

2025年度土木学会全国大会研究討論会  
数値解析における不確かさと原子力施設の安全性評価における課題

# 鉄道分野における数値解析の活用例

～地盤の動的解析の活用とその妥当性確認について～

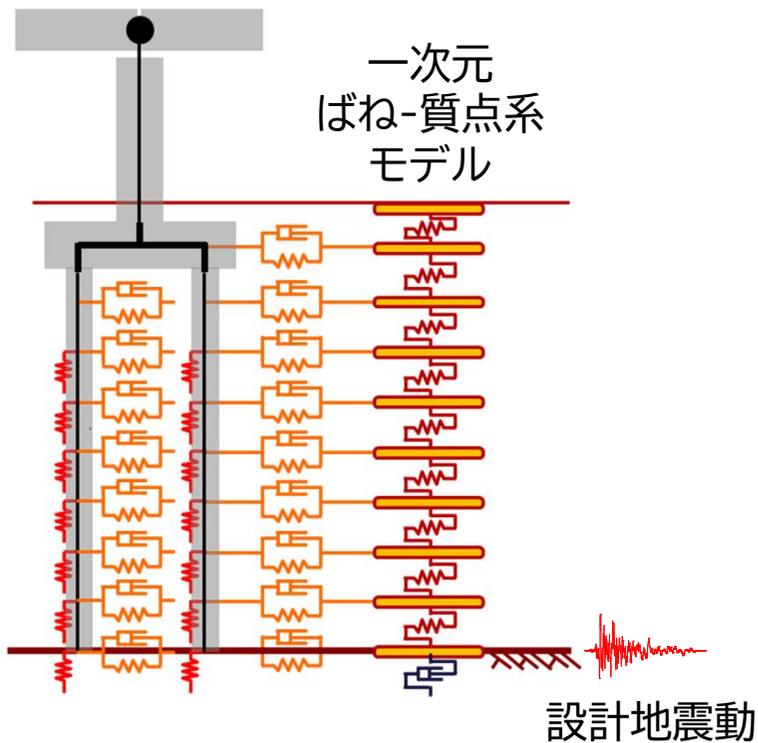
(公財)鉄道総合技術研究所  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室  
井澤 淳

