

# 鉄道構造物の災害対策と早期復旧

公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部長  
神田 政幸



## 1. はじめに

近年頻発した巨大地震や局所的強雨において、鉄道構造物は被害を受け、鉄道運行に支障を及ぼす事例が見受けられる。そこで、過去の地震や降雨による鉄道構造物の被害から得られた知見を総括するとともに、鉄道総研が取り組んできた鉄道構造物の災害対策として事前の診断・補強技術、災害発生時の損傷検知技術や、技術支援した復旧例を紹介する。さらに、鉄道のさらなるレジリエンスの向上のための防災・減災技術、早期復旧技術の今後の取り組みについて述べる。

## 2. 過去の地震被害、降雨被害の特徴と課題

鉄道構造物に被害を与えた最近の地震災害、降雨災害を概観する。地震については東北地方太平洋沖地震(2011年)、熊本地震(2016年)を、降雨については平成24年7月九州北部豪雨(2012年)、台風7、9、10、11号による大雨(2016年)を取り上げた。

東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード9.0という未曾有の巨大な海溝型地震であった<sup>1)</sup>。鉄道構造物の地震被害は、兵庫県南部地震以降のせん断補強対策や落橋対策の効果により、構造物の倒壊等はなかったものの、広域での電柱折損や高架橋柱の損傷、度重なる余震による被害(図1)や首都圏で発生した地盤の液状化被害、沿岸部における甚大な津波被害など、巨大地震の特徴的被害が生じた。

熊本地震は2016年4月14日に発生した日奈久断層によるマグニチュード6.5の前震と、2日後の16日に発生した布田川断層によるマグニチュード7.3の本震からなる直下型地震である<sup>2)</sup>。鉄道構造物は、熊本の平野部の九州新幹線等の高架橋柱端部のかぶりのはく落や支承部の損傷が確認されたが(図2)、設計上想定範囲であった。一方、南阿蘇地域を中心とした山岳

域や山間部では大規模な土砂災害が多数発生し、その後の連続して多発する余震により損傷・変形が進行し、被害拡大に繋がった。

平成24年7月九州北部豪雨は、気象庁より国内で初めて「これまで経験したことのないような大雨」と



図1 東北地方太平洋沖地震の余震による被害例 (RCラーメン高架橋柱)

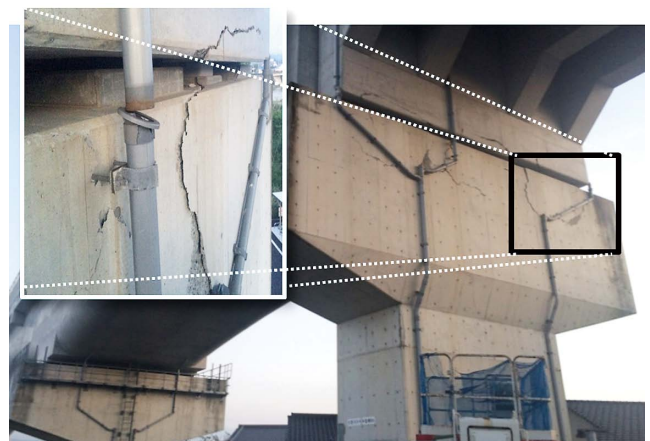


図2 熊本地震による被害例 (RC高架橋支承部)

表現され3日間で総雨量800mmを記録し、甚大な河川災害を熊本・大分・福岡・佐賀県域を中心とする九州北部にもたらした<sup>3)</sup>。鉄道構造物では、山間部を縦断する豊肥本線を中心に沢地形に位置する谷埋め盛土や河川橋梁に被害が生じた(図3)。

台風7、9、10、11号による大雨では、1週間に3個の台風が続々と北海道に上陸し、北海道東部を中心に大雨により河川の氾濫や土砂災害が発生し、その後の8月末の前線と台風10号の接近による大雨で、根室本線の河川橋梁や日高本線の海岸護岸の流出などの大きな被害となった(図4)<sup>4)</sup>。

