

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

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BASIC MECHANISM OF
ABUTMENT DAMAGE CAUSED FROM LARGE-SCALE BANK EROSION

西村 雄喬¹・武内 慶了²・諏訪 義雄³

Yusuke NISHIMURA, Yoshinori TAKEUCHI, Yoshio SUWA

¹正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室（研究当時）（〒305-0804 つくば市旭1番地）

²正会員 工修 国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室（同上）

³正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室（同上）

We attempted to understand the basic knowledge to prevent settlement and inclination of abutments which occurred in many bridges during Hokkaido heavy rain in 2016. By experiments of movable bed models, some of the important findings were obtained as follows; (1) an abutment could not be self-sustaining because of bed scouring caused from large-scale bank erosion, (2) in the vicinity of the abutment, riverbed degradation proceeded along with the 3 phases change. These phases were (a) a riverbank reached to the abutment by erosion, (b) occurrence of flow that was similar to flow around a tip of a spur dike, and (c) occurrence of flow that was similar to flow around a pier.

Key Words : *abutment, settlement and inclination, large-scale bank erosion, riverbed degradation, experiments of movable bed model, disaster risk reduction system*

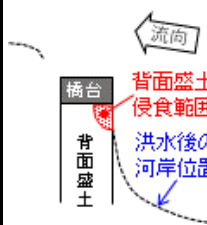
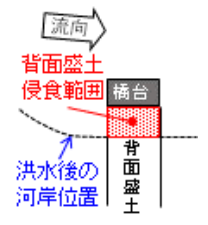
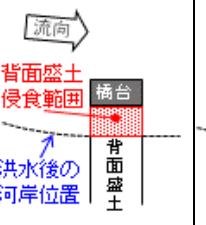
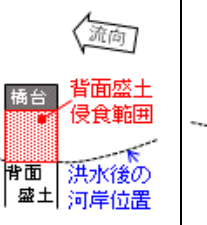
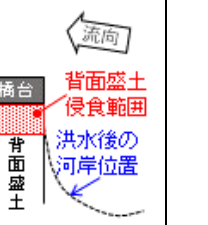
1. はじめに

平成28年8月の台風10号等や平成29年7月九州北部豪雨により、北海道、岩手県、福岡県の中山間地域を流れる河川の流下能力を大きく上回る洪水が発生し、河川を横断する多数の橋梁が被災したことは記憶に新しい。被災部位は多様であり、橋脚や橋台、橋桁（以下、橋梁本体と総称）に及んだ事例と、取付盛土や背後地盤等の橋梁本体以外（以下、付属物と総称）のみに留まった事例に大別された。著者らが実施した岩手県小本川水害調査によれば、付属物の損傷のみに留まった場合、応急復旧に要した期間が1週間～10日程度であったことが確認されている。一方、橋梁本体のうち例えば橋台が沈下・傾斜した場合、昼夜を問わず懸命の対応をもってしても、応急復旧により交通途絶が解消されるまでに1.5ヶ月もの期間を要した¹⁾。特に中山間地域においては、道路ネットワークの冗長性に乏しい実態にある。これらのことから、中山間地域の河川を横断する橋梁本体が被災し

た場合、交通ネットワーク自体の復旧までに長い期間を要すことにより、被災地域においては洪水による直接的な被害のみならず、地域の復旧対応の遅れも相俟って、地域社会の営みへの影響が中長期的に続くことも懸念される。このような状況が生じないように、橋梁本体及び付属物（以下、橋梁と総称）をより強固にしていくことが第一の手段として挙げられる。しかし、前述のように今般、各地で発生している洪水の特性や、長い年月をかけて国土に蓄積してきた橋梁の数、そして財政的な制約を踏まえると、必ずしもこの手段が合理的であるとは言えない。そこで、河川の流下能力を大きく上回る洪水が生じた場合、橋梁の被災が一定程度生じることをやむを得ないものとし、「橋梁の壊れ方を一定程度制御」することにより、被災後の施設復旧を短期間に完了させ、さらには地域社会の復旧対応のより迅速な開始を実現するための戦略も、有力な選択肢となると考えられる。

