

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

FIELD OBSERVATION AND NUMERICAL ANALYSIS FOR THE KYUSEN
BRIDGE COLLAPSE CAUSED BY HOKKAIDO HEAVY RAIN IN 2016

井上卓也¹・サムナー圭希²・加藤一夫²・六浦和明³・矢部浩規¹・清水康行⁴
Takuya INOUE, Tamaki SUMNER, Kazuo KATO, Kazuaki MUTSUURA, Hiroki YABE and
Yasuyuki SHIMIZU

¹正会員 工博 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²正会員 株式会社 水工リサーチ (〒062-0933 札幌市豊平区平岸3条3丁目2-7)

³正会員 工修 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-0813 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 工博 北海道大学大学院 工学研究院 教授 (〒060-0813 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

Many bridges were broken due to a large channel change during the Hokkaido heavy rain in 2016. We investigated the damage situation of the four bridges (the Kyusen Bridge, the Chiroro Bridge, the Kobayashi Bridge and the Kiyomi Bridge) immediately after the flood. Then we analyzed the collapse mechanism of the Kyusen Bridge using a two-dimensional riverbed deformation model (iRIC – Nays2D).

According to the observation result, the bed height near the Kyusen Bridge rose about 2 m. This implies that sediment supply was large during the flood. The results of numerical simulations indicated that the river bank was eroded largely due to both of a large flow discharge and a sufficient supply of sediment.

Key Words : bridge disaster, river bank erosion, field observation, numerical simulation

1. はじめに

北海道では、平成28年8月17日から23日にかけての1週間に、3つの台風が上陸し河川の氾濫や土砂災害が多数発生した。また、8月29日からの前線に伴う降雨、その後の台風10号の接近に伴う地形性降雨により、記録的な大雨となった。一連の大雨は、河川の大規模な流路変動を招き、全道で133の橋梁被災を引き起こした(国道で15、道道および市町村道で118、平成28年9月27日時点)。さらに、橋梁の被災とそれに伴う道路の寸断は、住民の生活や農作物の輸送に大きな爪痕を残した。

被災箇所の多くは中山間地に位置しており、大量の土砂により川底が上昇傾向にあった。このため、土砂流入が河岸侵食に何らかの影響を与えた可能性が示唆されているが、これまでに交互砂州と土砂流入の関係を調べた研究はあるものの^{1), 2), 3), 4), 5)}、河岸侵食と土砂流入の関係を調査した事例は少なく、不明な部分が多いのが現状である。

そこで本研究では、災害直後の8月31日、9月1日に実

施した現地調査の概要報告を行うと共に、九線橋を対象に実施した大規模な流路変動の発生要因に関する数値実験結果を報告する。九線橋を対象とした理由は、平成22年洪水において、河床洗掘により中央の橋脚が被災しており、右岸橋台が被災した平成28年洪水との比較により、被災要因を抽出できると考えたためである。

2. 北海道の橋梁被災状況の調査報告

ここでは、北海道豪雨における橋梁被災の特徴を伝えるために、4つの橋梁の被災状況を報告する。

(1) 千呂露橋(日高町)

千呂露橋は、沙流川に架かる橋長83.8mの3径間(橋脚間はそれぞれ27m)の橋で、昭和35年に共用開始されている。河道は緩やかに蛇行しており、湾曲部の外岸にあたる右岸が侵食され、橋台が沈下、橋台背面道路が流出した。橋梁下流側に位置する家屋は、河岸侵食により基盤部が流出し、オーバーハングしていた。



図-1 千呂露橋被災状況(aは北海道開発局提供)



図-2 清見橋被災状況(aは北海道庁提供)

