

2018年西日本豪雨による三篠川水系の橋梁流出 事象の現地被害調査報告

Investigation report damage survey of bridge collapse phenomena in Misasa River
due to torrential rain in western Japan flood in 2018

有尾一郎¹・渡邊学歩²・柴田俊文³・海田辰将⁴・河村進一⁵

¹ 広島大学大学院先進理工系科学研究科社会基盤環境工学専攻

² 山口大学大学院 創成科学研究科

³ 岡山大学大学院環境生命科学研究科社会基盤環境学専攻

⁴ 徳山工業高等専門学校土木建築工学科

⁵ 呉工業高等専門学校 環境都市工学分野

The heavy rainfall in West Japan, which occurred in July 2018, caused massive and widespread damage to social infrastructures and lifelines. The torrential rain damaged many roads and railway bridges, and traffic and logistics were disconnected in many places. Regarding bridge damage, Bridge Disaster Investigation Group of the Japan Society of Civil Engineers(JSCE) is conducting a field survey of damaged bridges in the Misasa River. In general, cases that can specifically and quantitatively analyze the damage situation and cause of the damaged bridge groups are valuable for overcoming structural and complex engineering problems, and by making use of such cases, the cause of the failure and analysis progress, and it will lead to improving the design elements and construction method of the bridges in the future, and measures such as the runoff of the bridge at the time of flood. We hope that this survey report will be useful for future disaster prevention and mitigation measures technology for bridge infrastructure, and we keep a survey record as a repository of Hiroshima University.

Key Words : *Planned high water level, lifeline disaster prevention, flood hydrodynamic force, bridge wash out*

1. はじめに

社会基盤である建造物は、その機能を果たすような荷重を想定するとともに、地域性を考慮しそれらの外力等の作用に耐えるように設計される。その前提である設計条件が崩れるような自然の振舞いに対して、支持条件を含む構造物の設計時の平衡条件が破綻する事象が発生しても、過去の被災事例から予想される崩壊を免れる対策は必要である。すなわち、社会基盤である建造物は、その機能や要求性能を満たすように構造(部材の寸法や諸元)が定められ、外力等の想定に耐えるように設計される。このために、その前提である設計条件が崩れるような想定を超える自然の猛威に対して、構造物は脆弱である。しかしながら、自然災害が頻発する状況を鑑みると、災害前後の復旧計画やフェールセーフ機能や冗長性を高めるなど、少なくとも過去の災害事例から想定される被害については十分な事前対策が必要である。本原稿は、土木学会・地盤工学会

2018年広島豪雨災害合同緊急調査団・調査報告書の橋梁災害調査をもとに、その後共著者らがその被害調査の記録を今後の地域防災ならびに減災に役立たせるために、本報は橋インフラの被災記録として構成しまとめ直したものである。

また、橋梁工学において、1940年米国のタコマナローズ橋の落橋はとても有名な事象である。その当時、風による相互作用を伴う構造-流体連成問題における共振現象によって橋の崩壊は想定もされていなかった。また、阪神淡路大地震を契機に地震による橋の損傷・落橋が問題視され、落橋防止装置や耐震性能は一見向上したが、3.11の東日本大震災では津波によって数多くの橋梁の流出という事象が生じた。さらに、橋梁の計画高水位を越えるような超過洪水に対する橋の損傷や流出に関する潜在的課題に対する現行技術として必要な設計要素であり、その対策が地方では施されていないのが実情である。そのためには、既存の橋梁含め超過洪水に対する橋梁の被害調査は流出原因や洪水時流

体力を推定する上で重要な設計ファクターと考えられる。この被害報告は、橋梁の豪雨被害調査の事実に基づいて、橋インフラの被害損失を最小に、かつ、有効な洪水対策や防災対策を考える基礎資料とするために、橋梁・構造工学研究者らでまとめた一部である。

2018年7月西日本豪雨をもたらした平成30年7月豪雨、2019年9月房総半島エリアを襲った台風19号、令和3年8月豪雨などの大雨による豪雨災害が多発し、道路や橋梁などのライフラインが寸断^{1),2),3)}、地方の交通ネットワークの断絶リスクが高まっている。交通網の復旧の早さは地域住民の生活再開に直結する重要事項であるにも関わらず、人手や予算の不足を背景として、損傷した構造物の復旧方法、洪水対策、非常時の運用などの課題と事後的な対応に任されている。

橋梁インフラの災害復旧に関しては、その被災規模や現場の状況などから様々な課題が存在する⁴⁾。地方では復旧査定後に施工発注や関連機関の災害協定などの要請によって復旧事業が開始される。災害現場の状況によっては現場特有の様々な課題を抱えており、万能的な方法論や施工技術は少ない。実際、豪雨後各所で集落を結ぶ橋が損傷や流失によって、孤立状態も含む車両等が通行できない状況や送水管等が破損し、被災後の不便な生活を強いられていたので、被災した橋インフラの早期の復旧は被災地で強く望まれている^{1),5)}。

調査団は、2018年7月西日本豪雨災害で発生した三篠川流域で被災した橋梁の調査報告書⁵⁾、自然災害フォーラム⁶⁾、中国支部研究発表の調査報告⁷⁾を速報している。しかしながら、令和2年7月豪雨洪水によって球磨川流域の数多くの橋梁群が流失するという事態が発生し、危機管理ならびに防災面の重大さから計画高水位を越えても橋桁を流出させにくい設計と対策の必要性を再認識した。

既存の橋桁の耐流水性能を把握できるように構造工学的に大切な視点として再構成し、橋梁の被災調査から今後の中小河川橋梁に必要な設計視点とその課題や対策についてもまとめた。すなわち、典型的な鉸桁橋梁を崩壊に至らしめた重力式橋脚の転倒崩壊事象の調査から洪水時の流体力、流速や流量などの水理学的な推定特性値を導出し、今後の計画高水流量を越えた中小橋梁の洪水対策の道標を提案する。また、今回の洪水事象によって橋梁が崩壊し、計画設計時とのギャップの事実から、例え計画高水位を越水したとしても崩壊に至らしめない耐流体力を有する最適橋梁、あるいは、抗力が小さい橋梁設計ならびに、既存の中小橋梁に対する耐流水・耐流失対策と設計の必要性がある。今田・渡邊(2022)¹⁰⁾は、有限体積法VOFによる橋梁構造周

面の水面形および浸水率に基づく抗力係数に関して、超過洪水時の橋梁の数値流体連成解析を検討している。

2. 三篠川流域の橋梁調査⁵⁾

(1) 調査対象

2018年7月上旬に発生した西日本豪雨は、気象庁が西日本の複数の県に特別警報を発令し、広域に甚大な被害をもたらした。この集中豪雨によって、広域に道路・鉄道の橋梁などの多くのインフラ施設が損壊し、各地で物流が断絶した。広島県内でもJR山陽本線、呉線、芸備線などの鉄道・道路施設の橋梁が損壊し、地区の孤立が多数発生した。広島県災害対策本部の公表では県管理の橋梁が2橋、市町村管理の橋梁70橋が損傷したとの報告がある⁸⁾。

調査エリアは、図-1に位置する広島県の中心を流れる三篠川沿いに架かる橋梁群を対象とした。三篠川流域は、太田川流域のうち下流東部に位置し、広島市、東広島市、高田郡向原町、高田郡甲田町、賀茂郡豊栄町、賀茂郡福富町、双三郡三和町の2市5町にまたがり、総流域面積は274km²、幹川流路延長は42kmである⁹⁾。太田川の支流である三篠川¹¹⁾は、平成30年7月豪雨時に河川断面の不足によって橋梁の流出及び半崩壊を引き起こした一級河川である。

3. 橋梁調査流域

(1) 調査日と調査員

表-1に示す。

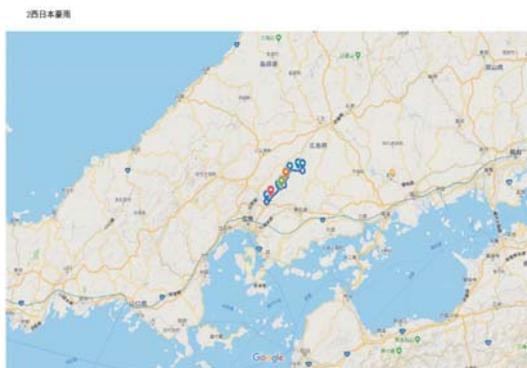
表-2 広島県「一級河川太田川水系三篠川ブロック河川整備計画」から抜粋

過去の災害発生状況				
被害発生年	降雨の原因	24時間雨量(mm)	市町村	被害状況
昭和40年6月20日	梅雨前線豪雨	265	高橋町	床上浸水420戸 農地浸水300ha
昭和47年7月11日	梅雨前線豪雨	199	白木町	家屋全壊3戸、家屋半壊2戸 床上浸水49戸、床下浸水236戸
昭和58年9月26日	台風10号	146	広島市	床上浸水1戸
昭和60年6月21日	梅雨前線豪雨	178	広島市	農地浸水0.5ha
平成9年5月14日	前線	86	東広島市	床下浸水20戸
平成11年6月29日	梅雨前線豪雨	161	向原町	床下浸水5戸

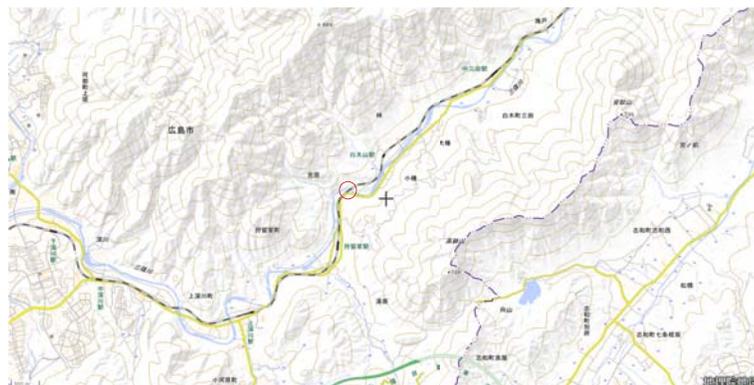
被害状況：昭和40年6月洪水「中国新聞(昭和40年6月21日付)」より
昭和47年7月洪水「昭和四十七年七月豪雨災害誌(建設省中国地方建設局)」及び聞き取り調査より
昭和58年～平成11年「河川浸水被害履歴調査(平成12年実施)」及び聞き取り調査より
24時間雨量：昭和40年～昭和47年 流域平均雨量(三田橋地点)
昭和58年～平成11年 東広島市気象台

(2) 三篠川流域の橋梁調査

合同調査エリアは、図-1に位置する広島県の中心を流れる三篠川沿いに架かる橋梁群を調査した。三篠川流域は、太田川流域のうち下流東部に位置し、広島市、東



(a) 三篠川の位置 (Google 引用)



(b) 被災調査した橋梁の位置 (出典：国土地理院)

図-1 三篠川流域の調査対象橋梁の位置と河川状況

表-1 調査日と調査員

2018年7月29日	事前調査:有尾一郎(広島大学)
8月7日	合同調査:柴田俊文(岡山大学)・渡辺学歩(山口大学)・海田辰将(徳山高専)・河村進一(呉高専)・有尾一郎・濱優太((株)長大;当時広島大学学生)・横谷祐樹(大日本コンサルタント(株);当時広島大学学生)・安藤貴博(八千代エンジニアリング(株);当時広島大学学生)・山下達也(広島県;当時広島大学学生)
8月26日	確認調査:有尾一郎(広島大学)
10月9日	確認調査:海田辰将(徳山高専)



