

橋台背面盛土の洪水時における侵食対策に関する
実物大模型実験と試験施工による動態観測

北見工業大学 地球環境工学科	中 村 大
北見工業大学 地球環境工学科	川 口 貴 之
北見工業大学 地球環境工学科	川 尻 峻 三
北見工業大学 地域未来デザイン工学科	早 川 博
北見工業大学 地域未来デザイン工学科	宮 森 保 紀

橋台背面盛土の洪水時における侵食対策に関する 実物大模型実験と試験施工による動態観測

EXPERIMENTAL STUDY FOR COUNTERMEASURE AGAINST EROSION FOR BACK-FILL OF ABUTMENT DUE TO FLOODING BY OPEN CHANNEL

中村 大¹・川口 貴之¹・川尻 峻三¹・早川 博²・宮森 保紀¹
Dai NAKAMURA, Takayuki KAWAGUCHI, Shunzo KAWAJIRI, Hiroshi HAYAKAWA
and Yasunori MIYAMORI

¹ 北見工業大学 准教授

² 北見工業大学 教授

要 旨

2016年8月中旬に観測史上初めて1週間に3つの台風が北海道に上陸し、8月下旬には前線と台風の接近によって、北海道の東部の広範囲で記録的な降雨災害である2016年北海道豪雨災害が発生した。この豪雨災害において特徴的な被災として同時多発的に発生した橋りょう被害がある。過去の降雨災害においても橋台背面盛土の侵食・流失は発生しており、出水時の河道変動や流向変化などの河川工学的な検討は行われる。その一方で、橋台背面盛土の侵食や流失メカニズムに着目した検討事例は見当たらない。そこで本研究では、より現実に近い縮尺での現象解明を目的として屋外開水路を構築し、これを用いた縮尺比1/5の模型盛土を用いた橋台背面盛土の崩壊メカニズムの解明と、このメカニズムを反映した効果的な対策工の検討に関する実験的検討を行った。一連の実験結果から、対策工として、壁面工に通水性能を有するギャビオン補強土壁を用いた場合には、補強土壁部が沈下したものの背面盛土の流出はほとんど発生しておらず、対策工無しの場合と比較して舗装面への被害を低減していることから、対策工としての有用性を確認できた。

《キーワード：橋台背面盛土；侵食・流出；洪水；屋外開水路；模型実験》

1. はじめに

2016年8月中旬に観測史上初めて1週間に3つの台風が北海道に上陸し、8月下旬には前線と台風の接近によって、北海道の東部の広範囲で記録的な降雨災害である2016年北海道豪雨災害が発生した^{1), 2)}。この豪雨災害において特徴的な被災として同時多発的に発生した橋りょう被害がある。鎌田ら³⁾の調査によると、上記の豪雨災害によって北海道内で被災した橋りょうは114橋のうち、橋台背面盛土の流出や橋台支持地盤の洗掘による橋台の変状は50橋であり、被災橋りょうの半分程度を占めている。このような橋台背面盛土が流失した被災事例では、背面盛土の流失に伴う道路陥没に気づかずに橋台内へ車ごと落下し、増水した河川に流されて死者2名と行方不明者1名の人的被害が発生した。これらは一連の豪雨災害での死者・行方不明者の半数にあたる。人的被害に加えて橋りょうに水道管を併設している場合には、橋台背面盛土の流失とともに水道管が流失し、断水の原因となった。また、図1に示すような北海道清水町での被災事例では、増水して蛇行した河川の流れによって、橋台背面盛土の一部が侵食した一方で、盛土が完全に流出した箇所も確認された。

過去の降雨災害においても橋台背面盛土の侵食・流失は発生しており、出水時の河道変動や流向変化などの河川工学的な検討は行われる^{4), 5), 6)}。一方で、橋台背面盛土の侵食や流失メカニズムに着目した検討事例は、筆者らの文献調査の範囲では見当たらない。このため、過去の被災事例や盛土の侵食や流失メカニズムを反映した具体的な対策工は示されていないのが現状である。今後の気候変動による外力規模の増大を考えると、超過洪水に対してはある程度の変状は許容するものの、被災時には交通地盤構造物としての最低限の性能は発揮できるような橋台背面盛土形式や対策工の研究開発が必要となる。

そこで本研究では、より現実に近い縮尺での現象解明を目的として屋外開水路を構築し、これを用いた縮尺比1/5の模型盛土を用いた橋台背面盛土の崩壊メカニズムの解明と、このメカニズムを反映した効果的な対策工の検討に関する実験的検討を行った。



図1 北海道清水町での被災事例

2. 実験に用いた屋外開水路および模型盛土の配置と計測内容

本実験では、河川左岸側に設置されている橋台および背面盛土を縮尺模型によって再現しており、盛土のり面と橋台側面に正面流が作用した場合を想定して模型盛土を開水路に設置した。なお、本研究における模型実験では、堤外に設置された生活道路における小規模橋梁や、橋台周辺での破堤による流向の変化によって橋台背面盛土へ正面流が作用する状態を想定している。

図2は本実験で利用した開水路の概要を示している。また、図3は実験前の開水路（図3a）および模型盛土（図3b）の状況を示している。開水路は長さ70m、幅1.3m、高さ0.3mの幅広直線水路である。この開水路の中央部は洗堀および河川蛇行を促進させるために、図4に示す粒度分布を持つ砂質土を河床面から深度0.8mまで敷設したものを河床とした。なお、開水路の水路勾配は1/100とした。

模型盛土については、模型盛土高さ300mm、のり面勾配1:1.5とした。模型盛土の締固め度は $D_c = 88\%$ であった。また道路舗装を模擬する為に天端に厚さ2cmを目標としセメントを塗布した。実験中の模型盛土に対する主な観測内容は、橋台背面盛土の侵食過程の動画撮影、間隙水圧計による模型盛土内の間隙水圧、盛土天端の変位をレベル測量によって実施した。また、水理量の計測項目としては、1次元の電磁流速計を用いた橋台周辺の局所流速計測と実験後の河床形状を3Dプロファイラで計測した。

