

平成29年度

# 土石流流下が構造物に及ぼす影響に関する 実験的研究

寒地土木研究所 寒地河川チーム  
寒地土木研究所 研究連携推進監  
寒地土木研究所 寒地河川チーム

○伊波 友生  
藤浪 武史  
矢部 浩規

土石流による砂防施設への損傷に関する研究に比して家屋等の構造物への損傷に関する研究例は少ない。そこで土石流が構造物に及ぼす影響を明らかにする目的で、室内水路実験を行った。渓流部勾配、河床材料、流量が異なる実験ケースにおいて土石流を流下させるとともに、水路内に家屋または橋梁を模した模型を設置し、これらに作用する流体力を連続的に計測した。このときの土石流流下に伴う構造物に対する力学的な作用を報告する。

キーワード：土石流、泥流、室内実験、構造物の被災、扇状地

## 1. はじめに

地震動を直接の外力とする橋梁の被災は、構造工学や材料工学分野の研究の発展によって、以前に比して減少している。その一方で土石流に起因する橋梁の流出や落橋が大きく報じられるようになった。これらは橋脚部の洗掘や土砂による埋没、流木・土石による閉塞、河川の蛇行などが関連しており、河川工学的な観点や手法を用いた研究が求められていると言える。

北海道では平成26年9月11日の午前6時までの12時間で支笏湖西岸を中心に総雨量300 mmを越える集中的な大雨が降り、表層崩壊、土石流、盛土崩壊などの土砂災害や、河川の侵食が発生した<sup>1)</sup>。漁川にかかる奥漁川橋は橋脚基礎が洗掘され路面が86 cm沈下し、橋台が水衝部となり橋台に接続する土留擁壁が倒壊し盛土が流出した<sup>2)</sup>。この例からも分かる通り、橋梁の被災と河川災害は相互に関係し合っており、相互に関連づいた研究はより実現に近いものだと言える。

橋梁の被災は救援物資供給ルートへの切断を意味し、被災の影響を長引かせる原因となる。先の例で挙げたように、橋梁自体は被災してなくても、河川の蛇行により道路盛土が流出し、橋梁の機能が損なわれるケースは多い。災害時における社会インフラのレジリエンス向上が求められている昨今、橋梁と河川が一体になった被災メカニズムを把握することは工学上重要と言える。

そこで筆者らは土石流流下時の家屋周辺の土石流および泥流の流下状況、ならびに橋梁周辺の閉塞、せき上げ状況を把握する目的で室内水路実験を行った。本稿はその実験結果と定性的な考察を報告するものである。

