

橋梁を考慮した土石流流下時の破堤メカニズムに関する実験的研究

Experimental Study on Levee Breach Mechanism by Mud Flow in Consideration of a Bridge

寒地土木研究所 寒地河川チーム ○正員 伊波友生 (Yu Inami)
 寒地土木研究所 研究連携推進監 正員 藤浪武史 (Takeshi Fujinami)
 寒地土木研究所 寒地河川チーム 正員 矢部浩規 (Hiroki Yabe)

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。

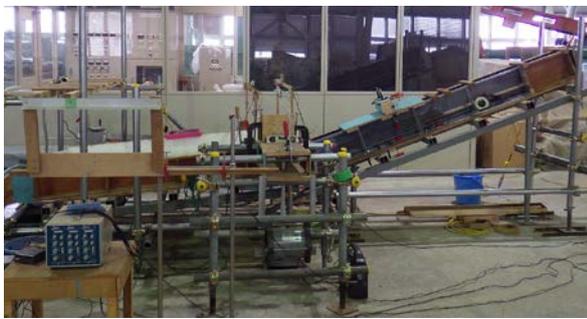
北海道では平成26年9月11日の午前6時までの12時間で支笏湖西岸を中心に総雨量300mmを越える集中的な大雨が降り、表層崩壊、土石流、盛土崩壊などの土砂災害や、河川の侵食が発生した。漁川にかかる奥漁川橋は橋脚が洗掘され路面が86cm沈下し、橋台が水衝部となり橋台に接続する土留擁壁が倒壊し盛土が流出した。ラルマナイ川にかかる山水橋は河川の蛇行により橋台に接続する盛土部が大きく侵食された。この例からも分かる通り、橋梁の被災と河川災害は相互に関係し合っており、相互に関連づいた研究はより実現に近いものだと言える。

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いなくても、河川の蛇行により盛土が流出し、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橋梁周辺の破堤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に本実験に用いた実験水路を示す。水路は出水時に山地河川を流下する土石流が橋梁に衝突の後に閉塞する、また閉塞をきっかけにして橋梁周辺の堤防を決壊させる現象を再現するため、扇状地部と渓流部で構成されている。扇状地部は長さ2m、幅1m、勾配5°である。渓流部は長さ2m、幅10cm、勾配20°である。出水を模擬するために上流端で流量を与えた。流量は



扇状地部 渓流部

写真-1 実験水路



写真-2 橋梁模型

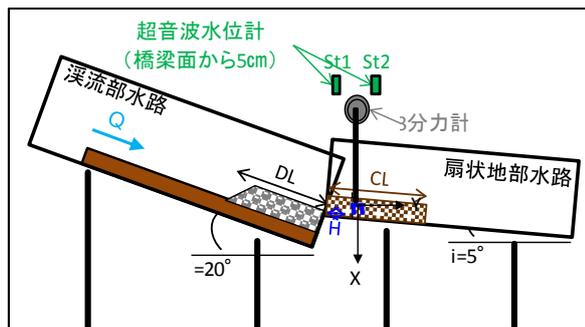


図-1 実験水路側面図

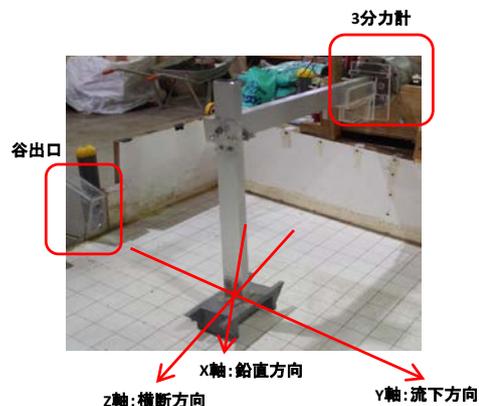


写真-3 3分力計設置状況

表-1 実験ケース

	流量 (L/min)	DL: 溪流河床材料の長さ (m)	H: 橋梁位置 (m)
ケース1	20.0	1.2	0.15
ケース2	20.0	0.8	0.15
ケース3	20.0	1.2	0.25
ケース4	20.0	1.2	0.40