このように最近の地震や降雨の自然外力は巨大化し、地震では本震も含めた複数の地震動により、鉄道構造物の損傷が進行して被害が拡大し、降雨では局所的短時間強雨により増水が発生し、鉄道構造物の高さを超過する越流により被害拡大へ繋がっている。

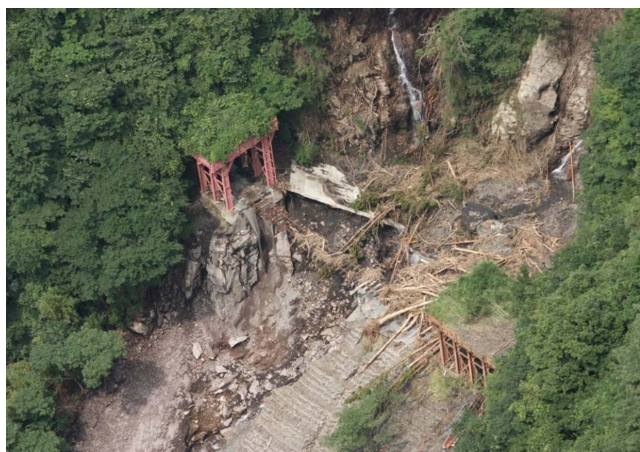


図3 平成24年7月九州北部豪雨による被害例(谷埋め盛土)



図4 台風10による被害例(河川橋梁)

被災前後の構造物の性能や機能は、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5)。同図において、「壊滅的な状態の回避」、すなわち性能の低下を抑えること、および「全体系機能の早期回復」の両者は、「レジリエンス」と定義される。鉄道のレジリエンスを高めるには、この曲線の災害発生前の事前対応(防災・減災技術)や事後対応(早期運行の判断技術、早期復旧技術)が必要となる。

### 3. 鉄道総研の災害対策－事前、初動、復旧対応

事前対応では、予め鉄道路線の弱点箇所を抽出し、粘り強い構造に変更する補強技術が重要となる。事後対応では、被災直後の初動において軽微な被害を判断し、早期の運行再開に繋げる鉄道構造物の損傷検知技術が必要である。一方、被害が軽微でない場合、補強により再共用可能か、取替かを判断する被災後の診断・補強技術が必要となる(図6)。以下では、鉄道総研が取り組んできた、事前対応、事後対応(初動、復旧)の一連の災害対策を示す。

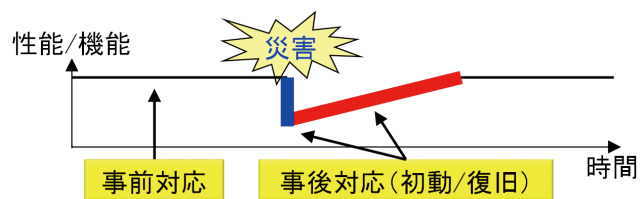


図5 被災前後の構造物の性能、機能

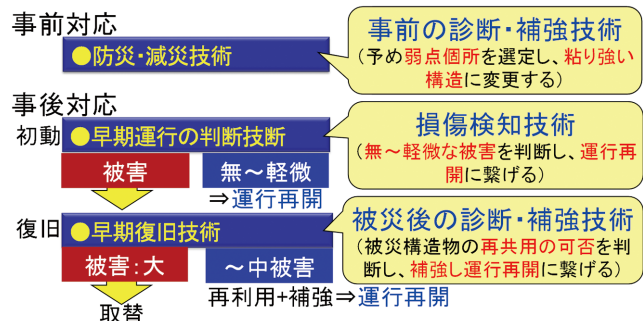


図6 鉄道の災害対策(事前対応、事後対応)