国道274号線（日勝峠）では、千呂露橋を含む10橋に加え、覆道など合計66箇所が被災し、2017年3月現在も通行止めとなっている。

(2) 清見橋（清水町）

清見橋は、ペケレベツ川を渡河する橋長37.6mの3径間（橋脚間はそれぞれ12.5m）の橋で、昭和38年に共用開始されている。洪水前の清見橋上流河道は直線に近かったが、洪水により河岸が交互に侵食され、左岸橋台の背面道路が流出した（図-2）。橋脚の間には、大量の流木が引っかかっており、河道閉塞により行き場の無くなった水が橋台背面に集中し、侵食を促進した可能性がある。

(3) 小林橋（清水町）

小林橋は、小林川に架かる橋長37.6mの3径間（橋脚間はそれぞれ12.5m）の橋で、昭和38年に共用開始されている。平時の小林川は、川幅10m程度の非常に小さな河川だが、今回の洪水により、左岸が大規模に侵食され、



図-3小林橋航空写真(北海道開発局提供)

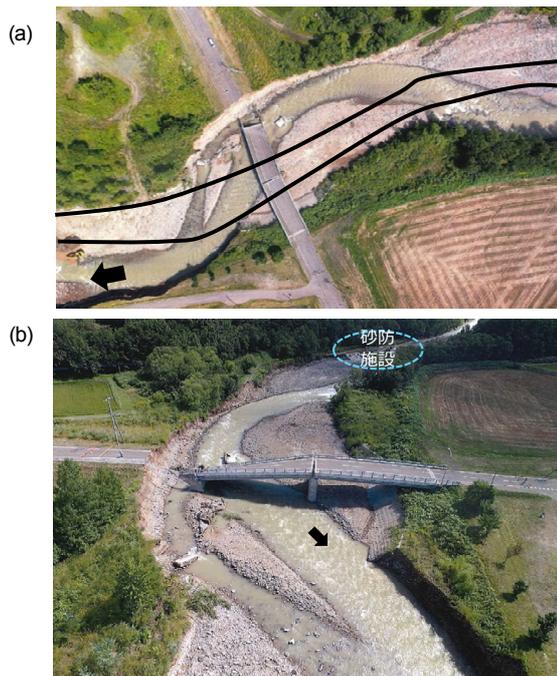


図-4 九線橋被災状況(a, bは北海道開発局提供)

川幅が約10倍に広がり、左岸橋台が沈下し、背面道路が80mにわたり流失した（図-3）。

橋梁の上流側には、流木が大量に引っかかっているが、被災時に現場を見ていた北海道開発局職員によると、先に橋台背面が侵食され、主流が左岸側へ移り、流れの遅くなった右岸側へ徐々に流木が堆積したとのことだった。このことから、流木の堆積による河道閉塞が橋脚被災の主要因でなく、上流側河道の湾曲に起因する河岸侵食により橋台が被災したと類推される。

