

# 鉄道分野における最新技術と

## 研究開発

### ～災害対策と早期復旧～

鉄道総合技術研究所

構造物技術研究部

神田 政幸



Railway Technical Research Institute

1

# 講演内容

1. 過去の地震被害、降雨被害の特徴と課題
2. 鉄道総研の災害対策-事前、初動、復旧対応
  - 事前の診断技術、補強技術
  - 初動の損傷検知技術
  - 被災後の診断技術、補強技術
3. さらなる災害対策と早期復旧
  - 強雨や津波による事前の広域被害推定
  - 原状復旧から強化復旧へ



Railway Technical Research Institute

2

## 関東大震災における地震被害

地震降雨被害

●1923年関東大震災では鉄道の**地震被害の多くは盛土**であったが、これは明治～大正、昭和初期に造られた在来鉄道のほとんどが土構造物であったことに起因する。なお、1944年東南海地震や1948年福井地震においても同様な盛土被害が確認されている。



関東大震災(1923年)



小田原駅での列車転覆状況

**技術的対応:**この地震を受け、1930年の橋梁標準設計では**水平震度0.2**が採用された。しかし、地震は**人智が及ばない天災**との認識から、盛土の耐震設計や既設施設に対する耐震補強は行われてこなかった。

3

## 新潟地震・十勝沖地震の被害

地震降雨被害

●1964年新潟地震では、**地盤の液状化**により、盛土の沈下、橋梁の落橋、建物の傾斜など、多くの被害が生じた。また、1968年十勝沖地震でも複線開業直前の東北線において、多くの盛土が液状化によって被災した。



新潟地震(1964年)



十勝沖地震(1968年)

引用: <http://ameblo.jp/starletgt/image-10995372988-11436844341.html>

**技術的対応:**これらの地震を契機に、国鉄では「耐震強化研究委員会」を設置し、その成果により東海道新幹線では、**シートパイル締切り工**などにより既設盛土に対して液状化対策が施された。

4

# 1995年兵庫県南部地震

地震降雨被害

●都市近郊直下型地震。従来の盛土主体の被害と異なり、RC高架橋柱などのせん断破壊により、甚大な被害が生じた。

JR神戸線高架橋柱せん断破壊



大開駅開削トンネルの被災

技術的対応：緊急対策として、新幹線などの重要施設の柱に対し、せん断破壊対策を実施。また、新設構造物の設計に関しては、耐震標準が制定され、中(レベル1)地震動、大(レベル2)地震動を対象とした2段階設計法、性能照査型設計法を導入。



Railway Technical Research Institute

# 東北地方太平洋沖地震(2011年)

地震降雨被害



電柱の折損



余震による再被害



津波被害

# 熊本地震(2016年)



柱の損傷



支承部損傷



斜面変位に伴う橋梁損傷

変形イメージ



Railway Technical Research Institute

# 鉄道構造物のこれまでの地震対策

地震降雨被害

●被害が少なかったのは、1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震被害を受け、優先度の高いものから順次、せん断破壊対策、落橋対策などが行われてきた成果。



鋼板巻立て補強

RC巻立て補強

移動制限装置

巨大地震・広域で、かつ時事刻々と変化する余震により、鉄道構造物に被害を及ぼす場合がある。



Railway Technical Research Institute

# 平成24年7月九州北部豪雨(2012年)

地震降雨被害



谷埋め盛土の崩壊



斜面崩壊/土砂流出



橋梁・基礎損傷

# 台風7、9、10、11号大雨(2016年)



橋梁流出



基礎の洗掘



護岸倒壊



Railway Technical Research Institute

## 盛土・橋りょうのこれまでの降雨対策

地震降雨被害

- 盛土は降雨に見合うのり面工、排水溝を設置し、滞水による盛土内への雨水の直接浸透や、越流を想定していない。
- 1990年の九州豪雨において、同一箇所が破堤。その際、補強盛土で復旧。2012年豪雨では復旧箇所の隣で破堤。



- のり面工は無かったものの、補強材のおかげで越流によるガリ侵食が途中でとまった。



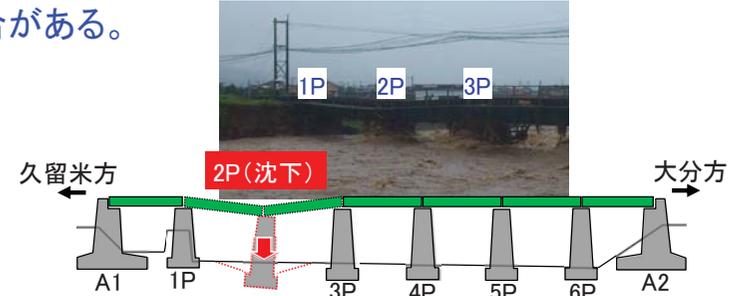
Railway Technical Research Institute

9

## 盛土・橋りょうのこれまでの降雨対策

地震降雨被害

- 河川橋りょうは降雨量に見合う設計高水位を設定し、設置。桁高を超える水位は想定していない。
- 橋りょう設置時期と比較して、護岸整備が進み、集水能力が向上。また、最近の局所的集中豪雨により河川水位が桁高を超える場合がある。



広域の豪雨、局所的豪雨で、かつ急変することにより、鉄道構造物に被害を及ぼす場合がある。



Railway Technical Research Institute

10

## 地震被害、降雨被害による知見

地震降雨被害

- 地震・降雨：巨大・広域、かつ急変する自然外力

**技術的対応**：2012年版鉄道構造物設計標準（耐震設計）で、想定を超える巨大地震動に対する取り扱いとして、「危機耐性」を導入。2014年に国土強靱化基本計画（6月3日閣議決定）を策定。目標①人命保護、②国家、社会機能の致命的障害の回避、③被害の最小化、④迅速な復旧復興。

危機耐性とは：想定を超える巨大地震災害（降雨災害も同様）などの「危機」に対して、破壊的な状態の回避と全体系機能の早期回復を可能にする必要性（構造計画、進入路、など設計計算では考慮されていない配慮）。

事前対応（防災・減災技術）

事後対応（早期復旧技術）



Railway Technical Research Institute

11

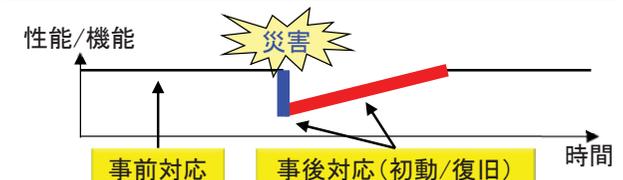
## 被害の特徴とレジリエンスの向上

地震降雨被害

特徴

- 巨大地震、余震：多数の地震動により損傷が進行。津波により、広域の沿岸部で被害が拡大。
- 短時間強雨：越流により構造物の損傷が進行、拡大。

### 被災前後の構造物の性能曲線



- レジリエンスとは、「壊滅的な状態の回避」と「全体系機能の早期回復」を可能にする性能。

- 鉄道のレジリエンスを高めるためには、事前対応（防災・減災技術）、事後対応（運行再開、早期復旧技術）が必要。



Railway Technical Research Institute

12

事前対応

● 防災・減災技術

事前の診断・補強技術

(予め弱点箇所を選定し、粘り強い構造に変更する)