*Railway Technical Research Institute*

1. 耐震設計 における活用例
2. 検証解析 における活用例
3. 全線評価 における活用例

# 1. 耐震設計における活用 ～橋りょう・高架橋の耐震設計～

## 動的解析法



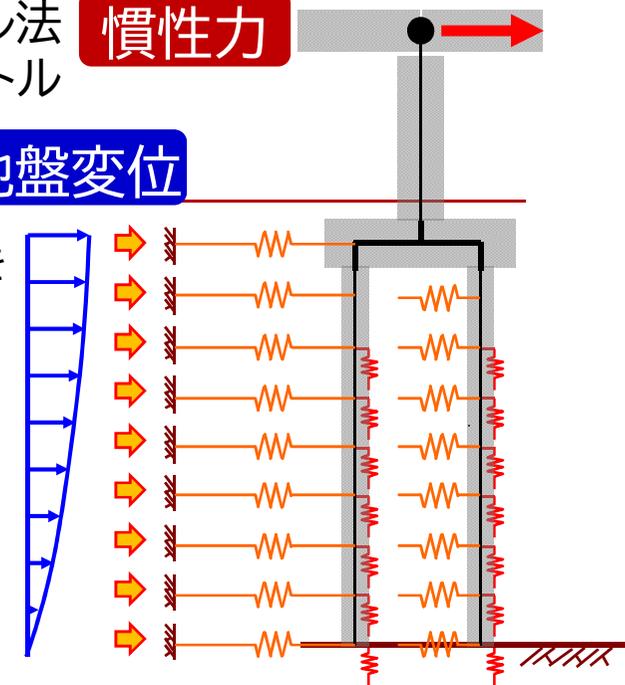
## 静的解析法

非線形スペクトル法  