(4) 九線橋（美瑛町）

九線橋は、辺別川に架かる橋長58.7mの2径間の橋で、

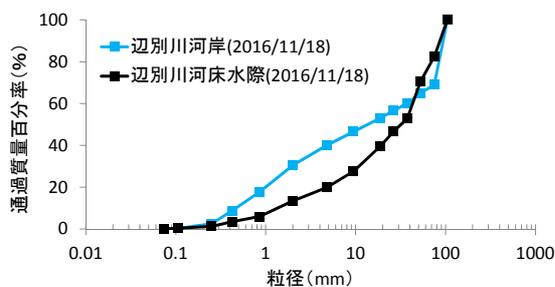


図-5 九線橋付近の河床材料調査結果

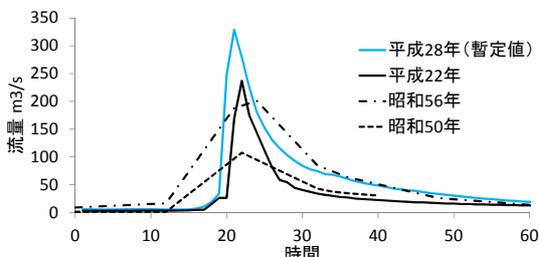


図-6 九線橋付近の推定流量

昭和57年に竣工されている。橋の右岸が長さ約175m、幅23mで侵食され、左岸側に砂州が形成されていた(図-4)。右岸橋台が洗掘により傾斜沈下し、上部構造主桁にねじれによるひび割れがあった。洪水時にその場にいた美瑛町職員の話では、橋上面は浸水しておらず、橋台はゆっくりと沈んでいった。以上のことから、河岸侵食によって橋台を支持する土砂が徐々に流出し、沈下に至ったと推測される。なお、九線橋は平成22年洪水でも被災しており、その時は河床が1~2m程度低下し、中央部の橋脚が被災した。

平成21年に測量されたLPデータによると、九線橋付近の右岸の河岸高さは7mであったが、洪水後に筆者らが行った河岸高の現地測量によると、右岸の河岸高さは5mになっており、今回の洪水により河床が2mほど上昇したことが伺える。また、河岸と河床の粒径を調査したところ、河岸材料のd60は37mmに対し、河床材料のd60は43mmであり、わずかに河床材料の方が粗いものの、概ね同じサイズであった(図-5)。

3. 九線橋被災メカニズムの解析

九線橋を対象に、平面2次元河床変動モデル(iRIC Nays2D⁶⁾)を用いて、流量規模、洪水継続時間、土砂供給量が河岸侵食に及ぼす影響の解析を行った。初期地形は平成21年LPデータ、河床材料粒径は上述の調査結果から40mm(単一粒径)とした。河岸侵食は、河岸の角度が45度以上になると崩落するモデルを用いた。

(1) 数値実験の条件

九線橋地点の流量は観測されていないため、下流にある辺別川18号水位流量観測所のデータを、九線橋上流域

表-1 数値実験条件

ケース名	流量m ³ /s	洪水時間hr	給砂条件
0	平成28年ハイドロ		動的平衡
1	100	3	〃
2	200	3	〃
3	300	3	〃
4	200	7	〃
5	300	7	〃
6	200→300	3	〃
7	300→200	3	〃
8	300	3	給砂なし
9	200	3	給砂なし

の流域面積(76.4km²)と18号観測所上流域の流域面積(189km²)の比で補正し用いることとした。九線橋地点における平成28年洪水の推定流量は328m³/s、平成22年洪水の推定流量は236m³/sである(図-6)。

まずモデルの妥当性を検証するために、図-6に示した平成28年洪水の推定流量ハイドロを与え、右岸侵食幅が再現できるか確認した。次に、流量規模の影響を分析するために、100m³/s、200m³/s、300m³/sを一定流量で3時間与える計算を実施した(表-1のケース1~3)。

平成22年洪水と平成28年洪水の波形は類似しているが、流量規模が異なるため、洪水継続時間が若干異なる。そこで洪水継続時間の影響を調べるために、200m³/s一定および300m³/s一定の条件下で、洪水時間を7時間とした計算を実施した(ケース4と5)。

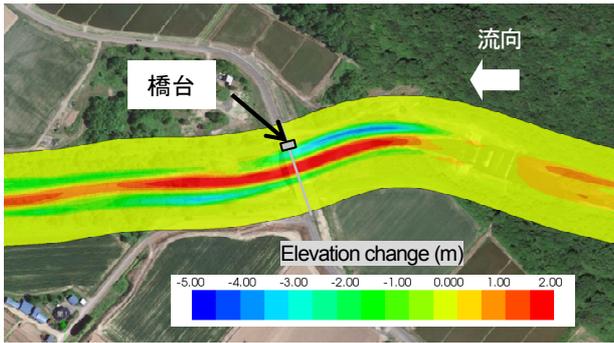
河岸侵食は流量減衰期に進行する場合が多い(例えば7)。そこで、流量上昇期と減衰期の河岸侵食幅の違いについて感度分析を行った。ケース6は流量上昇期を想定し、200m³/sから300m³/sに3時間掛けて線形的に流量を増加させおろし、ケース7は流量減衰期を想定し、300m³/sから200m³/sに流量を減少させている。