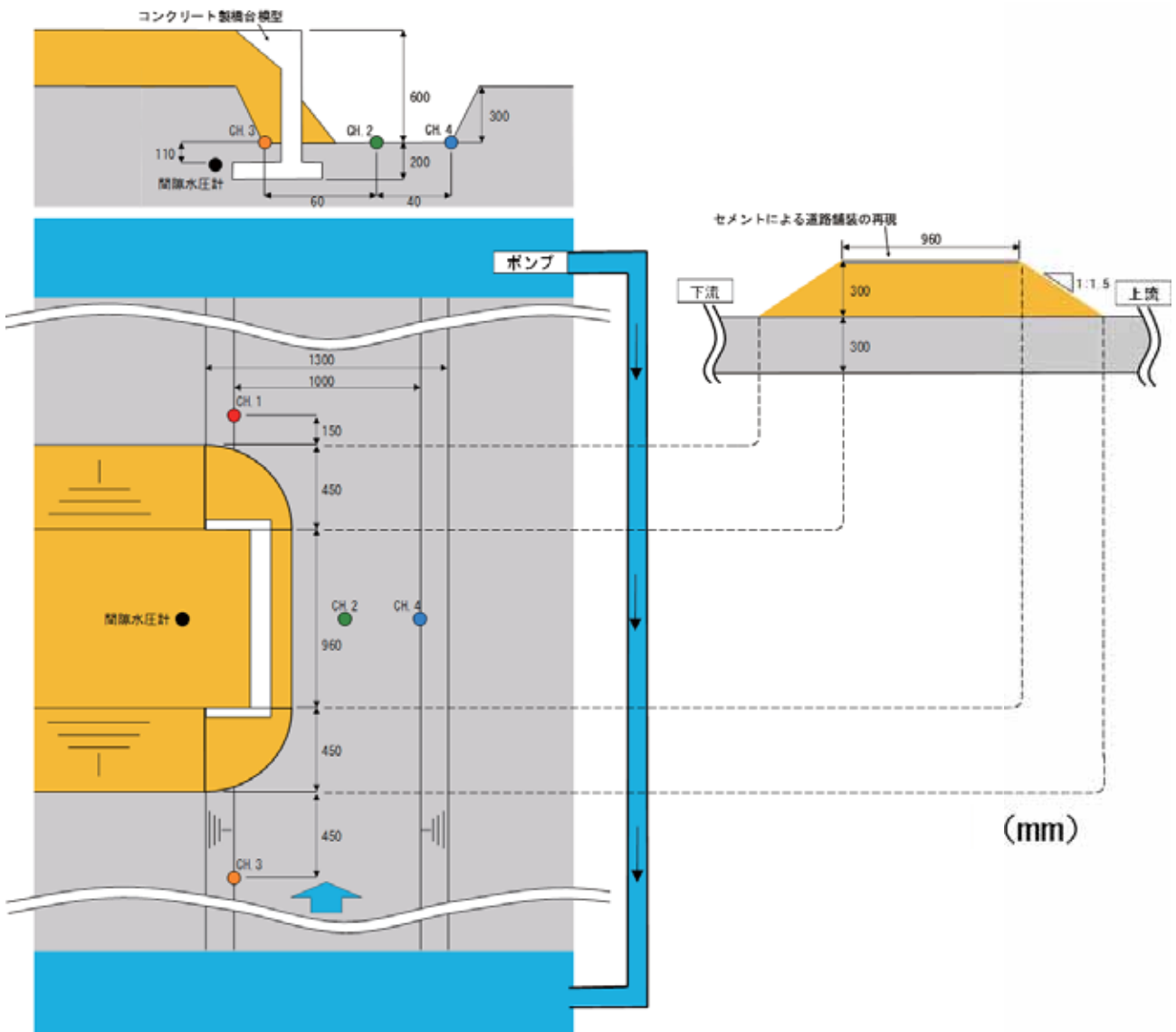
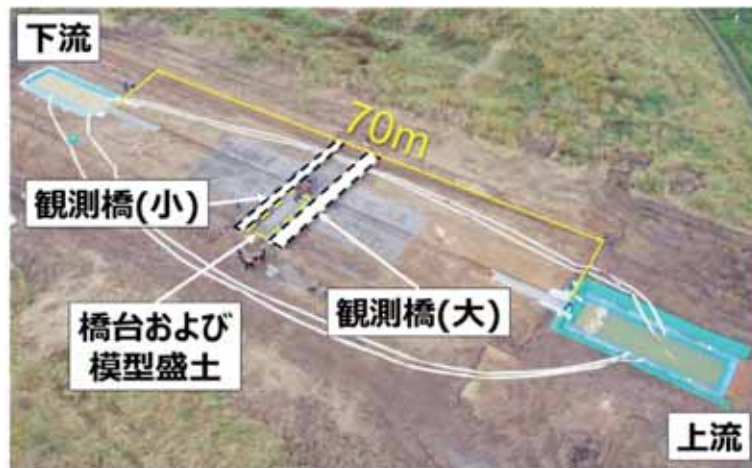
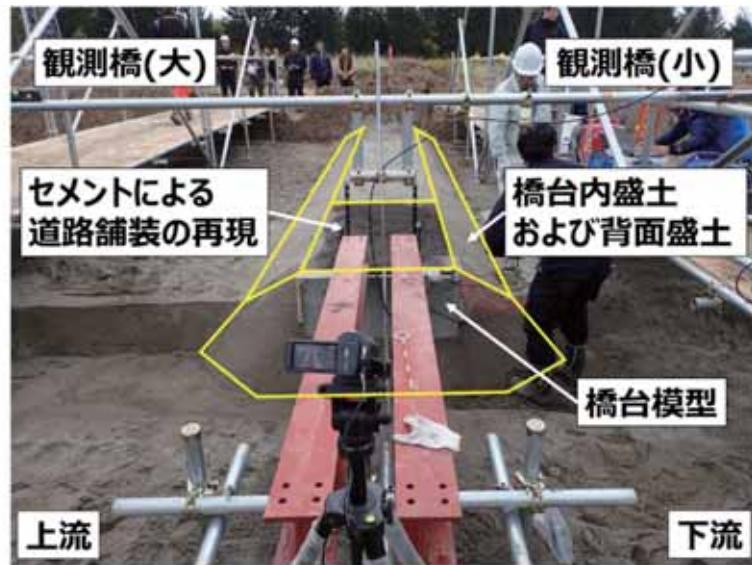