図-2 三篠川橋梁に架かる橋梁群と鳥声橋の架橋地点 (Google を引用)

広島市, 高田郡向原町, 高田郡甲田町, 賀茂郡豊栄町, 賀茂郡福富町, 双三郡三和町の2市5町にまたがり, 総流域面積は274km², 幹川流路延長は42kmである。

(3) 対象流域の治水に関する現状と課題 (広島県HP(2018)公表より抜粋)

この流域の治水に関する現状と課題は, 広島県が公表している「一級河川太田川水系三篠川ブロック河川整備計画」⁹⁾に次のように記述されている。「三篠川ブロックにおいて, 過去に昭和40年6月洪水, 昭和47年7月洪水による大規模な被害が発生しております。この

ため、洪水被害の解消を目指して長年にわたって治水安全度の向上を図り、被害の大きかった河川を中心に河川改修が進められています。しかしながら、近年においても、平成9年5月の豪雨による床上浸水20戸の被害や平成11年6月の豪雨による床下浸水5戸の浸水被害等が発生しています。このため、上・下流のバランス、本・支川の整合など水系一貫の観点に立ち、適切な安全度を有する新たな治水計画の策定と洪水防御対策の早期実施が課題となっています。過去の主な洪水とその被害状況を表-2に示します。(以下、割愛)。

(4) 三篠川沿いの調査橋梁群

三篠川沿いの調査対象の橋梁群を図-1に示す。図中の番号(1)~(10)は、201年8月7日の合同調査における現地調査順に従っている。

4. 三篠川の橋調査



図-3 鳥声橋の架橋地点の拡大図 (Google を引用)

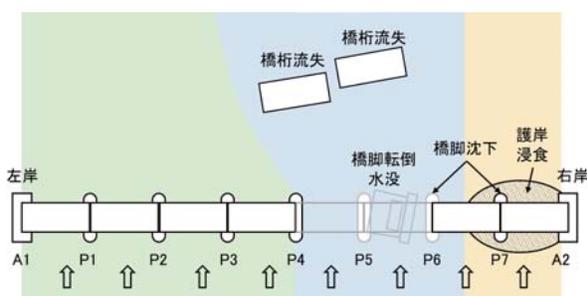


図-4 発災後の鳥声橋の崩壊状況 (配置)

(1) 鳥声橋

図-2には、豪雨災害で被災した鳥声橋を含む、三篠川に架橋されたJR白山山駅~下新川駅区間の橋梁群の位置を示す。鬼ヶ城山、中山、木ノ宗山に囲まれた狭隘

な急傾斜地の中央を三篠川が流れており、これに平行して県道37号線(白木線)およびJR芸備線が走っている。

また、図-3には当該架橋地点の拡大図を示すが、鳥声橋は旧県道に架かる橋梁で、芸備線上深川駅から300m西側(下流側)に位置している。さらに、その下流に芸備線の第2三篠川橋梁および県道37号線の新鳥声橋が存在する。なお、三篠川は鳥声橋上流側で左側に大きく蛇行しており、旧県道、県道37号線、JR芸備線に対して直交する形で流れている。

写真-1には発災約1ヶ月後の鳥声橋の状況を示す。本橋は橋長93m、幅員5mの8径間単純桁RC橋である。左岸側(上流側から見て)から数えて第7径間の橋桁は大きく傾き、第5径間および第6径間の橋桁は落下し、40m程下流に流されている。同橋に敷設された水道管も併せて流失してしまったために、災害当時、周辺の一部地域に断水が生じた。

写真-1(a)には、鳥声橋右岸側(下流側からみて左手側)の詳細な被害状況を示す。P5、P6およびP7橋脚がいずれも、洪水時の河床が洗掘され沈下している。P6橋脚は隣のP7橋脚よりも1m以上沈下し、これにより下流側に大きく傾いている(写真-1(b)および写真-1(c)参照)。第6径間の橋桁は相対的に上流側に跳ね上がるようにしてねじれている。第5径間および第6径間の上部構造が下流側に流失(写真-1(d)参照)しているが、これはP5橋脚(同図(a)および写真-1(e),(f)参照)が転倒したためと推察される。P5橋脚の転倒の原因としては、P6橋脚と同様に河床の洗掘によって基礎が不安定となったものと推察される。

被災から2年後の鳥声橋状況(2020.8.30)を写真-2に示す。倒壊した橋脚は新しく造り替えられ、束鉄筋が並び立つ状態まで復旧していた。さらに、1年後(すなわち被災3年後)の鳥声橋の状況(2021.8.29)を写真-3に示す。2径間連続のRC橋と1径間単純RC橋が復旧されていた。写真-3(a),(c)より、既存の橋脚のフーチングの形状が異なっており、径間長が延びており、RC床版が完成している(写真(b))。橋脚上部の支持は写真-3(c)よりゴム支承のように見受けられる。このように、本橋の場合、完全に復旧するまでに被災してから3年程度の歳月が必要であった。

図-5には、下流に位置する第3三篠川橋梁の発災時洪水状況を示すが、同橋梁の上下流間には河床レベルに段差がないにも関わらず、橋脚を挟んで上下流間で水位に1m近い高低差が生じている。架橋地点や橋梁形式が異なるが、本橋(鳥声橋)でも同種の状況が発生していたと考えられる。このような流れが生じると、



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

写真-1 鳥声橋の被害状況 (2018年8月7日撮影)

橋脚の背面（下流側）で複雑な流れが生じ、河床の洗掘が顕著となる可能性が高い。

a) 迫田橋

迫田橋は、主要道路である県道 37 号線と三篠川対岸の迫田地区を結ぶ、橋長約 40m の 2 径間連続ポニーワレントラス橋であり、4t の荷重制限下で供用されていた。図-6 や写真-4 より、本橋は河川の平面形状が上流

から下流に向かって大きく左に蛇行する際の変曲点に位置していることから、本橋の左岸側には砂洲が形成されている。このことから、本橋の右岸側には RC ブロックや擁壁による護岸が形成されていたが、今回の増水によって図-6(b) に破線で示す範囲の堤体が大きく洗掘・破壊されており、大型土嚢による応急措置が施されていた（写真-4）。写真-4(c),(d) に本橋の被災状況



(a)



(b)

写真-2 被災2年後の鳥声橋の復旧状況(2020.8.30)



(a)



(b)



(c)

写真-3 被災3年後の鳥声橋状況(2021.8.29)



(a) 地図



(b) 航空写真

図-6 被災した迫田橋の位置(Googleを引用)

を示す。写真-4(c)のように、本橋は2径間のうち右岸側径間が中間橋脚上で完全に分離し流失している。流失した径間の上部工はすでに撤去されたと思われる。調査当日には確認できなかった。残存している本橋の中間橋脚は基部が完全に露出しており、その上流側にお

いて多少の洗掘跡が確認され、上流側に若干傾いているように見えるものの、橋脚としての機能は保持していたと考えられる。一方、右岸側の護岸が大きく洗掘・損壊しており、写真-4(c)の右下に破壊された堤体の一部と思われるRC塊が確認されることから、蛇行流に



(a) 迫田橋の上流側



(b) 迫田橋の下流側



(c) 迫田橋周辺



(d) 中間橋脚の上部

写真-4 迫田橋の被災状況



図-5 第2三篠川橋梁(被害無し)



図-7 被災前の迫田橋 (Google を引用)

よる右岸側の水面高さの増大および2次流れ等の洗掘作用によって本橋の右岸側の堤体が崩壊し、それによって本橋の右岸側橋台と支承部が沈下したため上部工が冠水したと推察される。写真-4(d)は中間橋脚上の断面である。図中、破断部において露出したRC床版の配

力鉄筋(橋軸方向の鉄筋)の方向に着目すると、上流側では下向きに破断しており、下流側では上向きに破断している。さらに、上流側のトラス主構は鉛直方向に座屈し、下流側の下弦材が上向きに破断していることが確認できる。これらの事実から、本橋が中間橋脚



(a)



(b)

写真-5 被災2年後の迫田橋の状況 (2020.8.30)

上で分離・落橋した時点では、この断面に反時計周りの回転作用が生じていたことがわかる。

被災2年後の迫田橋の状況 (2020.8.30) は、写真-5(a),(b) に示すとおり、流出を免れたトラスと橋脚も撤去され、この集落は迂回できる橋梁があるので、橋の復旧工事は着手されなかった。



図-8 安芸高田市向原町坂の地図 (Google を引用)

(2) 寺山橋

寺山橋は広島県安芸高田市向原町坂に位置する(図-8)。図-9は災害前の航空写真で、右側が上流である。寺山橋の手前で川幅が若干大きくなっていることがわかる。写真-6(a),(b)は災害後の寺山橋の様子であり、仮設水道管が設置されている。ここで、右側の高欄(上流側)の一部が流失して流木等が滞留し、橋の手前の舗装が損傷を受けていることが確認できる。中央の橋脚の沈下に伴い床版も鉛直下向きに変形して「くの字」状になっており、この沈下は橋脚基礎部の洗堀が原因



図-9 寺山橋付近の写真 (Google を引用)

と思われる。

次に、図-9の破線部について、災害前の様子を図-10(a)、災害後の状況を写真-7に示す。図-10の中央にある墓石が写真-7に存在するはずだが確認することができず、流出あるいは損傷のため一時的に撤去した可能性がある。写真-7より、寺山橋に流木等が溜まることで越流が発生し、橋周辺にあった墓石や路面にダメージを与えたことが推察される。写真-7(b)は寺山橋から右岸下流の復旧作業の様子を撮影したものである。左岸でも土嚢が確認されることから、寺山橋を含む一帯で、広い範囲で被害が生じていることがわかる。参考までに、図-10(b)に災害前の寺山橋の状態を示す。高欄に損傷はなく、路面も平坦で中央(橋脚の上部)で変形がないことが確認できる。

復旧後の寺山橋は、写真-8に示すように、完全に原状復元された橋ではなく、橋脚は撤去され床版一体の



(a)



(b)

写真-6 寺山橋の被災状況



(a) 被災前の寺山橋からの上流側



(b) 被災前の寺山橋

図-10 被災前の寺山橋 (Google を引用)



(a) 護岸状況



(b) 復旧作業の様子

写真-7 被災後の寺山橋付近の周辺と復旧作業

RC 橋であり、支承は積層ゴム支承からなる。写真-8(c)の支承の仕様から再度の洪水による流下方向の流水に抵抗する部位が見当たらないので、橋の重量による重力式安定に期待しているものと思われる。

(3) スラブ橋 (床版桁橋)

被災前の写真 (写真-9(a)) から円柱橋脚を持つ二径間単純 PC 床版橋 (橋長 30m, 支間長 15m × 2 径間, 幅員 2m) であり、車両防護柵はない。被災後の写真 (写

真-9(b)) から床版桁そのものにほとんど損傷がなく、橋脚下部の洗堀により支持を失ったこと、土石流の影響により河川を流下した直径 30cm 程度の岩石等の橋脚への衝突により、橋脚が転倒し、スラブ橋が直下に落下したと推察される。古いプレキャスト PC 床版橋とみられ、図-11 のように桁高 300mm 程度の I 形プレキャスト PC 桁を複数本連結して桁間にモルタル充填し床版を製作している。この橋の橋脚の一部であった



(a)



(a) 被災前 (Google を引用)



(b)



(b) 2 径間 RC 桁橋の被災

写真-9 2 径間 RC 桁橋



(c)