※ 所要降伏震度スペクトル

応答変位法 **地盤変位**

※ モード解析を用いて設定

**慣性力**

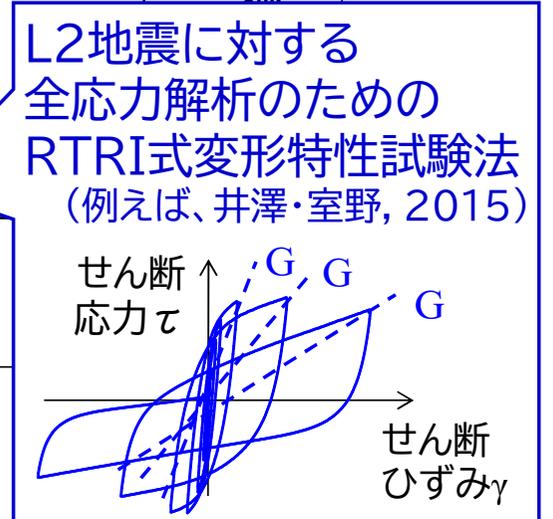
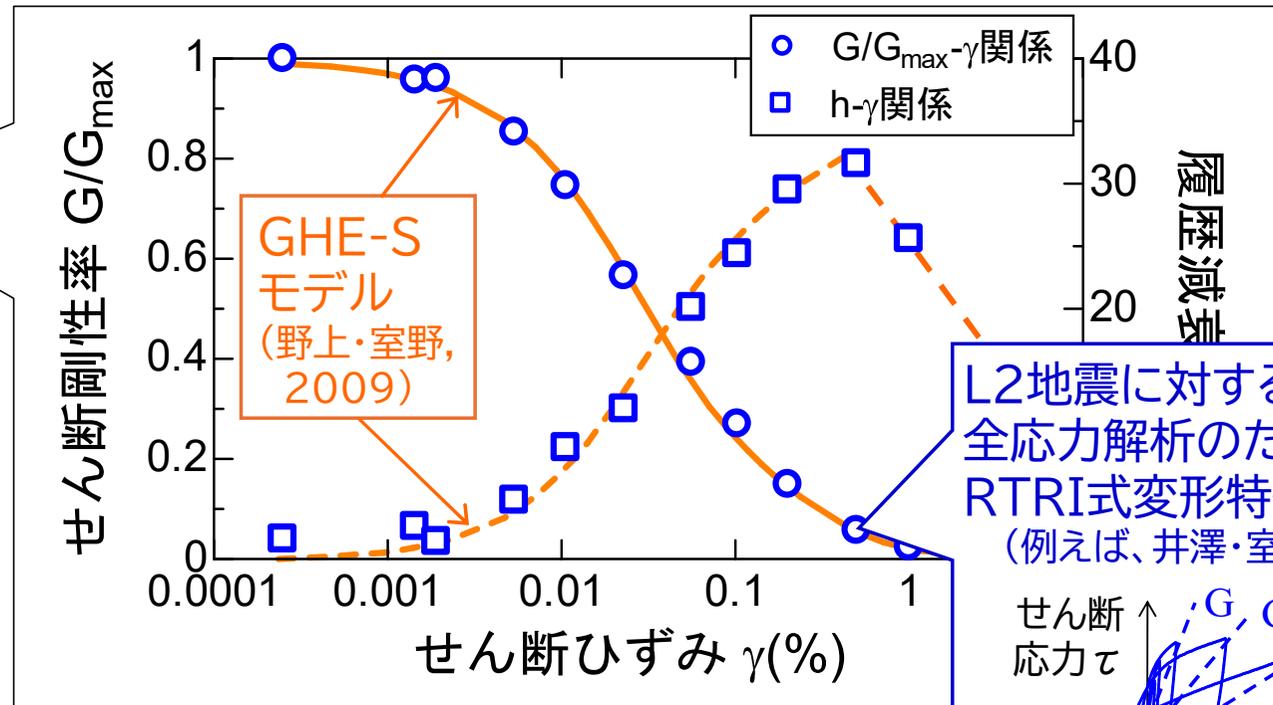
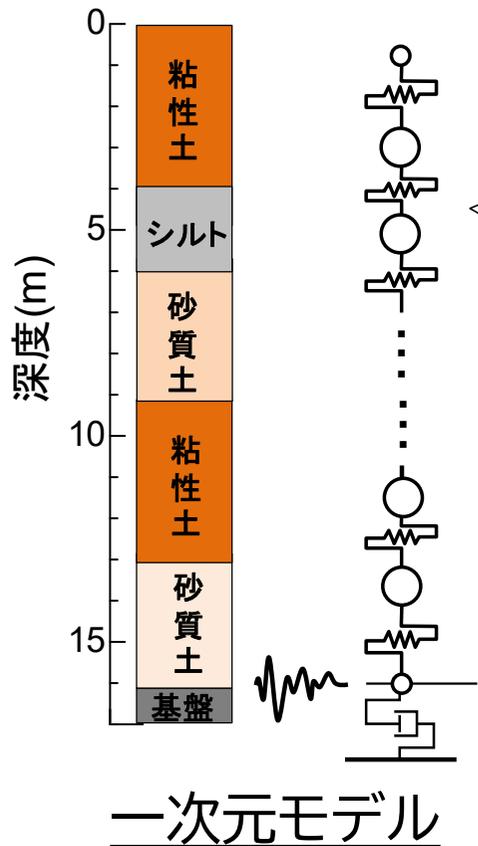


