

激甚化する降雨災害に対する鉄道インフラのレジリエンス向上

構造物技術研究部長
神田 政幸



1. はじめに

近年発生した局所的強雨や広域連続強雨において、鉄道インフラが被害を受け、鉄道運行に支障を及ぼす事例が見受けられる。そこで、過去の降雨による鉄道インフラの被害から得られた降雨災害の特徴を総括するとともに、鉄道総研が取り組んできた鉄道インフラのレジリエンス向上策を紹介する。さらに、最近の線状降水帯を伴う災害に対する課題を挙げ、さらなるレジリエンスの向上のための今後の取組みとして、診断・補強技術、早期復旧技術の取組みのほか、国が進める「流域治水」に対応した取組みについて述べる。

2. 過去の降雨災害の特徴

最初に鉄道インフラに被害を与えた最近の降雨災害を概観する。令和元年東日本台風（台風19号）

による災害（2019年）は、記録的な大雨、暴風、高波、高潮が特徴であった。総降水量は神奈川県箱根で1000mmに達し、甲信から東日本を中心に多くの場所で500mmを超過した。この大雨の影響で広い範囲で河川の氾濫が相次いだほか、土砂災害や浸水被害が発生した。鉄道インフラでは、JR東日本をはじめ多くの鉄道の河川橋梁や山間部の谷埋め盛土に被害が生じた（図1（a））。令和2年7月豪雨（2020年）は、西日本から東日本の広い範囲に大雨をもたらした。特に7月3日から8日にかけて発達した線状降水帯が九州地方で多数発生し、記録的な大雨により球磨川などの大河川で氾濫が相次いだ。鉄道インフラでは球磨川流域や筑後川流域のJR九州の河川橋梁や河川沿いの盛土等で甚大な被害が発生した（図1（b））。

鉄道インフラのうち、降雨災害が発生する箇所として、河川橋梁、河川沿いの盛土や集水地に位置する谷埋め盛土が挙げられる。これらは増水による被災リス




図1 最近の降雨災害による鉄道インフラの被害例

クを有する弱点箇所となりうるとともに、一旦被害が発生すると復旧に時間を要することが知られている。これらは、復旧にあたり河川協議や出水期の工事制限、あるいは工所用進入路の確保のため、復旧に数か月から数年を要することになる(表1)。

このように最近の降雨による自然外力は巨大化し、局所的強雨や広域連続強雨により増水が発生し、河川近傍あるいは集水地形に存在する鉄道インフラが損傷し、その損傷が進行し、被害拡大に繋がっている。被災前後の鉄道インフラの機能は、被災直後に急激に低下し、復旧とともに回復する曲線を描く(図2)。同図において、鉄道事業者は「被災前の対応」のほか、「発生中・初動の対応」、そして「復旧時の対応」を行うことで、鉄道インフラの機能低下を小さく、また機能回復を早めることを目指す(青の曲線から赤の破線へ)。本講演では、これらの対応策のうち、ハード対策に着目しこれをレジリエンス向上策と定義し、「被災前の対応」と「復旧時の対応」の研究開発について論ずる。

鉄道インフラのレジリエンスを高めるには、被災前の検査・診断技術、補強技術のほか、被災後の復旧時の早期復旧に寄与する技術が必要となる(図3)。ここでいう「検査・診断技術」とは、多数の鉄道インフラ群から降雨災害に対して耐力の小さい弱点箇所を予め抽出する技術である。抽出された弱点箇所に対して、「補強技術」により粘り強い構造に変更する。これにより鉄道インフラの路線ごとの降雨による被災リスクを低減させることに繋がる。一旦、鉄道インフラに被害が発生すると「早期復旧技術」が必要となる。これは損傷を受けた鉄道インフラのうち無被害から軽微な被害を判断し、運行再開に繋げる診断技術のほかに、中程度から大被害の鉄道インフラのうち、中程度の被害を判断し、被災構造物を再利用あるいは一部再利用し、かつ補強し運行再開に繋げる技術である。以上は、鉄道インフラの被害が重篤ではなく、取替え等の大規模な工事が不要であり、損傷した既設鉄道インフラを再利用に至る早期、かつ適切な診断と補強により、鉄

表1 河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土と復旧

	河川橋梁	河川沿いの盛土/谷埋め盛土
被害例		
復旧	数か月～数年	
決定要因	<ul style="list-style-type: none"> ■ 河川協議/出水期の工事制限 ■ 工所用進入路の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 沿線地権者との協議/出水期の工事制限 ■ 工所用進入路の確保