写真-8 復旧後の寺山橋

と思われる RC 円柱が橋の直下 (図-11(b)) にあり、下流側のは粗骨材や鉄筋が露出している状態で、岩石等が激しく衝突したかもしれない。被災後 2 年の現状 (2020.8.30) は、図-12 のとおりで本橋は復元されていない。



(a) 桁橋断面



(b) 橋脚の残骸

図-11 2 径間 RC 桁橋の被災



図-12 被災 2 年後の現状 (2020.8.30)



(a) 被災前 (Google を引用)



(b) 護岸部被災

図-13 実重橋付近の被災状況



写真-10 実重橋の水道管の被害



図-14 市明橋の位置 (Google を引用)

(4) 実重橋

図-13 は、安芸高田市向原町の県道 29 号線から南に外れた三篠川に架かる実重橋である。同左図は実重橋の被災前の状況で、右図は被災後の状況である。橋の外桁部に水道管が敷設されており、橋の南側に水道管の破損部が道路上に横たわり、道路部の盛土が越水により洗掘されていた(写真-10)。これら被災図から実重橋周辺の三篠川左岸には多くの土嚢袋が設置され、堤防が破堤していたことが分かる。実重橋の南橋詰めの道路部も深く洗掘しており、流路が発生していたことが推察される。このことから、破堤をオーバーフローした流れは、橋の端部に沿って道路部を越水し、盛土部が掘られ流道ができたものと思われる。その結果、直接的な橋の損傷は免れた。破堤は洪水時の河道の線形状態も影響したものと考えられる。



図-15 被災前の市明橋 (Google を引用)

(5) 市明橋

市明橋は、県道 37 号線(白木街道)から白木町大字井原地区を結ぶ、橋長約 60m の RC 橋である(図-14、図-15)。本橋は、右岸側からの 3 径間が単純 RC2 主桁橋、残りの左岸側 2 径間が連続 RC 床版橋となっており、橋梁形式が右岸側と左岸側の径間で異なっていることが特徴的である。また、左岸側から 1 つ目の中間



(a) 橋脚の沈下



(b) 橋脚拡大



(c) 水位痕

写真-11 被災後の市明橋

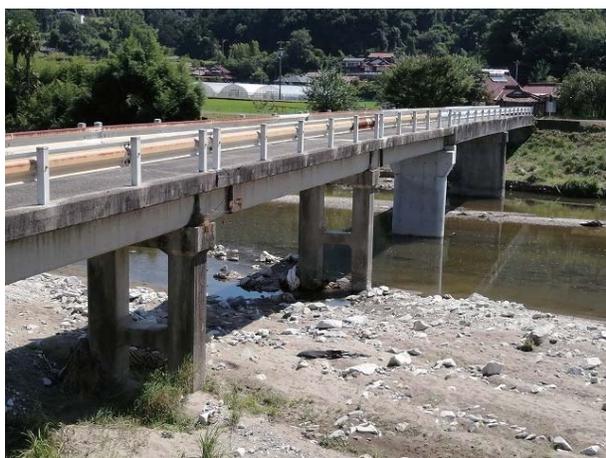


写真-12 復旧後の市明橋 (2021.8.31)

橋脚のみ壁式となっており、他 3 つの橋脚は 2 層ラーメン式である。これらの理由は不明であるが、本橋は過去にも流失または損傷し、復旧された可能性も考えられる。

本橋が被災して 3 年後には写真-12 に示すとおり、部分的に沈下していた橋脚は撤去され、小判型の橋脚が新設され、橋桁は以前のもが利用されていた。必要最小限の部分的な復旧タイプと見て取れる。

写真-11 に本橋の被災状況を示す。図 (a) から、左岸側から 2 つ目の中間橋脚が沈下しており、橋梁全体として「くの字」に折れ曲がっている様子が確認できる。また、図 (b) では、橋脚の沈下だけでなく単純桁が水平方向（下流方向）にズレを生じており、橋脚自体も若干傾いていることもわかる。これは、この橋脚が河川断面の中央部（最深部）付近に位置しており流速が速いことに加え、流木などの流出物が橋脚に巻きつくことによって橋脚基部での河床洗掘の範囲や深さも増すことに起因すると考えられる。写真-11(c) は右岸側から 1 番目に位置する高水敷上の中間橋脚の様子を示す。この橋脚は側壁に最も近い位置にあるにも関わら

ず、橋脚の下流側にて深さ約 1m を超える洗掘跡が確認され、フーチングも露出していた。橋脚基部の上流側には、写真の通り草木が巻きついていたので、これらの付着物が橋脚周辺の流況を大きく乱したと考えられる。

(6) 高瀬橋

高瀬橋は、市明橋の下流に 350m に位置する、橋長約 70m の 7 径間単純 RC 桁橋である（図-16）。6 基の橋脚はいずれも門形ラーメンとなっている。図-17 に本橋の被災状況を示す。本橋も市明橋と同じく中間橋脚の 1 つが河床洗掘によって沈下し、その影響により上部工が大きく変形したため通行禁止となった（図-17(a)）。沈下した橋脚は右岸側から 2 番目に位置する低水敷の中間橋脚である。本橋は、桁が橋脚頂部の橋座に掛け違いい状に設置されているとみられ、上部工が大きく「くの字」に折れ曲がったことにより、橋座付近に大きな水平ひび割れが生じている（図-17(b)）。また、同図より橋面上の地覆コンクリートのかぶりが曲げ圧縮によって剥離している様子も確認できる。橋軸方向に路面をみると、図-17(c) のように、沈下した橋脚上で大きく下がっており、ガードレールも橋軸方向に座屈していた。目視ではあるが、右岸側から 2 4 番目の橋脚付近が河川の最深部とみられ、図-17(d) に示したように、全ての橋脚に大量の流木や草木などの流出物が付着している状況を鑑みると、市明橋と同じく橋脚基部で発生した河床洗掘が主原因と考えられる。ガードレールや支承部に付着物や流木などの衝突跡が確認できないことから、最大水位は上部工までは達していなかったと考えられる。

橋の被災から 2 年後 (2020.8.30) と 3 年後 (2021.8.29) の高瀬橋の状況を写真-13 に示す。被災から 2 年後には新設の橋脚が施工され、3 年後には 2 径間連続の RC 桁が復旧している。今回沈下した 1 橋脚だけが異なる



(a)



(b)

図-16 高瀬橋の位置と被災前の状況 (Google を引用)



(a)



(b)



(c)



(d)

図-17 高瀬橋の被災状況

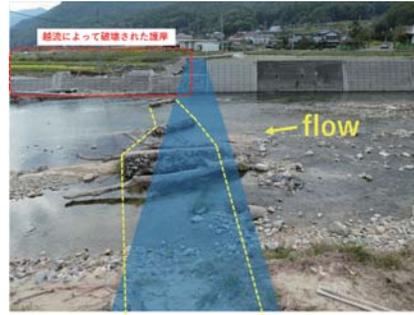
橋脚の形状をしている。この復旧した橋桁の形状を観察すると、将来再来する洪水に対する流体力を荷重とした橋設計を設定しているかどうかは、外観だけでは不明であるが、橋桁両端の支持条件によってある程度推察することができる。

(7) 安駄橋

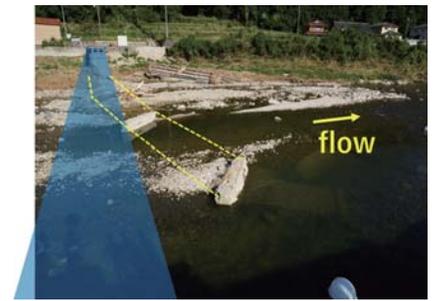
安駄橋は、県道 37 号線（白木街道）から白木町大字三田地区を結ぶ、橋長約 65m の道路橋である（図-18、図-19）。本橋は、右岸側からの 4 径間が単純 RC2 主桁橋、残りの左岸側 2 径間が単純鋼プレートガーダー



(a) 被災前



(b) 被災後



(c) 橋脚跡



(d) 護岸の損傷



(e) RC 桁床版の流出



(f) 橋脚転倒

写真-14 安駄橋



図-18 安駄橋の位置 (Google を引用)



図-19 被災前の安駄橋 (Google を引用)

となっている。5基の中間橋脚はいずれも RC 壁式橋脚であり、被災前は4tの荷重制限下で供用されていた。図-18に示すように、本橋の上下流で河川がS字にカーブしており、ほぼ中間点に本橋が架橋されている。

本橋の右岸側に設置されている護岸ブロックは比較的新しいものの、本橋の右岸側で越流が生じ、下流側の護岸の背後から洗掘や背面土の吸出しが発生したことから、右岸側の護岸が下流方向約100mにわたって崩壊していた(図-14(a)~(c))。また、右岸側の接続道において、支点から約20m離れた路面の舗装が図-14(d)のように剥離していた。

図-14(b)および(c),(f)は、本橋の流失部における中間橋脚の様子である。本橋は、鋼プレートガーダー(左

岸側)の1径間を残して全て流失しており、これらを支えていた壁式の中間橋脚は図(a),(b)のようにフーチング部分から転倒していた。橋脚のフーチング部端部を点線で繋ぐと、右岸側の橋脚ほど橋軸直角方向に近い角度で転倒していることがわかる。このことから、本橋流失の起点は水深の深い右岸側にあるものと推測される。また、これらのフーチングの底部は、図(c)のように、大きな石を間詰めRCとともに敷き並べた造りになっており、地中杭は確認できなかった。右岸側では越流が発生しており、左岸側の残存径間においても支承部に流木や草木が付着していたことから、この地点での最高水位は上部工まで達するほどであったことが予想される。



(a) 橋桁流出



(b) 橋桁拡大



(c) 東岸部の残存



(d) 桁固定部の損傷

写真-15 安駄橋の橋桁被災状況

左岸から2径間目において発生したプレートガーダーの流失状況を写真-15に示す。流失した桁は、ほぼ原形を保ったまま、下流側30m地点に上下ひっくり返った状態で確認された。本橋は単純形式であることから、RC床版も各径間で元々分離された構造であったことから、写真(c)のように、左岸の1径間はそのまま残存していた。流失したプレートガーダーの支承部には、ベースプレートとともにアンカー（丸鋼）が残存しており、写真(d)に示すように、アンカーがほぼ水平に折れ曲がった状態で引き抜かれていた。アンカー先端のフックの前で破断したものと推測される。

写真-16(a)は右岸側4径間におけるRC桁の流失状況である。RC桁は床版とともに右岸側の下流約100mの範囲に、ほぼ直列した配置で横たわっており、中には写真-16(b)のようにRC床版と桁が完全に分離しているものも確認された。この桁橋は、写真-16(c)のような2本の矩形断面を持つRC桁の上に、フーチングを有するRC床版を組み合わせた断面となっており、

桁の上に一定間隔で突き出している丸鋼以外、ずれ止めの役割を果たすものは確認できなかった。本橋の右岸側の橋台支点部の様子を写真-16(d)に示す。図から、本橋の端横桁は橋台のパラペットと一体化されていたと思われる。この断面から橋軸方向に突き出た鉄筋の多くは、下流方向を向いていたことから、上部工に作用した過大な水平力によって桁が流下方向に引っ張られて破断したと推察される。

本橋梁の被災は全径間に渡って流出崩壊していたので、2年後の建設中の安駄橋は、橋脚と橋台の下部工から写真-17に示すように橋脚数を減らし、写真(b)の被災前の橋用の標識（車両制限4.0tの仕様）の復元を遙かに超える大型化していた。ほぼ、復元というより現行の道路等級を格上げし、流体力を荷重項目として設計されたかは不明だが、橋脚の抗力を低減させるような断面でなく既往のコンクリートで重厚化させている。さらに、その一年後の2021年には写真-18に示すように、その下部工事は終わって、上部工の建設が残って