事後対応

初動対応

● 早期運行の判断技術

被害 無～軽微  
⇒ 運行再開

損傷検知技術

(無～軽微な被害を判断し、運行再開に繋げる)



復旧対応

● 早期復旧技術

被害:大 取替  
～中被害 再使用+補強 ⇒ 運行再開

被災後の診断・補強技術

(被災構造物の再使用の可否を判断し、補強し運行再開に繋げる)



事前の診断技術



講演内容

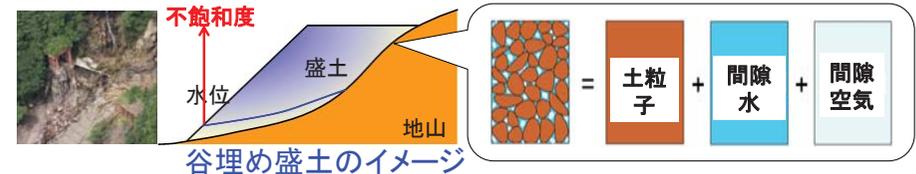
1. 過去の地震被害、降雨被害の特徴と課題
2. 鉄道総研の災害対策-事前、初動、復旧対応
  - 事前の診断技術、補強技術
  - 初動の損傷検知技術
  - 被災後の診断技術、補強技術
3. さらなる災害対策と早期復旧
  - 強雨や津波による事前の広域被害推定
  - 原状復旧から強化復旧へ



集水地形上の盛土の耐震診断

災害対策  
(事前対応)

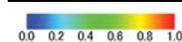
- 沢地形上の盛土(谷埋め盛土)は地下水が集まりやすく、耐震性が低い。
- 土粒子・水・空気からなる3層構造で土を表現。降雨の流入・流出を考慮した土構造物の耐震診断法を構築。



降雨の影響解析

地震応答解析

飽和度分布(水分)



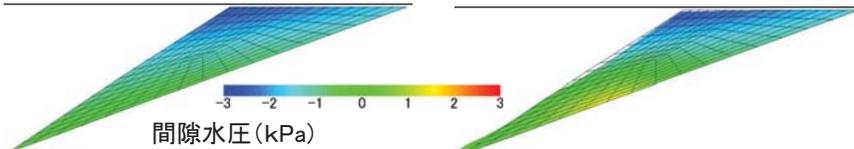
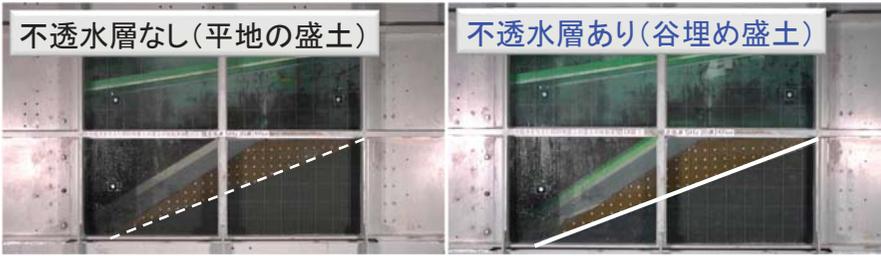
変形・水圧分布



## 1/10模型実験による検証

災害対策  
(事前対応)

- ▶ 不透水層なし(平地の盛土) vs 不透水層あり(谷埋め盛土)
- ▶ 降雨20mm/h(4時間)後、地震400gal(5Hz、10波)



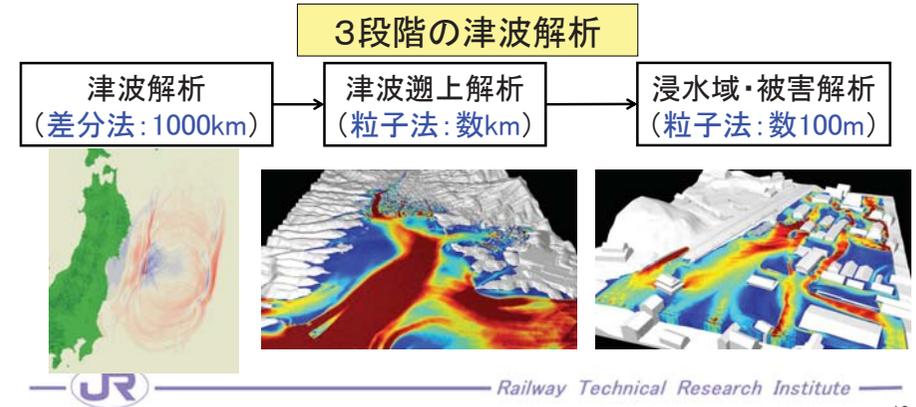
■ 谷埋め盛土等の集水地形上の土構造物の耐震診断が可能。耐降雨診断も可能。

17

## 津波による浸水域・被害の推定

災害対策  
(事前対応)

- ▶ 粒子法: 変形/移動・衝突・不連続面解析が得意(津波・洪水・土石流)
- ▶ 水・固体を粒子で表現し、津波の発生から津波の遡上、浸水域・被害の推定。



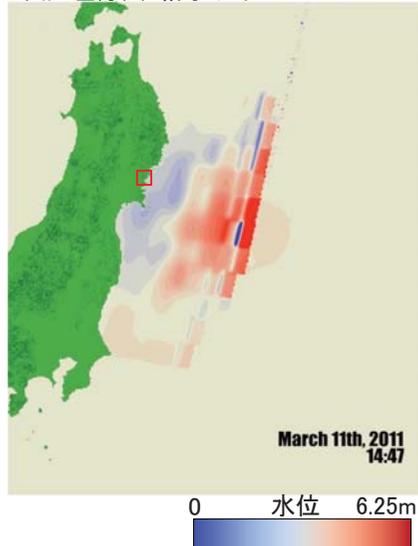
Railway Technical Research Institute

18

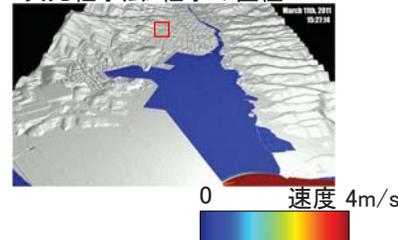
## 気仙沼湾/市街地の浸水域・被害解析

災害対策  
(事前対応)