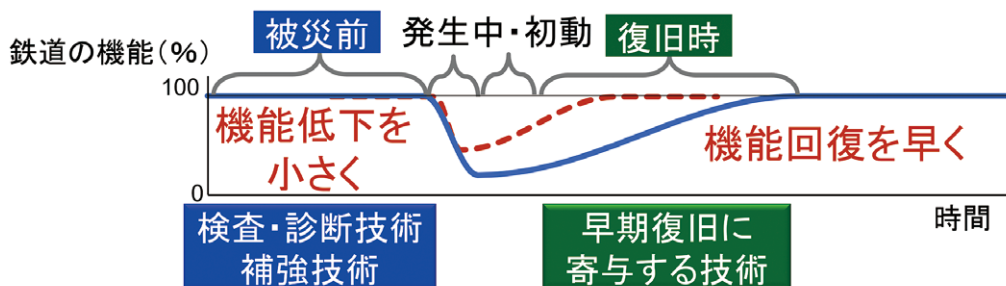


図2 被災前後の鉄道の機能とレジリエンス向上

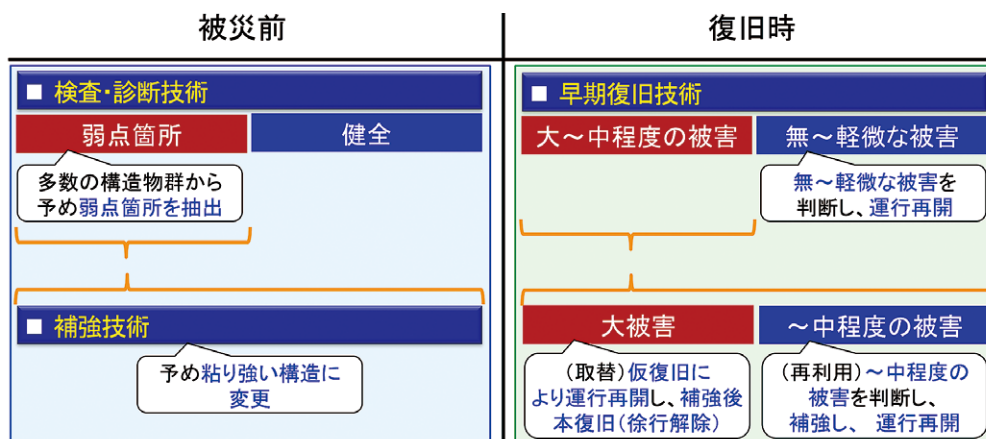
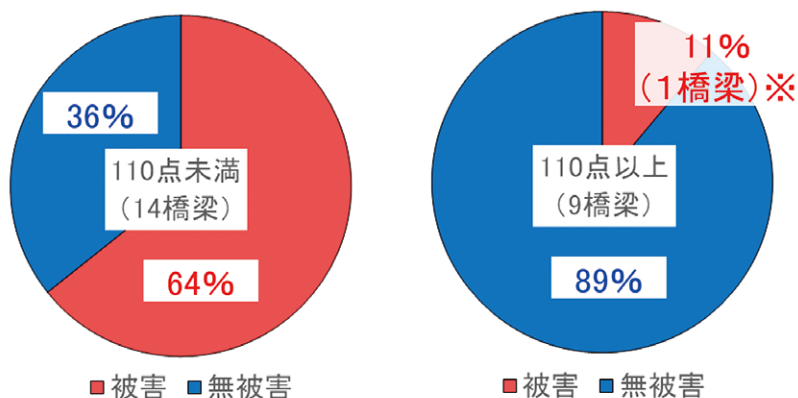


図3 レジリエンス向上のための研究開発



※根入れが大きい橋梁であったが、河口部に位置する緩い堆積層のため流出した例

図4 洗掘被害リスクを有する河川橋梁の抽出例(2019年以降)

道インフラの早期復旧に寄与する技術となる。一方、大被害を受けた鉄道インフラは再利用ができないため、再構築による取替えが必要となる。したがって、運行再開や復旧に時間を要することとなるが、この場合についても仮復旧により早期の運行再開に繋がる段階的復旧法が求められる。

3. 鉄道インフラのレジリエンス向上策

次にこれまで鉄道総研が取り組んできた鉄道インフラのレジリエンス向上策を紹介する。

3.1 被災前の検査・診断技術

被災前の検査・診断技術として、河川橋梁を例に示す。鉄道では、増水による洗掘被害を受けやすい河川橋梁の抽出に「洗掘採点表」が用いられてきた。これは河川橋梁の構造条件や河川環境条件のいくつかの

項目を採点形式で足し合わせ、110点未満の場合、洗掘被害を受けやすい河川橋梁として抽出するものである¹⁾。2019年以降、鉄道総研が調査を行った洗掘被災橋梁(10橋梁)、及び路線キロ程で10km以内の同一の増水外力を受けたと考えられる無被害橋梁(13橋梁)の合計23橋梁について、洗掘採点表を適用した。その結果、110点未満の場合(14橋梁)、洗掘被災橋梁を60%以上の確率で捉えることができた。一方、110点以上の場合(9橋梁)、河口部で深い根入れを有するため点数は高いものの、緩い堆積層の根入れが増水時に流出した洗掘被災橋梁が1件含まれたが、これ以外は無被害であった(図4)。