前述の戦略を社会実装するための技術を確認していくにはまず、洪水中の河道変化及びそれに応じて付属物や橋梁本体で生じる局所的な変化の過程を把握する必要が

表-1 橋台及び付属物の被災状況

	高原大橋	九線橋	千呂露橋	小林橋	清見橋
河川(水系)	石狩川(石狩川)	辺別川(石狩川)	沙流川(沙流川)	小林川(十勝川)	ベケレベツ川(十勝川)
橋台基礎形式	直接基礎	直接基礎	直接基礎	直接基礎	直接基礎
橋台変位状況	変位なし	上流側へ沈下・傾斜	下流側へ沈下・傾斜	上流側へ沈下・傾斜	変位なし
河岸侵食状況	上流側のみ侵食	上・下流側で侵食 橋台背面で流路形成	上・下流側で侵食 橋台背面で流路形成	上・下流側で侵食 橋台背面で流路形成	上・下流側で侵食 橋台背面で流路形成
橋台背面盛土の侵食状況					
橋台越流の有無	越流なし (写真判読)	越流なし	橋台沈下後に越流 (写真判読)	越流なし (写真判読)	越流なし

ある。そこで本研究では、最近では平成28年8月の北海道豪雨災害で多く見られた大規模な河道変化を伴う橋台及びその周辺の付属物の被災に着目し、移動床模型実験により被災過程を調べ、最低限、橋梁本体である橋台の被災（沈下・傾斜）を食い止めるために必要となる基礎的知見を得ることを目的とする。河川を横断する橋梁本体の構造要件は河川管理施設等構造令²⁾に示されている。この解説²⁾では、河道の計画外力を上回る洪水時においても流下断面障害に配慮するよう、橋台の横断的な設置位置に関する記述がなされている。洪水による侵食・洗堀に伴い、直接基礎形式の橋台が沈下・傾斜する事例は少なくとも20年ほど前から認識されてきた³⁾。その後、平成28年8月に発生した北海道豪雨災害において発生した類似事例が多数報告され⁴⁾、現象の把握に向けた実験や数値解析による検討⁵⁾、⁶⁾が行われ始めているものの、十分な知見が蓄積されたとは言えない現状にある。また、橋梁設計分野では、偶発的作用が支配的な状況において、耐荷性能の低下が生じても所定の安全性を確保するよう規定されており⁷⁾、具体的には地震動に対する信頼性設計手法が提示されている。これらのことから、本研究のように「河道の計画外力を大きく上回るような大規模洪水時の河道変化により生じる、橋台及び周辺付属物の減災対策」に焦点を当てた研究は見当たらない。

2. 事例の比較による橋台被災過程主要因の推定

平成28年8月の北海道豪雨災害で多く見られた大規模な河道変化を伴う橋台及びその周辺の付属物の被災事例を収集し、これらの特徴比較から、橋台被災過程の主要因推定を試みる。国土技術政策総合研究所道路構造物研究部から提供を受けた被災調査5事例を用いて、その被害の特徴を表-1に整理した。5事例を比較した結果、以下の知見が得られた。なお、1)～4)は共通事項である。

- 1) 橋台の基礎形式は直接基礎である（共通）。
- 2) 橋台取付部には、背面盛土が設置され、盛土天端高は周囲の堤内地盤高より高い位置にあった（共通）。
- 3) 出水前の河岸は橋台前面より河道側に位置していた。橋台より上流側の河岸は大きく侵食され、洪水後の河岸位置は橋台背面（堤内地側）に移動した（共通）。
- 4) 橋台・付属物の被災に有意な影響を及ぼす時間において、橋台を越える流れは生じていなかった（共通）。
- 5) 橋台の沈下・傾斜がないとき、背面土の上流側が一部侵食される場合（高原大橋）と、上流側から下流側まで背面土が侵食され、橋台背面に流路が形成される場合（清見橋）があった。4)を踏まえ、背面盛土は上流側から下流方向に侵食が進行し、侵食面が盛土下流端に到達後、流路が形成されるものと考えられる。
- 6) 橋台の沈下・傾斜がある場合、背面盛土が上流側から下流側まで侵食され、橋台背面まで流路が形成されている（九線橋、千呂露橋、小林橋）。
- 7) 橋台下流側における洪水後河岸位置は、橋台背面に流路が形成された場合には背面盛土侵食面と連続する位置まで移動し（九線橋、千呂露橋、小林橋、清見橋）、橋台背面に流路が形成されない場合には橋台前面より河道側にあった（高原大橋）。