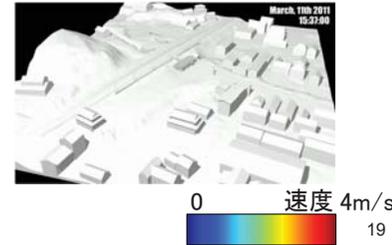
津波解析(1000km四方程度)  
2次元差分法/格子サイズ1350m~5m



津波遡上解析(4km x 2km)  
3次元粒子法/粒子の直径1m



浸水・被害解析(180m x 150m)  
3次元粒子法/粒子の直径0.1m



19

事前の補強技術

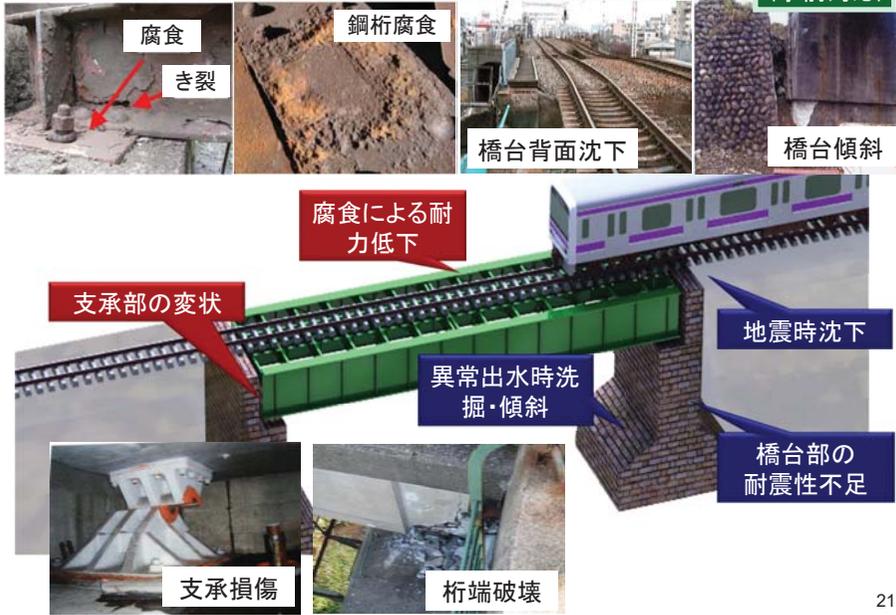


Railway Technical Research Institute

20

## ■ 既設の鋼橋りょうの課題

災害対策  
(事前対応)



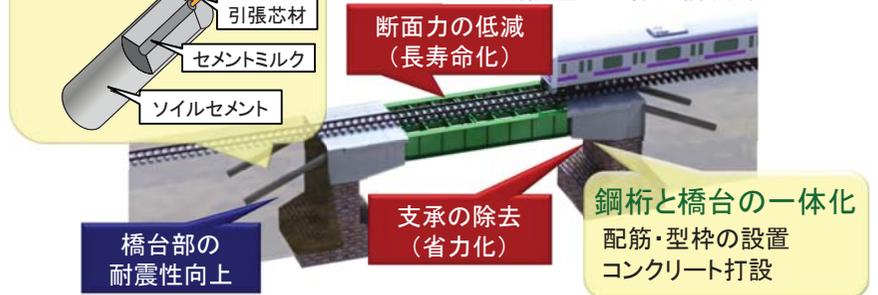
21

## 鋼桁・橋台・盛土一体化工法

災害対策  
(事前対応)

橋台と盛土の一体化  
地山補強材

Integral Bridge  
with Nail-Reinforced Soils  
既設盛土一体化橋りょう



既設の鋼橋りょうの架け替えなしで、

- 列車を止めることなく日中・夜間工事⇒工費の削減・工期の短縮
- 支承部除去(構造境界部)⇒メンテ費削減



本件については、国土交通省からの補助金により、研究開発。

22

## ■ 一体化効果: 静的載荷910kN

災害対策  
(事前対応)

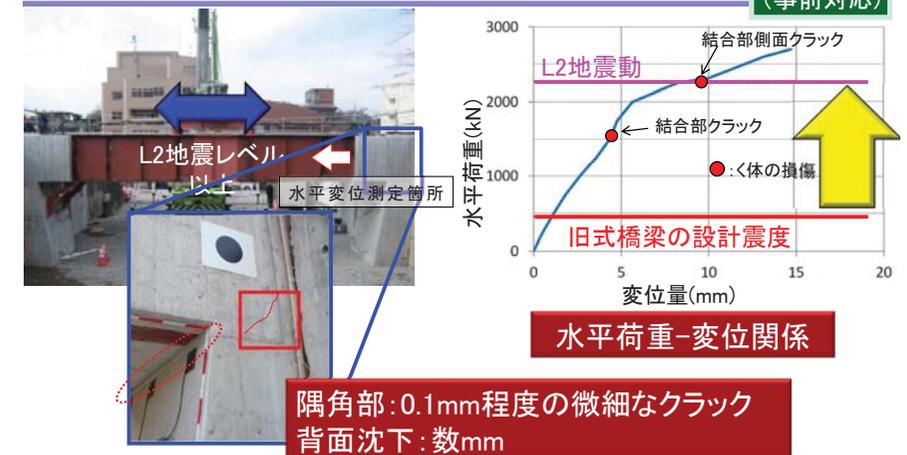


軌道荷重レベルでも両端固定条件を保持

23

## ■ 一体化効果: L2地震時挙動

災害対策  
(事前対応)



本工程により、耐震性の向上(L2地震レベル)を確認(微細なクラック程度)。既に実用化レベルにある



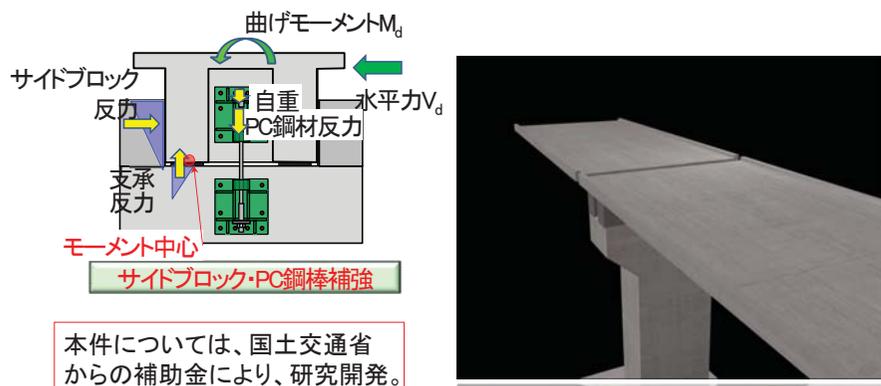
Railway Technical Research Institute

24

## 耐津波・洪水用の桁移動制限装置

災害対策  
(事前対応)