洗掘採点表により洗掘被害を受けやすい橋梁を抽出した後、橋梁下部工の固有振動数から健全度診断を行う「衝撃振動試験」により、河川橋梁の健全度の追跡調査が可能となる²⁾(図5)。



図5 衝撃振動試験

3.2 被災前の補強技術

抽出された増水による被災リスクの高い河川橋梁は、必要により粘り強い構造に変更する補強を行う。鉄道総研では、既設基礎の耐震補強工法として、既設基礎を鋼矢板（シートパイル）で囲み、これを既設フーチングと結合する「シートパイル補強工法」を開発した³⁾（図6 (a)）。シートパイル補強工法は、既設基礎の耐震補強工法として開発したものであるが、河川橋梁の洗掘被災リスク低減策としての利用も可能である。既に橋梁・高架橋100基以上の補強事例を有する（例えば、図6 (b)⁴⁾）。なお、本工法は（株）大林組、日本製鉄（株）との共同研究成果である。

このほか、河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土に対して、各種の降雨対策を提供し、導入支援を図ってきた（図7）。

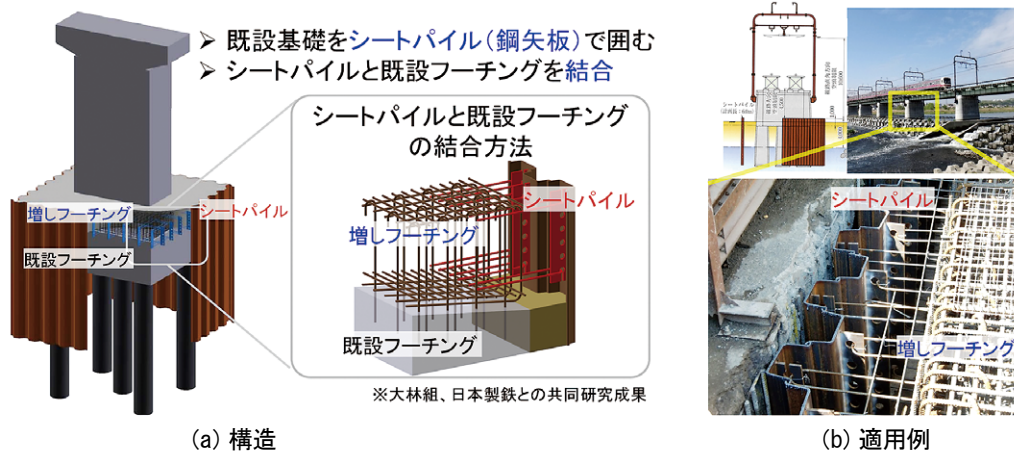


図6 シートパイル補強工法

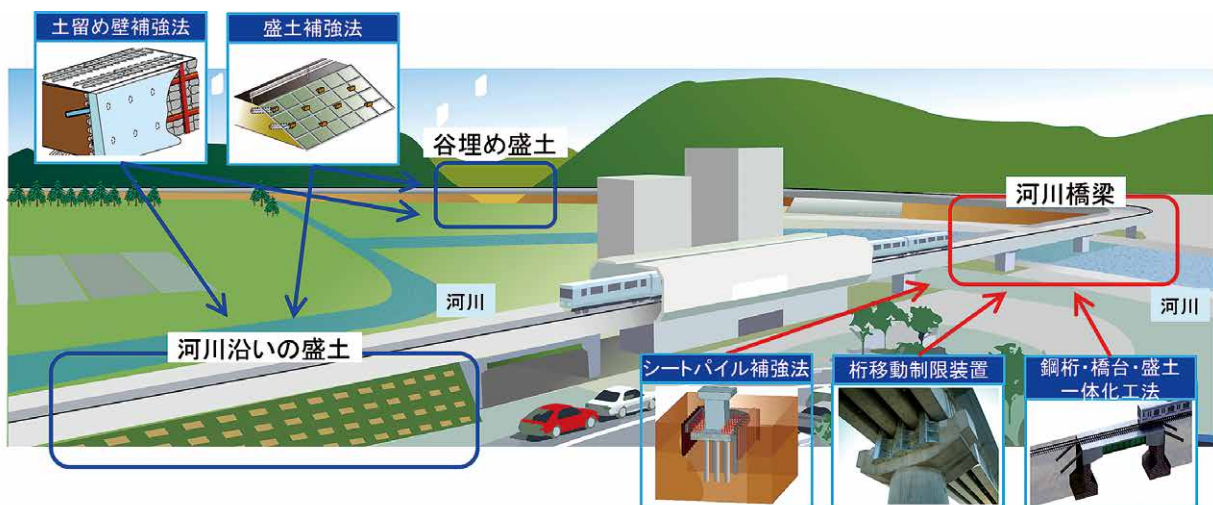
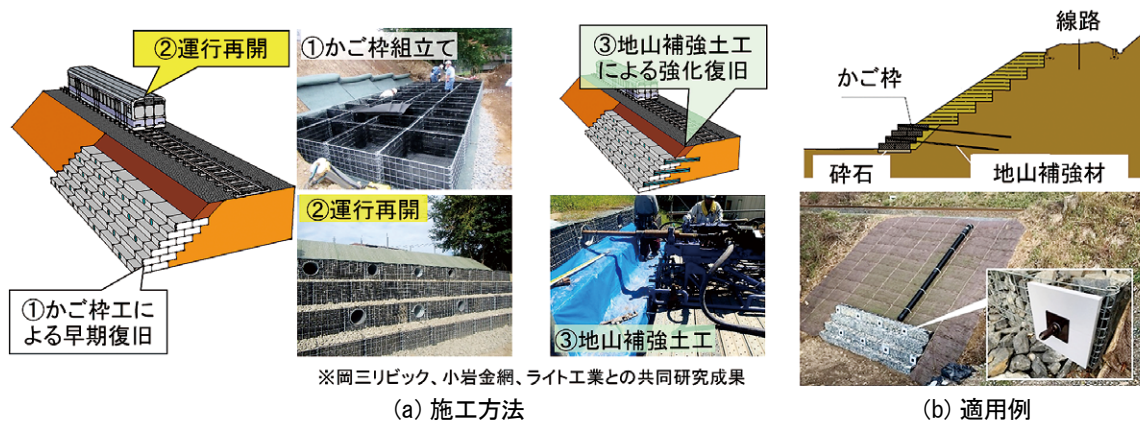


図7 河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土に対する降雨対策



※岡三リビック、小岩金網、ライト工業との共同研究成果

(a) 施工方法

(b) 適用例

図8 かご枠工による早期・強化復旧法



図9 線状降水帯の発生に伴う降雨災害の課題

3.3 早期復旧技術