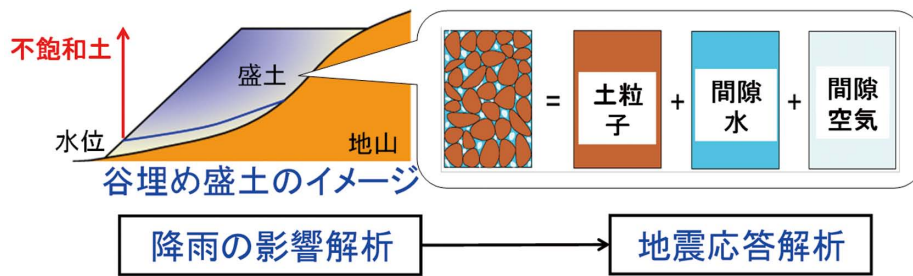


図7 集水地形上の盛土の耐震診断

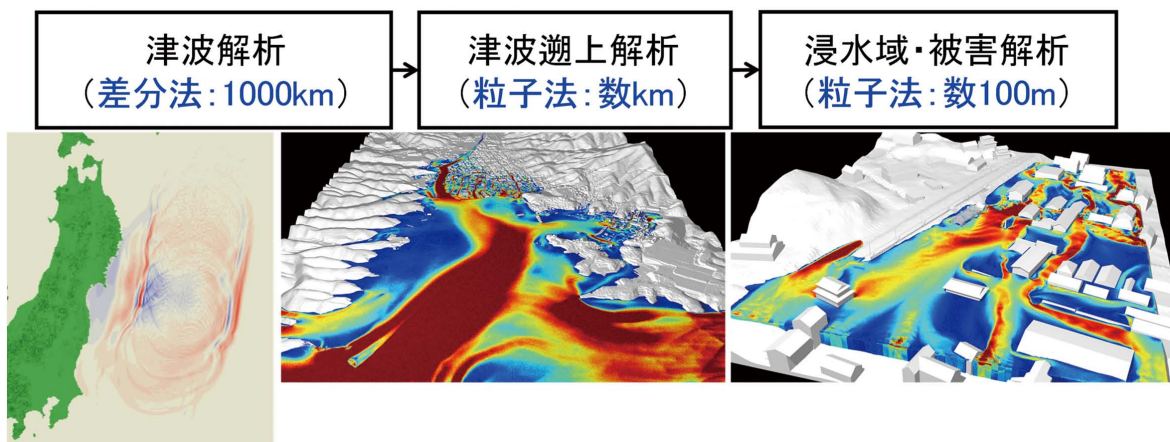


図8 差分法と粒子法による3段階の津波解析

**(1) 事前の診断・補強技術**

山間部や沢地形は地下水が集まり易く集水地形と呼ばれ、このような場所に構築された盛土は一般的に耐震性が低い。鉄道総研では、地下水の流入・流出による土の強度の変化を考慮した耐震診断技術の確立を目的として、土を土粒子・水・空気からなる3層構造で表現し、地下水の流入・流出を考慮した飽和・不飽和浸透流解析から、連続的に地震応答解析を行うことで、集水地形上の盛土の耐震診断を可能とした(図7)<sup>5)</sup>。1/10模型を用いた降雨実験および加振実験から、不透水層を有する谷埋め盛土模型と不透水層なしの盛土模型の2つの実験結果を、一連の飽和・不飽和浸透流解析、地震応答解析が精緻に表現できることを確認した。

津波による被害は、地域によって未経験あるいは経験が極めて稀で、かつ発生すれば被害が甚大となる。一方、中央防災会議防災対策推進検討会議の下に2012年4月に設置された「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ(主査:河田恵昭関西大学教授)」にお

いて、南海トラフ巨大地震や津波による被害、対策の検討を進めている<sup>6)</sup>。このように鉄道沿線の沿岸地域における津波による浸水域、被害推定は、事前対応のほか、事後の初動対応にも影響を及ぼす重要な検討事項である。鉄道総研では、差分法と粒子法を組み合わせ、大規模な津波の発生から、津波の遡上、そして流出物(浮遊物)を取り込みながらの浸水域の推定が可能な3段階の津波解析を可能とした(図8)<sup>7)</sup>。なお、各段階で解析領域を縮小させ、各境界条件の流入・流出を一致させることでより詳細な解析を行いつつ、計算時間の短縮を図っている。これにより東北地方太平洋沖地震の想定断層変位から津波の発生を2次元差分法で解析し(1000km四方)、気仙沼湾での津波の遡上を3次元粒子法で解析し(4km×2km)、最後に大船渡線鹿折唐桑駅近傍の津波の浸水域を3次元粒子法で解析した(180m×150m)。第1の津波解析、第2の気仙沼湾の津波の遡上解析、第3の鹿折唐桑駅近傍の津波の浸水域解析の結果、東北地方太平洋沖地震による津波高の計測値、浸水域の観測値、被害実態をほぼトレー