図2 模型橋台背面盛土および開水路の寸法



a) 屋外開水路の全景



b) 右岸側から撮影した模型盛土の様子

図3 実験開始前の開水路の状況

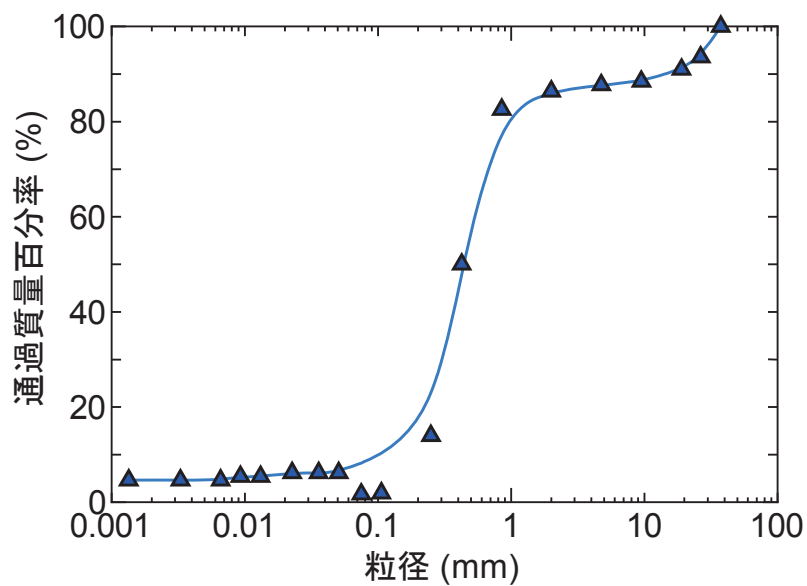


図4 橋台周辺の河床に用いた砂質土の粒度分布

図5は本実験で用いた模型橋台を示している。模型橋台は鉄筋コンクリート製であり、橋台形式は逆T型とした。また、翼壁部は図中の黄色枠内に木製の板で作製したものを取り付けた。

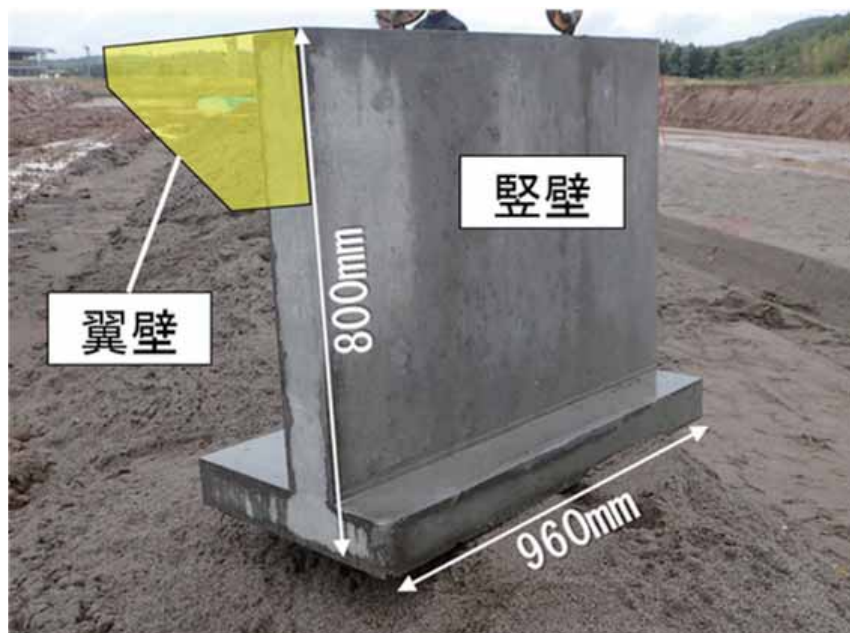


図5 実験に用いた模型橋台

以上に示した屋外開水路および模型盛土を用いて、条件が異なる2つの実験を行った。具体的な実験ケースは対策工の有無によって分け、一回目の実験では、橋台背面盛土の崩壊挙動を確認するため、対策工無しで実験を行った。二回目の実験では、過去の申請者らが屋内開水路実験において橋台背面盛土の流出抑制などの効果を確認することのできたギャビオン補強土壁⁷⁾の縮尺比1/5模型を作製して実験を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 対策工無しの模型盛土の状況

図6は実験中に上流側から撮影した模型盛土の経時変化を示している。河川水が上流側の模型盛土のり面へ到達直後から盛土のり面と橋台豎壁前面部のり面が侵食されて流失した。また、盛土の流失後には、洗掘による河床低下が進行した。盛土のり面の流失後は、模型盛土と模型橋台の境界部分から橋台内部へと侵食が進行した。時間経過に連れて翼壁下部の盛土と側壁境界部の盛土が流出し、その後、境界部付近の侵食は橋台内部へと拡大した。最終的には橋台背面盛土内に上流から下流に向かうトンネル状の空洞が発生し、その後、支持力を失った舗装面が完全に崩壊した。

図7は屋外開水路実験での、間隙水圧計の計測結果を圧力水頭 h_w に換算したものと水位計の計測結果の経時変化である。なお、経過時間 t は水路に水が流れ始めた時刻を基準($t=0$ 分)としている。また、 h_w は河床上面を基準($h_w=0$ cm)としている。また、水位計のグラフから分かるように、 $t=18$ 分頃には水位が上昇しており、図には示されていないが背面盛土が大きく侵食・流出している。しかしながら、 h_w の値は上昇しておらず、盛土崩壊の支配的な要因になっているとは言えない。このことから実験中に確認した崩壊挙動や崩壊メカニズムについては、いわゆる地盤工学的な間隙水圧・空気圧の変化による有効応力の増減は支配的な要因ではなく、河川工学的な流体力に対する侵食抵抗が支配的であると推察される。なお、対策工無しの本実験では河道の流量増加に伴い河道が拡幅し、想定していた低水路を満水では無かったものの、橋台背面盛土の侵食は進行した。