上記1)～7)より、5事例における橋台及び付属物の損傷は主に、河岸侵食に起因する橋台近傍の河床高（地盤高）の低下と、低下した領域で生じた流れによるものと理解することが有力である。また、橋台或いは背面盛土を越流しない水位状態であっても、表-1のような形態の被災が生じる場合があることが示されたことは、橋梁の減災対策を考える上で有用な知見であると考えられる。

3. 移動床実験による橋台被災過程の把握

表-2 実験水路の諸量

項目 \ 条件	辺別川	実験水路 (縮尺1/120)
延長(m)	430	3.6
河道幅(m)	12	0.1
土砂粒径(mm)	130(d60)	1.1(一様)
河床縦断勾配()	1/60	1/60
流量(m ³ /s)	350	0.0022
水深(m)	3.8	0.032
無次元掃流力※1	0.3	0.3
水深粒径比	29	29

※1 等流近似で得られた摩擦速度を用いて算定

表-1に示した5事例のうち、背面盛土の侵食及び橋台の沈下・傾斜が生じた九線橋をモデルケースとして移動床実験を行い、河岸侵食等の河道変化及び、橋台・付属物の被災進行過程の把握を試みた。

(1) 実験条件

辺別川の河道情報を参考に、模型縮尺を1/120とし、表-2のようにフルード相似則を満足するよう実験条件を設定した。九線橋より上流約190m地点に設置された床固工から、直線河道となる橋下流240m地点の計430m区間を実験対象区間とした。橋梁本体のスケールも同様に1/120の縮尺とし、九線橋設計図を参考に橋台基礎高を設定した。一様粒径の土砂を敷設し、河道内、堤内地それぞれ横断方向に一樣な高さの横断形状とした。橋脚は変位が生じないよう、水路床に設置させた。流量は定常で与えた。橋台実験水路上流端からは無給砂条件としたが、上流端付近の河床洗堀が大きく、結果として一定程度の給砂量があった。なお、2. で述べたように本研究で取り上げた被災事例は河岸侵食を起因とするものと想定されることから、実験水路の河岸斜面には護岸を設置せず、側方侵食が生じやすい条件とした。模型全景を写真-1に示す。

(2) 背面盛土及び橋台の被災過程～実験結果の観察～

通水後の右岸側橋台周辺の状況を、出水後の現地橋梁付近の状況と比較した結果を図-1に示す。右岸側の橋台及び橋桁の沈下・傾斜の状況や、河岸侵食後の河道平面形状について、実際の状況を極めて良く再現できていることがわかる。従って、本実験ケースでの河道及び橋台周辺の変化過程を調べることで、基本的な被災過程を把握できる可能性が大きい。

通水中の変化を観察した結果を図-2に示す。以下に示す過程を辿り、橋台の沈下・傾斜に至ったことがわかった。1) 水衝部となる橋梁上流右岸側、橋梁下流左岸側において、河岸侵食が進行し、右岸側橋台上流側へ河岸が到達した(図-2: 3.5分～5.0分)。2) 河岸侵食の進行に伴い、露出する橋台の横断方向幅が増大するとともに、橋台前面上流側基礎の下部が洗堀され、橋台上流側が浮いた状態となった(同6.5分)。3) 橋台前面上流側基礎



写真-1 実験水路の全景（実験前）

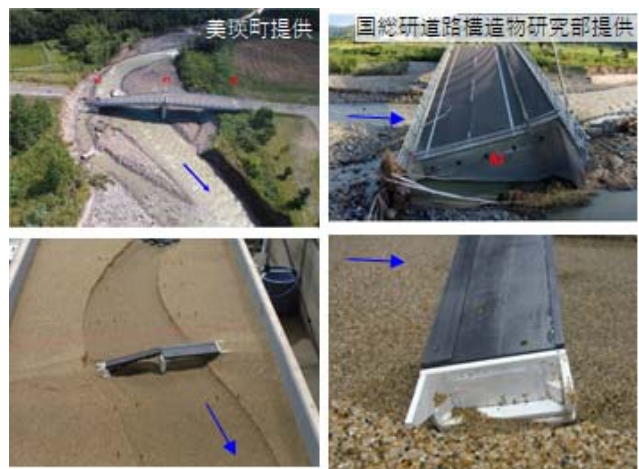


図-1 現地被災状況と実験結果の比較
(上段：九線橋，下段：実験結果（通水後）)