(a) 流失した橋桁部



(b) 流出したRC床板部



(c) 護岸とRC床版



(d) 西岸橋台の損傷

写真-16 安駄橋の護岸の破損状況

いる状況であった。

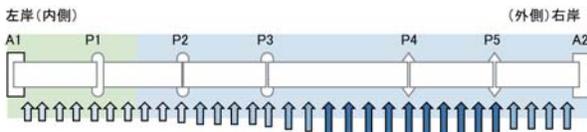


図-22 第1三篠川橋梁の橋桁と橋脚・橋台の位置

(8) 第1三篠川橋梁 (JR 芸備線)

図-20には、豪雨災害で被災したJR芸備線の第1三篠川橋梁を含む、三篠川に架橋されたJR白木山駅～下新川駅区間の橋梁群の位置を示す。第1三篠川橋梁は、三篠川に架かる鉄道橋で白木山駅から600m程下流に位置しており、白木山駅～下新川駅区間の橋梁の中で最も上流側に位置している。なお、三篠川は同橋を通過後、大きく左手に蛇行している。

図-21には発災1ヶ月後の架橋地点の様子を示す。同



図-23 被災前の第1三篠川橋梁 (Googleを引用)

橋はコンクリート橋脚3基 (RC橋脚かどうかは不明) と重力式石積み橋脚2基および橋台2基からなる下部構造が、2主鋼I桁で構成される6径間単純桁の上部構造を支持する橋長83mの構造からなる。左岸側のコンクリート橋脚は2つとも目立った外観上の損傷は見られなかったが、石積み式の橋脚が下流側に押し倒され、



図-20 三篠川にかかる橋梁の位置関係 (Google を引用)



(a) 全体



(b) 橋脚上部に水位痕

図-21 第1三篠川橋梁の被災

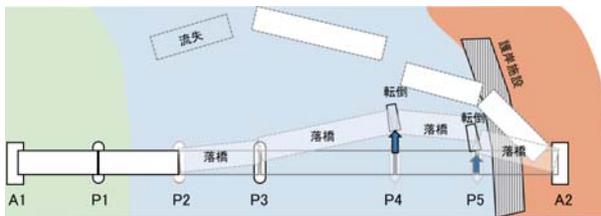


図-24 被災した第1三篠川橋梁の橋桁と橋脚の位置関係

上部構造である2主鋼I桁が流失し、さらに下流側に流下している。また、橋脚の上に流木等が残っていることと、桁部に付随する検査路の柵に草木が残っている様子から、洪水時の水位はこれらを乗り越えたと推察される。

左岸側のP1橋脚からP3橋脚はRCで作られた橋脚であるが、右岸側のP4およびP5橋脚は石積み橋脚となっている。この豪雨ではRC製のP1橋脚～P3橋脚は倒壊しなかったが、2つの石積みによる重力式橋脚の基礎から転倒していた。P4、P5の石積み橋脚は、川の流れを阻害しないよう、橋脚断面が上流側に尖角を持つ五角形で、最大30cm程度の石が密に敷き詰められた隙間にモルタルで固め、その外側を50cm～60cm程の大型岩石で固めた構造となっている。左岸側と右岸側で下部構造形式が異なる理由については、橋脚の構造形式が著しく異なることから、過去の災害等で架け替えられたものと推察される。

転倒を免れたコンクリート橋脚と倒壊した石積み式橋脚の間で、構造形式や材料強度が大きく異なること



(a)



(b)

写真-19 被災直後 (共同通信提供)

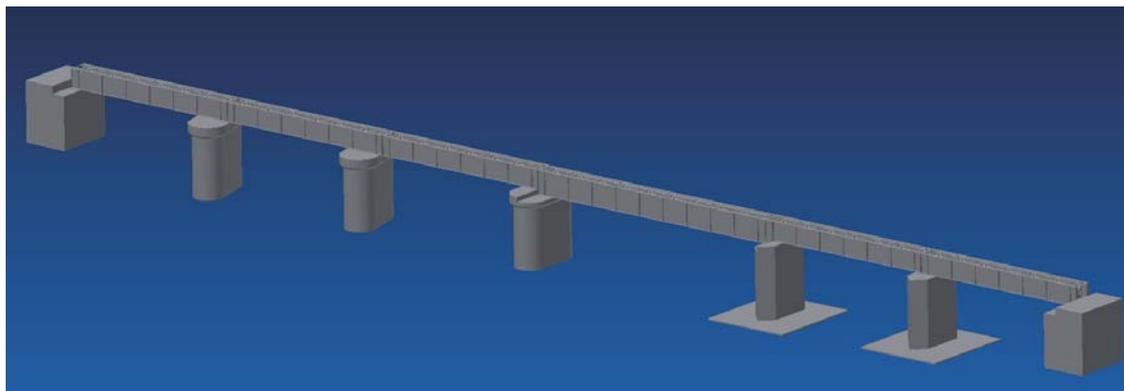


図-26 被災する前の第1三篠川橋梁全体の橋構造モデル



写真-20 復旧後の第1三篠川橋梁 (2021.8.29 撮影)

から、転倒の原因が下部構造の形式や材料に起因するのではという推測も成立する。しかし、右岸側の橋脚が川の外側に位置しており、図-22 に示す様に流速の差が影響したとも考えられるために、明確な原因の特定は難しい。

図-23 には、災害発生前の第1三篠川橋梁の様子を

以下に示す。左岸側（下流側）より4径間目が他の区間に比べてスパンが長くなっており、これにより桁高が高くなっている。周辺の浸水状況から災害当日は本橋梁が水没していたと推定され、橋桁が川の流れを阻害していたとすると、受圧面積の違いからこの区間の桁（第4径間）が最も大きな流体力を受けていたと考



(a) 被災2年後(2020.8.30)



(a)



(b) 被災2年後(2020.8.30)



(b)

写真-17 2年後の建設中の安駄橋(2020.8.30撮影)



(c) 被災3年後(2021.8.29)

写真-13 被災後の高瀬橋の状況



図-25 被災した第1三篠川橋梁の橋桁と橋脚の位置関係

えられる。

写真-19には発災後の第1三篠川橋梁上部構造の流失状況を示す。また、図-24には上部構造の流失状況から推定される橋梁部位の崩壊位置を示す。洪水時、水位が桁高まで達し、P2橋脚～A2橋台間の上部構造側面に大きな流体力が作用するようになった。さらに流速の増加に伴い、その流体力が大きくなり、上部構造を支持する下部構造ごと押し倒したと考えられる。さらに、洪水の流れとともに、上部構造が下流側に流されたと考えられる。

図-25には発災後の第1三篠川橋梁の損傷状況を示すが、倒壊した石積み橋脚は転倒後も元位置から1m以上上下流側に流されている他、上部構造も10m以上上下流側に流されていることから、相当な流体力でこれらを押し流したことが示唆される。図-26は、被災前の第1三篠川橋梁の橋桁全体構成からなる3次元構造DXモデルを示す。この橋桁の右側4径間分が流出崩壊し、2つの石積み橋脚P4,P5が倒壊した。



(a)



(b)

写真-18 3年後の建設中の安駄橋 (2021.8.29 撮影)

この橋梁形式の流出による崩壊メカニズムに関しては、別途 ASCE の被災調査と崩壊時の分析を技術論文としてまとめている¹⁷⁾。

今回の洪水時流体力から等価な地震時保有水平耐力係数の比率も割り出し、標準的な耐震補強性能の2倍であったことが判明した。この結果は、既往の計画高水位だけの橋設計の考え方と耐震性能の不十分さを示唆していることがわかった。写真-20 に復旧後の3径間連続プレートガーター構造形式の架橋状況を示す。

(9) 鋼吊橋

本橋は、無名の鋼吊橋(中央径間約40m)であり、県道37号線の側道から対岸を結ぶ人道橋であった。図-27に示すように、本橋の約400m上流側にはJR芸備線の第1三篠川橋梁が位置しており、この橋梁にも鋼桁の流失など甚大な被害が発生していた。本吊橋は、河川の平面形状として急激に左側へ湾曲する位置に架設されていたことから、右岸側の洗掘による護岸崩壊が著しかった。

写真-21に左岸側の被災状況を示す。本橋の主径間は、橋床をポニー形式のワーレントラスで支え、この

補剛トラスをハンガーロープ(丸鋼)で吊られていた。右岸側の主塔を支える橋脚が崩壊したことによって右岸側の主径間も崩落・冠水し、抗力によってハンガーロープが破断したと考えられる。その結果、図(a)のように下流方向に主径間が横たわり、左岸下流側のアンカーボルトで吊り下がっている状況となった。図(a)中に印を付した上流側のアンカーボルトは橋台に埋め込まれていたが、図(b)のようにベースプレートが付いたまま引き抜かれた状況であった。一方、流失した補剛トラス先端に位置する右岸側の支承部は、図(c)のように長孔のアンカーボルト孔が大きく拡大変形していたが、アンカーボルトは確認できなかった。

本橋のハンガーロープは直径約20mmの丸鋼である。これらのハンガーロープの先端を輪状に溶接し、メインケーブルと補剛トラス格点部のU字フックに取り付けて定着させていた。図(d)は破断したハンガーロープの例を示す。このハンガーロープは過大な引張力によって丸鋼自体が破断しているが、ロープ先端の溶接部で破断しているものも多数確認された。

右岸側では、護岸の著しい崩落とともに主塔を支えていた橋脚(写真-22)が完全に崩壊しており、主塔が水没している様子が写真-22(a)から確認できる。図-27(b)のように、本来堤体の天端よりも高い位置に上部工が位置していたはずであり、主塔の崩落が右岸側の上部工の冠水を引き起こしたことが推測できる。また、側径間の上流側には巨岩が露出している。写真-22(b)は右岸側の橋台から撮影した側径間と主塔の様子である。図から、主塔を支える橋脚のフーチング部分が下流側に確認できるが、橋脚の躯体は水没しているとみられ、視認できなかった。

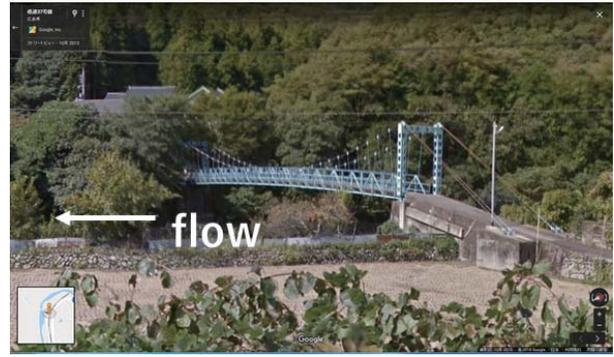
写真-22(c),(d)は右岸橋台の上流側(巨岩の背面)の様子である。主塔を支えていた橋脚は、蛇行流による洗掘作用を前面から受けていたと思われるが、巨岩の背面に回り込んだ水流が橋台の側方において、狭く深い洗掘を生じていることから、橋脚の背後からも強い水流を受けて基部の洗掘が助長された可能性も考えられる。