以下では、被災後の早期復旧技術として、盛土を例に示す。鉄道総研では被災した盛土を、碎石を詰めた鋼製のかご枠を使用して復旧する早期・強化復旧法を開発した⁵⁾(図8(a))。本復旧法には、従来の復旧法より工期を短縮しつつ耐降雨性を向上させた「かご枠工による被災盛土の早期復旧法」と、かご枠の施工後に地山補強材を追加施工し、耐降雨性ととも、耐震性も向上させた「かご枠工による被災盛土の強化復旧法」がある。従来、被災盛土を復旧する際、大型土のうを被災箇所に積み上げ仮復旧として早期の運行再開を図り、その後の本復旧で被災前の盛土構造に原状復旧するのが通常であった。しかしながら、仮土留め施工後に大型土のうを撤去したり、盛土構造を再構築したりするのに長い施工期間や多額の工事費を要していた。これに対し、上記の早期復旧法は、大型土のうの代わ

りに碎石を詰めたかご枠を使用するため、耐降雨性を向上させた本復旧構造である。仮土留めの施工や大型土のうの撤去が不要となるため、施工期間と工事費の削減が可能となる。さらに、運行再開後に地山補強材を追加施工する上記の強化復旧法は、段階的に強化し盛土の耐震性が向上する。強化復旧法は、令和元年東日本台風(台風19号)で被災した盛土の復旧工事に採用された(図8(b))。なお、本工法は、岡三リビック(株)、小岩金網(株)、ライト工業(株)との共同研究成果である。

3.4 線状降水帯の発生に伴う降雨災害の課題

最近の激甚化する降雨災害として、線状降水帯の発生に伴う災害がある。線状降水帯は、次々と発生し発達した雨雲(積乱雲)が列をなし、積乱雲群によって、数時間にわたってほぼ同じ場所を通過、または停滞することで作り出される。線状降水帯は、長さ50

～300km程度、幅20～50km程度の局地的な強雨をもたらす⁶⁾。代表的な線状降水帯の発生による降雨災害として、平成24年7月九州北部豪雨(2012年)、平成29年7月九州北部豪雨(2017年)、平成30年7月豪雨(2018年)や令和2年7月豪雨(2020年)などがある。

