

模型実験による土石流の再現と平坦部による流体力の低減効果

山口大学大学院 学生会員 ○吉村 翔
 正会員 中田 幸男
 (株) 高速道路総合技術研究所 正会員 竹本 将
 正会員 中村 淳
 正会員 村上 豊和

1. はじめに

近年、集中豪雨の増加に伴い、日本全国において土砂災害が発生している。気象庁のデータでは全国の1時間降水量50mm以上の年間発生回数は増加しており、最近10年間の平均年間発生回数は、1976年から1985年の10年間と比べて約1.4倍に増加¹⁾している。また、地球温暖化が豪雨に与える影響を評価²⁾するなど、豪雨災害に対する備えを今後実施していかなくてはならない。

このような中、高速道路でも、近年、土石流災害に見舞われることが多くなり、通行止めの解除に時間のかかる事象が増えており、災害に対するインフラ強化も求められている。一方で、高速道路特有の事象として、高速道路沿線には側道（4m程度の平地）の付随するケースが多く、この側道の存在が土石流被害を軽減するケースも見受けられた。また、土石流中の土粒子には、巨礫から細粒分まで幅広く含まれており、インフラ強化を考えるうえでこの違いが及ぼす影響の検討が必要である。そこで本研究では、模型を用いた土石流実験を実施し、平坦部による土石流流体力の低減効果についての検討を行うとともに、粒度分布の違いが及ぼす、土石流の流動特性や壁面衝突時の挙動、低減割合の検討を実施し、結果をここに報告する。

2. 実験概要

図-1 に実験装置の概要を示す。フレームは鋼製からなり、側面をアクリル板で構成し、土石流を側面から観察、撮影できるようにしてある。実験装置の斜路は底板幅0.3m、斜路延長6.0m、斜路勾配20°で、中国地方の代表的な危険渓流を模擬している。斜路の上端には土砂30kgおよび水50Lを貯めるタンクを設置し、タンクの流出口を開放することにより、土石流を発生させる仕組みとなっ

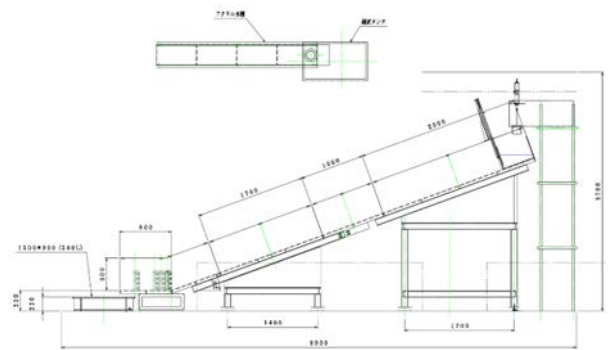


図-1 実験装置の概要

表-1 試料の配合割合

	Gravel	Sand	3A	5A	6	N5A
Gravelly Sand	20%	80%				
Gravel Sand	50%					50%
Sand			10%	30%	60%	

表-2 試料の物理的特性

	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	ϕ (°)
Sand	2.627	1.431	1.735	38.0

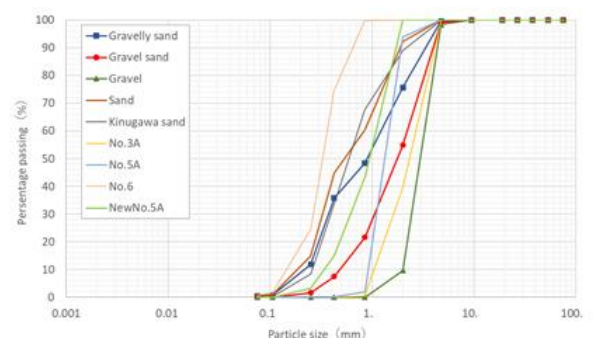


図-2 試料の粒度分布

キーワード 土石流, 模型実験, 流速, 土石流水深, 礫, 粒度分布

連絡先 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1 山口大学 大学院創成科学研究科

T E L 0836-85-9005

っている。また、斜路の下端には側道を想定した平坦部を設けた。平坦部には対策工として防護壁を模擬した立壁を設置することができ、斜路下端部からの距離を変えて設置することができる。

実験に使用する土砂は宇部珪砂の3号A、5号A、6号および新特5号Aを混合し、それぞれ礫、砂礫、礫質砂、砂として実験を行った。表-1に試料の配合割合、表-2に試料の物理的特性、図-2に試料の粒度分布を示す。なお、本実験は流体として水を使用するため、粘性項が影響を及ぼさず、重力項が流れに大きな影響を及ぼすと考えられるため、フルード数による相似則を考えた。ここで実験装置の縮尺は1/20を想定した。