- ▶ 桁流出防止技術として、津波到達時に発生する水平力、鉛直力に抵抗可能な「桁移動制限装置」を提案。
- ▶ 洪水時も同様に抵抗可能。



本件については、国土交通省からの補助金により、研究開発。



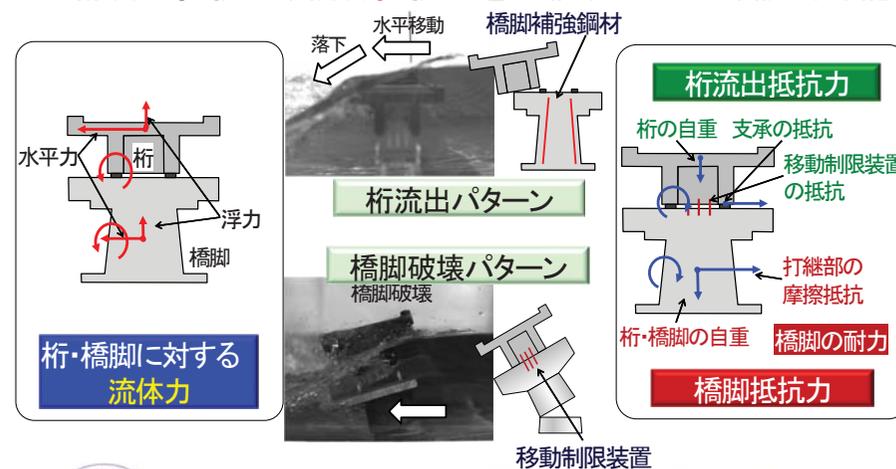
Railway Technical Research Institute

25

## 津波・洪水の流体力・抵抗力による診断

災害対策  
(事前対応)

- ▶ 津波到達時(洪水時)の流体力(水平力、鉛直力)と、桁流出抵抗力、橋脚抵抗力を比較することで、診断可能。



Railway Technical Research Institute

26

## 耐地震・津波・強雨盛土構造

災害対策  
(事前対応)

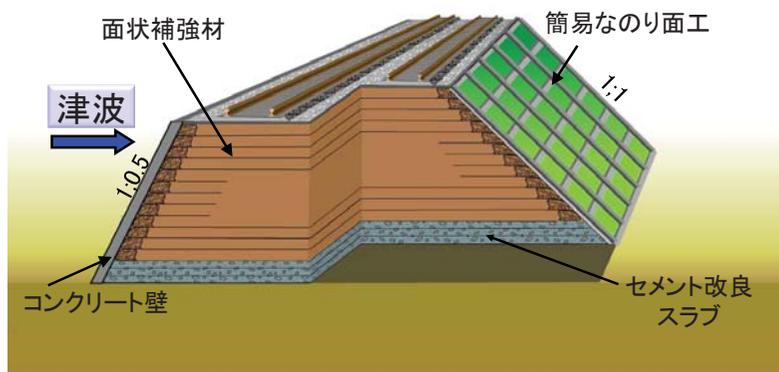
### 大規模地震への対応

補強土構造の採用

### 長時間の津波越流への対応

面状補強材・のり面工(流出回避)  
セメント改良スラブ(支持地盤の安定)

- ▶ 洪水時も同様に抵抗可能。越流実験で確認。



27

## 耐地震・津波・強雨盛土構造

災害対策  
(事前対応)

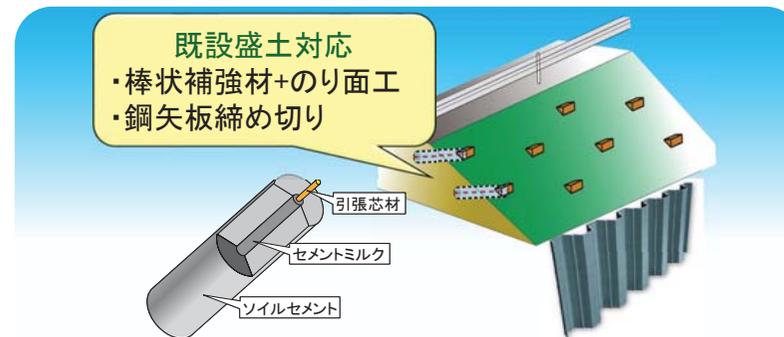
### 大規模地震への対応

補強土構造の採用

### 長時間の津波越流への対応

面状補強材・のり面工(流出回避)  
セメント改良スラブ(支持地盤の安定)

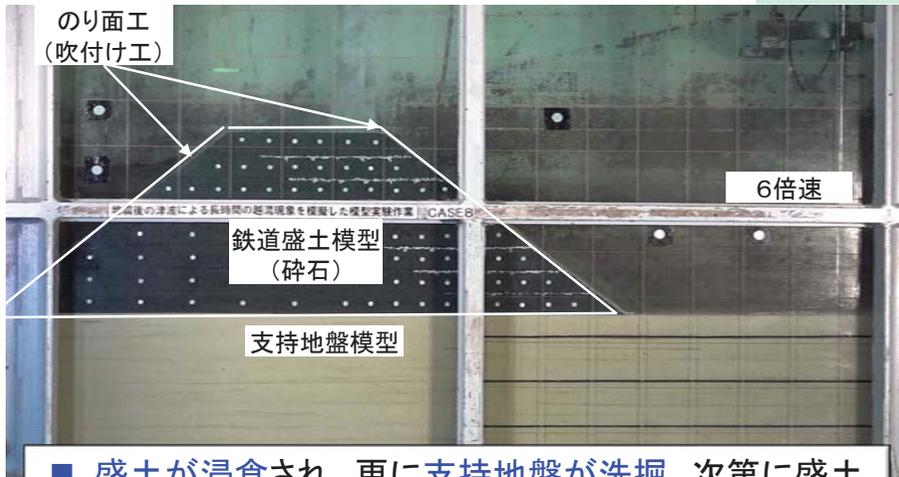
- ▶ 洪水時も同様に抵抗可能。越流実験で確認。



28

## 1/10従来盛土模型の越流実験

災害対策  
(事前対応)



- 盛土が浸食され、更に支持地盤が洗掘。次第に盛土全体の安定が損なわれる(3min=実物10min)。

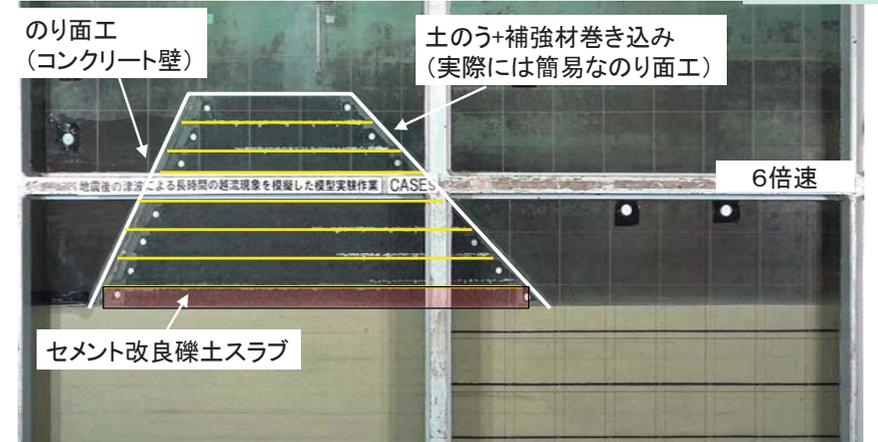


Railway Technical Research Institute

29

## 1/10提案盛土模型の越流実験

災害対策  
(事前対応)