九線橋の直上流は砂防区間となっており、溪流保全工が昭和59年~平成元年にかけて整備されている。辺別川流域は、昭和56年洪水の後、平成22年洪水まで大きな出水を経験しておらず、平成22年洪水時に上述の砂防施設が大きな効果を発揮し、土砂の流出が減少していた可能性がある。そこで、計算領域上流端から動的平衡流砂量を与えた場合(ケース2, 3)、土砂供給量を与えない場合の比較を行った(ケース8, 9)。

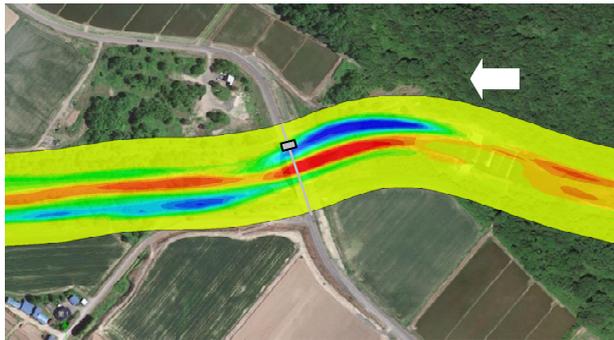
(2) 解析結果

図-7は再現計算における河床変動高のコンター図である。これによると、ピーク時には河道が全体的に拡幅し、低水路中央部が河岸から生じた土砂により埋まっている。減衰初期では、橋梁より少し上流側を中心に発生した大規模な河岸侵食が、橋台位置まで到達している。現場を見ていた美瑛町職員によると、橋台を回り込むように侵食が上流から進行したとの証言があり、再現結果と傾向が一致する。洪水後期を見ると、右岸側の河岸侵

ピーク時 (324m³/s 通水2時間後)



減衰初期 (225m³/s 通水5時間後)



減衰後期 (115m³/s 通水9時間後)

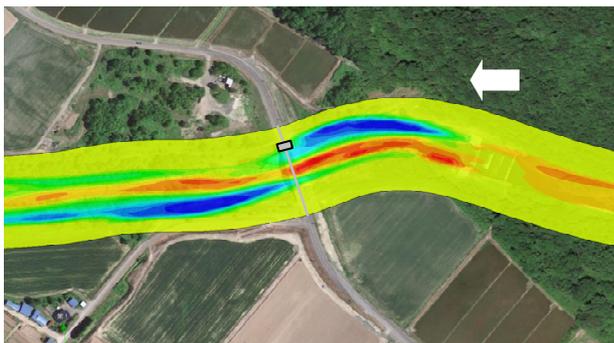


図-7 河床変動高コンター図 (再現計算)

食は進行しておらず、若干埋め戻っている。右岸側に湾曲が生じた影響により、対岸に水衝部が生じ左岸側の河岸侵食が進行しており、図-4aに示した洪水後の航空写真と同じ傾向を示している。

図-8は、ケース1～3における九線橋右岸の河岸侵食幅を示している。流量規模は河岸侵食幅に大きな影響を与え、300m³/s (平成28年洪水規模) を与えた場合の侵食幅は20m、200m³/s (平成22年洪水規模) で5m、100m³/sだと河岸侵食は発生しない結果となった。

図-9は、ケース4および5における九線橋右岸の河岸侵食幅を示している。これによると、洪水継続時間は河岸侵食幅に影響を与えるが、3時間以降の侵食幅はあまり変わらない結果となった。これは、左岸側の砂州が3時間程度で概ね平衡に至り、流れがそれ以上右岸側へ寄らなくなるためである(図-10)。