**慣性力** **地盤変位** の算定に  
動的解析の適用を推奨 → 近年、増加

# 1. 耐震設計における活用 ～地盤のモデル化～

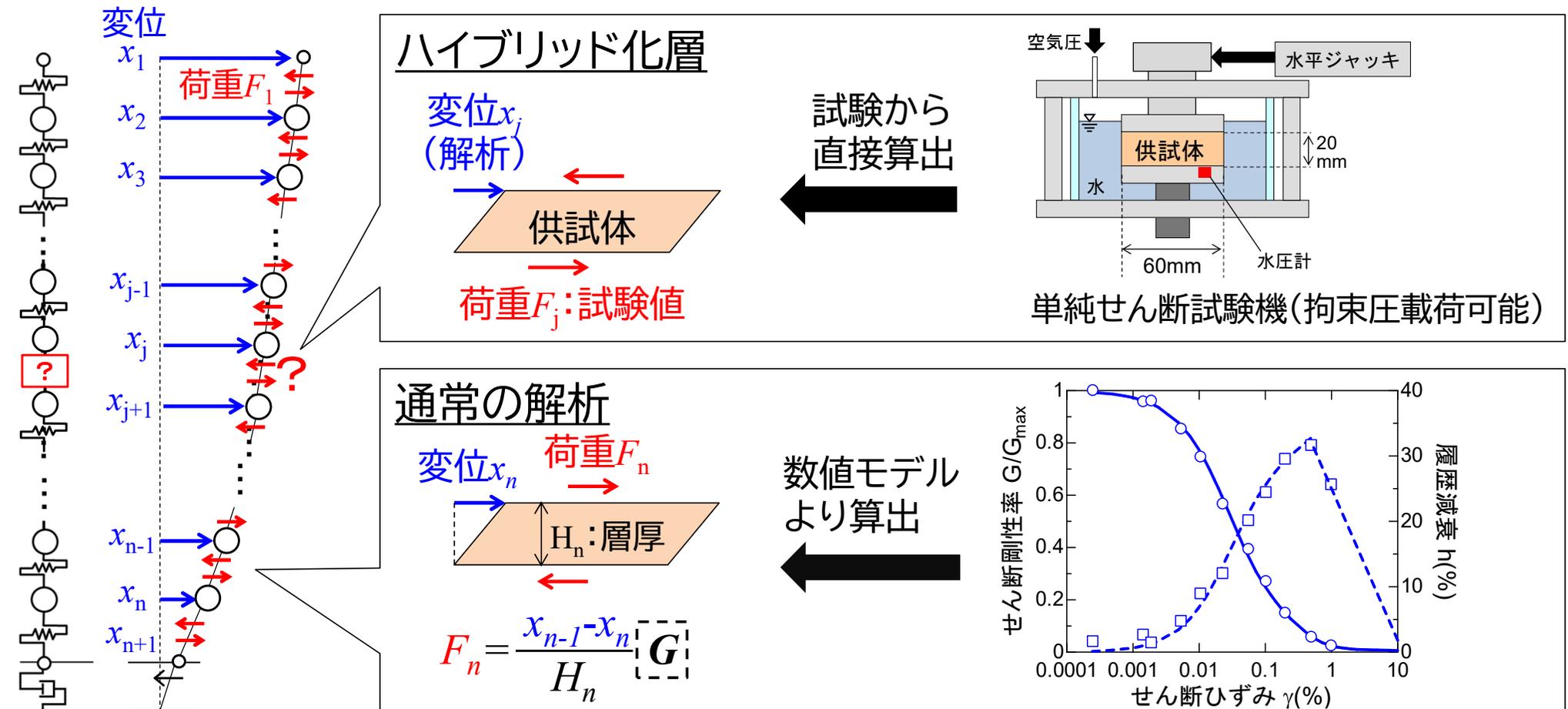
**構成モデル** : 幅広いひずみレベルの土の変形特性を再現可能

**試験結果** : 適切な解析を実施出来る構成モデルのパラメータを設定可能



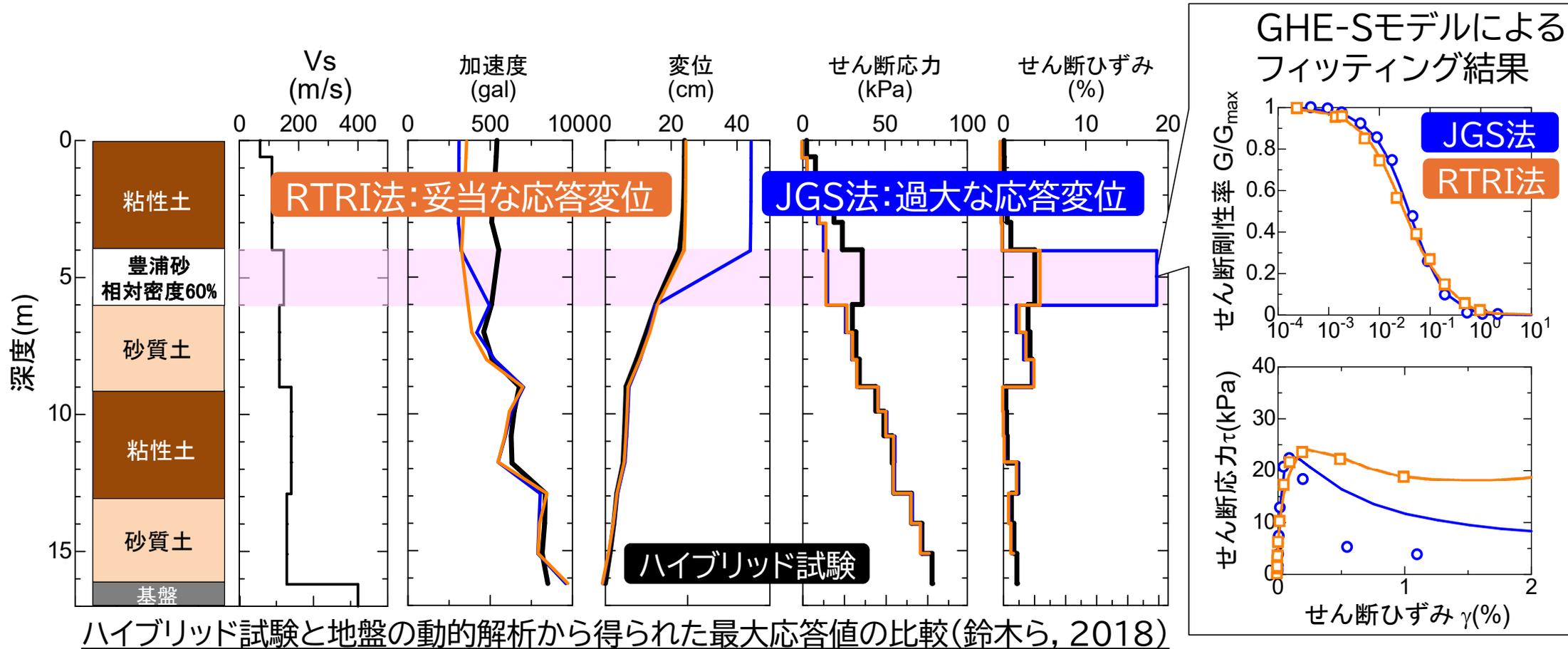
**妥当性の確認 → ハイブリッド試験**

# 1. 耐震設計における活用 ～モデル化の妥当性確認～



ハイブリッド地盤応答試験の概念図