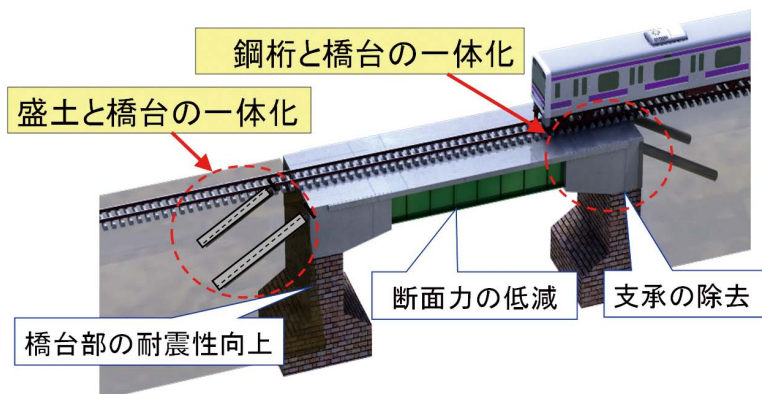


図9 鋼桁・橋台・盛土一体化工法

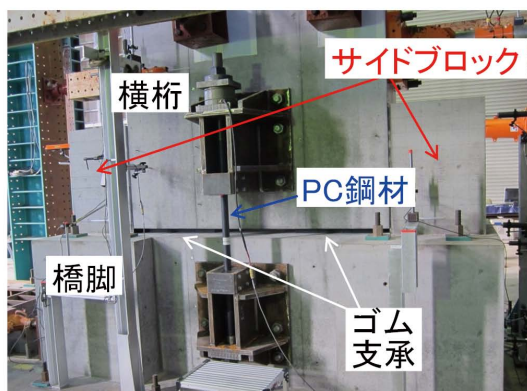
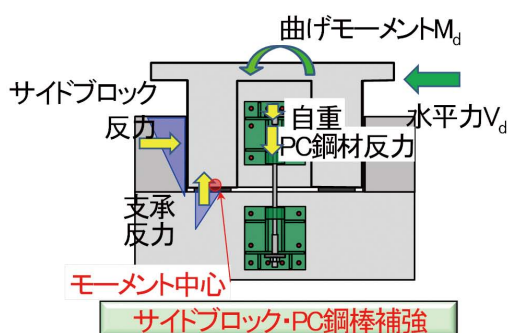


図10 桁移動制限装置

スできることが確認された。

橋梁の架替え無しでの鋼桁・橋台形式橋梁の耐震化を目的として、橋台と背面盛土を地山補強材と剛なRC壁により結合させ、鋼桁と橋台をRC巻立てでラーメン構造とする、鋼桁・橋台・盛土部の一体化工法（鋼桁・橋台・盛土一体化工法）を提案した（図9）。この工法は構造物境界で、弱点箇所であった鋼桁・橋台・盛土の境界を連続構造に変更することで、機能向上を図った画期的な工法であり<sup>8)</sup>、河川橋梁の越流に対しても鋼桁の流出抵抗を増加させることが可能となる。