## 2. 実験手法

写真-1、図-1に本実験において用いた水路の側面図を示す。水路は渓流部の河道に堆積する土砂が出水によって土石流もしくは泥流となって流下する現象を再現する



扇状地部 渓流部

写真-1 実験水路

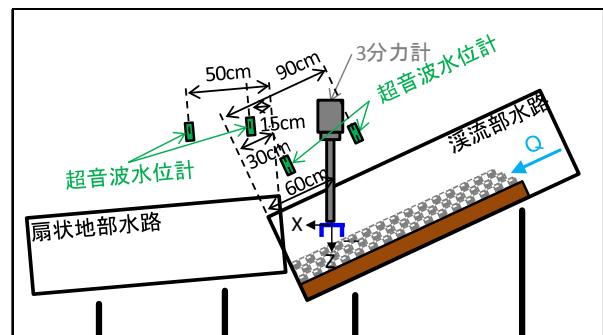


図-1 実験水路側面図

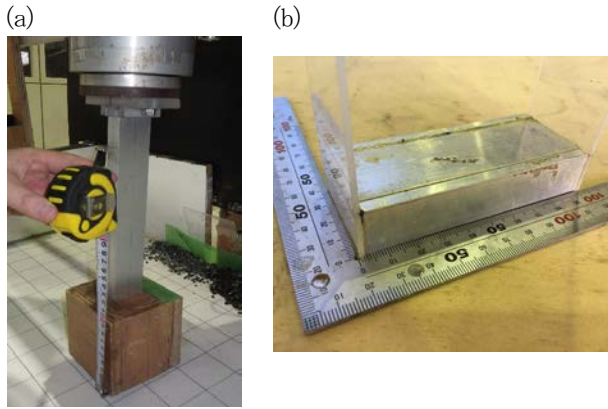


写真-2 (a) 家屋模型, (b) 橋梁模型

表-1 実験ケース

	実験パターン	流下条件	流量 (L / min)
ケース1	家屋実験	泥流	25
ケース2	家屋実験	土石流	25
ケース3	橋桁実験	泥流	25
ケース4	橋桁実験	土石流	25

ため、扇状地部と渓流部で構成されている。扇状地部は長さ2 m, 幅1 m, 勾配5°である。渓流部は長さ2 m, 幅10 cm, 勾配25°である。出水を模擬するために上流端で流量25 L / minを与えた。渓流部には河床材料を予め7 cm斜面と平行に堆積させており、 $d_m$  (平均粒径) : 1 mm~1.5 mmのとき泥流,  $d_m$  : 3 mm~4 mmのとき土石流となって出水時に流下するものとした。

本実験は家屋の被災を模擬するパターン (以下家屋実験と呼ぶ) と橋桁の被災を模擬するパターン (以下橋桁実験と呼ぶ) の大きく2パターンに分かれている。家屋実験において、大きさ10 cm立方の木製の家屋模型を谷出口下流25 cmの位置に上流面を垂直に設置した。家屋模型を写真-2 (a) に示す。家屋模型には3分力計 (日章電気 (株) 製LMC-3502-10NWP) を接続し、図-1に示した方向にx, y, zと座標を設定した。それぞれ流下方向、横断方向 (左岸から右岸に向かう向きを正とした)、鉛直方向を指している。また、家屋模型と扇状地部の斜面とは5 mm程度クリアランスを設けている。加えて家屋模型上方からデジタルカメラで撮影を行い、家屋模型周辺の土石流、泥流の流下挙動を把握した。橋桁実験において、橋桁模型は渓流部に設置した。橋桁模型を写真-2 (b) に示す。橋桁模型はアルミ製で、長さ9.4 cm, 高さ2 cm, 幅4 cmであり、桁下高さは3 cmに設定している。3分力計に接続するアームは幅0.2 cmで、水槽の内幅が10 cmなので両側に0.1 cmずつクリアランスがあり、側壁による摩擦の影響がないようにした。家屋実験と同様に橋桁模型にも3分力計 (日章電気 (株) 製LMC-3502A-100N) を接続し図-1に示した方向に家屋実験と同様の座

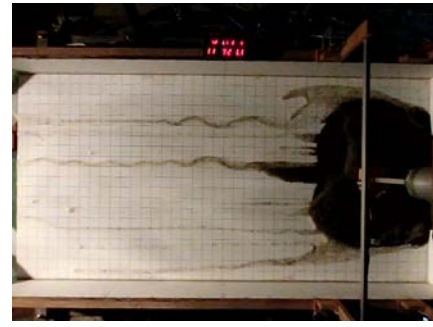


写真-3 流下状況 (ケース1)