の下部洗堀領域が拡大を続け、通水開始後7.5分過ぎに、橋台の微小な変位が確認された。4) その後も河岸侵食の進行とともに、橋台は上流側への変位を続け、明らかに橋台が変位したことが確認できたと同時に、橋台背面盛土内部の露出が目視で確認された(同9.5分)。この時、既に橋台背面盛土部に大きな空洞が形成されていた(同9.5分)。この空洞内に投入された染料は、橋台下流側基礎の下部から河道へ流出したことが確認された。このことから、橋台下部における洗堀領域が増大していった6.5分頃の段階から、橋台背面盛土が橋台基礎の下部からの吸出しを受け始めており、既に背面盛土内で空洞が形成され、背面盛土天端はオーバーハングの状態となっていたものと推察される。5) 橋台の変位及び背面盛土部の侵食が進行し、オーバーハング状態であった背面盛土天端付近の土砂の落下・堆積・流出が継続しつつ、侵食域が背面盛土部下流端に到達した(同12.0分)。その結果、橋台背面上流側から流入した洪水流が、橋台背面下流側を通過し始めた。

橋台周辺の河床高及び水位の時間変化を図-3に示す。測定地点は図-4のとおりである。河岸が侵食され橋台に

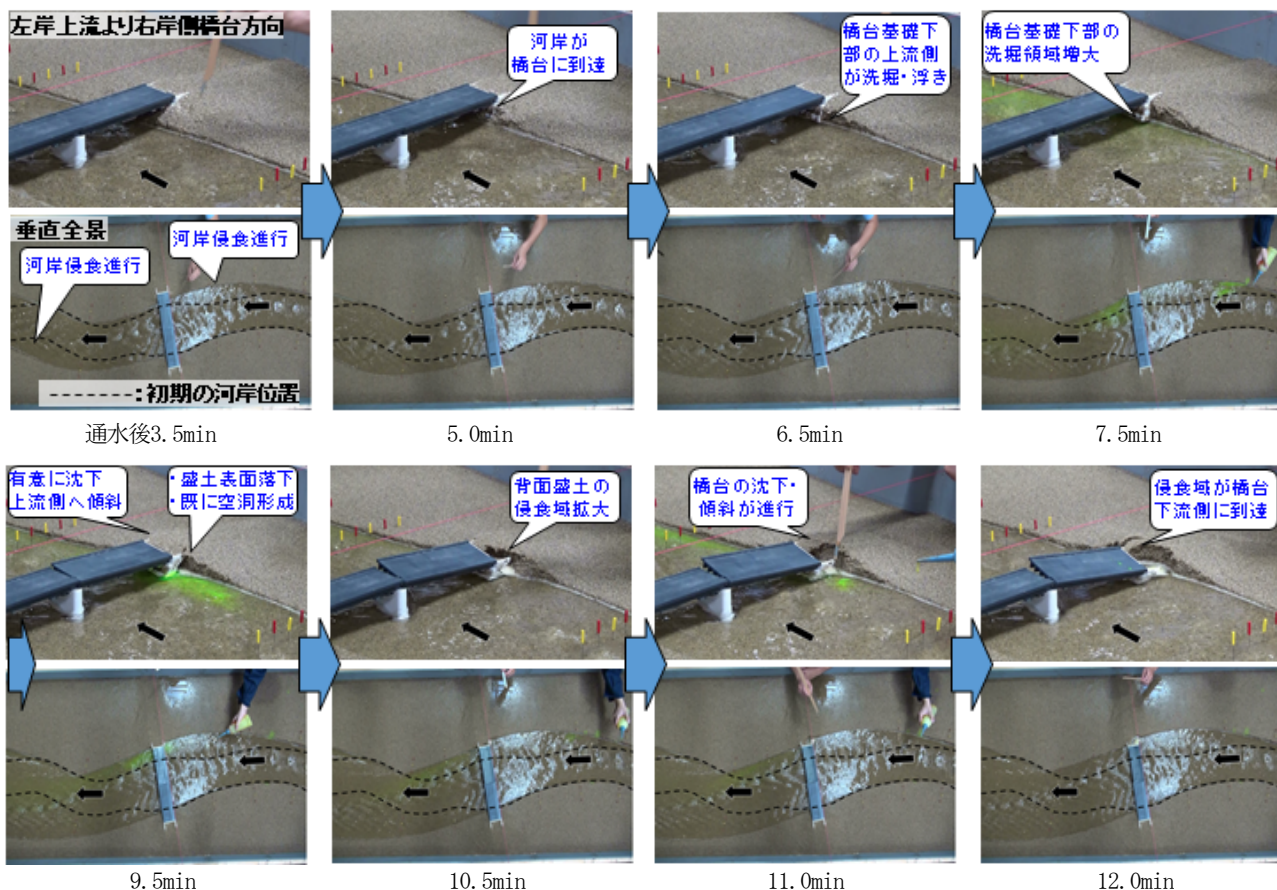