これらの災害では、構造物の高さを超える高出水が発生した。これは、河川橋梁においては流木等の流出物が橋脚だけでなく、鋼桁に衝突することによって外力の増加をもたらし、河川沿いの盛土/谷埋め盛土においては土砂流出や浸透による強度低下をもたらし、被害規模の拡大に繋がる可能性がある(図9)。これらに対応するため、外力の増加や強度低下に対しては、被災前の鉄道インフラの検査・診断技術や補強技術への取り組みが必要であり、被害規模の拡大に対しては、復旧時の早期復旧技術への取り組みが必要である。また、これらの鉄道独自の取り組みでは十分でないことが想定され、従前以上に河川管理者との連携が求められる。

4. さらなるレジリエンス向上を目指して

前章において、線状降水帯の発生に伴う災害に対する課題を示した。本章では鉄道インフラのさらなるレジリエンス向上を目指した今後の取り組みとして、「流出物を考慮した河川橋梁の診断・補強技術」や、「土砂流出や浸透による強度低下を考慮した河川沿いの盛土/谷埋め盛土の診断・補強技術」のほか、「甚大な被害規模の河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土の早期復旧技術」の必要性を示す。また、従前以上に河川管理者との連携が必要と考え、国が進める「流域治水」に対応した取り組みを示す(図10)。

4.1 流出物を考慮した河川橋梁、土砂流出や浸透による強度低下を考慮した河川沿いの盛土/谷埋め盛土の診断・補強技術の取り組み

増水時の河川橋梁には、流水圧が作用し増水とともに

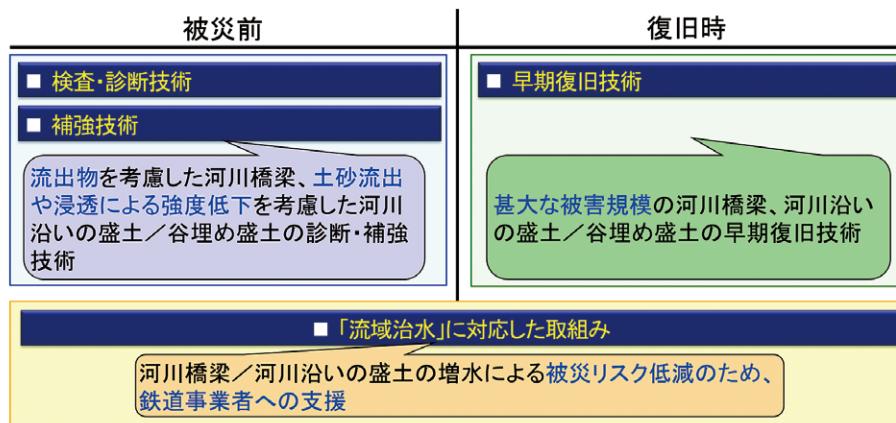


図10 さらなるレジリエンス向上のための取り組み

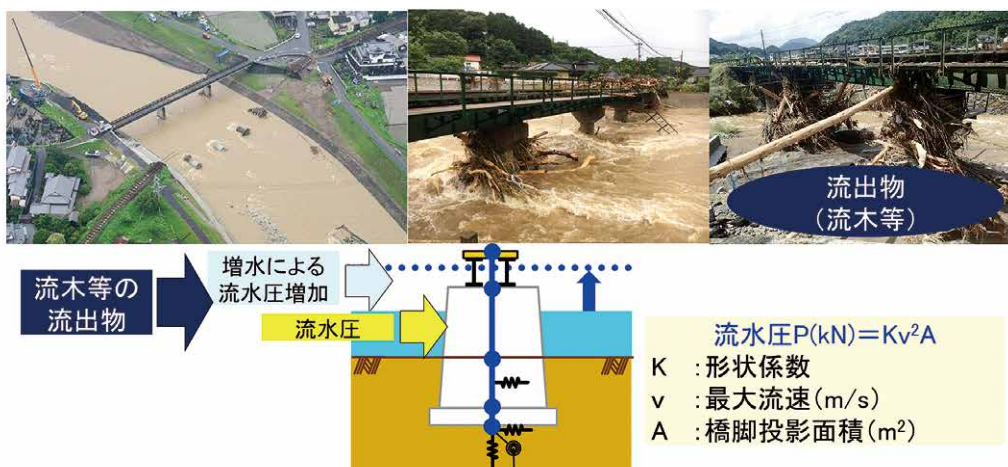


図11 流木等の流出物を考慮した河川橋梁の診断・補強技術



図 12 土砂流出、浸透による強度低下を考慮した河川沿いの盛土/谷埋め盛土の診断・補強技術



図 13 最近の被災鉄道インフラの復旧事例

に流水圧は増加する。流水圧は形状係数のほか、流下方向断面積に比例するが、流出物が橋梁橋脚に留まることで、上述の抵抗面積が増加し急激に流水圧を増加させる。平成29年7月九州北部豪雨(2017年)では、過去最大級の流木等が流出し⁷⁾、その結果河川橋梁の被害拡大に繋がったとも考えられている⁸⁾。このように流木等の流出物が河川橋梁の被害を顕在化、拡大化させる現象は、その流出物の定量化や流水圧の推定など未解明な点が多い。今後これらを考慮した河川橋梁の診断技術や、補強技術の構築のための研究開発が必要と考えられる(図11)。