3. 計測器および配置

図-3に計測機器およびその配置を示す。斜路下端の立壁には荷重計（写真-1）を設置しており、土石流の壁面衝突から流下終了までの荷重を測定した。荷重計を設置した立壁は斜路下端部から、距離0.0m、0.1m、0.2m、0.5mに変更し実験を行った。斜路部には上方からレーザー変位計（データ取得間隔0.01s）を4台設置し、土石流発生中の水深を測定した。図-4に土石流水深の経時変化を示す。また、4台のうち斜路下端の2台を用いて、土石流先頭部の流速を求めた。ここで、流速=レーザー変位計間の距離/土石流到達時刻の差とする。土石流到達時刻については、土石流水深が初期値より1mm上昇した時刻と定義した。また、土石流流下方向に対して左側から、土石流が立壁に衝突する際の映像を高速度カメラ（120fps）で撮影し、衝突時における土石流の挙動と壁面に作用する荷重の関係进行分析することとした。

4. 実験結果

平成30年西日本豪雨災害で土石流の発生した溪流の大半は溪床勾配が15°～25°であった。図-5に西日本豪雨災害で発生した土石流の流速と水深の関係を示す。これらの溪流で発生した土石流は流速3.0～5.0m/s、土石流水深0.3m～0.7mのものが卓越した。このことから、模型実験を用いて発生させる土石流の流速と水深もこの範囲を目標値とした。ここでフルード数を用いた相似則に当てはめると、実験値では流速0.67～1.12m/s、土石流水深0.015m～0.035mに相当する。図-6に模型実験で得られた流速と水深の結果を示す。流速は目標値よりも速い傾向にあるが、実務の際には安全側の設計になると考えている。また、実験結果の定量的な比較のため、マンニングの平均流速公式に目標値を代入すると、粗度係数0.0323～0.1043が目標値となる。図-7に実験結果から得た粗度係数とその目標値を示す。礫含有率による結果の違いは、特に土石流水深に表れており、礫を50%以上含んだ土砂では概ね目標値を満たせた。

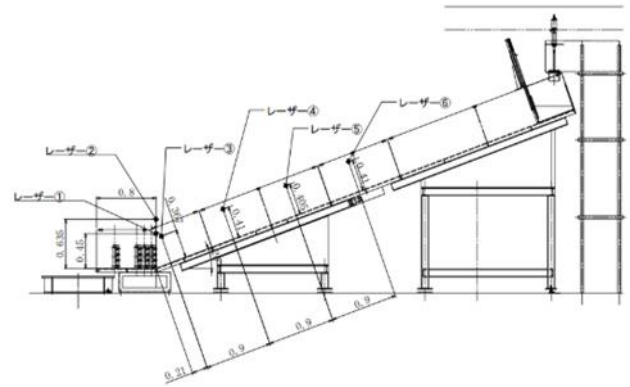


図-3 計測機器およびその配置



写真-1 防護壁に設置した荷重計

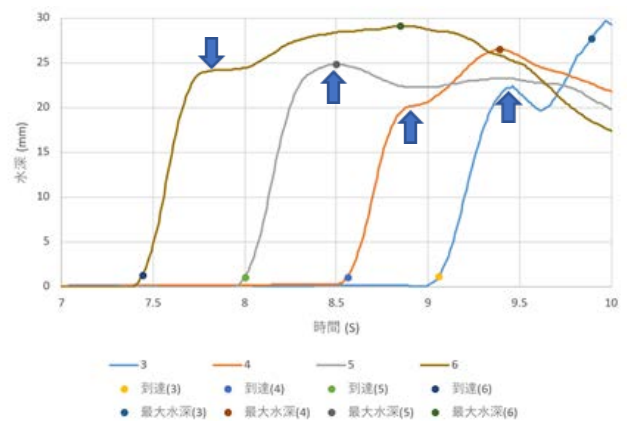


図-4 土石流水深の経時変化

5. 防護壁に衝突する土石流の挙動および荷重の分析

土石流が防護壁に衝突する様子を高速度カメラで、土石流流下方向に対して左側から撮影した。写真-2は行った実験のうち、斜路下端部から防護壁を距離0.5mの位置に設置した実験（試験番号100）である。各段階の状態を下記に示す。

- ①（左上）：平坦部を流土石流が防護壁に到達。
- ②（右上）：土石流の動きが防護壁に沿って鉛直上向きに変わる。
- ③（左下）：鉛直上向きの動きがピークとなり、動きが下向きになる。
- ④（右下）：防護壁底部の土砂が停止して、堆積を始める。