図6 対策工無しの場合の模型盛土の侵食状況

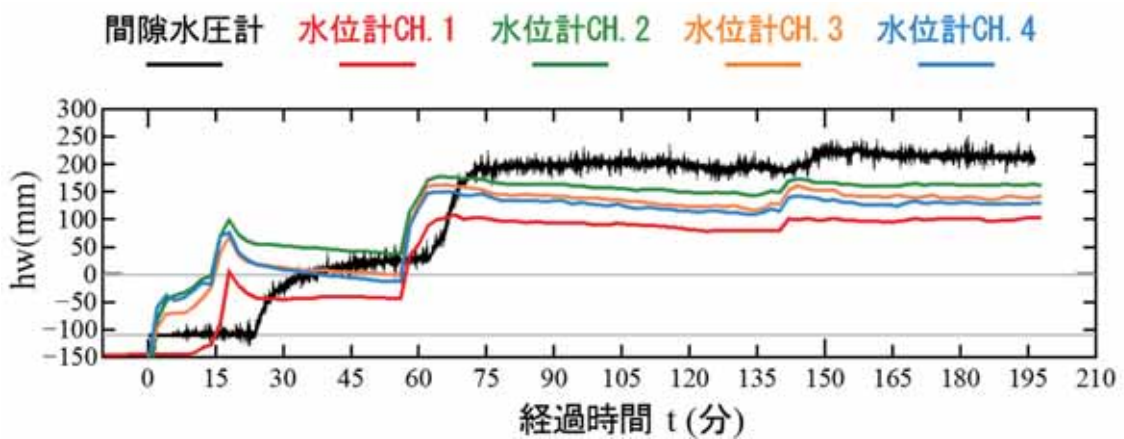


図7 圧力水頭の経時変化

(2) 対策工有りの模型盛土の状況

本研究では、具体的な対策工の提案の基本的な検討として、**図8**に示すようなふとんかごを壁面材としたギャビオン補強土壁^{8),9)}による対策効果を検証する。**図9**はギャビオン補強土壁による橋台背面盛土の侵食対策のコンセプトを示している。礫材を中詰め材としたふとんかごを壁面材としているため、河川水がふとんかご内へ流入するものの、この際に流速が低減されることで盛土を侵食させる流体力の低減が期待できる。また、根入れ部についてもギャビオン補強土壁を用いることで河床内部の流水を円滑に下流へ排出できるため、通常用いられるコンクリート護岸工などで発生する護岸工前面や基礎部の洗掘とそれに伴う不安定化を軽減できると予想される。外力規模が大きく、仮にギャビオン補強土壁の基礎部が洗掘された場合には、補強土壁としての機能を発揮できるため地盤構造物として直ちに不安定化することではなく、盛土天端部について交通地盤構造物としての性能を確保できると考える。なお、本研究で検証するギャビオン補強土壁については、積雪寒冷環境における耐凍上性能や、融雪期および記録的降雨時における安定性について、**図8**に示した試験施工例で別途確認済みであり^{8),9)}、侵食対策のみならず記録的な降雨に対する既設盛土の対策工としても有用である。また、**図10**および**図11**は実験に使用したギャビオン補強土壁模型の状況である。ギャビオン補強土壁模型は縮尺比1/5とし、ギャビオンの中詰め材となる地盤材料についても過去の研究で利用した地盤材料の平均粒径の概ね1/5となるものを使用した。また、ギャビオン補強土壁模型と橋台背面盛土の境界部には、橋台背面盛土の吸出し防止材として不織布を敷設した。また、**図11**に示すように対策工の実施範囲は対策無しの実験ケースと屋内開水路実験結果を参考に、上流側の橋台と盛土の境界部付近ののり面と、橋台前面付近とした。実験では隅角部に**図**に示したような三角柱状のギャビオンを設置し、河床の下には一段分が根入れしてある。また、隣り合うギャビオンを針金で柔に連結した。