構造物の高さを超える高出水は、盛土に対して土砂流出や浸透による強度低下をもたらす。強度低下はさらに土砂流出を顕在化させ、被害拡大に繋がる。鉄道総研では、LES乱流モデルを用いた流体計算と土砂の3次元的な移動に基づく流体土砂境界の変動計算を連成し、流体/地盤境界の変動解析手法を構築し、河川

内橋脚周りの洗掘量の評価を可能とした⁹⁾。しかしながら、浸透による地盤材料の強度低下は考慮されていない。そこで、土砂流出や浸透による強度低下を同時に考慮した数値解析法の確立と、これを活用した河川沿いの盛土/谷埋め盛土の診断技術や補強技術の構築のための研究開発が必要と考えられる(図12)。

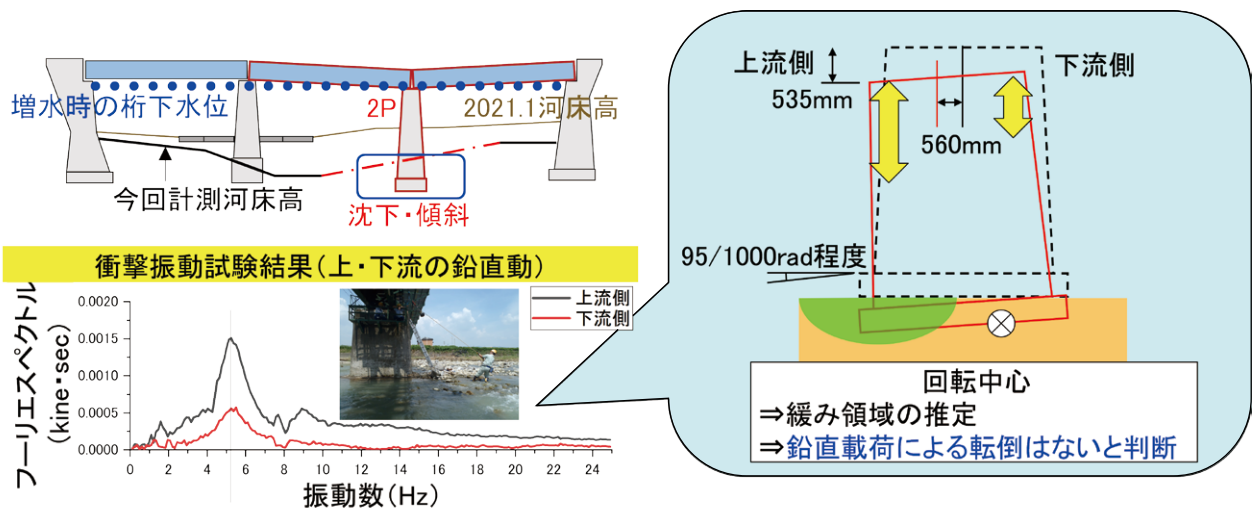
4.2 甚大な被害規模の河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土の早期復旧技術の取組み

これまで鉄道インフラが甚大な被害を受けた場合、定量的な診断ができないため、被災鉄道インフラを再利用することは難しかった。最近の被災鉄道インフラの復旧事例では、被災した河川橋梁を診断し、被災鉄道インフラを再利用、あるいは一部を再利用したことがある(図13)。甚大な被害規模の被災鉄道インフラを再利用し復旧した例は少なく、今後も継続して甚大な被害規模の河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土

の早期復旧の診断・復旧技術の構築のための研究開発が必要と考えられる。

以下では、甚大な被害規模の河川橋梁を再利用し、早期に復旧した例を紹介する¹⁰⁾。当該橋梁は橋脚天端で上流側に500mm以上、沈下で500mm以上、傾斜で95/1000傾く重篤な被害を受けた。復旧に向け被害調査が重要となるが、増水時の洗掘によって発生した橋脚基礎の支持地盤の緩み領域の推定が必要であった。ここでは、橋梁下部工の診断に用いる衝撃振動試験により、上流側・下流側の鉛直振動の大きさの違いから、回転中心を求めることで緩み領域の推定を行った。上流側の基礎地盤の緩み領域の発生に伴い回転中心は下流側に移動するが、鉛直载荷の位置とこの回転中心のずれ量の大小で鋼桁や列車荷重の再载荷の可否