図-2 通水中の河道及び橋台・背面盛土の変化過程（橋台変位あり）

到達した後すぐに、橋台前面上流端の河床高は橋台基礎高を下回る状態を継続した。橋台底面とそれを支える土砂との間に空隙が生じ、やがて橋台は自立が不可能となり、変位が生じたことがわかる。また、背面盛土の上流側表面が崩落し、盛土内部が露出した時には既に空洞が形成されていたが（9.5分）、この時の橋台前面上流端の河床高は橋台基礎高を大きく下回っている。このことから、今回の実験条件では、背面盛土内部の空洞は、橋台下部から河道方向に土砂の吸出しを受けたことによって生じたものと考えられる。川尻⁵⁾は、橋台底面位置が十分に深い条件で背面盛土の侵食過程を実験的に調べた結果、盛土上流側からの侵食進行によって盛土内部の空洞化が進み、天端路面はオーバーハングの状態になることを指摘した。この指摘に加え、本研究では、橋台基礎高によっては橋台底面下部からの吸出しにより、より早期に背面盛土内部で空洞が形成され得ることがわかった。以上のことから、今回対象とした被災パターンは、井上⁶⁾が指摘するように大きな洪水外力による大規模な河岸侵食に起因するものであり、さらには橋台基礎高と河岸侵食の進行に伴い変化する周辺河床高との関係によって、橋台の沈下・傾斜発生の有無が決定と考えられる。