図8 ギャビオン補強土壁の試験施工例^{5),6)}

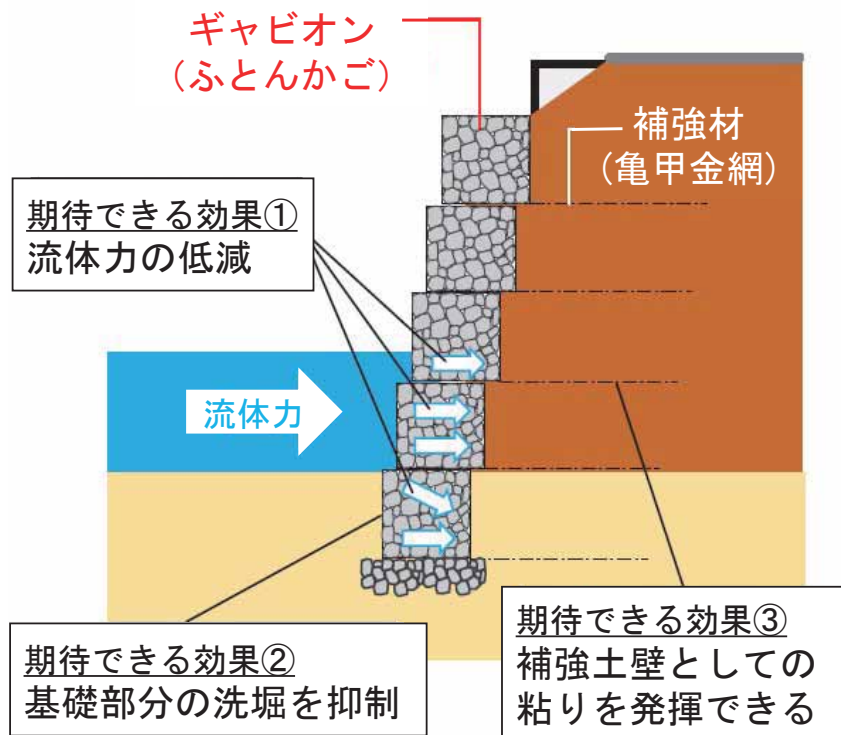


図9 ギャビオン補強土壁による対策効果のコンセプト



図10 実験に使用したギャビオン補強土壁の模型



図11 対策工無しと比較した対策工設置の状況

先述した対策工無しの実験では河道の流量増加に伴い河道が拡幅し、想定していた水位は低い状態であった。そこで対策工有りの実験を行うにあたり、開水路施設の一部を改築した。図12は低水路のり面に護岸ブロックを敷設した様子を示している。対策工無しの実験において、時間の経過とともに低水路のり面が侵食し低水路幅が拡大したことにより、河川水位を一定に保つことが困難となったため、護岸を敷設することにより、護岸工を敷設することで河道拡幅を抑制し、河道内水位を安定させることを目的とした。護岸ブロックは上流・下流端部分を二段組とし中腹部は一段組とした。低水路河岸と護岸ブロックの間には不織布の吸出し防止材を設置した。橋台周辺に関しては、盛土の侵食を阻害しないように護岸の敷設は行わないこととした。さらに図13は下流側の貯水池を拡大した様子を示している。対策工無しの実験では、低水路幅の拡大とともに排水ポンプからの河川水の流出などにより、流量が足りず安定して河川水を循環させることができなかつたため、貯水池の容量を約2倍程度拡大した。

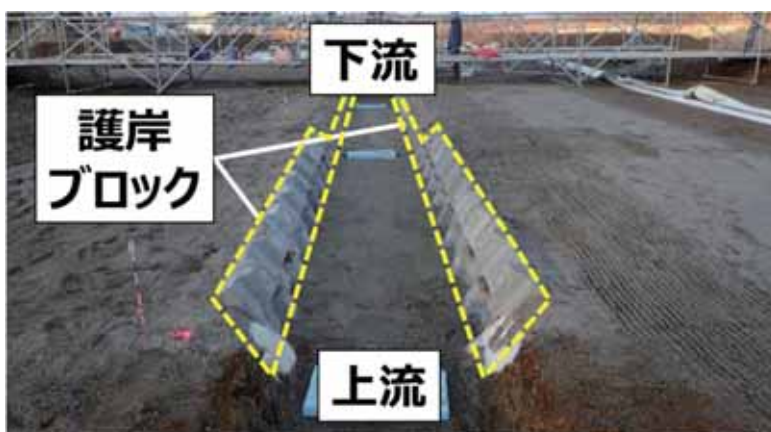


図12 護岸ブロックを敷設した低水路のり面

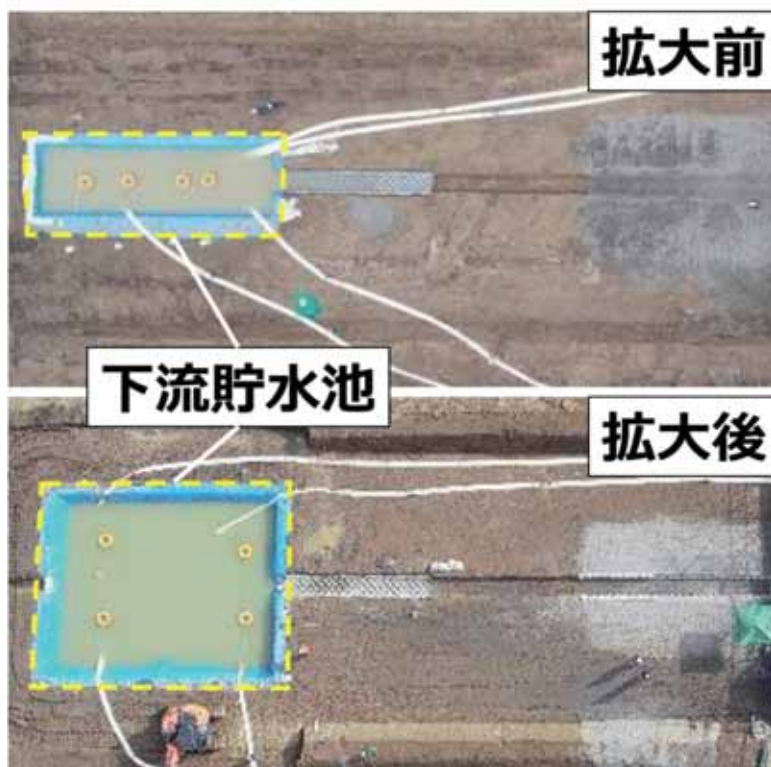


図13 拡大した下流側貯水池

図14は屋外開水路実験での上流側から撮影した模型盛土の経時変化を示している。時間の経過とともに隅角部のギャビオンが沈下しているものの大規模な崩壊は発生しておらず、対策工無しの場合と比較すると橋台背面盛土の流出を抑制していることが分かる。橋台背面盛土の流出を抑制されていることから、舗装面の陥没も発生せず交通地盤構造物としての性能を洪水中でも維持していることがわかる。また、河床が洗掘されてその付近のギャビオンに変位が生じた際にも、ギャビオン同士を連結したことで大規模な崩壊に至らず対策工としての粘り強さが発揮していると言える。また、吸い出し防止の設置によって背面盛土の流出を抑制し、背面盛土の流失が抑制されたことで補強材の効果が低下しなかったこともギャビオン補強土壁の安定性向上につながったと考えられる。図15は対策工有りにおける間隙水圧計の計測結果を圧力水頭 h_w に換算したものと水位計の計測結果の経時変化である。対策工無しの場合と比較して、水位計の値が全体的に増加しているものの、盛土内の間隙水圧計の値は減少している。これは、河川水がギャビオン補強土壁に到達した際に流向が変化し、橋台背面盛土部分に浸透する河川水