(10) 轟橋

2本のRCラーメン式橋脚と合成桁からなる橋幅が2m弱の轟橋の被災前と被災後を図-28に示す。左図は同じ視点での橋の被災前と被災後を比較したものである。手前の橋脚から対岸までの橋桁部が流下し、対岸の橋脚も倒壊している。右図は、元の位置から100mほど下流に流された橋桁であり、橋桁部のガードレールも存在しないことから、流れが激しかったことが推測される。ちょうど橋の前に半階ほど高くなっている家



(a) 鋼吊橋の位置



(b) 被災前の鋼吊橋

図-27 鋼吊橋 (Google を引用)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

写真-21 被災した鋼吊橋 (左岸東側)

があり、住民の話では、当時玄関口まで水位が上がってきたとのことであった。

図-29 は、倒壊した柱式の橋脚の形態である。幾何学的に RC 橋脚がサンドイッチのように崩れていることが分かる。特に、中央の横梁の両端接続部が回転変形を伴いながら裂けて鉄筋でつながっている様相で重なった。河川勾配はほとんどないと思うが、相当の流速があり、河川の流れに沿った川下側に根元のモーメントが大きい部位から折れて倒れていた。本橋の被災2年後の状況を写真-23 に示し、橋の復旧工事はなされていない。

(11) 大寺橋

大寺橋もほとんどが流され、調査に入った8月26日には既に河川に重機が持ち込まれ、工事車両用の搬入路が土砂で盛られ、図-30 のような状況であった。上図は被災前の橋風景を、下図は同じような視点からの被災後の合成図である。上図の被災前の左岸側には植林された低い堤防があり、被災後は破線で示された位置まで水位が到達している。橋脚は赤丸で示された位置で倒れており、2つの橋桁は RC 単純桁であり、それぞれ両岸に向かって 100m ほど下流の赤線矢印の位置に裏返った状態で留まった。手前の残った橋端部も橋上のアスファルトが剥がれ、欄干部に草木が付着し、沈

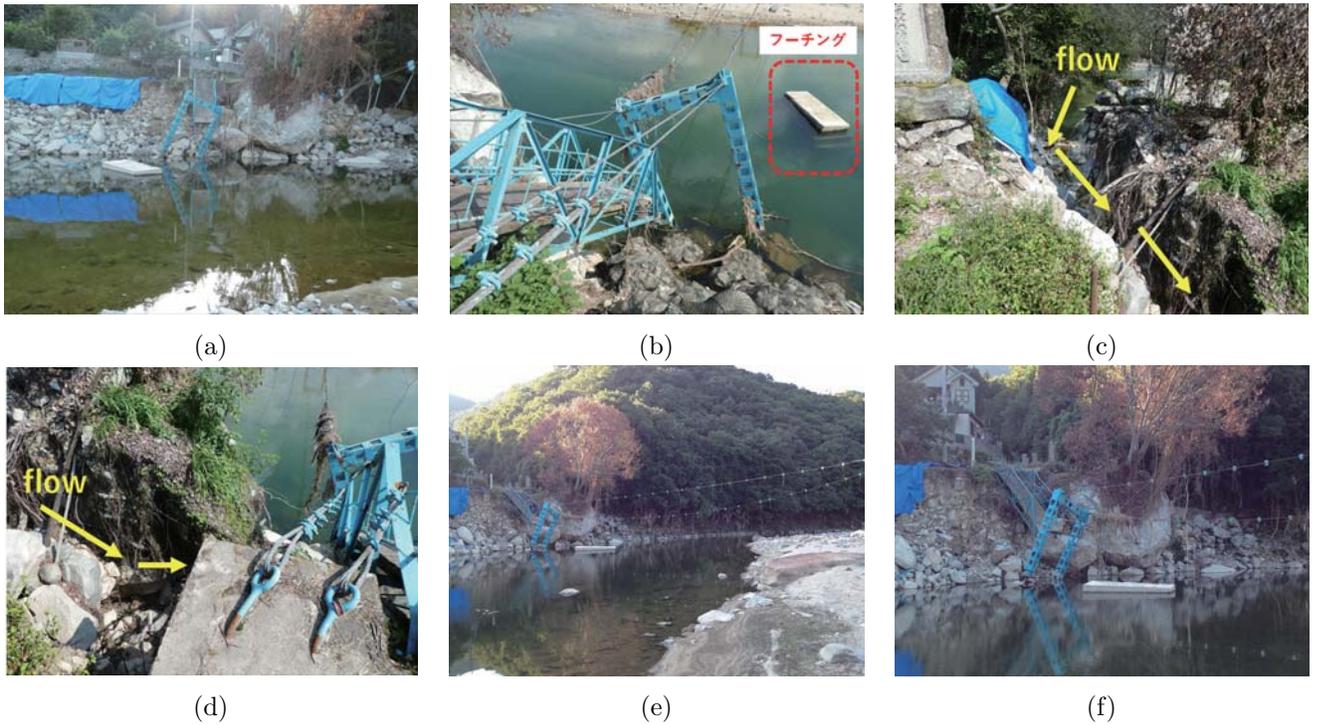
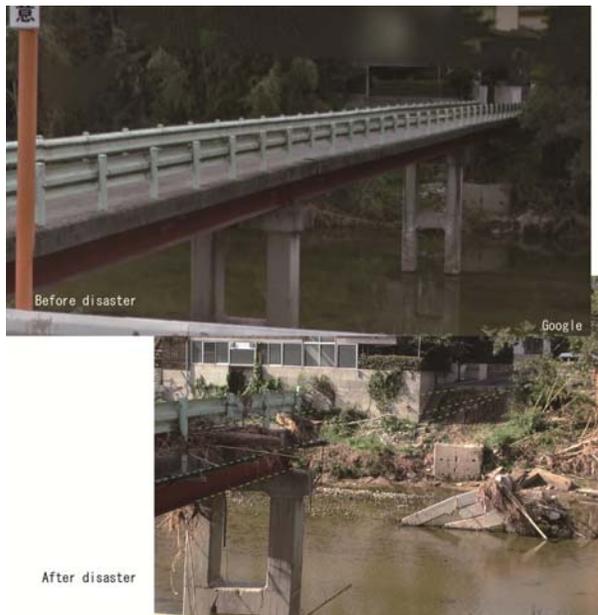


写真-22 被災した鋼吊橋 (右岸西側)



(a)

(b)

図-28 被災前後の轟橋 1

下橋のように沈んでいた．流出した橋桁等の水工障害物を早期に撤去しているものと思われるが，崩壊調査や分析がなされないと，繰り返される洪水に対する橋梁計画の対策や技術もより良いものにならない．橋の被災 2 年後の状況を写真-24 に示し，本橋の復旧工事もなされていなかった．

5. 東広島市の橋調査

(1) 中原橋 (RC 歩道橋)

中原橋は，広島県広島市安芸区上瀬野一町目に位置する，瀬野川にかかる RC 製の歩道橋 (中原橋) である．図-31 の地図に示すように，国道 2 号線バイパスに入

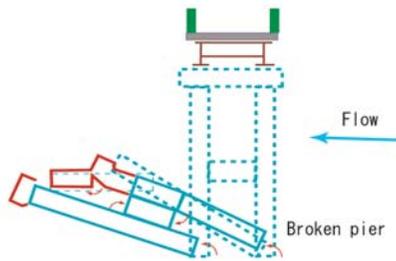


図-29 被災後の轟橋 2



図-30 被災前後の大寺橋



写真-23 被災2年後の轟橋の状況 (2020.8.30 撮影)



(a)



写真-24 被災2年後の状況 (2020.8.30 撮影)



(b)

写真-25 中原橋 (RC 歩道橋)



図-31 中原橋 (RC 歩道橋) の位置 (Google を引用)

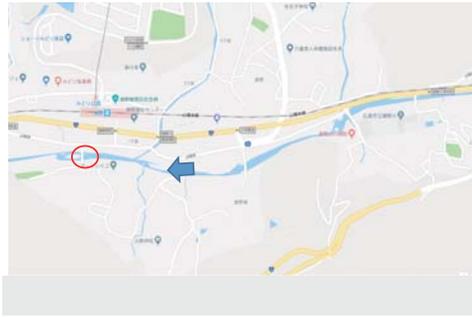
る箇所、瀬野川に架かる歩道橋である。橋の全長は約45mあり、3径間RC桁から構成されていた。写真-25は、中間部に位置する橋脚と左岸側2径間単純桁が下流に裏返って流された。手前の橋桁をよく観察すると、手すり部に枯れ草が留まっていることから、その位置

まで水位が到達し、橋桁等に直接流体力が作用し、橋脚と共に流出したものと推察される。中間橋脚の姿形もなく、橋桁部は観音開き状態で広がっていることから、橋脚が存在した位置は水流の勢いが激しかったことが推察できる。見かけ上、比較的新しいRC橋であるが、流出した。

図-32(a)に示す広島市安芸区瀬野一町目のJR瀬野駅近くの塚地橋が、図-32(b)の矢印のとおり、橋の下流側にRC桁ブロックが流出していた。図-32(c)に示すように橋桁と橋脚が大きく損傷し、原型をとどめていない。残った橋部に多くの草木が留まり、橋の中央が残りその両側が流失した。

(2) 一貫田橋

図-33に示す熊野川と瀬野川が合流する上瀬野地区の一貫田橋が写真-26のように落橋した。右岸側2径間および橋脚1基が流失した。平行する歩道橋は大きな被害はなく、車両用の橋が損傷している。歩道橋の方が1径間のスパンが長く、車両用の橋の方が短かった。倒壊した橋脚に土砂(一部流木)が大量に残されていた。護岸には桁が擦った跡が残されていた。橋脚が



(a) 被災現場位置 (Google を引用)



(b)



(c)

図-32 塚地橋



(a)



(b)

写真-26 一貫田橋



図-33 一貫田橋の位置 (Google を引用)

崩壊して、橋桁が落ちたものと推察される。

(3) 川原橋

東広島市瀬野から八本松へ向かう途中の国道 2 号線の脇に瀬野川に架かる川原橋も橋本体が流されていた(図-34)。流出した橋は軽トラが通行できる程度の幅で、その脇の護岸部も削られ、家の石垣の色も土砂で変色しており、その辺りまで水位が到達したことが推察される。この場所では、川の勾配もあり、大きな石も残っていることから、当時の水の勢いは激しかったものと推察される。

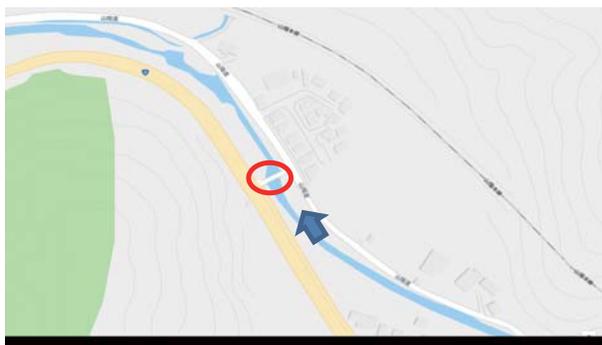
6. 安浦町の橋の被災事例

(1) 呉市安浦町の頓原橋の被災

被災場所は図-36 に示す中畑川に架かる頓原橋である。現場周辺の中畑川の右岸側が削られ、頓原橋が河川閉塞を起こし、河川の水が橋端の橋台背面上から舗装(アスファルト)や土を大きく削り、マンホール全体がむき出しとなっていた(写真-27(a))。その後、削れた部分を土で埋め戻し、仮復旧を終えていた(写真-27(b))。このように、橋台背面の土が削れるほど流量が大量に入り込んだことが分かる。