津波による橋梁の桁流出防止技術として、津波の水平力、鉛直力（上揚力）を推定し、これに対して抵抗

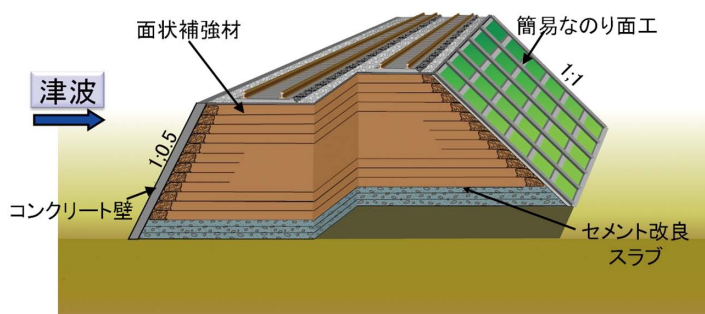


図11 耐地震・津波・強雨盛土構造

可能なサイドブロックとPC鋼棒からなる桁移動制限装置を提案した（図10）。津波の流速、津波高を与条件として作用する外力、提案工法の抵抗力により照査が可能となる。洪水時の河川橋梁の越流に対しても同様の考え方を適用できる<sup>9)</sup>。

津波による盛土の流出防止技術として、補強土構造とセメント改良スラブによる盛土構造を提案した（図11）<sup>10)</sup>。長時間に及ぶ津波の越流に対して、面状補強材による土粒子の流出防止効果と、セメント改良スラブによる盛土の安定化を図るものである。なお、1/10の従来盛土模型と提案構造の盛土模型による越流実験を行った結果、従来盛土は越流によりり面が浸食し、これに伴い急激な下降流が発生することで洗掘が進展、拡大した。一方、提案構造では盛土の浸食は発生せず、背面の支持地盤の洗掘は生じるものの、盛土は安定を保持した。なお、既設盛土に対する津波対策は提案構造と同様の考え方を適用し、土粒子の流出防止に棒状補強材とのり面工を、支持地盤の洗掘防止に鋼矢板による締切り工を設置することとした。

## (2) RC ラーメン高架橋柱の損傷検知技術

地震時に発生するRCラーメン高架橋の損傷（損傷レベル）は、高架橋の応答変位の増加とともに柱のかぶりコンクリートのはく落、主鉄筋の降伏、コンクリートの圧縮破壊、主鉄筋の座屈等による抵抗力の低下へと進展する。RCラーメン高架橋の応答変位と部材角（柱と梁がなす角度）の関係は、構造物の諸元によって決定される。したがって、地震時に柱端部に生じる最大応答部材角を測定することで、地震後早期に柱の損傷レベルの評価が可能となり、被災後の調査や復旧作業の効率化により、運行再開までの時間短縮が可能となる。鉄道総研では、地震後の初動対応として、RCラーメン高架橋柱の損傷検知を目的に、最大変位を記憶する無電源方式のセンサー「ピークセンサー」により、柱の最大応答部材角を測定する部材角測定装置、およびこれを用いたRCラーメン高架橋柱の損傷レベル検知システムを開発した（図12）。これまでの検討では、装置の測定誤差は10%程度であること、新幹線高架橋群を模擬したモデル線区に対し、時刻歴動的非線形解析を行い、部材角測定装置の配置方法と構造物の損傷レベルの推定値との比較を行った結果、約5kmに4基程度の測定システムを配置すれば、高い精度で損傷レベルの推定が可能であることがわかった<sup>11)</sup>。このシステムを導入することで、中規模地震による軽微な損傷では、従来高所作業車を用いた近接目視で確認するところを、本データおよび一部の代表高架橋の近接目視で代替可能であり、運転再開までの調査時間を大幅に短縮させることが可能となる。

## (3) 被災後の診断・補強技術

鉄道構造物が被害を受けると、被災構造物の診断、および補強技術が必要になる。ここでは、平成24年7月九州北部豪雨（2012年）による被災後の復旧の技術支援と、熊本地震（2016年）による被災後の復旧の技術支援を紹介する。

平成24年7月九州北部豪雨では、久大線の隈上川橋梁が増水により基礎底面の支持地盤の吸出し・洗掘が生じ、P2橋脚が約350mm沈下した。被災後の衝撃振動試験では健全度の低下が確認できるものの、載荷試験等により支持地盤の緩みを除去することで再供用可能と判断し、各種載荷試験を実施し運行再開に繋がった。具体的には、水タンクによる鉛直載荷試験（機関車荷重DE10の90%までの載荷）により沈下の収束を確認し、機関車による走行試験（制動荷重を付与す