- 盛土の浸食は補強材・のり面工で防護。支持地盤の洗掘はセメント改良スラブで回避。

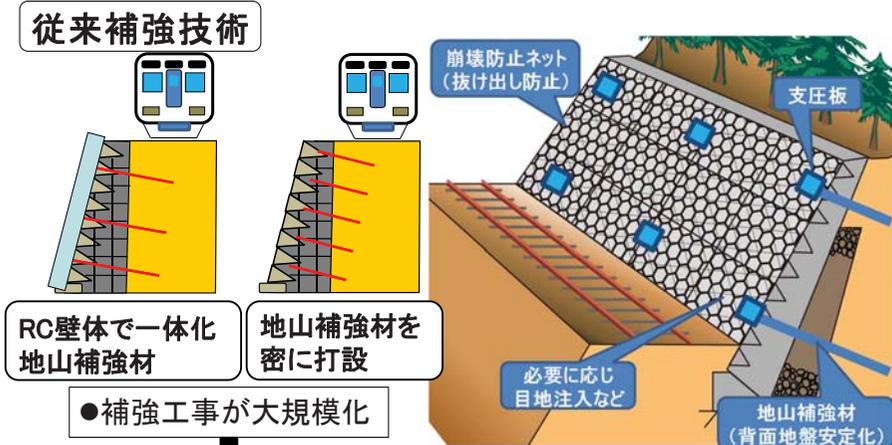


Railway Technical Research Institute

30

## 石積み壁：ネットと地山補強材補強

災害対策  
(事前対応)



●補強工事が大規模化

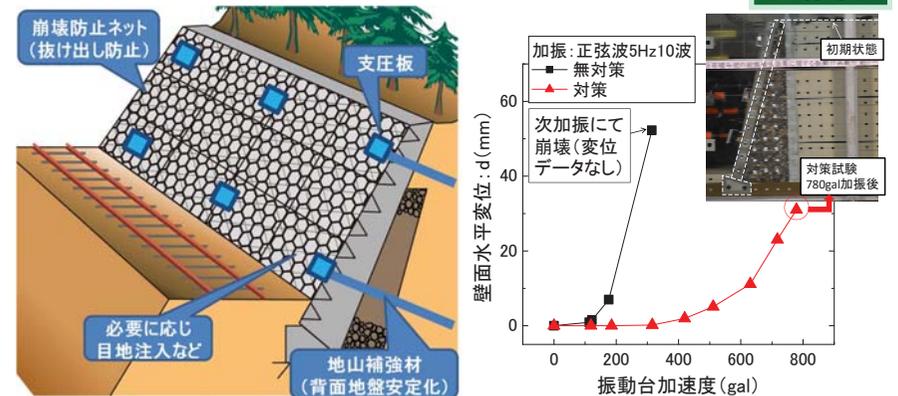
数量の多い石積み壁の補強に不適

◆背面地盤の安定性に応じて補強仕様を合理化可能

31

## 補強効果～1/6縮小模型、振動台実験

災害対策  
(事前対応)

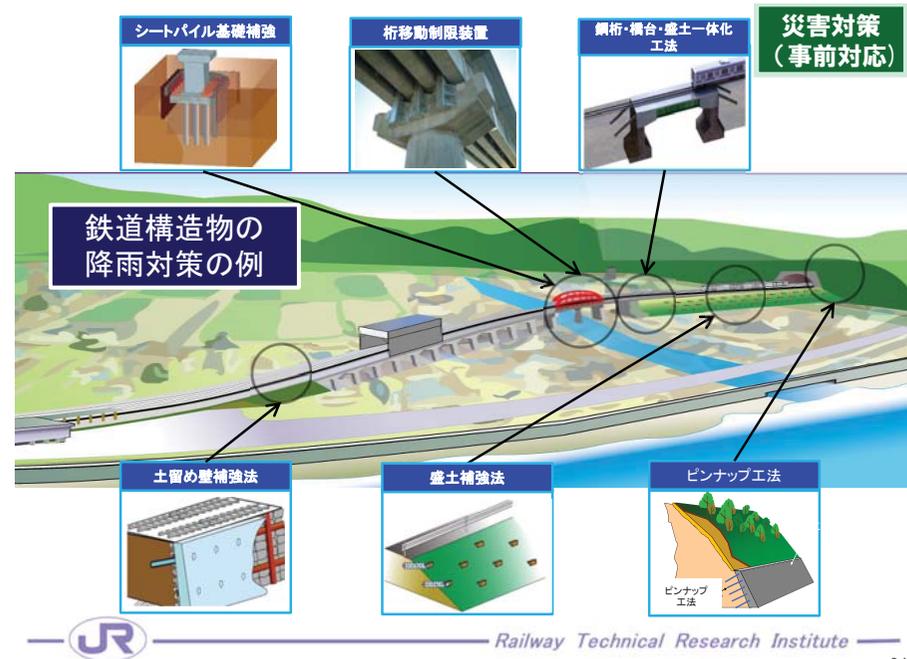
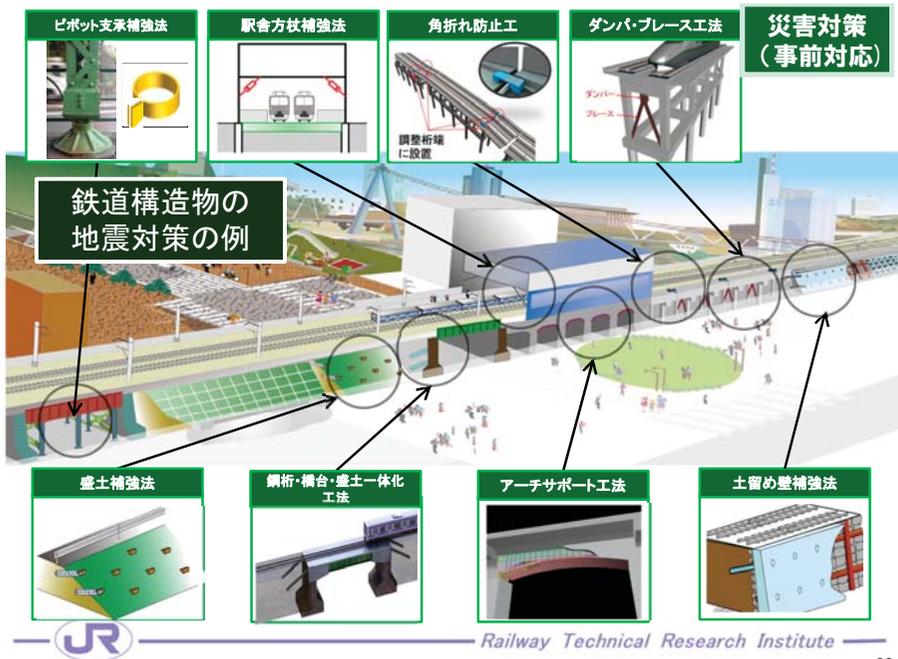