図-8に防護壁にかかる荷重の経時変化を示す。行った実験のうち、土砂に砂礫を用いた4回の実験結果（試験番号92, 94, 96, 100）を示しており、斜面下端部からの距離はそれぞれ、0.0m, 0.1m, 0.2m, 0.5mである。いずれの結果においても荷重が一時的に一定(保持状態)となる瞬間が、青矢印と緑矢印の2回存在し、これはこれら4回以外の全ての実験においても確認することができた。青矢印(1回目)の保持状態は写真-2の②(右上)を示し、初期流体力と呼ぶこととする。緑矢印(2回目)の保持状態は写真-2の④(右下)直前の状態で、最大の流体力(動的荷重の最大値)を示しており、この状態を疑似流体力と呼ぶこととする。このような荷重保持状態が発生する原因を考察する。初期流体力は防護壁衝突後0.1s未満に発生するため、壁に当たった土砂が跳ね返ることによる荷重保持状態と考えられる。また、疑似流体力は、防護壁衝突後0.3~0.4s程度で発生するため、土石流先頭部の水深が急増し終えた(図-4の矢印)ことによる荷重保持状態と考えられる。ただし、土石流最大水深よりも早い時刻に発生することが多い。④以降は防護壁の前面に土砂が堆積するため、静止土圧と土石流の動的荷重が合算された荷重がかかることになる。今後、模型実験を用いて得られた結果の荷重分析を行う際には、初期流体力および疑似流体力に着目し、対策工の設計や平坦部による土石流流体力の低減効果について検討する必要があると考える。