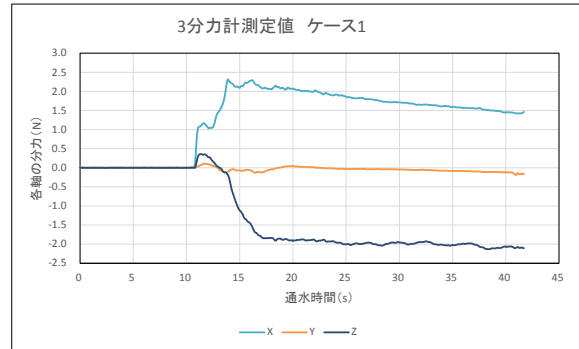


図-2 流体力の時系列変化

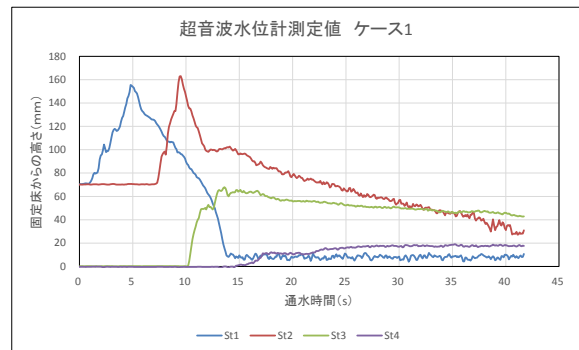


図-3 水位の時系列変化

標を設定した。加えて橋桁模型側方からデジタルカメラで撮影を行い、橋桁模型周辺の土石流、泥流の流下挙動を把握した。さらに構造物前後の堆積状況を把握するため、家屋実験、橋桁実験において超音波水位計 (KEYENCE社製UD-100) を橋桁模型に対して上流側がSt1, 下流側がSt2, 家屋模型に対して上流側がSt3, 下流側がSt4となるように設置した (図-1)。

### 3. 結果

全実験ケースを表-1に示す。先に述べた家屋実験、橋桁実験に対し、それぞれ河床材料と流量を変化させた全4ケースについて、以下に実験結果とその考察を述べる。

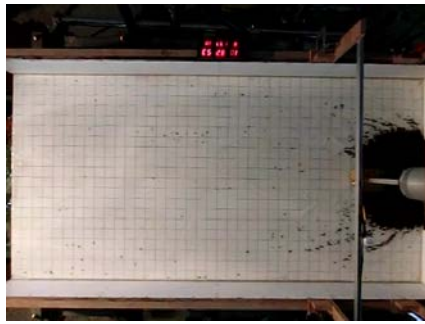


写真-4 流下状況 (ケース2)

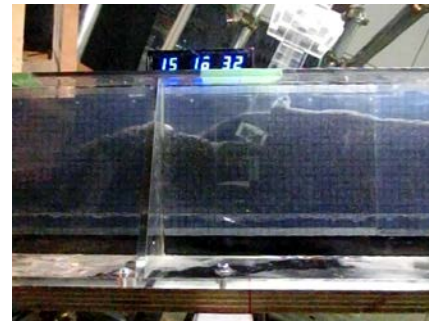


写真-5 流下状況 (ケース3)