Eke et al.⁸⁾の蛇行研究によると、蛇行にはbank pull と bar pushの2つのパターンがあり、bank pullは河岸が先に

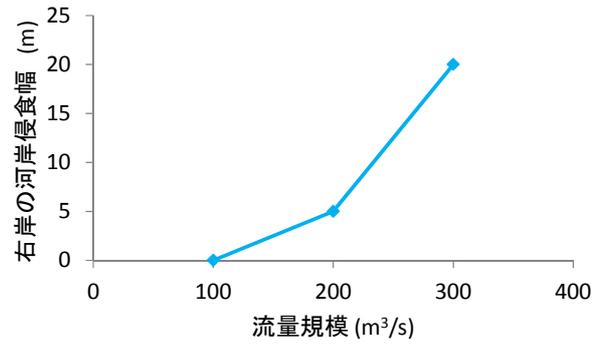


図-8 流量規模と河岸侵食幅 (ケース1,2,3)

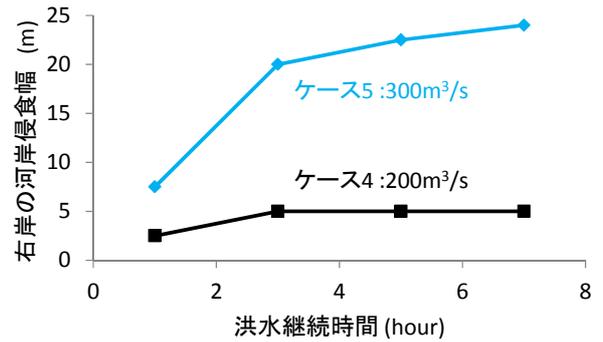


図-9 洪水継続時間と河岸侵食幅 (ケース4,5)

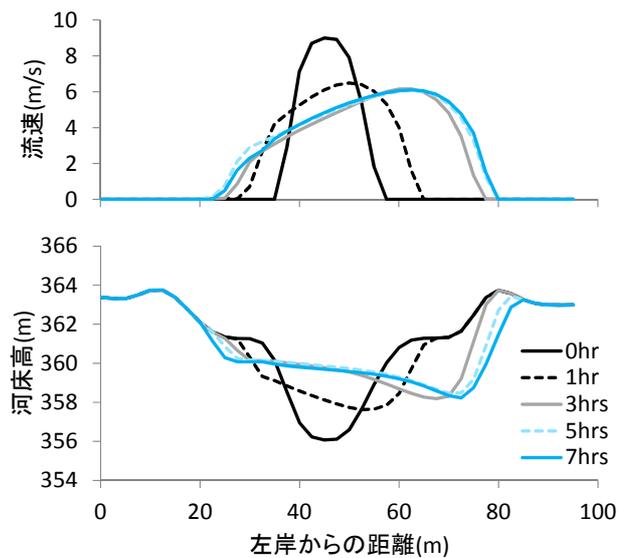


図-10 洪水継続時間と砂州の発達状況 (ケース5)

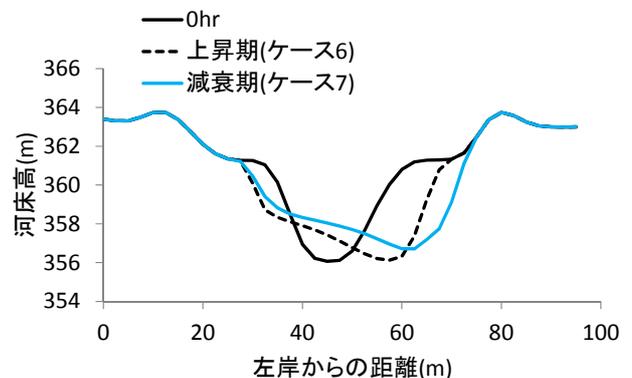


図-11 流量上昇期と減衰期の河岸侵食幅 (ケース6,7)