が分かる。ここでは、両者のずれ量が小さいことから緩み除去のための鉛直プレロード载荷によって上流側に転倒しないことが明らかになり、したがって被災橋脚の再利用が可能と判断した(図14(a))。水タンク12tf(営業車の32%荷重)の鉛直プレロード载荷によって緩み領域を締め固めた後、保守用車17.5tf、40tf(それぞれ営業車の46%、113%荷重)による走行試験、及びブレーキ試験を行い、走行安全性の確認を行った。これらの結果から徐行による運転再開に繋げることができ、運行再開後、基礎を補強し徐行解除に至った(図14(b))。2022年8月9日に当該河川橋梁が被災したが、診断の結果、鋼桁及び橋脚の再利用が可能と判断し、約4か月後の12月23日の早期に運転再開した。



(a) 被災河川橋梁と緩み領域の推定



(b) 被災河川橋梁の復旧方法

図14 甚大な被害規模の河川橋梁の早期復旧

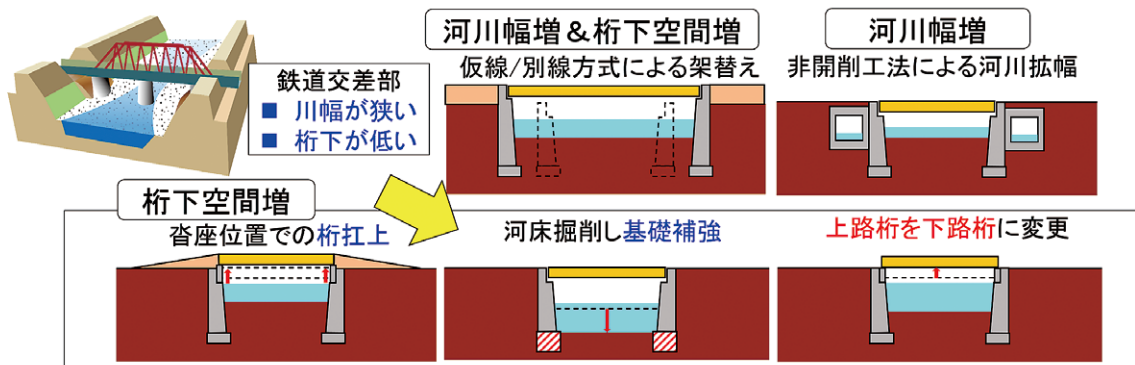


図 15 河川と鉄道交差部の河川改修方法

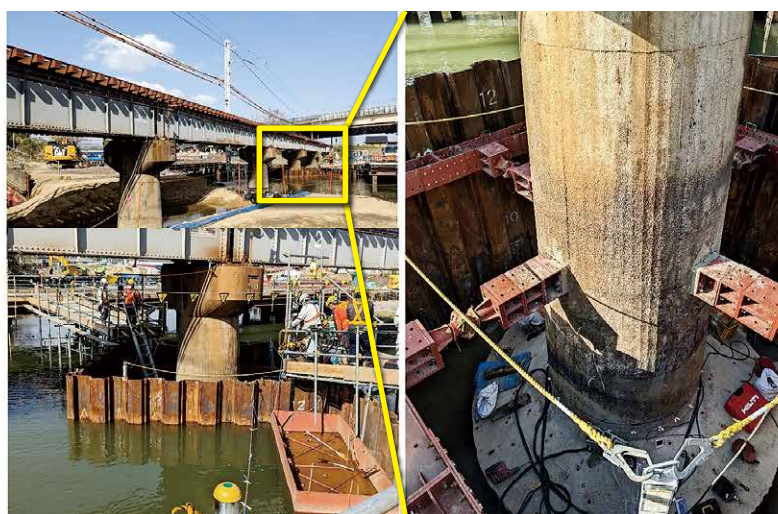


図 16 河床掘削と河川橋梁の基礎補強

4.3 流域治水に対応した取組み

「流域治水」とは、国土交通省が進める、気候変動による降雨量の増加に対応した治水施策である。都市部の河川のみならず全国の河川を対象とし、河川改修等の整備を加速化すること、並びにステークホルダー間の協働によって、被害対象を減じることに加え、被害軽減や早期復旧を図るものである¹¹⁾。このうち、河川改修等の整備事業は、河川管理者と鉄道事業者の協議により事業が進められる。河川と鉄道の交差部は、川幅が狭い、あるいは河川橋梁の桁下が低いなど、増水による被災リスクが存在する場合がある。河川管理者や鉄道事業者が連携し、このような箇所の河川改修事業を進捗させることが求められている。そこで、鉄道事業者のための支援ツールとして、河川改修事例集や選定表を整備する必要があるものと考えられる。