20 L / min である。溪流部には河床材料を予め斜面と平行に 7 cm 堆積させている。溪流河床材料は平均粒径 $dm = 3 \text{ mm}$ の石礫と平均粒径 $dm = 1 \text{ mm}$ の石礫を 1 対 1 の割合で混合したものを作成し使用した。橋梁模型周辺の築堤材料には脱水ケーキ焼却灰を用いた。脱水ケーキ焼却灰は実験に用いる石礫や珪砂よりも浸透性が低く比較的締め固めが容易なため、築堤模型材料に使用した。築堤長さ 80 cm, 築堤高 45 mm, 天端幅 105 mm, 底幅 150 mm であり法勾配は 1 : 0.5 である。橋梁模型は変形しにくく耐水性があるアクリル部材 (比重 1.19) を用いて作成した (写真-2)。桁下高 3 cm, 橋長 10 cm であり, 土石流衝突時の橋梁に作用する流体力を測定するために 3 分力計を接続した (写真-3)。橋梁模型が受ける流体力が 3 分力計のみに伝わるように, 扇状地部の河床から 2~3 mm 程度のクリアランスを設けてこれを橋梁模型の設置高さとした。土石流流下の様子を把握する目的でデジタルカメラを扇状地部上方と溪流部水路上部にそれぞれ 1 台ずつ計 2 台設置した。土石流の堆積状況を把握する目的で, 超音波式水位計を実験水路中心線上において橋梁模型の前縁から 5 cm 離れた上流側と後縁から 5 cm 離れた下流側に 1 台ずつ設置した。

3. 結果と考察

全実験ケースを表-1 に示す。溪流河床材料の長さ (DL) は実験において土石供給の量を決めるパラメータであり, 土石流を構成する土石の生産源が主に河床堆積物であると現象を単純化させた。橋梁位置 (H) は谷出口 (勾配変化点) から橋梁模型までの距離であり, 土砂生産源からの距離を模擬している。以下に実験結果とその考察を述べる。

(1) ケース 1

土石流の挙動に関して, 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。通水開始後, 土石流は土石が橋梁に衝突するとすぐに桁下空間において閉塞する。このことによって橋梁を迂回するように蛇行が生じ, 橋台背面が侵食されつつ越流する。通水 10 秒後には橋台背面より上流側で両岸が破堤した (写真-4)。この時主流は土石の堆積によって蛇行し, 蛇行の外岸側の水衝部で大規模な侵食が発生した。すると通水 31 秒後, 橋梁模型より下流側の水衝部で新たな破堤が左岸, 右岸それぞれ 1 箇所ずつ発生した。以降は主流の蛇行を繰り返し, 堤防のほとんどが侵食され流出した。

図-2 に 3 分力計の計測結果を示す。x 方向の流体力は



写真-4 土石流流下状況 (ケース 1, 通水 10 秒後)