(2) 女垣内の集落の橋

呉市安浦町女垣内地区のスパン 10m 弱の RC 橋が流れ、4 世帯の集落が孤立した。この地区へ向かうには、県道 353 号線から脇道に私道 6m の位置に RC 製の橋を渡る必要があり、迂回路は存在しないため、橋を復旧しなければ通行できない。そのため、7 月 6 日の豪雨発生から 7 月 28 日までの 21 日間(3 週間)は車両が入れない状態で孤立していた。図-35、写真-28 は被災直後の RC 橋が流された状態で、橋部と橋台部が崩れて



(a) 被災現場の位置 (Google を引用)



(b) 被災状況

図-34 川原橋



(a)



(b) 被災現場の位置 (Google を引用)



(c)

図-35 女垣内の RC 橋

いた。表-1 の広島県災害対策本部の報告 [2] の「孤立状態にある地区の状態」に関して、発生原因が「崩土」と記載されていたが、実際は「落橋」による通行不可能な状態であった。豪雨や地震などのゲリラ的に発生する集落の孤立化問題の対策は喫緊の課題である。過去の広島土砂災害を教訓に地域防災上の橋インフラの備え等があれば、容易に対応できる事象かつ事例であろう。

図-28(a) は、7月21日時点では測量と建機で河川内のがれきの撤去作業中であった。この復旧作業期間内に大雨が降らなくてよかったが、最終的に7月28日に暫定的な仮橋が架けられた。



図-36 頓原橋の位置 (Google を引用)

7. 竹原・本郷町の被災事例

その他、竹原市内では写真-29 の中間橋脚の沈下した橋梁や、写真-30 のような橋脚が流出した橋梁などに被害があった。さらに、広島空港の近くの本郷町では沼田川が氾濫し、写真-31 に示す石積み橋脚からなるポニートラスが流出崩壊していた。

8. 橋梁の損傷について

過去の自然災害による橋梁の被災調査から、豪雨被害独特のいくつかの共通する事象があり、中小河川で生じたそれらの特徴的な橋の被災事象と原因を照合しながら考察する。今回の豪雨災害による橋の部位（橋台・橋脚、橋桁、洗掘部）の損傷箇所注目すると、図-37(a)



(a)



(b)

写真-29 中間橋脚の沈下



(a)



(b)



(c)

写真-31 ポニートラス橋の崩壊

に示すような桁橋の損傷パターンに分類することができる。橋台ならびに橋脚に異常があるとその上部の橋桁部に影響を与え、連鎖的に損傷している。橋桁部に異常があれば、橋台・橋脚に影響を与える場合もあれば、桁部単体で流出する場合も存在した。しかしながら、三篠川に架かる調査した橋梁には、直接的に土石流による被災した橋梁は見当たらなかった。中小規模の橋梁において、河川の計画高水位より低い位置にある既存の橋の設計時には、桁部にかかる流体荷重は想定していないので、その流体力に抵抗できない橋脚や橋桁は下流側に流される。今回の被害調査では、単純支持された橋桁部が下流に裏返った状態で流出したケースが多かったので、橋桁部にかかる流体力に対して、支承部による反力支持力が不足していることが推定される。すなわち、既設の橋梁設計において、洪水における桁部に浸かる流体荷重を想定していないので、その桁部が流出するかどうかの抵抗安定性を今後の橋の設計に

考慮していかなければならない課題と考えられる。

図-37(b)に2径間以上の単純支持された桁橋の典型的な損傷箇所を図-37(a)に基づいて提示する。この場合、中間橋脚に沈下や転倒などの異常があると、その上の両側の橋桁にも深刻な影響をもたらすことは明らかである。したがって、1径間桁橋の損傷よりも2径間以上の橋桁部が下流へ流出することになったり、桁が傾斜するなどの影響を受けたりする。復旧作業の範囲も広範囲となる。

図-37(c)は桁橋の損傷した部位に対する応急的な復旧方法と水工障害にならないように橋脚や桁の撤去やその後の新設を模式的に描いたものである。部分的に原状に復旧できるものと、致命的に橋がほぼ壊滅している場合には造り替える必要がある。今回調査した橋梁に対してそれらの損傷を図-37(d)のように分類した。橋脚・橋台部の崩壊による橋桁部の流出が多く見受けられた。図-37(e)は参考までに今回被災調査した橋の



(a) 被災後



写真-28 女垣内の RC 橋の復旧現場



(b) 盛土で埋戻し

写真-27 頓原橋



写真-30 水ノ口橋の無橋脚

構造形式毎に分類すると、単純 RC 桁からなる橋梁の損壊が多かった。

9. 洪水時の流体力による橋桁部や橋脚の安定性の検討の必要性

この洪水事象による被災した橋梁の調査から、橋梁が河川の最大計画高水位や想定される洪水高さよりも低く、河川勾配により流速が速い場合、新しい橋であっても、洪水の流体力が橋桁部に作用することを前提に設計されていなければ、橋が崩壊する可能性があることが判明した。現状の橋設計においては、橋桁部に流体力の荷重を想定していないので、同様の河川計画流量を超える豪雨規模になれば、各地の橋梁は崩壊や橋桁の一部が流出する恐れがある。

以下に、流体力が桁部に作用する際の橋の安定性を、モーメントの釣合合いから例示的に考えることとする。桁の流出や橋脚の安定性を説明するために、単純な桁橋

モデルを対象として、

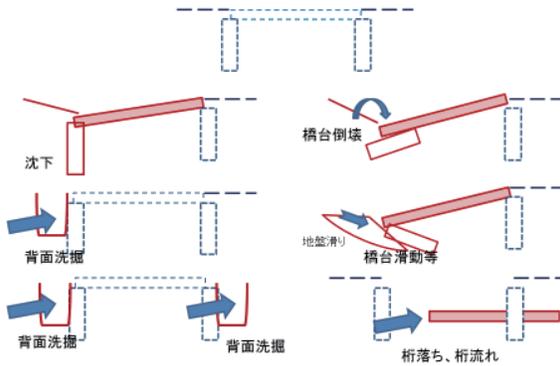
- i) 洪水時の深さ方向の流速分布を等分布 $w(y) = \text{一定}$ と考える、
- ii) この報文では、橋脚の転倒モーメント、桁部の支持点における転倒モーメントの釣合合いにより、橋の安定性を示唆することとする。
- iii) 橋桁部の流体力は、単純支持支点と仮定し、そのスパン分×桁浸水高さの投影面積相当に作用するものとし、その作用力の半分が片側の桁上部の支持反力として担うものと考えた。
- iv) 次の2つの検証箇所について、モーメントの釣合合いを想定した。

(1) 洪水時の重力式橋脚の簡易転倒安定性について

a) 作用モーメント

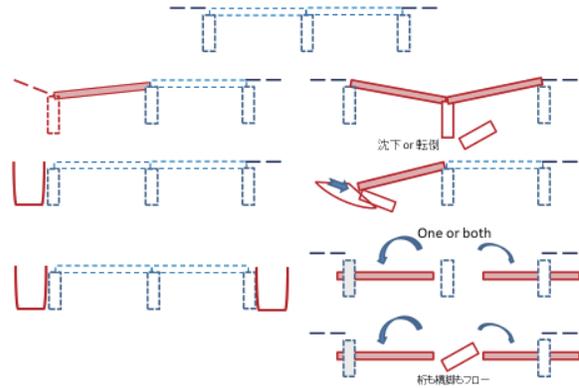
重力式無筋コンクリート橋脚根元の作用曲げモーメントについて、水理的な浮力の影響等も考えられるが実用的かつ簡易的に考えることとする。各部位に負荷

桁橋の損傷原因



(a) 桁橋の損傷部

2径間単純桁橋の損傷部



(b) 2径間の単純桁橋の損傷

桁橋の損傷部の復旧

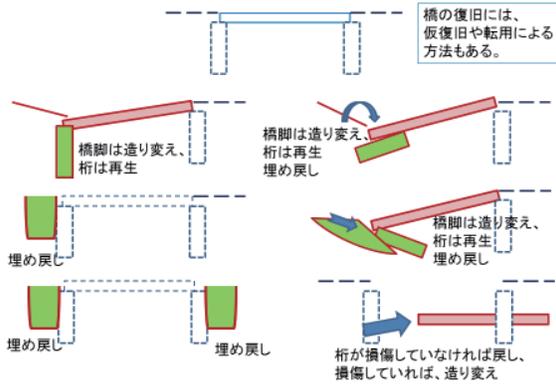
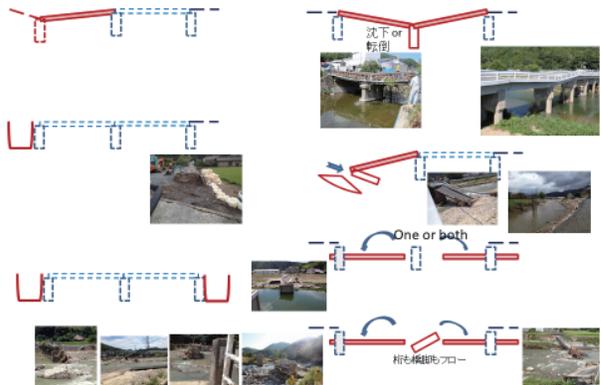


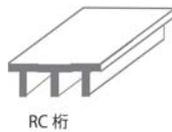
図6.3 桁橋損傷部位に対する復旧法(例示)

(c) 桁橋の損傷部復旧

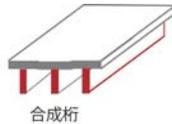
n径間単純桁橋の損傷分類と対象例



(d) 多径間単純桁橋の損傷



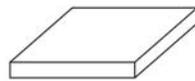
該当橋: 大寺橋
一貫田橋、塚地橋
頓原橋、鳥声橋、
市明橋、高瀬橋、中原橋



該当橋: 轟橋、上成井橋
水の口橋、実重橋、安駄橋、



該当橋: 下畑橋、迫田橋



該当橋: 川原橋、女垣内の橋



該当橋: 銅吊橋、民家用の吊橋(2橋)