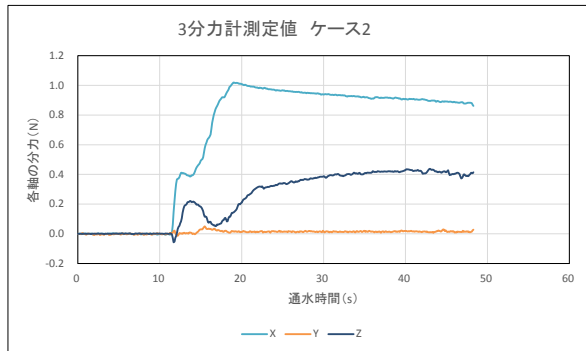


図-4 流体力の時系列変化

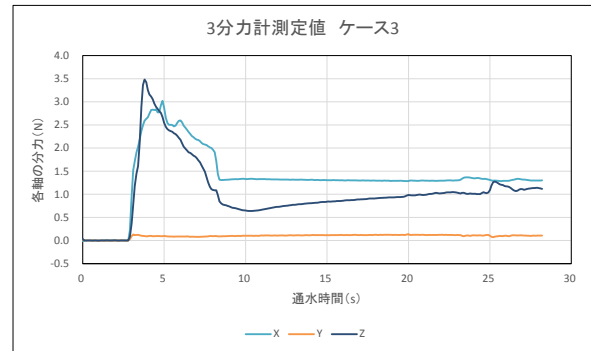


図-6 流体力の時系列変化

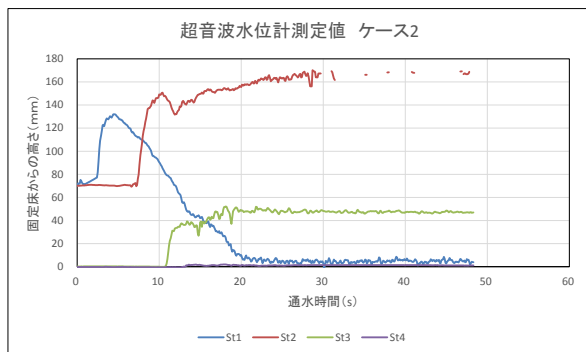


図-5 水位の時系列変化

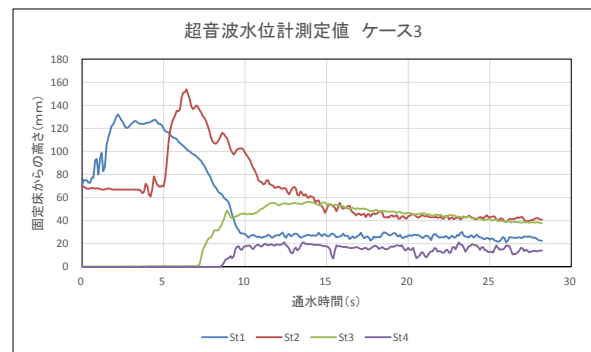


図-7 水位の時系列変化

**(1) ケース1 (家屋実験・泥流)**

家屋模型周辺の泥流の挙動に関して、デジタルカメラで撮影した動画を元に結果を示しつつ、定性的に考察を行う。泥流は家屋模型に衝突後、流下速度が低下し、泥流中の水分が抜けて水分のみが先行して流下するが、上流からの流水に連行される形で土粒子も追従し、結果として扇状地を形成した。先端部から水が湧き出している様子も確認できた。この湧水が扇状地に堆積した土砂を再度輸送させ、扇状地部下端まで流下させていることが分かった(写真-3)。

図-2に3分力計の計測結果を示す。流下方向の流体力は泥流が家屋模型に作用した後、常に正であり、流下方向に力が作用し続けたことが分かる。横断方向の流体力はごく小さな変動こそあるが常に0 Nであった。鉛直方

向の流体力は常に負であり、家屋を持ち上げる方向に流体力が作用していたことが分かる。これは泥流が家屋模型と扇状地部に設けたクリアランスに流入したことが原因と考えられる。

図-3に水位計の計測結果を示す。流下方向と鉛直方向の流体力が生じたとき、家屋模型に対して上流側の水位(S3)が上昇した。それぞれの流体力がピーク値をとった通水14秒後には家屋模型に対して上流側の水位(S3)もピーク値をとりその後は上げ止まり一定であった。このことから家屋模型には家屋模型の上流側の面に堆積した泥流の土圧が作用していたことが推察される。

**(2) ケース2 (家屋実験・土石流)**

土石流は家屋模型に衝突後、土石流を構成している礫



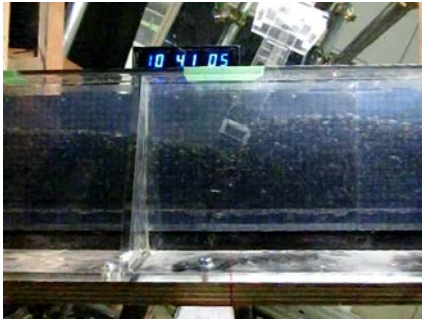


写真-6 流下状況 (ケース4)