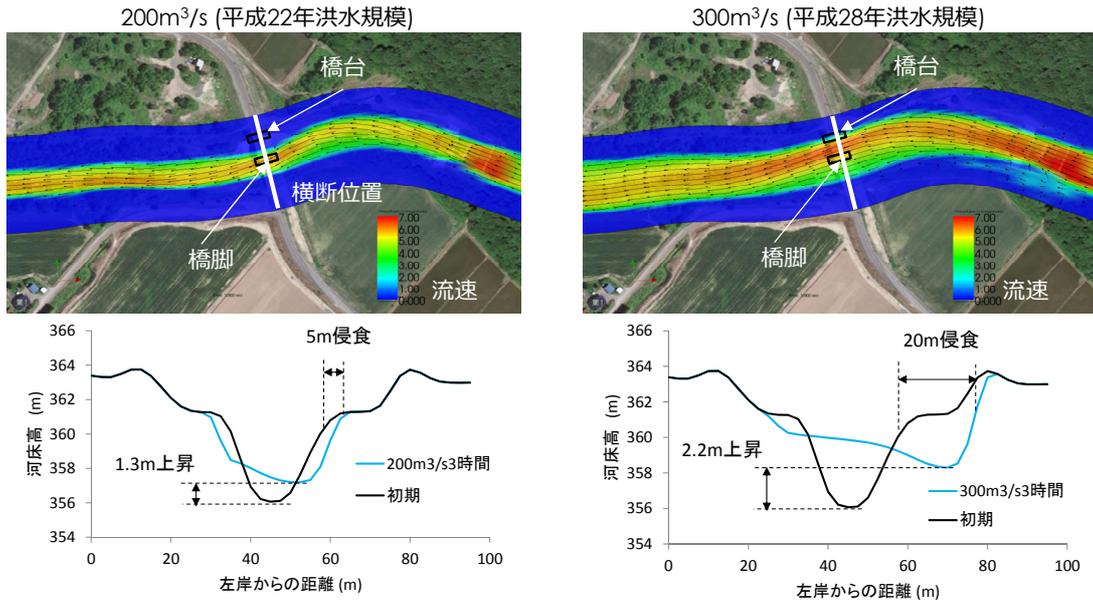


図-12 土砂供給がある場合の解析結果 (ケース2,3)