# 1. 耐震設計における活用 ~モデル化の妥当性確認~



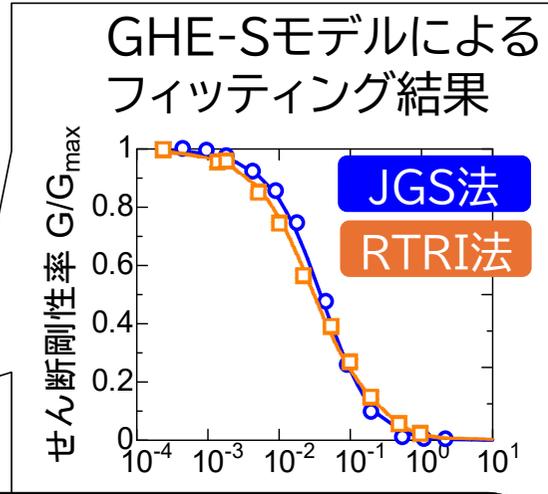
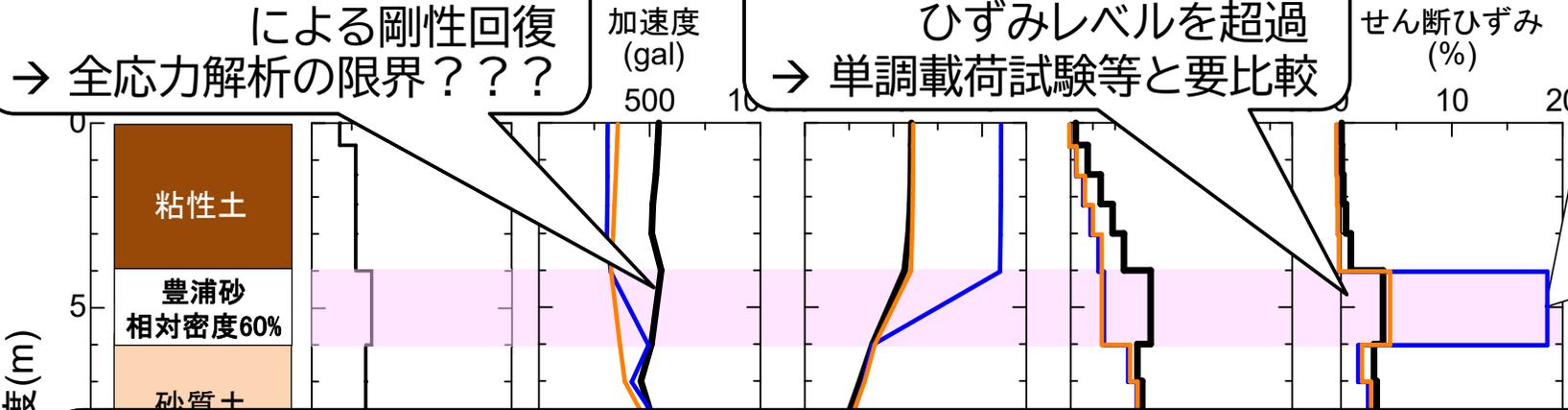
ハイブリッド試験と地盤の動的解析から得られた最大応答値の比較(鈴木ら, 2018)

**「GHE-Sモデル+RTRI法」→ 精度の高い応答値を算出可能**

# 1. 耐震設計における活用 ～モデル化の妥当性確認～

サイクリックモビリティ  
による剛性回復  
→ 全応力解析の限界???