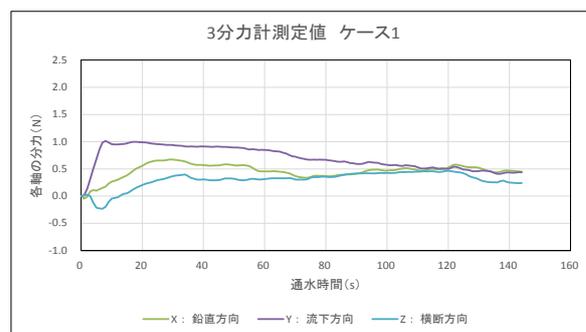


図-2 流体力の時系列変化

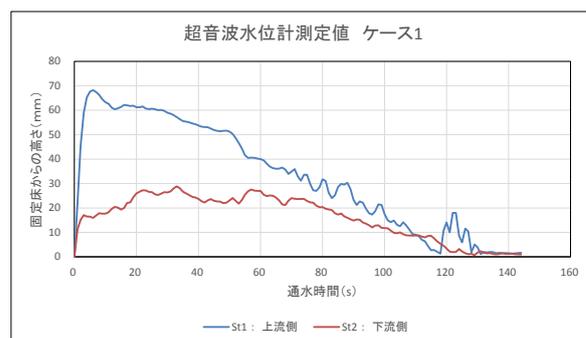


図-3 水位の時系列変化

通水中常に正であり, 橋梁に対し下向きの力が作用していたことが分かる。これは土石が橋梁で閉塞し土石流が橋梁を越流したためと考えられる。y 方向の流体力は通水中常に正であり, 流下方向に流体力が作用していたことが分かる。

図-3 に水位計の計測結果を示す。橋台背面が破堤した通水 10 秒後に上流側の水位計はピーク値をとり, 以降は土石がフラッシュされるとともに水位は急激に下降した。

(2) ケース 2

土石流の挙動に関して, 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。ケース 2 はケース 1 に対して溪流河床材料の長さ (DL) が短く, 土砂供給の量が少ないケースである。通水開始後, 土石流は土石が橋梁に衝突するとすぐに桁下空間において閉塞する。このことによって橋梁を迂回するように蛇行が生じ, 橋台背面から上流側にかけて侵食される。通水 24 秒後, 破堤が生じるよりも先に, 裏法面から河川