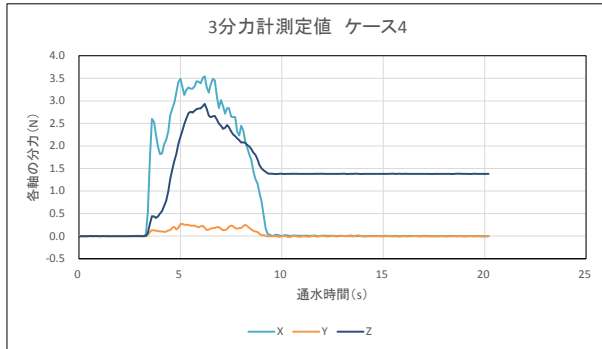


図-8 流体力の時系列変化

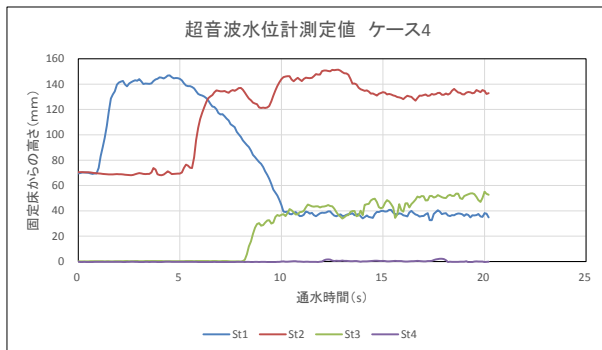


図-9 水位の時系列変化

分は停止し、礫間から湧水が生じた。この時、泥流流下時とは異なり、上流から供給される流水によっても、湧水によっても礫は再移動せず、扇状地地形が大きくなることはなかった。したがって、礫が家屋模型上流側で堆積し、家屋模型を越流した (写真-4)。

図-4に3分力計の計測結果を示す。流下方向の流体力は土石流が家屋模型に作用した後、常に正であり、流下方向に力が作用し続けたことが分かる。横断方向の流体力はごく小さな変動こそあるが常に0 Nであった。鉛直方向の流体力は常に正であり、家屋を沈める方向に流体力が作用していたことが分かる。これは土石流が家屋模型の上面にまでせき上がったためと考えられる。

図-5に水位計の計測結果を示す。流下方向と鉛直方向の流体力が生じたとき、家屋模型に対して上流側の水位

(St3) が上昇した。一方で家屋模型に対して下流側の水位 (St4) は通水中ほぼ0 mmであり、家屋模型下流側に土石流がほとんど回り込まなかったことが分かる。

### (3) ケース3 (橋桁実験・泥流)

泥流は橋桁模型に衝突後、桁下空間で閉塞し、橋面上部を越流する。この間、細粒の河床材料には上流から与えている水分が浸透し、洗掘すると言うよりも河床全体を取り込むように流下することで結果として閉塞が解消された (写真-5)。

図-6に3分力計の計測結果を示す。流下方向の流体力は流下からおよそ4秒後にピーク値をとった。この時泥流は橋面上部にせき上がり、鉛直方向の流体力もピーク値をとっている。鉛直方向の流体力は泥流の流下後も土石が橋面上部にせき上がったまま残留していたため正の値をとり続けた。一方で流下方向の流体力は0 Nにならなかった。これは橋桁模型と側壁との隙間 (およそ1 mm) に  $d_m: 1 \text{ mm} \sim 1.5 \text{ mm}$  の河床材料が詰まったためと考えられる。横断方向の流体力は土石流が橋桁に作用している間にごく小さな変動を示したのみであり、通水中において0 Nであった。

図-7に水位計の計測結果を示す。流下方向の流体力と鉛直方向の流体力がピーク値をとった時、橋桁に対して上流側の水位 (St1) は下がり始め、橋桁に対して下流側の水位 (St2) は上がり始める。これは橋桁の上流側で閉塞した泥流が河床を取り込みながら流下し始めたタイミングと一致する

### (4) ケース4 (橋桁実験・土石流)

土石流は橋桁模型に衝突後、狭隘な桁下空間を通過しきれず閉塞した。続いて閉塞した地点から堆積が生じ橋面上部を越流した。その後、橋面上部の越流とは別に橋梁基礎部周辺が局所的に洗掘され流下断面が確保されると、桁下空間に流れが生じ、河床材料を巻き込みながら流下した。これら二つの流れは橋桁下流側で合流した (写真-6)。