試験で確認された  
ひずみレベルを超過  
→ 単調载荷試験等と要比較



「地盤の動的解析マニュアル(意見照会中)」の整備 → 解析結果の確認方法を記載

- 線形解析の実施 → 固有周期との整合確認
- スパイク等の発生の有無
- 応力・ひずみレベル、残留応力等の確認
- 試験における水圧変動の影響確認 → 全応力解析が適用可能か? 等を記載
- フィッティング時の注意点、最適化手法によるパラメータ設定ツールの付属 etc...

# 1. 耐震設計における活用 ～課題と現在の検討状況～

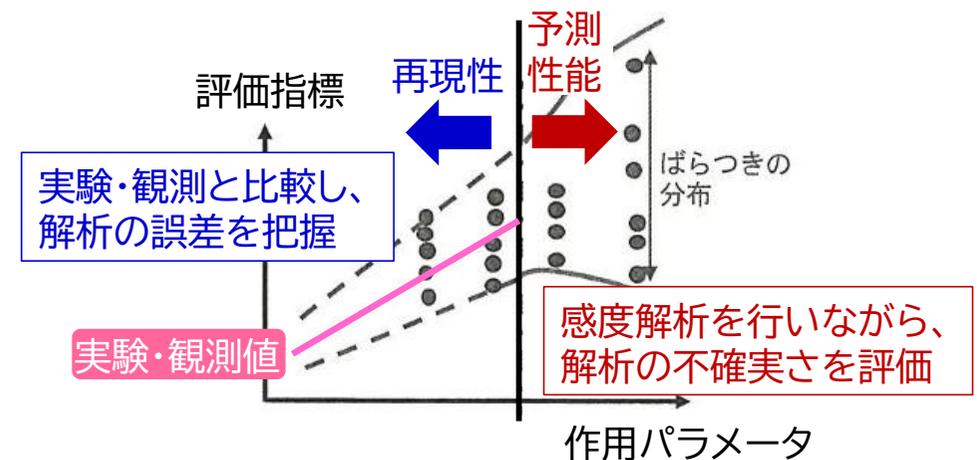
## (1) 定量的な妥当性確認手法の構築(Validation)

- ・ 定量的な誤差指標(DTW等を検討中)
- ・ 誤差指標の限界値(構造物の設計への感度と関係?)
- ・ 実務設計での使用を鑑みた手法 → 設計者自身で確認できないか?

## (2) 予測性能の評価法

**再現性** : 実験結果とどこまで整合するか  
→ 実施可能

**予測性能** : 実験と異なる作用に対して  
どれだけばらつくか?



「地盤・構造物の非線形解析法の検証と妥当性確認の方法」図 D2-1に加筆

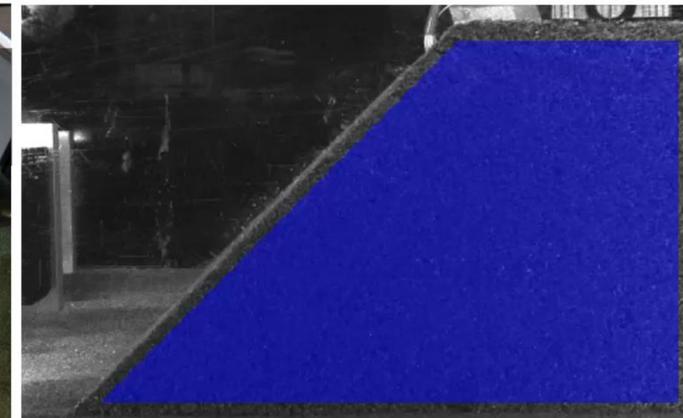
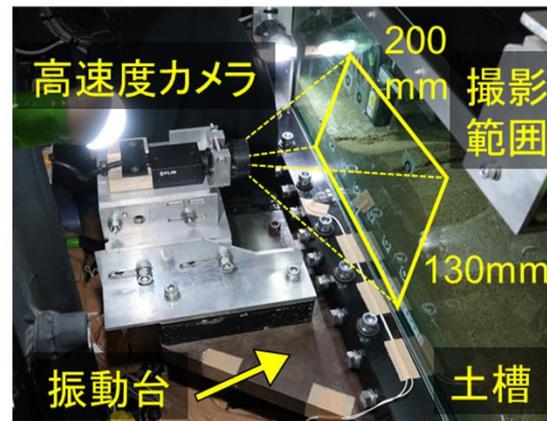
## (3) 多自由度+動的解析の信頼性評価手法の検討(Verification)