該当橋: 第一三篠川橋梁

(e) 被災した橋の構造形式

図-37 橋梁の崩壊の事例分類

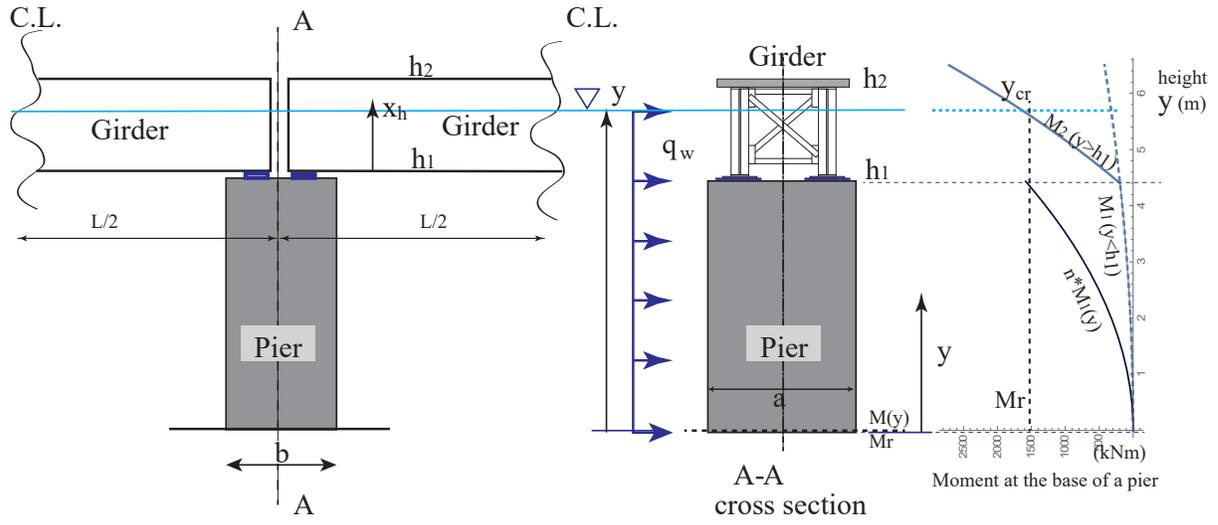
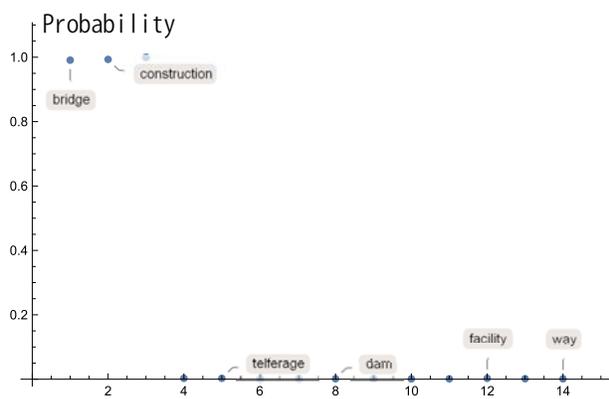
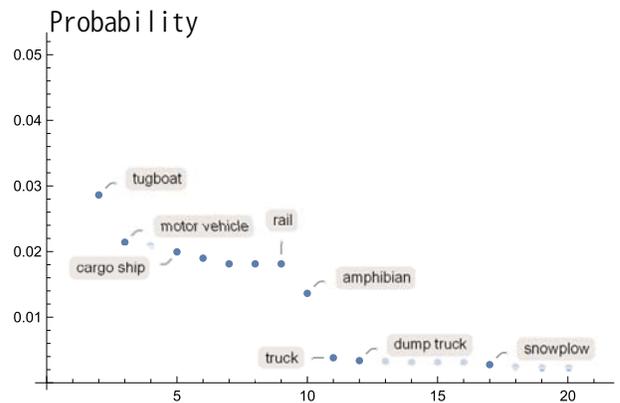


図-38 橋桁に流体力が作用する算定モデルと水位上昇に伴う橋脚基部のモーメント変化



(a) 被災前の画像図-27(b)の認識ワード



(b) 被災後の画像写真-21(a)の認識ワード

図-39 機械学習による橋の被災前後の画像の認識ワードの確率

が掛かるモーメントは

$$M_1 = wbyy/2 \quad \text{橋脚部} \quad (1)$$

$$M_2 = wL(y - h_1)((y - h_1)/2 + h_1) \quad \text{橋桁部} \quad (2)$$

を仮定する。ここに、 w は単位面積あたりの流体力、 b は橋脚の幅、 L は桁橋のスパン長さ、 h_1 は桁下までの高さ、 y は水位とする。例えば、想定する橋の与値 $L = 20\text{m}$ 、 $w = 1\text{t/m}^2$ 、 $h_1 = 5\text{m}$ 、 $b = 2\text{m}$ 、 $h_2 = 8\text{m}$ として、水位 y 上昇に伴う橋脚根元に掛かる作用モーメントの変化を、図-38 に示す。水位が橋桁部の h_1 に浸かり出すと、増加するモーメントの勾配が全く異なり、加速度的に負荷が大きく増加していることが分かる。

b) 抵抗モーメント

橋脚転倒の被害写真から、橋脚の表面は石積ブロックとその内部は栗石で固められた無筋の重力式橋脚の重量のみで抵抗するものと仮定する。したがって、各部の重量 R_1, R_2 は、

$$R_1 = W_1 \cdot b \cdot h_1 \quad \text{橋脚部} \quad (3)$$

$$R_2 = 4.3\text{t/m} \cdot L/2(\text{半分}) \cdot 2(\text{両側}) \quad \text{橋桁部} \quad (4)$$

$$= 50\text{tf}(\text{仮定}) \quad (5)$$

ここに、 W_1 は橋脚の単位体積重量とする。これらが、橋脚のほぼ中心にあるものとする、転倒モーメントのアームを橋脚の奥行き幅 a の半分と想定すると、

$$M_R = (R_1 + R_2) \cdot \frac{a}{2} \quad (6)$$

で表され、これらを転倒の安定性より

$$\begin{aligned} \text{転倒安全率} &= (\text{抵抗モーメント})/(\text{作用モーメント}) \\ &= \frac{M_R}{M_1 + M_2} > 1 \end{aligned} \quad (7)$$

であれば、橋脚の転倒は免れることになるが、1 以下の値では転倒することを表す。このことは、今回被災した第 1 三篠川橋梁の重力式橋脚の転倒時の崩壊に至らしめた際の流体力を推定することが可能となる。また、このことはこれだけに留まらず、地方の中小河川に架かる既存の橋梁の橋桁部に浸水する危険性がある場合には過去の洪水流速から、このタイプの橋脚が崩壊するか否かの簡易的な評価が可能となる。

全国の既存の重力式橋脚の転倒安定性や計画高水位以下に中小橋梁を新規に設計する場合には、橋桁部に浸水しても流出しないように、想定される橋梁(桁部)に掛かる流体力も考慮に入れた設計荷重・設計法を見直し、再検討する必要があることを意味する。この橋の被災調査は数値シミュレーション等の実験では得られない実際の構造物の物理挙動であるので、この事象調査は貴重な被災痕跡情報と今後の対策の一助を与えてくれる。

(2) 橋桁部のみ転倒流出について

橋桁部の流出被害において、ほとんどの橋桁部は、元的位置から下流に裏返った状態で流出していた事実から、桁のローリングを伴った流失と予測される。このことから、橋脚の安定性の他に、橋桁部の流出に抵抗しなければならない。この場合、橋桁部の支承部のボルト等の固定で十分かどうかの検討が必要になる。すなわち、支承位置からの転倒モーメントあるいはせん断力による安定性の検討が必要である。

10. まとめ

雨期シーズンを迎えると毎年のように風水害が発生し、降水強度 50mm/h を越え 80mm/h 以上の線状帯降雨の発生と断続的な雨の降り方が問題視され、その規模や多様な形で我々の生活環境を脅かすようになっている。特に、鉄道、道路や橋インフラは生活を営む上で欠かせない社会基盤であり、それらが寸断することによって、物流や人流に影響を与え、これまでの施設サービスの利便性が損なわれ、地域によっては復旧の遅れが生じる。今回の豪雨災害による橋梁の被災調査を、社会基盤系構造力学分野の学識経験者と技術者らと橋の被災現場を視察し、この事象を共有できたことは、貴重な機会であると共に、この橋構造物の損傷事象を科学的に分析し、現行設計法の不十分な設計対応・対策を講じていかなければならない。従来の橋梁復旧業務(橋梁被害査定(橋梁の原状復旧)から現行橋梁設計・施工仕様)に関して、今回の被災調査から、中小河川における被害を最小にするような各地の既往の中小橋梁の流出被害対策、流出しにくい橋の設計、流出する恐れに対する対策、流出したときの対策などの検討が必要であろう。すなわち、橋梁・構造技術者が橋の流域特性にも配慮し、現行設計と現実的な被害事象のギャップを埋めること、交通需要に見合った橋の復旧最適化法、ならびに橋復旧の時間と目標が肝要である。そのためには、流橋被害が単に耐震設計的な視点で同等と見なすことではなく、流域計画流量・計画高水位以上の設計時には想定していなかった橋桁部に氾濫時の流体力が作用する場合も考慮した対策や設計項目の必要性が浮き彫りになった。

西日本豪雨による橋梁群の被害調査と分析を通して、同様の流域環境条件にある既存の橋の流出防止対策や被災した橋の損傷度と健全度を科学的に調査しておくことは、適格な橋の管理運用と被害対応力(防災・減災対応)を向上させることができるものと考えられる。例えば、機械学習 AI の認識技術を用いて、鋼吊橋の被災前の画像図-27(b) と被災後の画像写真-21(a) を対象とする

と、それぞれ図-39となる。前者の被災前の画像では、認識されたキーワード‘bridge’が筆頭に現れ、その時の確率は「bridge=0.990865」と非常に高いのに対して、後者の被災後の画像ではそのキーワードそのものも現れていないので、教師無しの機械学習では‘bridge’と認識されていない。このことから、この被災した鋼吊橋は損傷度は認知されない程度に崩壊した認識数値とみなすことが可能であり、この数値から災害復旧の大まかな被害レベルを客観的に推定することが可能であり、災害後の人手がかかる現場のインフラ復旧に関して、最適な復旧手段と迅速な復旧アシストを可能とし、人命や財産に関わる被害レベルや復旧の重要性・緊急性・優先度などに活用できるものと期待する。

このことは、別の中小河川でも氾濫危険水位と越流量が発生の恐れがある場合には、合理的かつ体系的な被害軽減対策を実施することができる。橋梁が崩壊した場合には、その被害原因や破壊力を正しく分析し、橋梁に作用する外力と橋脚・橋梁の耐力を設計に反映させることは大切なことである。被災後の橋梁全体の健全度と、洪水時の河川流量と流速の推定、橋梁に作用する流体力の推定、橋梁被害から再発防止策や地域環境・立地条件に適した橋梁の耐力設計を考えていかなければならないことを示唆している。以下に、今回の事象から考えておかなければならないことも含め記しておく。

- i) 中小橋梁の被災後の状況については、橋の被災が限定的な寺山橋や実重橋は、盛土等のリペアと共に、生活に関わる上水道管の復旧工事を優先していた。橋梁は、車両や人の通行だけでなく、水道管や各種ケーブルなどの付属物も懸架されている場合があり、一旦橋が崩壊すると、単に人が渡橋するだけの問題ではなく、現代生活に欠かせない水や電気、通信などのライフラインも使用できなくなり、迅速な復旧が重要となっている。
- ii) 短時間雨量強度が50～80mm/h以上の線状降雨帯が長く続くようになり、中小河川では許容できる最大流量や氾濫危険水位を越えて、橋桁部が流水に浸かり、氾濫時の流速によっては、橋梁が崩壊するケースが増加してきた。これは、橋の設計時には、橋桁部の高さが計画高水位以上を想定、あるいは考慮しておらず、実際の被災では橋桁部に流水を受けていた。
- iii) この洪水時の水位が、橋梁の橋桁下の高さが計画高水位近くあるいはその高さを越えて、橋桁部に流木や流水が浸かり、橋桁が流出する可能性があると共に、橋台あるいは橋脚の倒壊等によって、それ

に支持されていた単純橋桁部が流出する被害ケースが多かった。橋台あるいは橋脚の倒壊は、その上部の橋桁部に損傷を与えることになるので、その倒壊対策や、現実の洪水時水位に対する橋の高さと、流体力に対する橋桁部の抵抗力を算定しておく必要がある。

