 、 $t=t_0+0.5\text{ s}$ で最大荷重198 N、 $\theta_{LS}=30^\circ$ 、 $t=t_0+0.6\text{ s}$ で最大荷重143 Nに達した。最大荷重は、前面傾斜角を有すると約30%軽減されており、最大荷重到達時間は0.1 sほど遅れてい

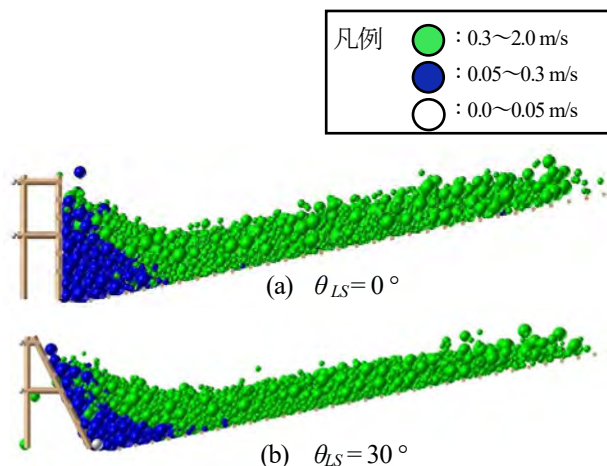


図-10 最大荷重時の礫速度分布

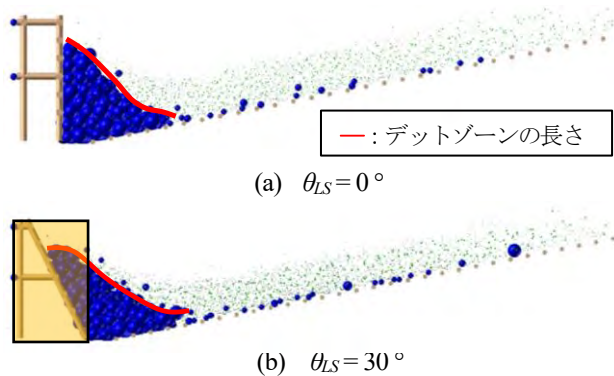


図-11 先行停止領域 (デッドゾーン)

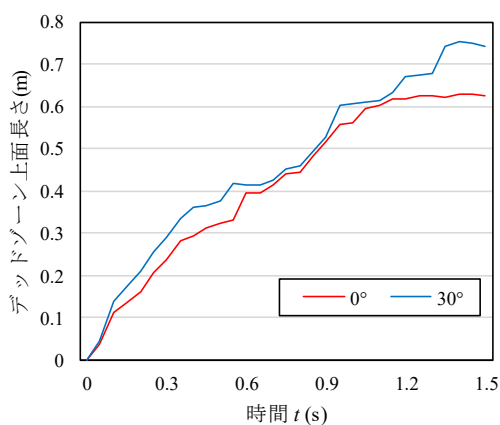


図-12 先行停止領域上面長さ

る。一方、解析では、 $\theta_{LS}=0^\circ$ 、 $t=t_0+0.5s$ で最大荷重 209 N、 $\theta_{LS}=30^\circ$ 、 $t=t_0+0.6s$ で最大荷重 149 Nに達している。実験と比較して解析の方がやや荷重が大きくなるが、前面傾斜角による荷重の低減効果を再現できている。さらに、最大荷重が発生するまでの時間の遅れも再現できている。また、堆積終了時の荷重が $\theta_{LS}=30^\circ$ の方が、堆積荷重小さくなる点でも実験結果を再現しており、最大荷重の発生から堆積荷重までの過程を表現できていることがわかる。

3.4 先行停止礫塊形成過程の比較

図-8(a), 9(a)には、実験で想定された荷重低減メカニズムの考察を示す。さらに、図-8(b), 9(b)は、解析時にお

ける堆積過程を速度ベクトルを付して示している。図-8 (a), 9(a)の第 I 段階では、礫のみの土石流の先端が堰堤に到達した時のものを示している。この時、実験と解析で荷重は生起しない。なお、解析の土石流では、両堰堤に対して、同じ状態を生起しているが、実験では必ずしも同一状態に再現できない。

図-8, 9の第 II 段階では、衝突後 0.2s 後のものを示す。先頭部の礫が速度を失うことで、デッドゾーンを形成している。この形は直立堰堤では、直角三角形に形成し、 $\theta_{LS}=30^\circ$ では、堰堤下部で鈍角な三角形を形成することになる。

図-8, 9の第 III 段階では、解析の $t=t_0+0.3s$ の状態を示している。ここでは、直立堰堤のデッドゾーンは第 II 段階のものと相似形で形成し、その高さ上流側への伸びている。一方、図-9の $\theta_{LS}=30^\circ$ の場合、高さは堰堤頂部直下まで達しているが、底面は上部に若干広がった程度で、デッドゾーン上面の角度は第 II 段階より急になっている。なお、両方ともデッドゾーン上面を流れる後続の礫の先端は、堤体頂部に向かって斜め上方に向かう運動をしている。