図12 RC ラーメン高架橋柱の損傷検知システム  
（水色：部材角測定装置、ピンク：振動センサー）

る列車停止試験を含む)を行い、沈下がほぼ収束したことを確認した。これらの一連の載荷試験により被災後、約1か月での運行再開に繋がった。なお、基礎については、シートパイル補強工法による補強を実施した上で、2013年4月に徐行解除とした（図13）。

熊本地震では、九州新幹線の新玉名・新八代間のRCラーメン高架橋の柱や支承部が損傷した。その数は1000箇所を優に超え、被害箇所の調査、復旧計画策定、復旧に長期間を要することが懸念された。そこで、運行再開前に補修が必要か否かを指標とし、損傷をランク分けし、徐行での運行再開、その後の徐行解除による段階的復旧の方針とした。この結果、2016年4月23日（被災後9日）に博多・熊本間で運行再開し、4月27日には九州新幹線全線で運行再開に至った（図14）。

2つの事例は、被災後の鉄道構造物の診断およびその結果に基づく補修・補強により早期復旧を図ったものである。熊本地震では、復旧計画策定段階で広域での多数の被害箇所を被災程度と区間に分け、運行再開から徐行解除を区間ごとに実施した初めての例であった。

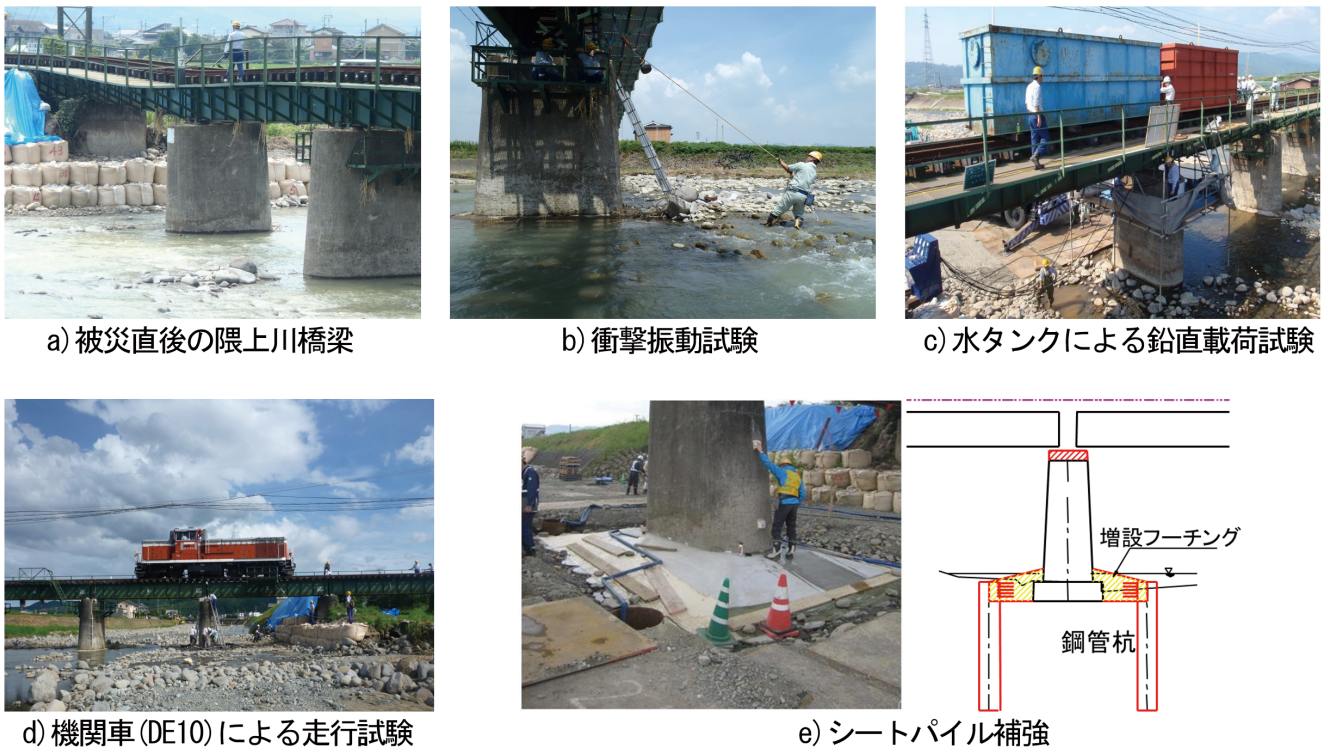


図 13 平成24年7月九州北部豪雨により被災した隈上川橋梁の診断・補強に関する技術支援



図 14 熊本地震により被災した九州新幹線高架橋の診断に関する技術支援

## 4. さらなるレジリエンスの向上にむけて

前章では、鉄道総研が取り組んできた、鉄道のレジリエンスの向上を目的とした、事前対応として「事前の診断・補強技術」、事後の初動対応として「RCラーメン高架橋柱の損傷検知技術」、事後の復旧対応として「被災後の診断・補強技術」を紹介した。以下では、さらなる鉄道のレジリエンスの向上に向けて、今後の取り組みを述べる。