図14 対策工有りの模型盛土の侵食状況

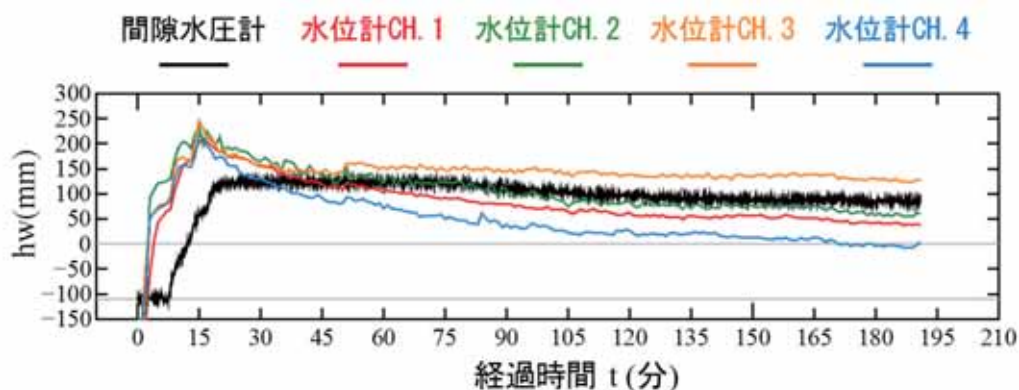


図15 対策工有りの圧力水頭の経時変化

が減少したためであると考えられる。また、先述した通り、橋台背面盛土の崩壊挙動や崩壊メカニズムについては、地盤工学的な間隙水圧・空気圧の変化による有効応力の増減は支配的な要因ではないと考えられるが、間隙水圧が減少することにより、対策工無しの場合と比較して、盛土がより安定することが考えられる。

(3) 橋台盛土周辺の河道形状の変化

通水前の橋台周辺の状況を図16に示す。橋台が河道に突き出す形で敷設され橋台周辺の盛土を守る形でギャビオンが敷設されている。また、ギャビオンが敷設されている位置から上流は河岸浸食が生じるように河床と同じ材料で成形されている。一方、橋台を敷設した対岸である右岸及び橋台から下流の左岸は、浸食されないようコンクリート製のブロックが敷設されている。

ドローンに3Dスキャナを搭載し、通水開始前と通水終了後の河道形状を把握した。通水前の測定結果を図17に、通水終了後の測定結果を図18にそれぞれ示す。なお、測定は水路全体について行っているが、橋台周辺の浸食状況をより明瞭とするため、図には橋台周辺のみを示している。

通水により、橋台直上流の河岸が浸食を受けるとともにギャビオンが河道中心方向からやや上流方向に傾斜している。また、橋台直下流の河岸も直上流に比較して程度は小さいものの浸食を受けている。橋台直上流部の河岸浸食は、橋台周辺部が水制のような形で河岸から突き出す形となっていることから生じたものと考えられる。また、ギャビオンが河道中央やや上流側に傾斜した原因は、ギャビオン前面の河床が局所洗堀を受けたことによるものと考えられる。