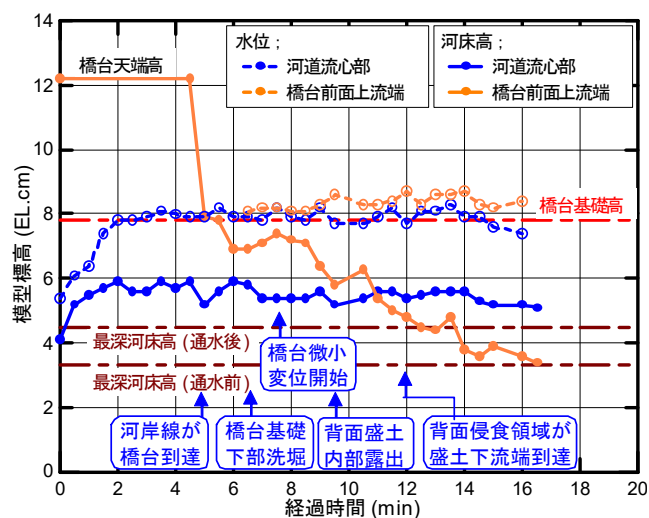


図-3 河床高及び水位の時間変化（橋台変位あり）

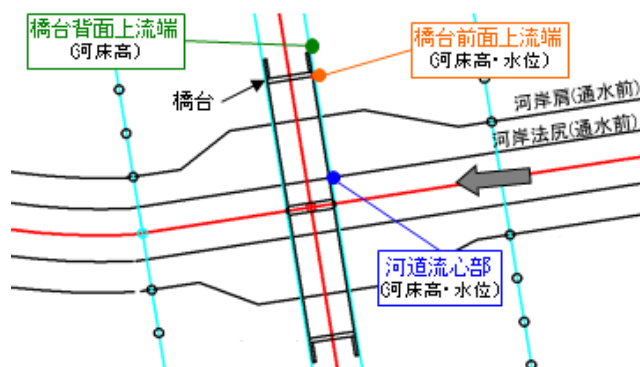


図-4 河床高及び水位の測定地点

4. 橋台上流側河床高の低下過程の把握

前章において、対象とした橋台被災パターンは、橋台基礎高と橋台周辺河床高の高低関係から橋台の沈下・傾斜の有無が決まり、周辺河床高は河岸侵食の進行に伴って低下していくことがわかった。本研究の目的は最低限、橋梁本体である橋台の被災（沈下・傾斜）を食い止めるために必要となる基礎的知見を得ることであり、そのためには、河岸侵食の進行に伴う橋台周辺河床高の低下過程を把握する必要がある。そこで、表-2と同様の条件で、橋台を実験水路床に定着させ、橋台の沈下・傾斜が生じない場合の実験を行った。

(1) 橋台付近河床高の低下過程～実験結果の観察～

橋台周辺の河床高及び水位の時間変化を図-5に示す。

測定地点は図-4のとおりである。橋台前面上流端の河床高時間変化に着目する。通水開始後4.5分から13分の間に、まず河床高低下速度が大きくなり、その後時間経過とともに小さくなっていく時間帯が、大きく分けて4つあることがわかる。これに、通水開始後、橋台前面上流端の河床高が急激に低下するまでの時間帯（0～4.5分）を加え、以下1)～5)に示す5つのフェーズとして区分し、各フェーズでの特徴的な変化を観察した結果を、図-6も用いながら記す。

1) フェーズA（通水開始後0～4.5分）

水衝部となる橋梁上流右岸側及び橋梁下流左岸側において河岸侵食が進行し、河岸が右岸側橋台の上流側へ到達した（図-6：4.5分）。その結果、橋台前面上流端の河床高が急激に低下した。栗山ら⁹⁾や井上ら⁶⁾は、上流からの供給土砂量が多い場合に、砂州の形成等に伴って流心が移動し、河岸侵食が引き起こされることを数値解析的に調べた。本実験では、模型上流端付近の局所洗堀や上流区間での河岸侵食により下流への土砂供給が生じたため、これらの知見と同様に大きな河岸侵食が引き起こされたものと考えられる。

2) フェーズB（通水開始後4.5～7.5分）

橋梁上流右岸側の河岸侵食の進行に伴い、橋台上流面の横断方向露出幅が増大していった。この時、上流から橋台上流面に向かう流れは、橋台前面上流端付近で河道方向に向きを変え、その後橋台前面（河道側）に回り込んでいた（図-6：5.5分）。また、橋台上流側面では、特に河道に近い部分（橋台前面上流端付近）における河床の洗堀が確認された。この流況及び洗堀の特徴は、例えば音田ら⁹⁾が指摘する非越流・不透過型水制周りの流れ及び水制先端部の局所洗堀と良く似ており、これと同様の機構により橋台前面上流側における河床低下が進行したものと考えられる。