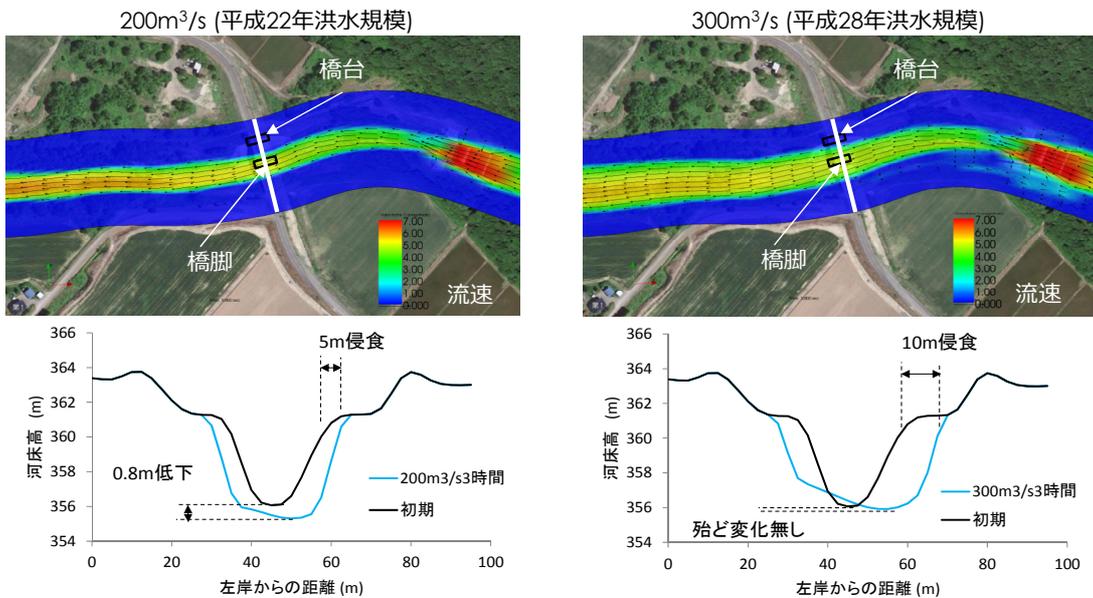


図-13 土砂供給がない場合の解析結果 (ケース8,9)

に侵食され、これに付随するように内岸が堆積する蛇行形態であり、bar pushは固定砂州の成長に伴い、流れが外岸へ押し出され、蛇行が発達する現象である。九線橋の事例は、河床上昇時に固定砂州が大きく成長し、bar push型の蛇行が進んだと捉えることができる。

流量上昇期を想定したケース6の右岸の河岸侵食幅は10mであった。一方、流量減衰期を想定したケース7の侵食幅15mであり、上昇期に比べ侵食しやすい結果となった(図-11)。ケース7の低水路河床高はケース6より高いことから、減衰期に生じる埋め戻りにより、砂州の形成が助長され、河岸侵食が促進したと推測される。

ケース2、ケース3の解析結果は、上流端に動的平衡流

砂量を与えた場合であり、どのケースでも橋脚付近の河床が上昇しており(図-12)、平成22年洪水時に生じた河床洗掘と中央橋脚の被災を説明できない。そこで、砂防施設の影響で土砂供給が殆どなかった場合を想定したのが、ケース8とケース9である(図-13)。ケース8(流量200m³/s・給砂無し)の結果を見ると、橋脚周辺の河床が低下し、河床洗掘によって橋脚が被災した平成22年洪水と類似した結果となった。一方、ケース9(300m³/s・給砂無し)の場合、橋脚上流側で発生した河岸侵食によって土砂供給がなされるため、河床低下は起こらなかった。ただし、侵食幅は10mと土砂供給がある場合の20mに比べ減少する結果となった。

4. 考察と今後の課題

現地調査した4つの橋梁被災を総括すると、橋の上流側から河岸侵食が拡大し、橋台とその背面を回り込むように侵食が進行していったと考えられる。このことは、図-7に示した九線橋の再現計算からも伺える。橋梁周辺には、10mから20m区間に渡って護岸が設置されていたが、基本的に護岸は護岸前面の流れから河岸を護ることを想定しているため、護岸背面を回り込むように大規模な河岸侵食が発生した場合、十分な効果を発揮しなかったと推測される。また小林橋や清見橋のように径間の狭い橋梁では、流木が堆積し、水位を押し上げ、河岸侵食を助長した可能性が高い。

本研究の数値実験により、流量規模や流量の非定常性だけで無く、土砂供給条件が流路の変動に大きな影響を与えることが確認された。実際に、九線橋でも河床が約2m上昇しており、土砂供給と河岸侵食に因果関係があることが伺える。そこで、土砂供給が交互砂州に与える影響を検討した研究成果^{1), 2), 3), 4), 5)}を参考に、解析結果に考察を加える。

寺本・辻本¹⁾の実験によると、土砂供給がない場合、ある場合と比べて砂州の進行は遅くなり滞筋の固定化に繋がる。三輪ら^{2), 3)}は、同じ河床低下傾向の場合（土砂供給が少ない場）でも、流量規模によって砂州の形状が異なることを実験により示している。流量が大きい場合（非砂州領域に近い交互砂州領域）、砂州波長は短くなり、流量が小さい場合（複列砂州領域に近い交互砂州領域）、砂州波長は大きくなる。矢野ら⁴⁾は、複列砂州領域に近い交互砂州領域で実験を行い、土砂供給が少ない場では、砂州波長が伸び、流れの直進性が増すことを指摘している。