図16 通水前の橋台周辺の状況

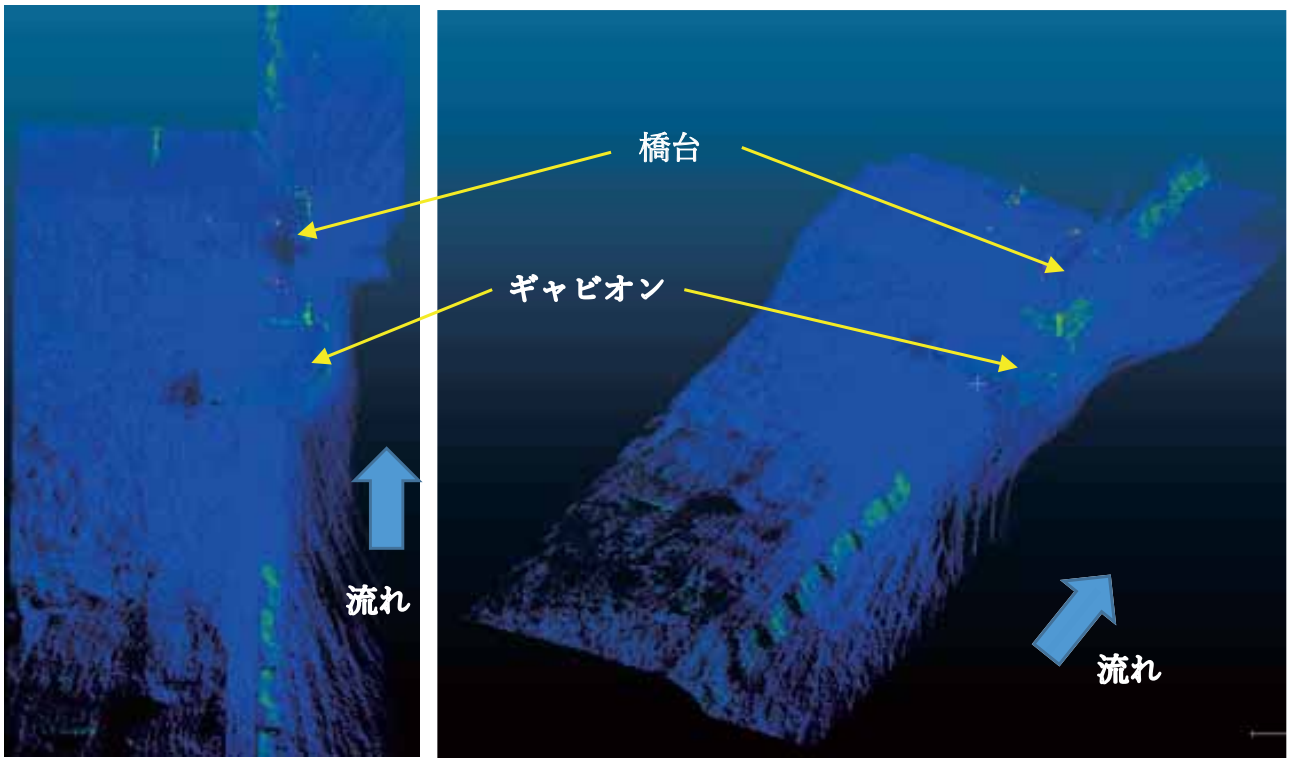


図17 通水前の橋台主変の河道形状（左；橋台周辺，右：橋台周辺広域）

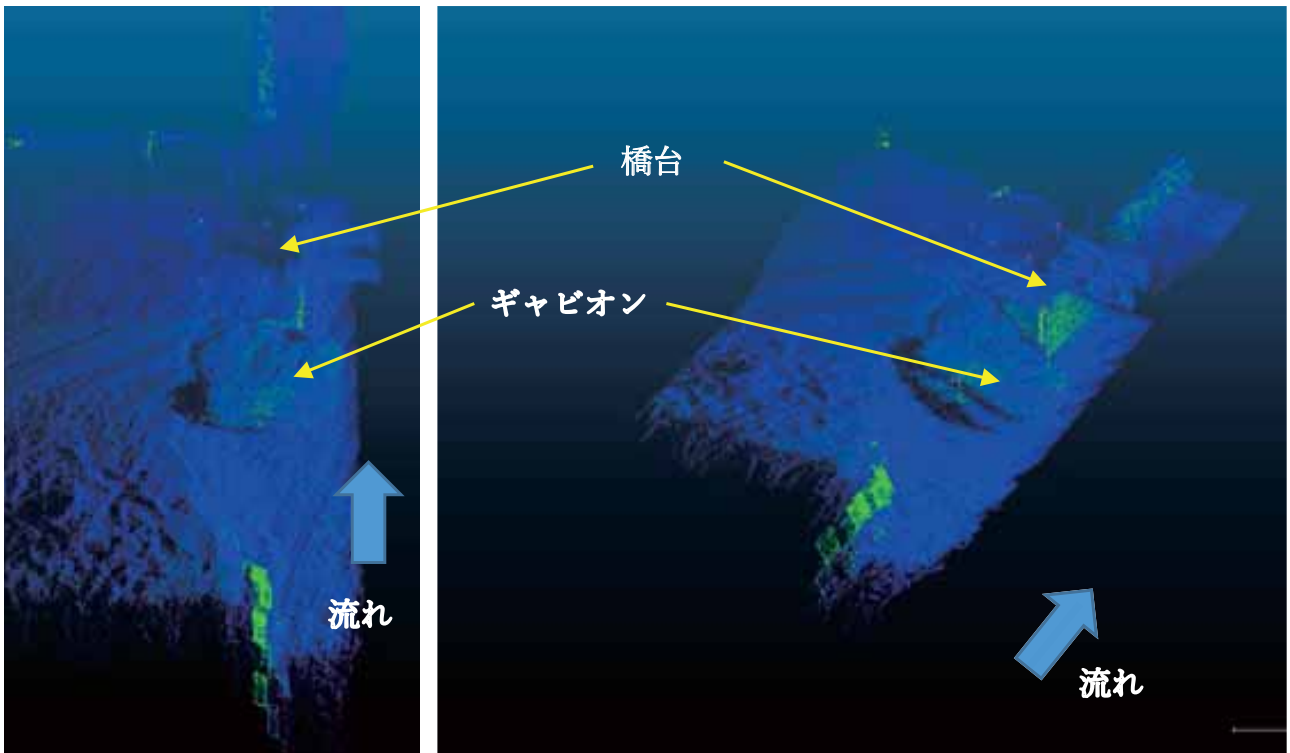


図18 通水後の橋台主変の河道形状（左；橋台周辺，右：橋台周辺広域）

(4) 実験中の橋台周辺の流況

流れの状況を把握するため、図16に示した①～⑭の位置（測点）で主流方向（下流向きを正）と横断方向（右岸方向を正）の流速を電磁流速計により測定した。なお、基準点を決め、その基準点水面から基本的に5cm毎に水深方向に流速分布が把握できるように計測を行っている。計測は、河岸浸食がおおむね落ち着いた時点で各測点において40秒間計測を行い、その平均値を流速として記録した。なお、計測可能時間の関係で計測を省略している測点も多数存在している。また、測点⑨および⑩の地点は、ギャビオンが流路中央方向に傾斜したため、流速の測定が不可能となった。構造物周辺の流れのため時間的に非常に乱れており、計測時間40秒では正確な測定ができなかったが、流況の概要を把握する目的で結果を図19に示す。主流方向の流速は、各点でおおむね1m/s程度であるが、ギャビオン前面の測点①では0.1m/s以下となっている。横断方向流速に関しては、橋台位置よりも上流側では、右岸方向に生じている。また、底面方向の流速が大きい傾向が示されており、ギャビオンによる右岸側への流れの偏向に伴う2次流の発生が生じているものと考えられる。一方、橋台位置における各測点の横断方向流速は右岸側に向いている。これは、ギャビオン上流で右岸に向けた流れが右岸にぶつかって左岸方向に向きを変えたものと考えられる。

流況から河道変化の要因を考察すると、ギャビオン上流における左岸の河岸浸食とギャビオン部の河床洗堀は、ギャビオンにより流れが右岸方向に偏向されて生じた2次流によるものであり、橋台直下流部の左岸の河岸浸食は、ギャビオンの位置の右岸にぶつかった流れが左岸方向に偏向し左岸が水衝部となったためであると想定される。このため、今回の実験で確認された橋台位置直下流部の左岸の河岸浸食は、川幅が狭いために生じたものであり、川幅によって大きく変化するものと考えられる。