3) フェーズC（通水開始後7.5～8.5分）

侵食された河岸が橋台背面に到達し、背面盛土上流面の侵食が進行するとともに、背面盛土内部には空洞が形

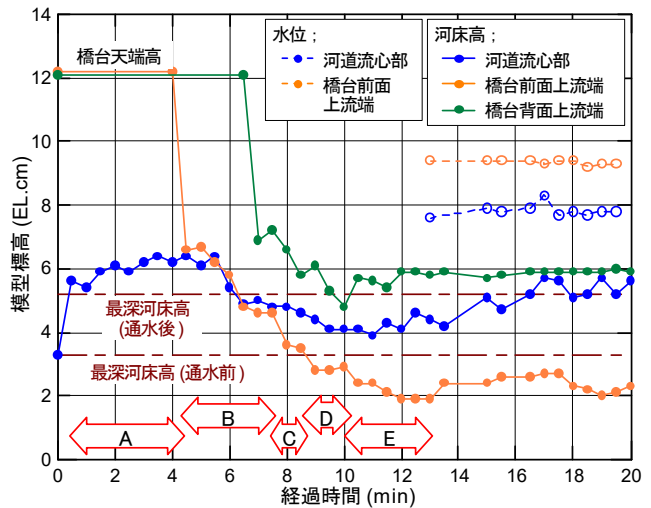


図-5 河床高及び水位の時間変化（橋台変位なし）

成され始め、盛土天端がオーバーハングの状態となった。

（図-6：7.5分）。空洞部壁面の土砂は侵食後に空洞底面に堆積後、空洞内で生じた渦によって橋台上流側面付近を経由して河道側に流送されていた。また、空洞域はこの現象を続けながら流下方向、横断方向に拡大を続け、やがて背面盛土下流端に到達し、橋台背面を通過する流れが生じた（8.5分）。この背面盛土侵食・空洞拡大過程は、川尻ら⁵⁾の実験結果と同様であった。露出した橋台上流面において、動圧による局所的な水位上昇が生じた（図-6：7.5分）。この時に生じる、橋台上流面に沿う流れがフェーズBに加わり、橋台上流面付近の河床洗堀が進行したのと考えられる。

4) フェーズD（通水開始後8.5～10分）

橋台背面を通過する流れが生じた後も、河岸侵食は進行を続け、橋台背面部の流下幅増大とともに、そこを通過する洪水流の流速が大きくなっていった。

5) フェーズE（通水開始後10～13分）

橋台の両岸側を通過する速い流れが生じ、橋台上流面では、フェーズCで見られたよりも大きな局所的な水位上昇が観察された（図-6：12.5分）。この水位上昇は、図-5でも読み取ることができる。この状態で生じた河床低下は、例えば福岡ら¹⁰⁾が提案した実用的な解析法により予測可能となった橋脚周りの流れ及び局所洗堀の発生と類似した機構として説明できると考えられる。

(2) 河岸侵食に起因する橋台付近の河床高低下機構

以上のことから、橋台前面上流端付近の河床高低下には、次に示す3つのフェーズが存在すると考えられる。

- i) 侵食された河岸が橋台に到達することにより、低水路河床高相当まで急激に低下するフェーズ（フェーズA）。
- ii) 河岸侵食の進行に伴う橋台上流面の横断方向露出幅が増大し、橋台周辺が「非越流・不透過型水制周りの流れ」で説明される流況に変化することで生じる、橋台前面上流端付近の河床洗堀フェーズ（フェーズB, C）。