洪水・津波発生に伴い、浸透、越流、浸食（洗掘）、堆積、流出（流木、橋脚、桁など）が生ずるが、これらは流水による複雑な現象である。これらの浸透、浸食（洗掘）、堆積、流出物の影響により、洪水・津波による被害が広域、かつ深刻となってきた。例えば、今年発生した平成29年7月九州北部豪雨では、大量の流木、土砂の流出が被害を拡大させた。このような事象はこれまで顕著な例がなく、あるいは未経験の事象と言ってよい。このような未経験な事象では、事前の被害推定、弱点箇所抽出の重要性が、より増すと

考えられる。また、復旧においても原状復旧の考え方では、今後の洪水・津波発生時の被害の拡大、甚大化は否定できない。

前章で示した3段階の津波解析による津波の浸水域、被害の推定では、流水、浮遊物、構造物を表現したが、盛土や橋梁などの構造物の変形・破壊は表現できていない。洪水・津波の発生時には、水・土・構造物の他に流出物も混じり合い、これらの相互作用によってその流れは変化する。その際、流水、浸透、浸食（洗掘）、堆積により土や構造物の変形・破壊が進展し、被害拡大に繋がる（図15）。そこで、未曾有の洪水や津波による被害の推定では、既存の3段階の津波解析を発展させ、構造物（盛土、橋梁）の浸透、浸食（洗掘）、堆積、変形・破壊、そして流出を考慮した大規模変形・破壊解析が必要と考えられ、これらの解析法の構築が望まれる。特に流体と練成させた浸食（洗掘）、堆積を伴う土・構造物の大規模破壊解析は、学術レベルにおいても高度でかつ、難易度が高い研究開発である。

一方、洪水・地震・津波発生後、被災構造物の復旧では、原状復旧から強化復旧の考え方への見直しが求められる。早期に運行再開を可能にし、今後新たに発生する被災時に鉄道構造物の壊滅的な状態を回避するため、段階的に強化が可能な技術（段階的強化復旧技術）が必要となる（図16）。この技術で必要とする特徴は手戻りが少なく、かつ早い施工速度である。このように早期復旧から強化復旧へ容易に展開可能な、各種構造物の段階的強化復旧技術が望まれる。