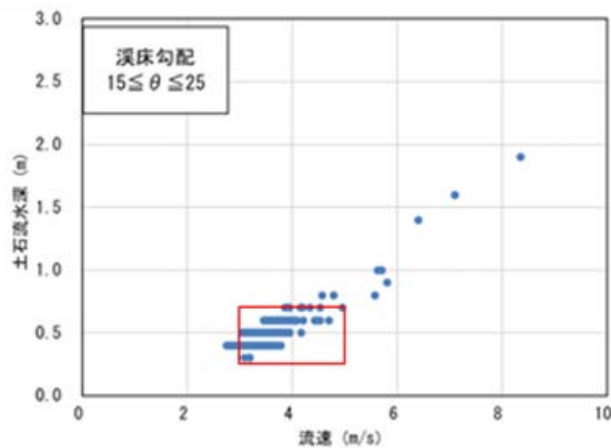


図-5 西日本豪雨土石流の諸元

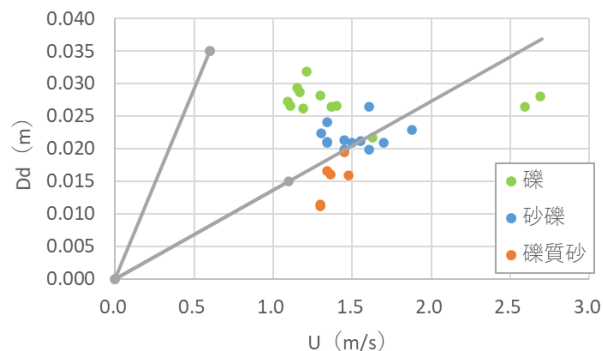


図-6 模型実験での流速と水深

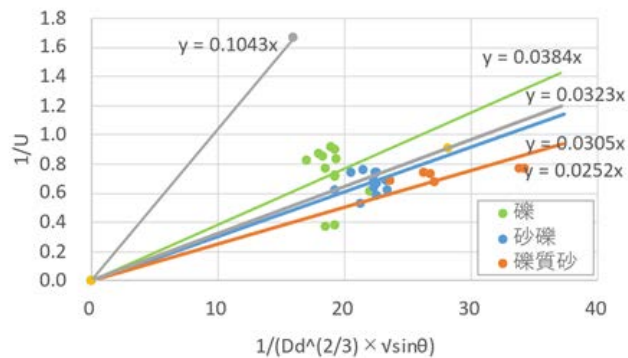


図-7 実験結果から得た粗度係数

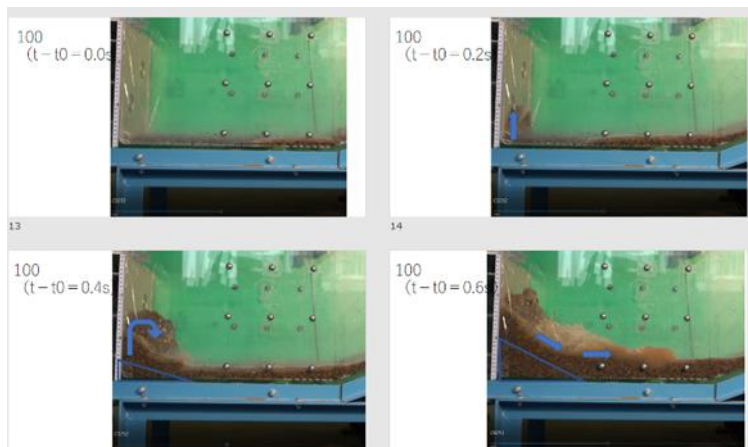


写真-2 土石流が防護壁に衝突する際の土砂の挙動

6. 壁面荷重に与える試料の影響

2 回荷重が保持される現象は，土砂に礫や砂礫を用いた全ての実験においても確認することができた．図-9 に初期流体力の比較結果を示す．土石流中の礫の含有率にかかわらず，壁の設置位置が斜面下端部に近いほど初期流体力は大きくなり，設置位置が斜面下端部から遠いほど初期流体力は低減することが確認された．また，礫の含有率が高いほど初期流体力は大きくなる傾向にあり，最大でおよそ 3 倍の差が生じた．このことから，土石流中の礫含有率が高いほど土石流の先頭部が持つエネルギーは大きいと考えられる．また，平坦部による初期流体力の低減効果は，礫の含有率に依存せず同程度であることが分かった．

図-10 に疑似流体力の比較結果を示す．初期流体力と同様に，壁の設置位置に近いほど疑似流体力は大きくなり，設置位置が遠ざかるほど疑似流体力も低減することが確認された．一方で，土石流中の礫含有率による疑似流体力の差は初期流体力ほど顕著に発生しておらず，線形的な減少割合を示すという結果が得られた．また，平坦部による疑似流体力の低減効果は，初期流体力と同様に礫の含有率に依存せず同程度であると考えられる．

7. 結論

本研究において，模型実験によって西日本豪雨災害で発生した土石流を再現することができた．また，実験中に測定される防護壁に作用する荷重の応答に対して，防護壁周りの土砂の動きと対比させて考察するとともに，特徴的な荷重として初期流体力と疑似流体力を定義した．さらに，土石流中の大粒子割合が高いほど土石流先頭部が持つエネルギーは増大すること，平坦部による低減効果は同程度である見込みを示すことができた．

8. 謝辞

実験を進めるにあたり，本学学部生，青田凌昌さん，清永真白さん，大学院生，鯨吉樹さんには，ご協力を頂きました．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

- 1) 気象庁 HP
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
- 2) Yukiko Imada, Hiroaki Kawase, Masahiro Watanabe, Miki Arai, Hideo Shiogome, Izuru Takayabu; Advanced risk-based event attribution for heavy regional rainfall events, npj Climate and Atmospheric Science, Article number: 37 (2020)

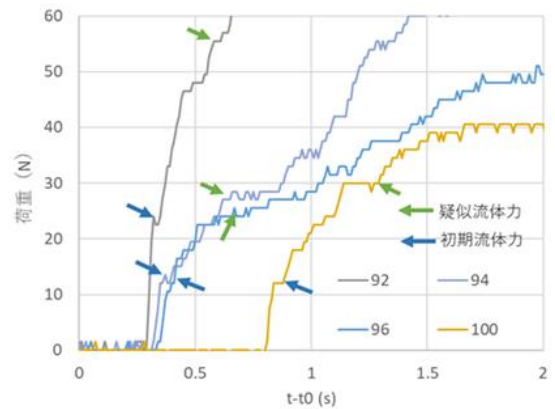


図-8 防護壁にかかる荷重の経時変化

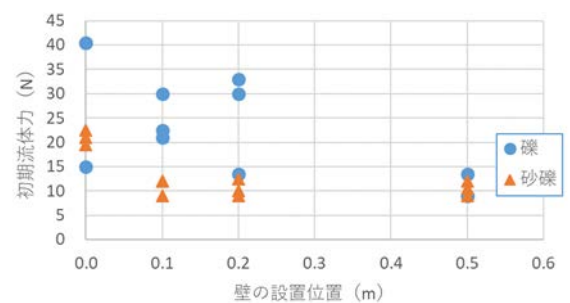


図-9 初期流体力の比較

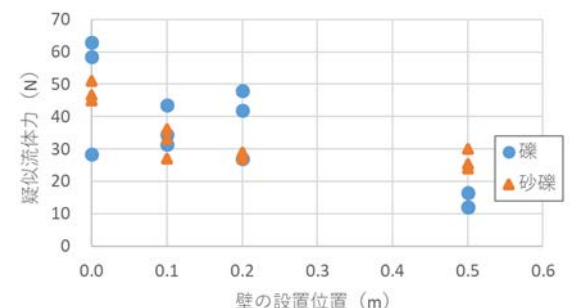


図-10 疑似流体力の比較