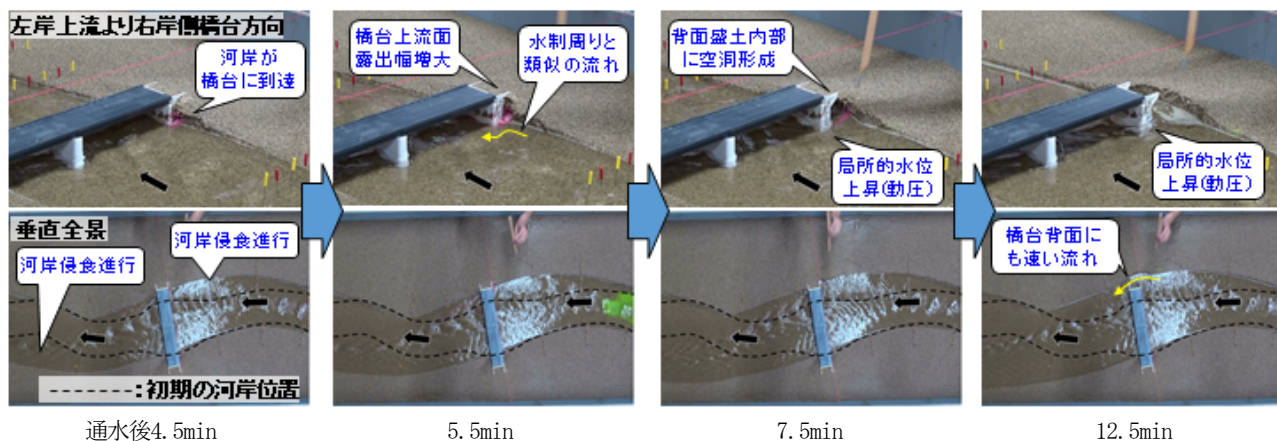


図-6 通水中の河道及び橋台背面盛土の変化過程（橋台変位なし）

iii) 河岸がさらに侵食され、橋台背面においても速い流れが生じるようになった結果、橋台周辺が「橋脚周りの流れ」で説明される流況に変化することで生じる、橋台上流面付近の河床洗堀フェーズ（フェーズD、E）。

橋梁の判定法の検討が挙げられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、美瑛町、北海道、北海道開発局、国総研道路構造物研究部から貴重な調査データを頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

5. まとめと今後の課題

平成28年8月の北海道豪雨災害で多く見られた大規模な河岸侵食を伴う橋台及び背面盛土の被災を対象に、最低限、迅速な復旧が困難な橋台の被災（沈下・傾斜）を食い止めるために必要となる基礎的知見を得ることを目的とし、移動床実験によりその被災過程を調べた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 今回対象とした被災パターンは、大きな洪水外力による大規模な河岸侵食に起因し、河岸侵食の進行に伴い低下する橋台近傍の河床高と橋台基礎高の関係から、橋台の沈下・傾斜の有無が説明される。
- 2) 橋台近傍のうち、特に橋台前面上流端の河床高低下過程には、以下の3つのフェーズが存在する。i) 河岸位置の橋台到達に伴う急激な河床低下、ii) 橋台上流面露出幅の増大による非越流・不透過型水制と類似する流況発生に伴う局所洗堀、iii) 背面盛土侵食の結果生じる高流速の橋台背面通過流れによる、橋脚周りと類似の流況発生に伴う局所洗堀。
- 3) 上記2)の過程において、橋台近傍の河床高が橋台基礎高を下回ることで、橋台の沈下・傾斜現象が進行する。
- 4) 橋台基礎高によっては、河岸が橋台に到達後、背面盛土上流側表面が侵食され始めるまでの間に、橋台基礎の下部からの土砂吸出しによって背面盛土内部に空洞が形成される場合がある。安全に避難する上で、このことを留意する必要がある。

今後の課題として、地域社会経済活動等の観点を踏まえた橋梁の優先順位に応じ、また財政的な制約を踏まえた橋台の減災対策工法や、当該被災パターンが生じる

参考文献

- 1) 北海道開発局：国道38号（清見橋・小林橋）通行止解除及びこれに伴う道東自動車道における代替路（無料）措置区間の変更について、国土交通省記者発表資料，2016。
- 2) (財) 国土開発技術研究センター編：改訂 解説・河川管理施設等構造令，技報堂出版，2000。
- 3) 土木研究所：平成10年8月末豪雨による福島県、栃木県豪雨災害現地調査報告書，土木研究所資料，第3793号，2001。
- 4) 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，土木学会HP，2017。
- 5) 川尻峻三，川口貴之，渡邊康玄，宮森保紀，川俣さくら，御殿敷公平，金子大輝，高橋大樹：橋台背面盛土の地盤工学的な性状把握と水理模型実験による侵食過程の観察，土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_1273-I_1278, 2018。
- 6) 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，第23巻，2017。
- 7) (公社) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 I 共通編，日本道路協会，pp.37-40，2017。
- 8) 音田慎一郎・細田尚・木村一郎・岩田道明：平衡・非平衡流砂モデルによる水制周辺の局所洗堀に関する数値解析，水工学論文集，第51巻，pp.943-948，2007。
- 9) 栗山卓也・川口広司・末次忠司・目下部隆昭・最上谷吉則：平成10年余笹川洪水による国道4号橋梁上下流の河床変動と河岸侵食，水工学論文集，第48巻，pp.1087-1092，2004。
- 10) 福岡捷二・富田邦裕・堀田哲夫・宮川朝浩：橋脚周りの局所洗堀推定のための実用的数値シミュレーションの開発，土木学会論文集，No.497/II-28，pp.71-79，1994。

(2018. 4. 3受付)