上述の実験結果を逆に捉えれば、土砂供給が多い場合、砂州波長は縮まり、流れが蛇行しやすくなる。このことは高畑・泉⁵⁾の解析でも指摘されており、河床が上昇し、河床縦断形状が凹型になるとき、波長の短い砂州が形成されやすくなる。波長の短い砂州により、側方へ向かう強い蛇行流が生じれば、河岸侵食が進行しやすくなる可能性は高いと推察される。ただし、本研究で取り上げた九線橋の事例は、交互砂州というより固定砂州に近いため、土砂供給と固定砂州の挙動について更なる調査や実験が必要である。

5. まとめ

本研究では、平成28年北海道豪雨直後に実施した橋梁被災箇所の現地調査と、九線橋を対象に数値実験を行い被災メカニズムの分析を試みた。本研究で得られた知見を以下に列記する。

- a) 現地調査によると、橋の上流側から河岸侵食が拡大し、橋台とその背面を回り込むように侵食が進行し、橋脚被災に繋がった事例が多かった。また、径間の狭い橋梁では、流木が多く堆積しており、河岸侵食を助長した可能性がある。
- b) 数値実験により、流量規模は河岸侵食幅に大きな影響を与えたことが確認された。また、洪水継続時間そのものよりも、砂州の発達時間が河岸侵食幅に影響を与えることが示唆された。
- c) 洪水上昇期と減衰期の河岸侵食幅を比較したところ、減衰期の方が侵食しやすい結果を得た。これは、減衰期の埋め戻り作用が砂州の発達を促進するためと類推される。
- d) 土砂供給条件により、河床変動の傾向は大きく異なり、土砂供給がある場合、砂州が形成され河岸侵食が進行するが、土砂供給が無い場合、河岸侵食はあまり進行せず、河床低下が進む。
- e) 河岸侵食が進めば橋台が被災する可能性があり、河床低下が進めば橋脚が被災する可能性がある。今後は、様々な土砂供給シナリオを想定し、対策の検討を行うことが重要と考えられる。

謝辞：本研究の調査にあたっては、橋梁の専門家である国総研の西田様、西藤様、寒地土研の西様、佐藤様にご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 寺本敦子, 辻本哲郎: 流量, 土砂流入条件が砂州の変動に及ぼす影響の一考察, 河川技術論文集, Vol.10, 273-278, 2004.
- 2) 三輪浩, 大同淳之, 横川純: 交互砂州河床における水みちの形成過程に及ぼす土砂供給と砂礫の分級の影響, 水工学論文集, Vol.49, 949-954, 2005.
- 3) 三輪浩, 大同淳之, 片山智仁: 交互砂州河床の変動に及ぼす流量・土砂供給条件の影響, 水工学論文集, Vol.51, 1051-1056, 2007.
- 4) 矢野雅昭, 渡邊康玄, 井上卓也, 山口里実, 平井康幸: 岩床河川における覆礫厚が自由砂州形状に及ぼす影響, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71(4), I_1003-I_1008, 2015.
- 5) 高畑知明, 泉典洋: 河床上昇・低下に伴う河床勾配の時間変化を考慮した砂州の線形安定解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 67(2), I_661-I_669, 2011.
- 6) iRIC Nays2D (<http://i-ric.org/ja/software/1/>).
- 7) 桑村貴志, 河合崇, 永多朋紀: 音更川における堤防流出の原因分析, 国土交通省国土技術研究会, 2012.
- 8) Esther Eke, Gary Parker, Yasuyuki Shimizu: Numerical modeling of erosional and depositional bank processes in migrating river bends with self-formed width: Morphodynamics of bar push and bank pull, J. Geophys. Res. Earth Surf., 119, 1455-1483, 2014.

(2017. 4. 3受付)