図15 洪水・津波発生時の水・土・構造物・流出物の相互作用

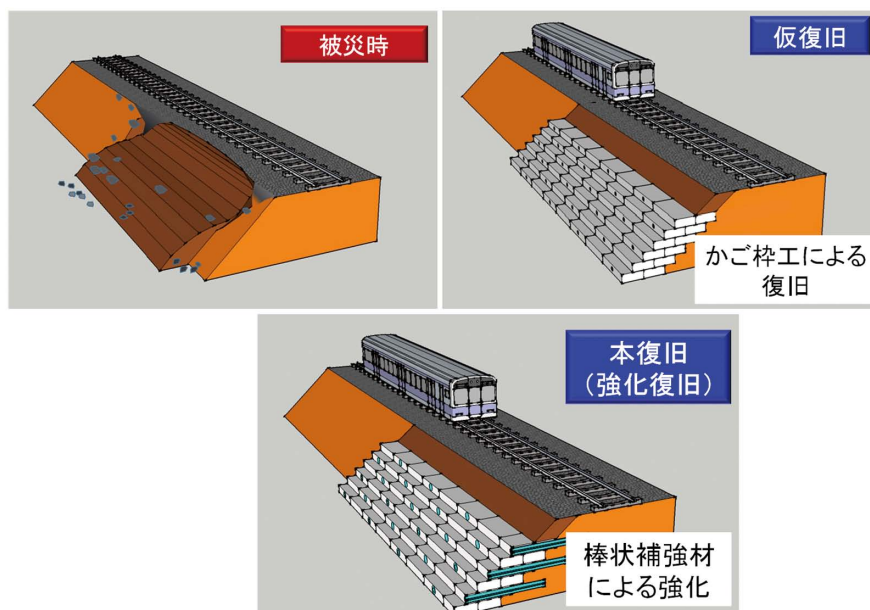


図16 被災盛土の段階的強化復旧の例

## 5. おわりに

本講演では、過去の地震や降雨による鉄道構造物の被害から得られた知見を総括するとともに、鉄道のレジリエンスの向上を目的として、特に鉄道構造物の災害対策を中心に、鉄道総研が取り組んできた事前対応（事前の診断・補強技術）、事後対応（RC高架橋柱の損傷検知技術、被災後の診断・補強技術）について紹介した。

洪水・津波発生時の現象として、浸透、浸食（洗掘）、堆積、流出物が被害を拡大させ、深刻化していることから、さらなる鉄道のレジリエンスの向上には、洪水・津波による広域災害の推定精度の向上策や段階的強化復旧技術の必要性を示した。鉄道総研では、鉄道のレジリエンスの向上に寄与する研究開発を継続、発展させ、実務展開を目指していく予定である。

なお、本文に示した「鋼桁・橋台・盛土一体化工法」、「桁移動制限装置」、「RCラーメン高架橋柱の損傷検知システム」は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

## 参考文献

- 1) 館山勝：地上設備の耐震化技術，第24回鉄道総研講演会講演概要集，2011.11
- 2) 公益社団法人地盤工学会：平成28年熊本地震地盤災害調査報告書，2017.4
- 3) 公益社団法人土木学会九州北部豪雨災害調査団：平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書，2013.2
- 4) 公益社団法人地盤工学会平成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，2017.8
- 5) 松丸貴樹，小島謙一，館山勝：浸透水の影響を受けた盛土の地震時挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集C（地圏工学），Vol.70，No.1，pp.135-149，2014
- 6) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害推定について（第2次報告）～施設等の被害～【被害の様相】，2013
- 7) 室谷浩平，高垣昌和：MPS法を用いた鉄道構造物に対する津波波圧による構造解析，第22回計算工学講演会，ソニックシティ（埼玉県さいたま市大宮区），2017
- 8) 神田政幸，野中隆博，館山勝，龍岡文夫：橋梁・

盛土の構造物境界の耐震化－既設盛土一体化橋梁－，橋梁と基礎，Vol.47，No.12，pp.22-27，2013.12

- 9) 渡辺健，大野又稔，岡本大：津波によるコンクリート橋りょうの被害判定，鉄道総研報告，Vol.30，No.12，pp.29-34，2016
- 10) 渡辺健治，松浦光佑，野中隆博，藤井公博，工藤敦弘，中島進：大地震及び津波越流に粘り強く抵抗するジオシンセティックス補強土，地盤工学会誌，Vol.64，No.3，pp.8-11，2016
- 11) 松本光矢，曾我部正道，谷村幸裕，仁平達也：応答部材角測定システムによる高架橋群の損傷レベル推定手法，コンクリート工学論文集，Vol.31，No.2，pp.847-852，2009