1. 崩壊防止ネットと地山補強材による石積み壁の耐震補強工法を開発
2. 振動台実験により高い耐震補強効果を確認



Railway Technical Research Institute

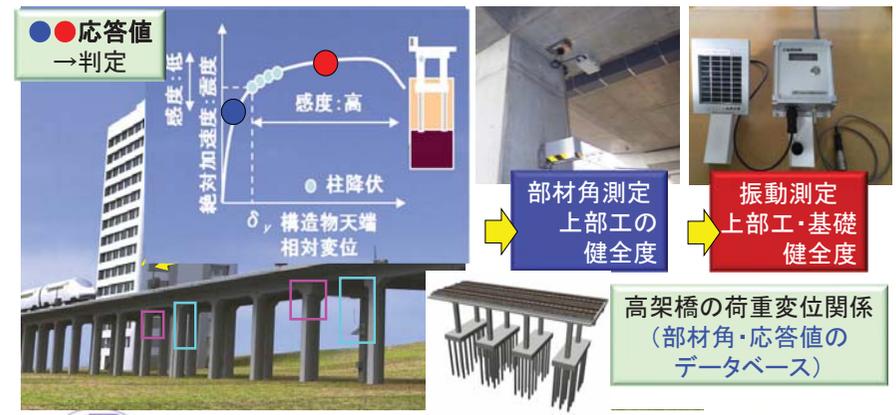
32



初動の損傷検知技術

地震後の構造物損傷検知システム (災害対策 (初動対応))

- センサー(部材角測定、振動測定)とデータ伝送システムを組み合わせた高架橋柱の損傷検知システムを開発。
- 無～軽微の損傷検知で運行再開を可能。

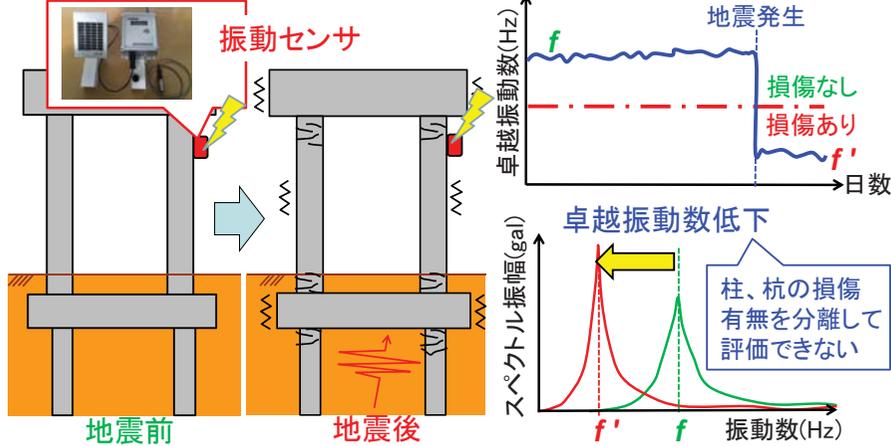


## ■ 構造物の損傷検知の手法

災害対策  
(初動対応)

### 振動センサ

常時微動の卓越振動数を計測し、卓越振動数の低下率から、柱、杭の損傷の程度を評価



柱と杭の損傷の有無を分離して評価する方法が必要

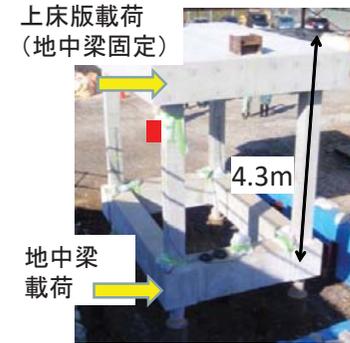
37

## ■ 損傷と振動数の低下(柱と杭)

災害対策  
(初動対応)

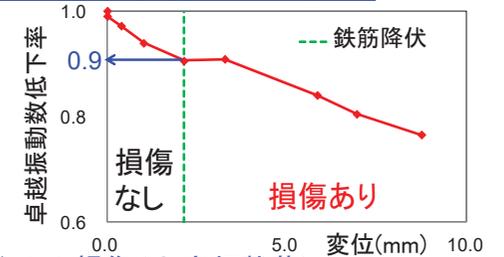
### 振動センサ

大型模型実験により、常時微動の卓越振動数の低下率と損傷の程度を確認

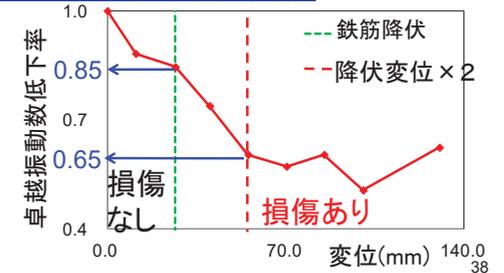


1/2大型ラーメン高架橋模型

### 杭頭部のみ損傷(地中梁載荷)

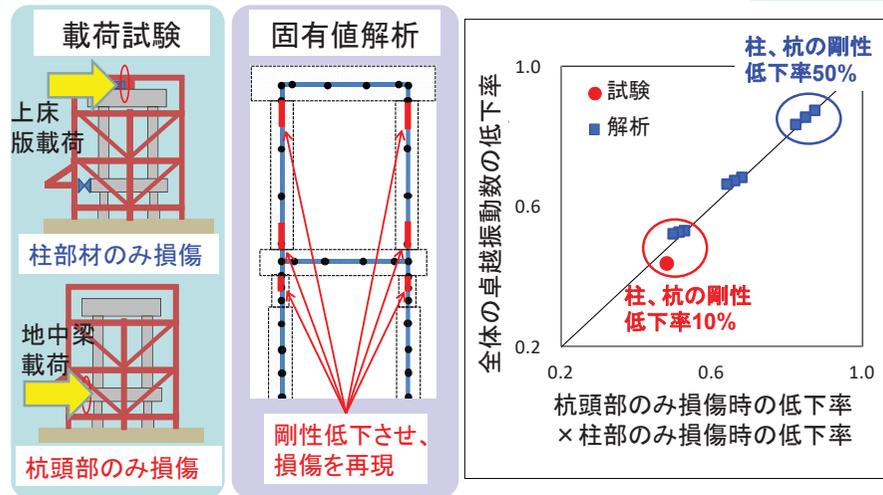


### 柱のみ損傷(上床版載荷)



## ■ 構造物全体の損傷、柱と杭の損傷の関係

災害対策  
(初動対応)



$$\text{全体の卓越振動数の低下率} = \text{杭頭部のみ損傷した場合の低下率} \times \text{柱部材のみ損傷した場合の低下率}$$

39

## ■ 構造物全体の損傷、柱と杭の損傷の関係

災害対策  
(初動対応)