図-8に3分力計の計測結果を示す。流下方向の流体力は流下からおよそ6秒後にピーク値をとった。この時土石流は橋面上部にせき上がり、鉛直方向の流体力もピーク値をとっている。鉛直方向の流体力は土石流の流下後も土石が橋面上部にせき上がったまま残留していたため正の値をとり続けたが、一方で流下方向の流体力は土石流の流下に伴い減少し、最終的には0 Nとなった。横断方向の流体力は土石流が橋桁に作用している間にごく小さな変動を示したのみであり、通水中において0 Nであった。

図-9に水位計の計測結果を示す。流下方向の流体力と鉛直方向の流体力がピーク値をとった時、橋桁に対して上流側の水位 (St1) は下がり始め、橋桁に対して下流側の水位 (St2) は上がり始める。これは橋桁の上流側で閉

塞した土石流が河床を洗掘しながら流下し始めたタイミングと一致する。

## 4. 考察

### (1) 家屋実験における泥流と土石流の比較

ケース1とケース2で各軸の流体力の大きさを比較すると、ケース1の方が流体力が大きいことが分かる。これは、扇状地部は勾配が緩く、泥流のような粒径が小さく限界掃流力の小さなものでないことと流水によって流下しえないためと言える。また、泥流および土石流ともに通水中は絶えず家屋模型に力を作用させていることが分かる。このことから、家屋への瞬間的な衝突力のみならず、作用時間を考慮した力積も土砂による構造物の被災を考える上で重要なファクターであることが推察される。

### (2) 橋桁実験における泥流と土石流の比較

ケース3とケース4を比較すると、泥流は通水中は絶えず橋桁模型に力を作用させていることが分かる。これは土石流が河床材料を巻き込みながら橋桁上流で閉塞し、その閉塞した土砂が流下しきってしまうのに対して、泥流は流下しきるまでに時間を要したためと考えられる。

## 5. 結論

以下に主要な結論を述べる

(1) 家屋の損傷被害を考えると、泥流および土石流は絶えず流下し、家屋に流体力が作用し続けるため、その瞬間的な衝突力のみならず、作用時間を考慮した力積も土砂による構造物の被災を考える上で重要なファクターであることが推察される。

(2) 橋桁の損傷被害を考えると、土石流は橋桁に衝

突したときに流下方向と鉛直方向の流体力のピーク値をとり、流下と共に減衰し流下方向の流体力は最終的にはほぼ0 Nとなる。一方、泥流は橋桁に衝突したときに流体力のピーク値をとりその後やや減衰するものの、衝突以降も流下方向に力が作用し続ける。したがって流下物の粒径によって流体力の作用する継続時間が異なり、ひいては被災特性も異なるものと推察される。

### 参考文献

- 1) 気象庁：報道発表資料， <http://www.jma.go.jp/jma/press/1409/11a/kaisetsu2014091106.pdf>, (2017.12.19 確認)
- 2) 倉橋稔幸, 藤浪武史：平成 26 年 9 月 11 日の支笏土石流等による国道 453 号の災害について，寒地土木研究所月報，No.748, pp.53-60, 2015.
- 3) 藤浪武史, 阿部孝章, 倉橋稔幸：橋梁の損傷状況からみた恵庭岳ボロピナイ沢土石流の流動形態に関する考察，第 8 回土砂災害に関するシンポジウム，pp.223-228, 2016.
- 4) 阿部孝章, 藤浪武史：橋桁に対する土石流の流体力に関する実験的研究，日本混相流学会 混相流シンポジウム，D125, 2016.
- 5) 高橋保, 中川一, 佐藤広章：土石流および土砂流扇状地の形成に関する研究，水理講演会論文集，Vol.32, pp.497-505, 1988.
- 6) 中谷加奈, 小杉恵, 長谷川祐治, 里深好文, 水山高久：家屋が存在する扇状地における土石流の挙動に関する実験的研究，砂防学会誌 Vol.67, No.6, pp.22-32, 2015.
- 7) 水山高久：流砂系における土砂動態と土砂管理そして砂防，土木学会論文集，No.754, pp.1-8, 2004.
- 8) 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, pp.22-30, 1998.