河川と鉄道交差部の河川幅の増加や桁下空間を広げ

る方策として、「仮線や別線方式による河川橋梁の掛け替え策」のほか、レールレベルは変えずに川幅を増加させる方策として、「非開削工法による河川拡幅策」が考えられる。このほか、桁下空間を増加させる方策として、「沓座位置での河川橋梁の桁扛上策」、「河床掘削し河川橋梁の基礎補強を行う方策」や、河川橋梁の桁種について「上路桁を下路桁に変更する方策」が考えられる(図15)。先に示した、鉄道事業者のための河川改修選定表を幅広く整備するには、ここで示した、新しい河川空間確保の改修工法(例えば、桁扛上策、河床掘削し基礎補強を行う方策や、桁種変更策)の研究開発が必要と考えられる。

河川改修事業の一環として、河床掘削と河川橋梁の基礎補強を行った例を紹介する¹²⁾。これは、河床掘削し河川橋梁の基礎の支持力が低下した分を、シートパイル補強工法により基礎補強した例である(図16)。

5. おわりに

本講演では、過去の降雨による鉄道インフラの被害から得られた降雨災害の特徴を総括するとともに、鉄道総研が取り組んできた鉄道インフラのレジリエンス向上策を紹介した。さらに、最近の線状降水帯を伴う災害に対する課題を挙げ、さらなるレジリエンスの向上のための鉄道独自の取組みとして、診断・補強技術、早期復旧技術の取組みのほか、河川管理者と鉄道事業者の連携として、国が進める「流域治水」に対応した取組みについて示した。

具体的には、線状降水帯の発生に伴う構造物の高さを超える高出水が要因となって、河川橋梁及び河川近傍の盛土の被害を拡大させる可能性が高いとし、「流木等の流出物と河川橋梁」、「土砂流出や浸透による強度低下と盛土」の関係を明らかにする診断・補強技術の構築のための研究開発の必要性を示した。また、「流域治水」に対応した河川改修事業を進捗させるための鉄道事業者の支援ツールとして、河川改修事例集や選定表を整備する必要があるとした。このうち、河川と鉄道交差部の新しい河川空間確保の改修工法（例えば、桁扛上策、河床掘削し基礎補強を行う方策や、桁種変更策）の研究開発の必要性も示した。これらの取組みを進捗させることで、鉄道インフラのさらなるレジリエンス向上策に繋がるものと考えられる。

参考文献

- 1) 中村貴史, 佐溝昌彦, 村石尚, 小林徹, 渡辺諭, 中島大輔: 鉄道橋梁における洗掘を受けやすい橋梁を抽出するための採点表(案)の作成, 土木学会第60回年次学術講演会, IV-154, pp.307-308, 2005.
- 2) 西村昭彦, 羽矢洋: 衝撃振動試験による橋脚の健全度判定法, 土木学会誌, Vol.78, No.9, pp.26-28, 1993.
- 3) 西岡英俊, 樋口俊一, 西村昌宏, 神田政幸, 山本忠久, 平尾淳一: シートパイルによる既設杭基礎の耐震補強効果に関する模型実験, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.251-262, 2010.
- 4) 光森章, 対馬俊治, 西平宣嗣, 清水竜也, 今村年成: 京王電鉄多摩川橋梁の耐震補強工事-現地状況に合わせた補強工法選定例-, 基礎工, Vol.44, No.5, pp.38-41, 2016.

- 5) 中島進, 佐藤武斗: 被災盛土の早期・強化復旧工法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.1, pp.47-52, 2021.
- 6) 加藤輝之: 集中豪雨をもたらす線状降水帯~基礎研究が生み出した防災用語~, 第21回都市水害に関するシンポジウム, pp.1-7, 2011.
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部: 平成29年7月九州北部豪雨は過去最大級の流木災害~今回の災害と流木の記録がある土砂災害との比較を行いました~, プレスリリース資料, 2017.
- 8) 矢野真一郎, 土橋将太, 堂蘭俊多, 笠間清伸, 北隆範: 流木発生ポテンシャルの概念に基づく花月川の橋梁における流木災害リスク評価, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.289-294, 2016.
- 9) 石井秀憲, 室谷浩平, 中出孝次: 流水中の3次元的な土砂の移動に基づいた河川橋梁周りの局所洗掘解析手法, 鉄道総研報告, Vol.37, No.4, pp.9-15, 2023.
- 10) 齋藤祐樹: 豪雨により橋脚が傾斜した鉄道橋りよの復旧, 日本鉄道施設協会誌, Vol.61, No.11, pp.74-78, 2023.
- 11) 降旗涼介: 流域治水関連法の概要, 基礎工, Vol.50, No.6, pp.26-32, 2022.
- 12) 濱田吉貞, 大野光紀, 船谷恵: 河川改修に伴う既存橋脚保全対策としてのシートパイル基礎補強工法の適用, 基礎工, Vol.51, No.10, pp.56-59, 2023.