### 卓越振動数の低下率と損傷程度の関係

卓越振動数低下率	柱のみ損傷		杭頭部のみ損傷	
	損傷なし	1.00~0.85	損傷あり	0.90~
1.00 ~ 0.90	損傷なし	1.00~0.90	損傷なし	1.00~0.90
0.90 ~	損傷あり	0.85~0.65	損傷なし	1.00~0.90

部材角より、柱のみ損傷した場合の低下率

$$\text{低下率(杭頭部のみ損傷)} = \text{低下率(全体)} \div \text{低下率(柱のみ損傷)}$$

40

## 早期運行を実現できる損傷検知システム

災害対策  
(初動対応)

	柱の損傷程度	従来への対応	手法導入後
中規模地震	 無損傷～軽微	 近接目視重視	 データと近接目視で 検査時間を短縮 部材角測定装置
巨大地震	 鉄筋降伏、かぶり剥落	 近接目視 + 衝撃振動試験 (健全度判定)	 データと近接目視で 早期に損傷箇所把握 部材角測定装置+振動センサ

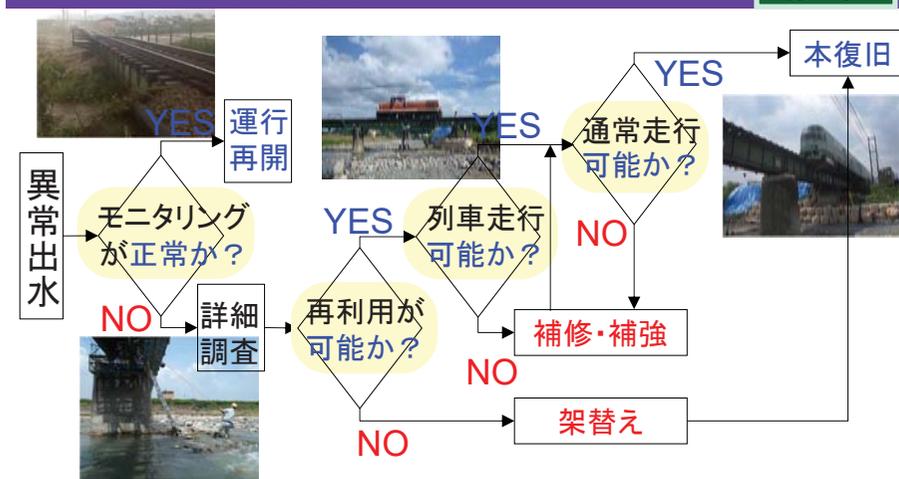
早期の運行再開  
早期の復旧計画策定

被災後の診断技術、補強技術  
(技術支援の事例)



## 被災後の早期復旧のためのフロー

災害対策  
(復旧対応)



- 診断(モニタリング、調査・試験)により適切・迅速な判断。
- 段階的強化復旧により、強化復旧。

## 洪水による被災後の復旧支援

災害対策  
(復旧対応)

- 久大線隈上川橋梁2Pが約350mm沈下(平成24年7月九州北部豪雨)。
- 各種試験(①②③)により診断を行い、運行再開。

① 衝撃振動試験

② 水タンク載荷試験

③ 機関車による走行試験

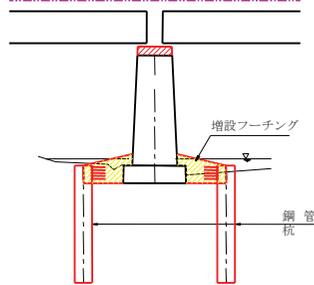
④ シートパイル補強で本復旧



## 徐行後、基礎の本復旧技術

災害対策  
(復旧対応)

シートパイル基礎で本復旧  
(直接基礎+締め切り工)。さらに。  
洗掘にも抵抗性が高い。



2012年7/14被災、8/25徐行+監視により約1か月での運行再開(仮復旧)。(本復旧は2013年4月徐行解除)



Railway Technical Research Institute

45

## 講演内容

1. 過去の地震被害、降雨被害の特徴と課題
2. 鉄道総研の災害対策-事前、初動、復旧対応
  - 事前の診断技術、補強技術
  - 初動の損傷検知技術
  - 被災後の診断技術、補強技術
3. さらなる災害対策と早期復旧
  - 強雨や津波による事前の広域被害推定
  - 原状復旧から強化復旧へ



Railway Technical Research Institute

47

## 地震による被災後の復旧支援

災害対策  
(復旧対応)

- 2016年熊本地震で九州新幹線が被災。
- 列車走行前に補修が必要か/否かでランク分け。
- JR九州殿:(運行再開/徐行解除)段階的復旧計画策定。

ホーム柱



⇒運行再開前に補修



⇒運行再開後に補修

- 2016/4/14被災後、4/23に(9日間)博多・熊本間で運行再開。  
(4/27全線運行再開、2017/3/4徐行解除)



Railway Technical Research Institute

46

## 強雨や津波による特徴的な現象

災害対策と  
早期復旧

集水/浸透



越流/浸食



洗掘



崩壊  
/堆積



流出物

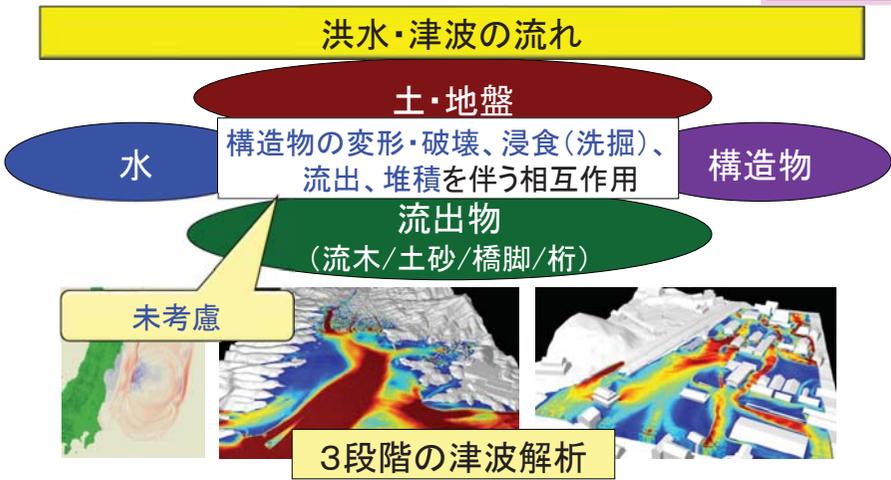
- 浸透、浸食(洗掘)、流出物(流木・土砂)、堆積の影響により、被害が広域、かつ大規模化。
- 未経験な現象、経験が乏しい現象。