11. 今後の対策等について

(1) 橋梁の桁断面の改善による流失対策

洪水時の流体力が橋桁に作用すると、その反力として、橋桁の支承・支持部に横ずれのせん断力が発生するとともに、もし橋桁と橋脚が一体構造であれば橋脚基部にも大きなモーメントが発生する¹。このような橋桁部への流体力の作用は、橋梁を建設する計画段階の設計条件において、河川水位から橋桁位置までのクリアランス(高さ)の確保の前提条件が崩れるので、橋梁全体は設計想定外の流体力の外力が加わり、これに耐えなければならない。すなわち、橋梁の耐流水問題が浮上してくる。これは、橋梁の構造側の内的抵抗問題と共に、流体力の大きさと振る舞いなどの外力作用要因との平衡安定性や流体-構造連成問題の議論が必要となる。そういう意味では、橋の耐震対策は橋本体の限定的な耐力性能の向上で設計法も確立しているが、橋の耐流水対策は橋周辺の浸水被害や洗掘問題なども影響し、橋設計の前提条件が個々の橋事情や河川条件によって異なるので複合的な設計条件も考えていく必要がある。

例えば、橋桁部に揚力が発生すると、橋桁が浮き上がるように橋桁がローリングし、その結果、橋桁が下流側に裏返って流失してしまう場合もある。このことから逆に、浸水した橋桁に対して、流体力学的な抗力係数が小さい橋桁断面を採用することができれば、洪水時流出しにくい橋梁を構築することは可能である。すなわち、吊橋系の補剛桁部において、耐風安定性を考慮した流体弾性力学的な橋桁断面を翼断面(フェアリング)を採用するように、水流においても橋桁を流出しにくい流体力学的な知見を利用し、橋桁の安定性を高めることができる¹⁶⁾。このような耐流体力効果を有する橋桁断面は、流れにより断面方向に発生する抗力と揚力を計算し、流体力が橋桁の側面に抵抗する面積をできる限り小さくするように橋桁の抗力を小さくし、橋桁の水平(橋軸直角)方向に対してせん断抵抗力を向上させるとともに、揚力も抑えられ、橋を流失させにく

¹ 令和2年7月豪雨の球磨川流域の数多くの流失した橋梁を調査した結果、そのような要因で支承・支持付近の破損(西瀬橋、相良橋、坂本橋、深水橋など)や橋脚基部に大きな損傷(沖鶴橋、球磨川第1鉄橋)が見られた。

くすることが可能である。

あるいは、洪水時の越流時のみの加速度的な流体力の増加要因のみに着目し、橋脚の転倒安定式を活用し、橋脚の幅 a を大きくするか、あるいは、橋桁高さ h_1 を低くすることが、工学的に耐流水安定性を改善できる設計変数と設計値を与える。しかしながら、現実的に鉄道橋の h_1 は低くできないので、被災の重力式の橋脚の場合であれば、 a を大きくするか、RC 橋脚に改善すべきことが判明した。

今回の洪水で流失した橋梁復旧に関しては、既存の河川計画の最大流量に基づいた復旧計画や施工では、最近の雨量強度が大きく異なるので、拙速な復旧計画や設計対応ではなく、洪水は氾濫時も想定した橋桁部の高さ、構造形式、支承の構造の見直し、耐流と流木対策などの橋桁部も含めた耐流設計が必要である。すなわち、橋脚本数を減らし鉸桁の橋桁高さを単に大きくした橋桁の剛性では、再度洪水時に水工障害や流木が衝突し堰化する懸念や課題が存在する。特に、既往の橋桁の反力部では今回のような流体力想定に対する川下側の水平反力の確保が必要であり、そのような支持構造が無いと桁の支承部周辺から損傷する懸念も存在する。

(2) 流失した橋梁被害から学ぶべきことと既存の橋梁対策

ここで取り上げた広島県の三篠川流域の橋梁群の流出²、最近の線状降雨帯の発生や降雨強度の強さから既存の河川橋梁においても、橋桁部の耐流出対策や流出しにくい対策が必要である。

橋脚による河積阻害率を改善するとともに、橋梁の構造形式を変更するなどして、橋梁の桁下空間を確保することによって、河川の流量を増やし、例え橋桁を越水しても橋の構造特性や構造安定性から被害を少なくすることは、重要な工学的・科学的視点である。また、無筋の橋脚に対して補強耐力や橋脚の転倒を防止するような断面補強は有効な対策であろう。

今回調査分析対象外の被災した橋梁においても、橋脚や橋台周辺に水流による洗掘事象によって、倒壊した鳥声橋、安駄橋などや、橋脚が沈下した高瀬橋、市明橋などの事例が存在したことから⁵⁾、洗掘防止対策の川床固めなどの補強や橋脚そのものの改修も必要があり、それらも含めた計画高水位以上の河川の流水外力と橋構造物の一体化させての、流失しにくい橋設計が望まれる。

このような洪水事象によって橋が実際に被災し、計

画の想定とのギャップを埋めるとともに、例え橋桁部に浸かるような計画水位を越水したとしても橋脚や橋桁が崩壊に至らしめない橋梁設計対策を考え、既存の中小河川における橋梁の耐流出対策を施しておくことは、ライフラインを守る上でも大切なことである。

流失した橋梁では、それぞれの橋桁部にも流体力が作用し、設計を越える作用モーメントに抵抗できなかった可能性が大きい。このことは、全国の中小河川に掛かる、既存の橋梁でも氾濫時危険水位が橋桁に架かるような橋梁は流出する可能性を暗示しており、流況に伴う橋梁の点検、流水や流木による橋桁の補強などの対策も考えられる。

これらの河川橋梁の損傷の程度を数値指標的な被害レベルとして位置づけて復旧しやすさや被害の大小関係を把握するためにも、この水害による被災記録は地域災害の深刻さと大きさにおいてライフラインを計画・構築する上で大切であり、このような超過洪水に対する橋梁の耐流水設計の必要性を浮き彫りにし、今後の超過洪水に備える必要があることを示唆する。

(3) 結語

今回の被災した橋梁（橋脚・橋桁等）の現場の崩壊状況の被災調査から、河川の重要な施設設計の基となる洪水時流量や洪水時流体力を推定し、石積み式橋脚の平衡安定問題から崩壊原因を明らかにした。その他、以下の通りである。

- i) 一様流速の仮定で、今回の洪水による橋梁の崩壊事象の調査分析から橋脚と橋桁に対する流体力と推定流量を算定し、その安定性と水理特性値を明らかにした。
- ii) 今回の洪水事象によって橋梁が崩壊し、計画設計時の想定を大きく越える事象が生じたことから、例え増水し橋桁まで水位が達しても、橋桁の流体力を含め崩壊しにくい橋梁設計ならびに、既存の中小橋梁に対する耐流水・耐流失対策が急がれる。また、重力式橋脚であってもフーチングの改修等によってその流体力に抵抗できる設計や補強対策が望まれる。
- iii) 本橋の被災検証から、計画高水流量の 1.37 倍以上を算出するとともに、増水時橋桁が浸からないように、橋脚高さ（桁下空間）の確保が必要である。越流しても桁高の受ける抵抗を小さくできる橋梁構造が望まれる。
- iv) 近年の雨量強度 50mm/h から 80mm/h 以上の降水が断続的に続く危険な集中豪雨が現れるようになり、既存の中小橋梁の橋桁部に越水する危険性

² 令和 2 年 7 月豪雨の球磨川流域の数多くの流失した橋梁も深刻な問題をもたらした。

がある場合には、流水に対する橋脚と橋桁の安定性・安全性を確認しておく必要がある。

- v) 洪水による各地の中小河川に架かる橋梁の流失を防ぐために、橋梁設計において、流水荷重を想定するとともに、耐流水性と抗力係数を低減し、流出しにくい橋桁断面と流水に対して転倒しにくい橋脚によって、橋梁が崩壊に至らしめない技術や崩壊したとしても復旧が容易な対策が望まれる。

最後に、気象の極端化によって、国内の中小河川の中小橋梁の数と現行設計に準じておらず再生しなければならない橋梁群は大半であろう。これらを全て更新させていくことは得策ではなく、ポスト災害の状況を踏まえた耐流体力を想定した橋設計や迅速な対応が可能な架橋最適化などの新たな対策や技術導入を考えていく必要性がある。

謝辞

土木学会中国支部西日本豪雨災害被災橋の現地調査ならびに報告書作成に関わっていただいた関係者と、当時修士学生の濱優太君、横谷祐樹君、八木郁哉君、学部生の安藤貴博君には、被災調査の同行と資料作成に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 防災, 全国防災協会機関誌 809号, 平成 28年 11月 (2018)
- 2) 広島大学 豪雨による被災インフラ調査記録, 令和 2年 7月豪雨橋流失調査 (7.23,24,25), 令和 2年 8月 (2020.8)
<https://home.hiroshima-u.ac.jp/bridge/disaster-2020.htm>
- 3) 土木学会 構造工学委員会「災害時の緊急架設を目的とした緊急仮設橋に関する調査」小委員会 報告書, 令和 2年 3月 (2020)
<https://committees.jsce.or.jp/struct18/node/1>
- 4) 石井一郎・丸山暉彦・元田良孝・姫野賢治・亀野辰三: 防災工学, 森北出版 (1999)
- 5) 2018年 7月西日本豪雨災害調査報告書, 2018年 7月西日本豪雨土木学会中国支部緊急災害調査団 (橋梁災害調査) (2019)
- 6) 有尾一郎, 横谷祐樹, 濱 優太: 豪雨による橋の流出被害とその対策について, 平成 30年自然災害フォーラム & 第 13回南海地震四国地域学術シンポジウム (2018)
- 7) 有尾一郎・横谷祐樹・椿涼太 他: 洪水による鉸桁橋梁の崩壊事象からの流体力・流量の推定, 土木学会中国支部研究発表会 (2019)
- 8) 広島県災害対策本部平成 30年 7月豪雨災害報告, 広島県危機管理課 (2018.7)
- 9) 一級河川太田川水系三篠川ブロック河川整備計画, 広島県土木建築局河川課 (2011.12)
- 10) 今田吉貴・渡邊学歩, 橋梁構造周囲の水面形および浸水率に基づく抗力係数に関する研究, 土木学会構造工学論文集, vol.68, (2022.4)
- 11) 国土交通省, 三篠川において災害復旧助成事業に着手, H30.7 豪雨三篠川助成事業プレスリリース (2018.12)
- 12) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., Fukami, K.: Rainfall-Runoff-Inundation Analysis

of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, 57(2), pp.298 ~ 312 (2012).

- 13) 広島県:平成 30年 7月豪雨災害を踏まえた今後の水害・土砂災害対策のあり方検討会, 第 2回河川・ダム部会 (平成 30年 10月 24日), 資料 7,2018.
<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/99/arikatakento.html> (2019年 3月 11日確認)
- 14) 椿涼太, 河原能久, 塚井誠人: 中山間地域における計画規模を越えた降雨による洪水氾濫被害特性, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No.1.11-25(2016)
- 15) 玉井信行・石野和男・榎田真也・前野詩朗・渡邊康玄: 豪雨による河川橋梁災害-その原因と対策-, 技報堂出版 (2015)
- 16) 橋梁, 特開 2014-084689 (2019), 国立大学法人広島大学産学・地域連携センター (知的財産部門)(2019)
- 17) I. Ario, T. Yamashita, R. Tsubaki, S. Kawamura, T. Uchida, G. Watanabe, A. Fujiwara, Investigation of Bridge Collapse Phenomena due to Heavy Rain Floods: Structural, Hydraulic, and Hydrological Analysis, Journal of Bridge Engineering (ASCE) (2022)
doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001905

正誤表

場所	正	誤
4 頁 左段 13 行目	2018 年	201 年
22 頁 右段 3 行目	一丁目	一町目
24 頁 右段 7 行目	一丁目	一町目
32 頁 右段 9 行目	橋桁に	橋桁にに