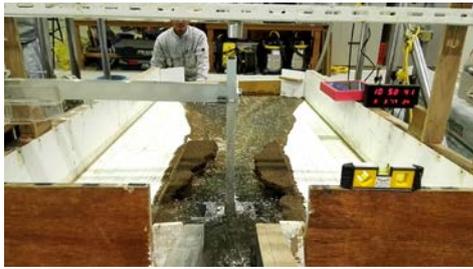


写真-5 土石流流下状況（ケース 2，通水 42 秒後）



写真-6 土石流流下状況（ケース 3，通水 8 秒後）

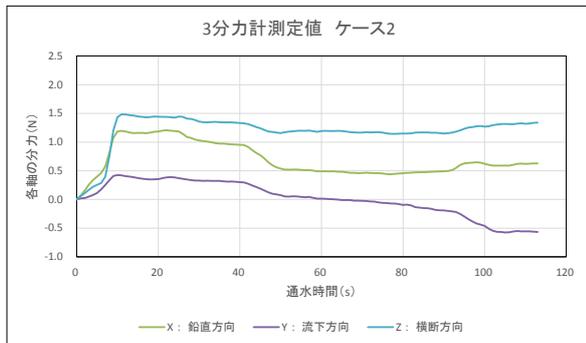


図-4 流体力の時系列変化

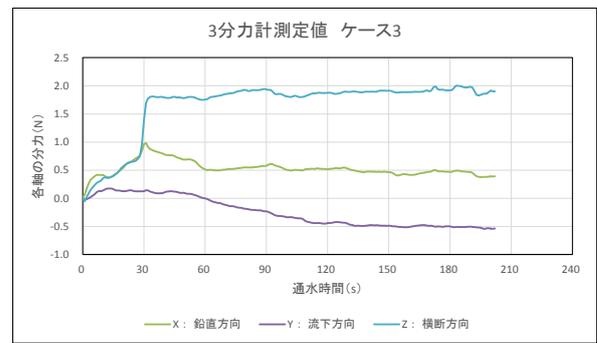


図-6 流体力の時系列変化

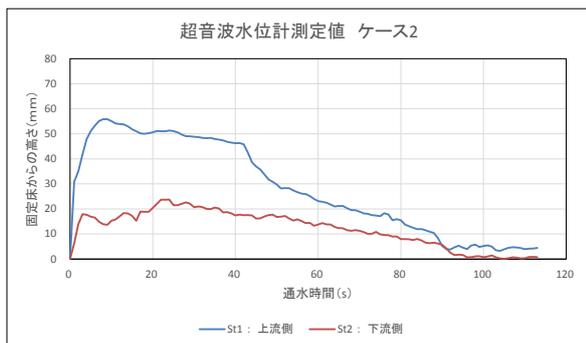


図-5 水位の時系列変化

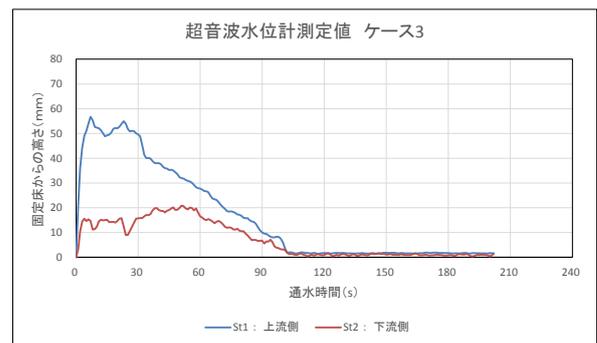


図-7 水位の時系列変化

水が浸透した。通水 42 秒後、蛇行によって橋梁模型左岸側の堤防が越流するとともに決壊した（写真-5）。この時生じた氾濫流は橋梁に閉塞していた土石を連行し、結果として閉塞を解消させた。すると、流下能力が改善され水位が下がるとともに、以降は河道に沿った流れとなり堤防の侵食が停滞した。

図-4 に 3 分力計の計測結果を示す。x 方向の流体力は通水中常に正であり、橋梁に対し下向きの力が作用していたことが分かる。これは土石が橋梁で閉塞し土石流が橋梁を越流したためと考えられる。y 方向の流体力は通水開始からおよそ 60 秒までは正であり、以降は負に転じた。これは通水からは土石流の流下方向に流体力が作用していたが、およそ 60 秒で橋梁周辺の土石がフラッシュされ反力が生じたためと考えられる。

図-5 に水位計の計測結果を示す。上流側の水位計は通水からおよそ 10 秒後にピーク値をとると、土石の連行に伴ってなだらかに水位は減少した。破堤が生じた通水 42 秒後には土石のフラッシュにより、水位は大きく減少した。

(3) ケース 3

土石流の挙動に関して、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。ケース 3 はケース 1 に対して橋梁位置 (H) が長く、谷出口（勾配変化点）から橋梁模型までの距離が長いケースである。通水開始後、土石流は土石が橋梁に衝突するとすぐに桁下空間において閉塞する。このことによって橋梁を迂回するように蛇行が生じ、橋台背面が侵食され、左岸では越流する。通水 8 秒後には橋台背面より上流側で左岸が決壊した（写真-6）。通水 20 秒後、裏法面での河川水の浸透をきっかけに裏法面が崩壊することによって右岸側が決壊した。

図-6 に 3 分力計の計測結果を示す。x 方向の流体力は通水中常に正であり、橋梁に対し下向きの力が作用していたことが分かる。これは土石が橋梁で閉塞し土石流が橋梁を越流したためと考えられる。y 方向の流体力は通水開始からおよそ 60 秒までは正であり、以降は負に転じた。これは通水からは土石流の流下方向に流体力が作用していたが、およそ 60 秒で橋梁周辺の土石がフラッ

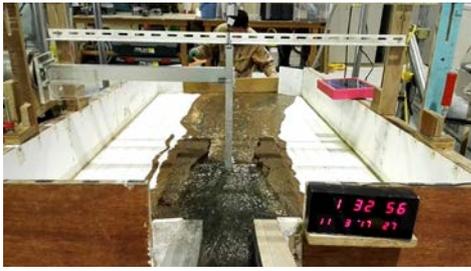


写真-7 土石流流下状況 (ケース4, 通水23秒後)