Railway Technical Research Institute

48

## 強雨や津波による事前の広域被害推定 災害対策と早期復旧



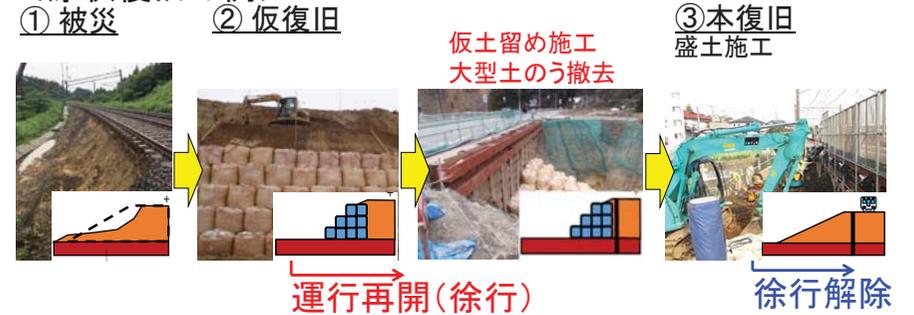
- 事前の広域被害推定を目的に、構造物の変形・破壊、浸食(洗掘)、流出、堆積を考慮した解析手法の構築。

49

## 原状復旧から強化復旧へ 災害対策と早期復旧

- 原状復旧が基本。再被害の可能性は否定できない。

### <原状復旧の例>



- 被災から仮復旧の状態、さらに通常の盛土構造に戻すことで、本復旧までの工期、コストが増。

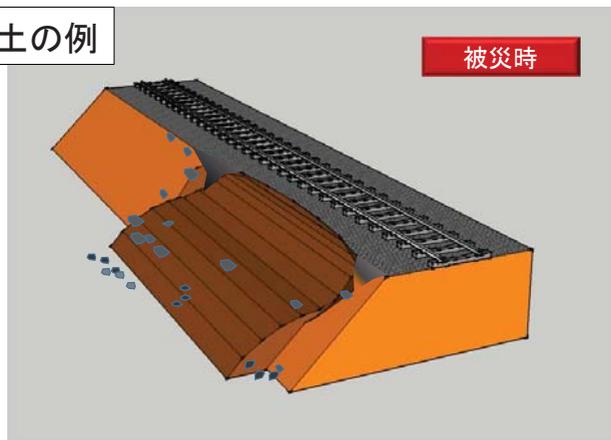


Railway Technical Research Institute

50

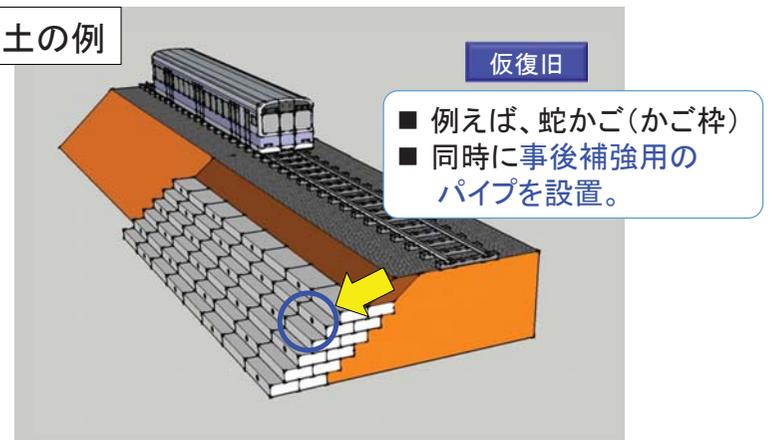
## 原状復旧から強化復旧へ 災害対策と早期復旧

盛土の例



## 原状復旧から強化復旧へ 災害対策と早期復旧

盛土の例



Railway Technical Research Institute

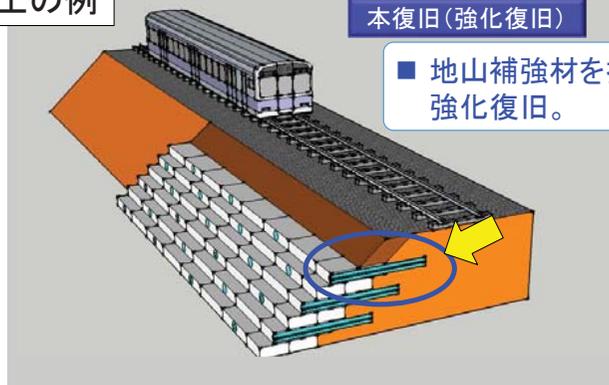
51



Railway Technical Research Institute

52

## 盛土の例



本復旧(強化復旧)

- 地山補強材を打設して強化復旧。

- 被災箇所は**弱点箇所**。早期復旧から強化復旧に展開可能な**段階的強化復旧技術**の開発。



## まとめ

- 巨大、かつ急変する自然外力に対して、**事前の補強技術**はもちろんのこと、被災時に無被害から軽微な被害を把握し、運行再開に繋がる**状態監視・損傷検知技術**、早期復旧のための**診断技術、補強技術**が必要。
- これらの技術は、災害発生時の**壊滅的な状態の回避と全体系機能の早期復旧**を可能とする「**危機耐性**」の向上に寄与。
- さらに、顕在化する**広域での被害推定**や**低コストな補強技術**が求められる。被災後は原状復旧から強化復旧可能な**段階的強化復旧技術**が必要。



- 従来から「事前の診断、補強技術」、「事後の損傷検知技術」、「早期復旧のための診断、補強技術」の開発。

巨大、かつ急変する強雨、地震、津波。  
 構造物の変形・破壊、浸食(洗掘)、堆積、その後の流出。  
 ➡ 被害が広域、大規模化。

これらを  
考慮

- (事前)広域の被害推定、補強技術の開発。
- (事後)原状復旧から強化復旧が可能な**段階的強化復旧技術**の開発。



## 講演内容

1. 過去の地震被害、降雨被害の特徴と課題
2. 鉄道総研の災害対策-事前、初動、復旧対応
  - 事前の診断技術、補強技術
  - 初動の損傷検知技術
  - 被災後の診断技術、補強技術
3. さらなる災害対策と早期復旧
  - 強雨や津波による事前の広域被害推定
  - 原状復旧から強化復旧へ