図-8, 9の第 IV 段階では、解析における $t=t_0+0.6s$ の状態を示している。直立($\theta_{LS}=0^\circ$)と前面傾斜($\theta_{LS}=30^\circ$)の堰堤におけるデッドゾーンは、その頂部が堰堤の頂部まで達しており、停止礫塊上面の角度は、前面傾斜を有している堰堤に比べて、直立堰堤の方が急になっている。また、停止礫の上面を滑動している後続の礫は接触することで勢いを失い、堰堤に直接、接触ができる流速ベクトルを有する礫が見当たらない。

3.5 先行停止領域 (デッドゾーン)

図-10に、最大荷重生起時における解析結果を示している。なお、礫の速度について色分けしており、概ね停止している要素を青色 ($v \leq 0.3 \text{ m/s}$)、速度を有する要素を緑色 ($v > 0.3 \text{ m/s}$) に分けて表示した礫の分布状態を示す。また、図-11には、図-10において速度を有していない礫のみを抽出したデッドゾーン (青色の要素) の形状を示す。なお $\theta_{LS}=30^\circ$ では 0.1s ほど遅れて最大荷重に達するので、概ね同じ堆積高さのデッドゾーンを形成するのに時間を要することになる。これは、図中に黄色で網掛けした領域に停止礫が移動する必要があるためである。図中には、デッドゾーンの上面に沿った形で赤線を示している。これを比較すると直立堰堤の傾斜の方が急なことがわかる。このためデッドゾーンの右下下部から左上の頂部にかけての距離は明らかに $\theta_{LS}=30^\circ$ の方が長くなっている。図-12には、このデッドゾーン上面の長さの時間変化を示すが、最大荷重を迎える 0.6s まで一貫して直立堰堤の方がその長さが短くなっている。

4. 結言

本研究は、透過型砂防堰堤の前面傾斜角が土石流衝突荷重に与える影響について、個別要素法における個々の要素の運動過程を通して考察したものである。本研究の成果は以下の通りである。

- 1) 個別要素法を用いて、直線水路における土石流実験で得られた荷重～時間関係や前面傾斜角の影響で最大荷重が減少することを再現できた。
- 2) 前面傾斜角を与えることで、デッドゾーンの上面が伸びることを示した。さらに、デッドゾーンの上面が伸びると、後続の礫は停止礫塊と多く衝突(接触)するため、堰堤モデルが受けるまでに、運動量が小さくなることが示唆される。
- 3) 今後、デッドゾーンによる効果によって、摩擦・衝突エネルギーが堰堤の衝撃荷重を低減することが有用であれば、堰堤上流側の施工方法などの工夫によって、土石流の破壊力を低減する方法も考えられる。さらに、上流側の不作為な河川形状の影響や土石流の流れ方によって、破壊を免れた事例検討などを加えることで、実用化へ向けた検討が必要であると考えられる。
- 5) 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，Vol.112，pp.40～43，1979.8.
- 6) 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，土石流・流木対策設計技術指針 No905，2016.
- 7) Horiguchi T., Katsuki S., Ishikawa N., Mizuyama T. : Method for Evaluating the Trapping Effects of Woody Debris Using a Distinct Element Method International Journal of the Japan society of Erosion Control Engineering, Vol.12, No.1, pp.1-12, 2019.
- 8) Song D., Gordon G., D., Xu M., Choi G., E., Li S., Zheng Y.: Quantitative analysis of debris-flow flexible barrier capacity from momentum and energy perspectives, Engineering Geology Vol.251, pp.81-92. 2019.
- 9) 小松喜治，堀口俊行，香月智，石川信隆，水山高久：鋼製透過型砂防堰堤の前面傾斜角が土石流衝突荷重に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.62A，pp779—778，2018.

参考文献

- 1) 平松ら：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，Vol.67, No.4, pp.38-48, 2014.
- 2) 大同淳之，吉栖雅人，中嶋健太：土石流による衝撃力，水工学論文集，第 38 巻，pp.557～562，1994.2.
- 3) 山本彰，山本修一，鳥井原誠，平間邦興：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，Vol.51, No.2, pp22～30，1998.
- 4) 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，Vol.43, No.2 (169) ， pp.11～19，1990.7.
- 10) 堀口俊行，香月智：個別要素法による鋼製透過型砂防堰堤に対する巨礫衝突荷重解析，砂防学会誌，Vol. 70, No.3, pp. 51-57，2017.
- 11) Horiguchi, T., Takahashi, T., Takamori, K., Katsuki S. : Evaluation of load-carrying capacity of full-scale falling protection net using distinct element method, International Journal of Protective Structure, Vol.8, No.1, 1-20.