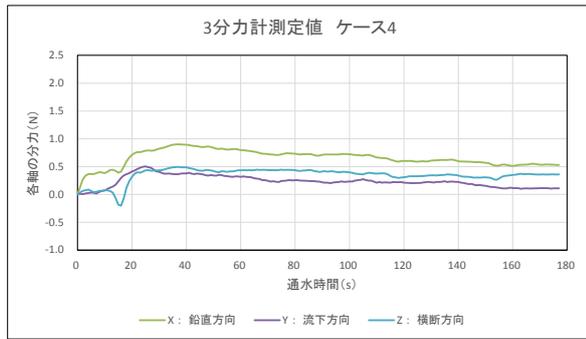


図-8 流体力の時系列変化

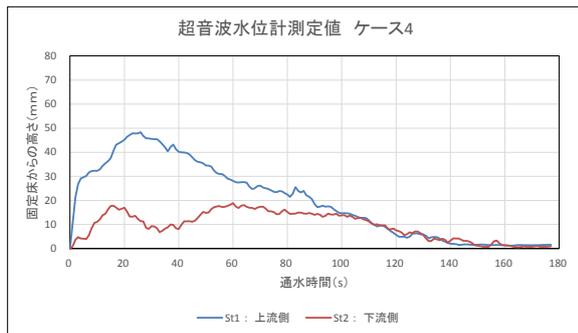


図-9 水位の時系列変化

シュされ反力が生じたためと考えられる。

図-7 に水位計の計測結果を示す。上流側の水位計は通水8秒後の破堤が生じたタイミングでピーク値をとるが、橋梁に閉塞した土砂がフラッシュされなかったため、ピーク値をとり続けた。通水20秒後の右岸の決壊に伴って橋梁に閉塞していた土砂がフラッシュされ始め、以降は水位が減少した。

(4) ケース4

土石流の挙動に関して、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。ケース4はケース1、ケース3に対して橋梁位置(H)が長く、谷出口(勾配変化点)から橋梁模型までの距離が長いケースである。通水開始後、土石流は橋梁で閉塞する前に土石自体が橋梁模型上流側の河道内で堆積した。このとき堆積した土砂を避けるように蛇行が発生し、堆積した地点の側岸が侵食されるとともに、裏法面から河川水が浸透した。通水23秒後、裏法面が崩壊することによって左岸側が決壊した(写真-7)。

図-8に3分力計の計測結果を示す。x方向の流体力は通水中常に正であり、橋梁に対し下向きの力が作用していたことが分かる。これは土石が橋梁で閉塞し土石流が橋梁を越流したためと考えられる。y方向の流体力は通水中常に正であり、流下方向に流体力が作用していたことが分かる。y方向の流体力は全4ケースの中で最も小さい。これは、蛇行に伴い横断方向の流れが生じ橋梁模型に作用するy方向の流体力が低減されたためと考えられる。

図-9に水位計の計測結果を示す。左岸が破堤した通水23秒後に上流側の水位計はピーク値をとり、以降は土石がフラッシュされるとともに水位は急激に下降した。

4. 結論

- ・ 橋梁や桁下空間での閉塞は蛇行を生じさせる原因である。したがって橋台の背面は蛇行の水衝部となり破堤しやすい。
- ・ 橋梁位置(H)の異なるケース1, 3, 4を比較したとき、橋梁位置(H)の小さなケース1, 3では橋梁や桁下空間に土石が閉塞することで蛇行が生じ破堤へと至った。一方、橋梁位置(H)の大きなケース4においては、土石流が橋梁に達するよりも早く橋梁より上流側の河道内において土石流に含まれる土石自身が堆積し、蛇行が生じ、破堤に至った。
- ・ 破堤によって新たな流路が形成されることで、一度閉塞した土石がフラッシュされ、閉塞が解消される。
- ・ 溪流河床材料の長さ(DL)の異なるケース1, 2を比較したとき、土石流の流下が橋梁に対して作用する力学的性質を明瞭に得ることが出来なかった。これは橋梁模型を設置する際に設けたクリアランスに土石が詰まることで生じたと考えられ、今後の課題である。

参考文献

- 1) 阿部ら：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.
- 2) 阿部ら：2014年9月支笏豪雨災害により発生した恵庭岳土石流の再現計算，第8回土砂災害に関するシンポジウム，pp.199-201.2016.
- 3) 高橋保ら：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.
- 4) 中谷ら：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.
- 5) 山本ら：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.