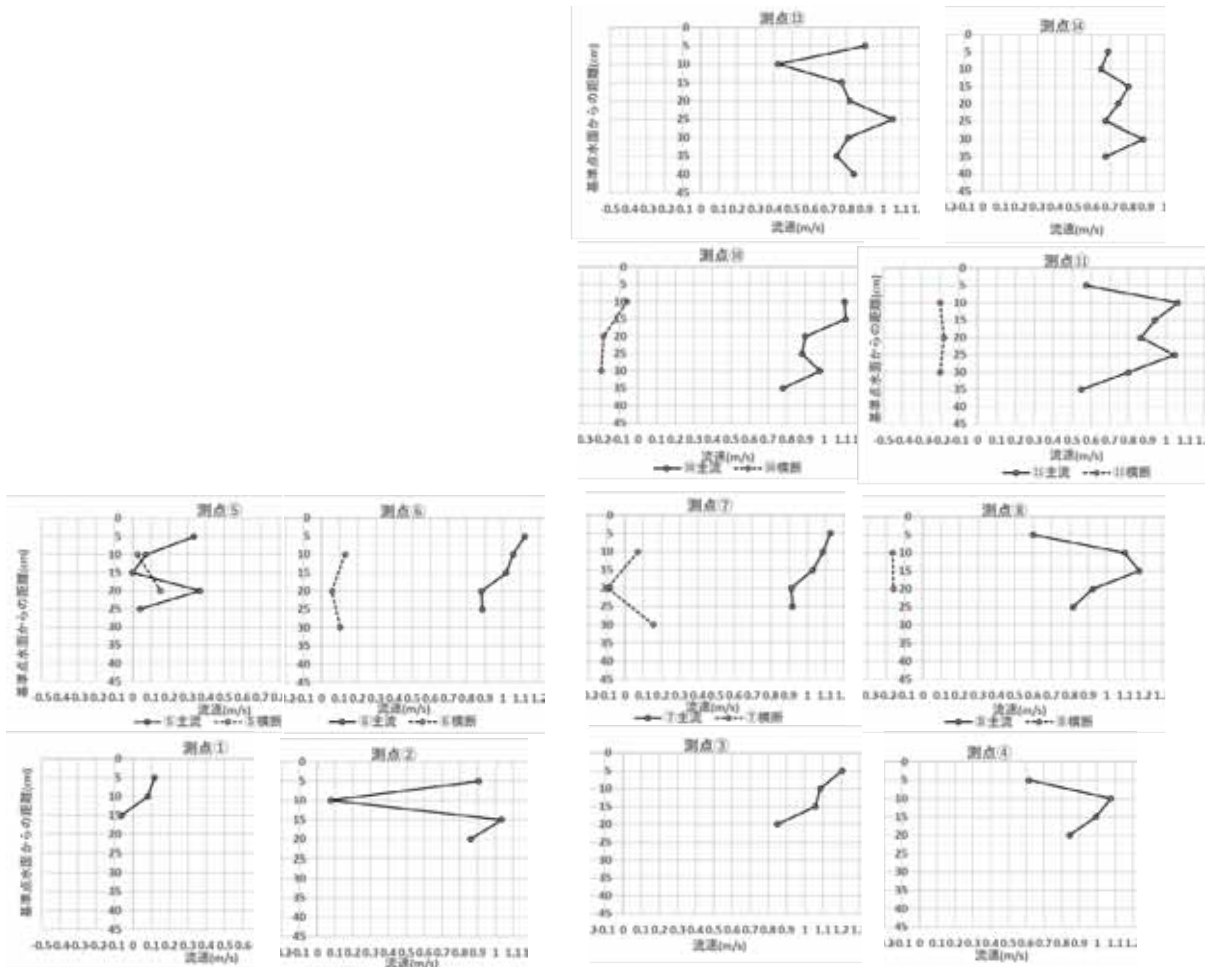


図19 橋台周辺での流速測定結果

7. まとめ

本研究では2016年8月北海道豪雨災害において多数発生した橋台背面盛土の流失による被災事例を受け、昨年度まで行っていた縮尺比1/30模型を用いた屋内開水路実験に加え、新たに縮尺比1/5模型を用いた屋外開水路を構築し、橋台背面盛土の崩壊メカニズムの解明、そして崩壊メカニズムを反映した効果的な対策工の検討を目的として実験を行った。屋外開水路実験での間隙水圧計や盛土の侵食過程の観測によって得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 盛土の侵食は橋台と盛土の境界部である構造物境界部で進行し、橋台内盛土へと進行した。最終的には橋台内盛土に上流から下流方向へ向かうトンネル状の空洞が発生し、支持力を失った舗装面が完全に崩落した。
- ・ 盛土のり面および橋台内盛土の侵食・流出や盛土の崩壊時における圧力水頭（間隙水圧）の有意な増減は確認できず、今回の実験の範囲では有効応力の増減は盛土の侵食・流出に与える影響は小さい可能性がある。
- ・ 対策工として、壁面工に通水性能を有するギャビオン補強土壁を用いた場合には、補強土壁部が沈下したものの背面盛土の流出はほとんど発生しておらず、対策工無しの場合と比較して舗装面への被害を低減していることから、対策工としての有用性を確認できた。

なお、今年度に予定していた実河川への対策工の試験施工については、北見市内の一般河川での実施を河川管理者とも協議して実施段階であったものの、平成30年胆振東部地震の発生により、中止せざるを得ない状況となった。今後、実河川への対策工の試験施工について、大型屋外開水路実験での結果を十分に反映し、対策工の設計用値を取得できるよう観測網を充実化させて実施する考えである。

謝辞

本研究の実施にあたり、北海道開発局網走開発建設部北見河川事務所および美幌貨物自動車株式会社から多大な協力を得た。末筆ながら記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) (公社)土木学会2016年8月北海道豪雨災害調査団：2016年8月北海道豪雨災害調査団報告書，2017。
- 2) (公社)地盤工学会平成28年8月北海道豪雨による地盤災害調査団：平成28年8月北海道豪雨による地盤災害調査報告書，2017。
- 3) 鎌田啓市，宮森保紀，渡邊康玄，川口貴之，川尻峻三，三上修一：2016年北海道豪雨による橋梁の被災状況と被災メカニズムの基礎的検討，土木学会第72回年次学術講演会講演概要集，CS6-004，2017。
- 4) 上野鉄男，石垣泰輔：足羽川山地地域における2004年水害について，京都大学防災研究所年報，Vol.48B，pp.657-671，2005。
- 5) 井上卓也，サムナー圭希，加藤一夫，六浦和明，矢部浩規，清水康行：2016年北海道豪雨における九線橋被災メカニズムの調査と解析，河川技術論文集，Vol.23，2017。
- 6) 西村雄喬，武内慶了，諏訪義雄：大規模な河岸侵食に伴い生じる橋台被災の基本的機構把握に向けた実験的検討，河川技術論文集，Vol.24，pp.149-154，2018。
- 7) 川尻峻三，御厩敷公平，川口貴之，倉知禎直，原田道幸：河川増水による橋台背面盛土の侵食に対するジオシンセティックス材料による対策工の提案，ジオシンセティックス論文集，Vol.33，pp.159-166，2018。
- 8) 川俣さくら，川口貴之，中村大，倉知禎直，林啓二，川尻峻三，山下聡：透水性断熱材を用いたギ

ヤビオン補強土壁の積雪寒冷環境における性能評価，ジオシンセティックス論文集，Vol.31，pp.119-126，2016.

- 9) 川俣さくら，川口貴之，川尻峻三，中村大，倉知禎直，林啓二，山下聡：積雪寒冷環境におけるギヤビオン補強土壁の適用性に関する研究，ジオシンセティックス論文集，Vol.32，pp.109-116，2017.