数値創成解による手法を用いて検討(月岡ら2025)

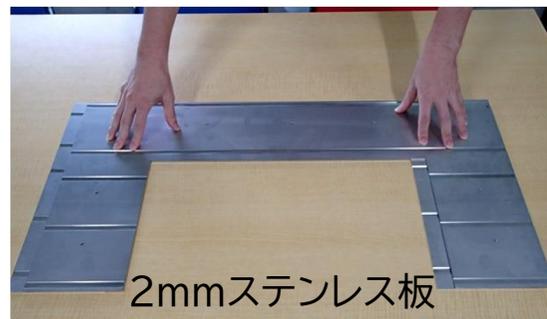
# 1. 耐震設計における活用 ～課題と現在の検討状況～

- (4) 一次元の全応力解析 → 2次元(土構造物、地下構造物等) + 有効応力解析へ展開  
→ 精緻な実験による確認対象の創出

- 例1) 遠心場での  
高速度・解像度画像撮影システム  
→ 動的な変形解析  
→ 2次元動的FEMの妥当性確認  
(井澤ら, 2023)



- 例2) せん断土槽の作成  
・ 内部の変状を観察可能  
・ 局所的なせん断可能  
→ 液状化時の挙動評価  
→ 有効応力解析の妥当性確認  
(土井ら, 2025)



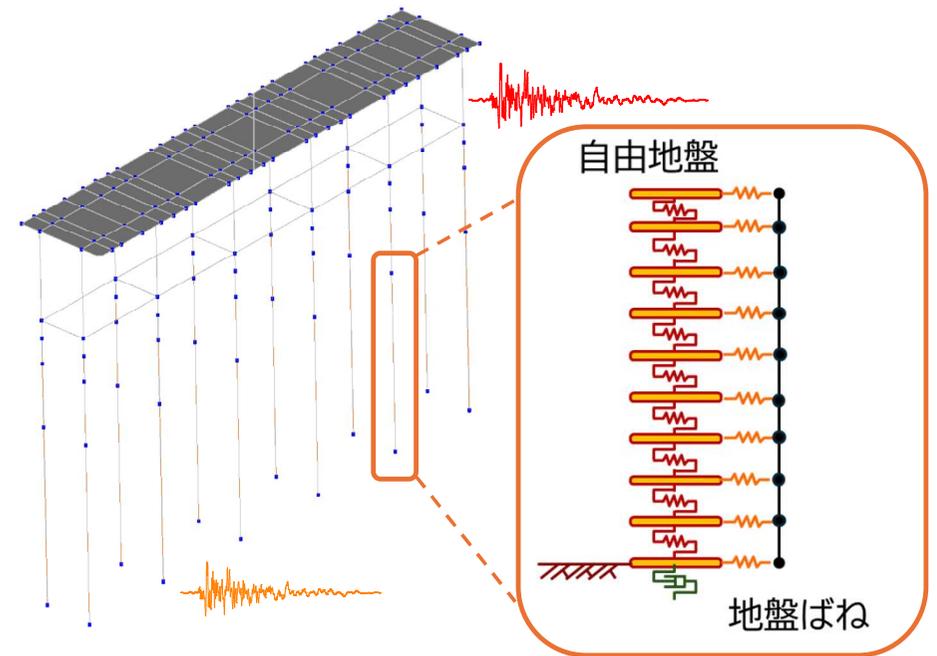
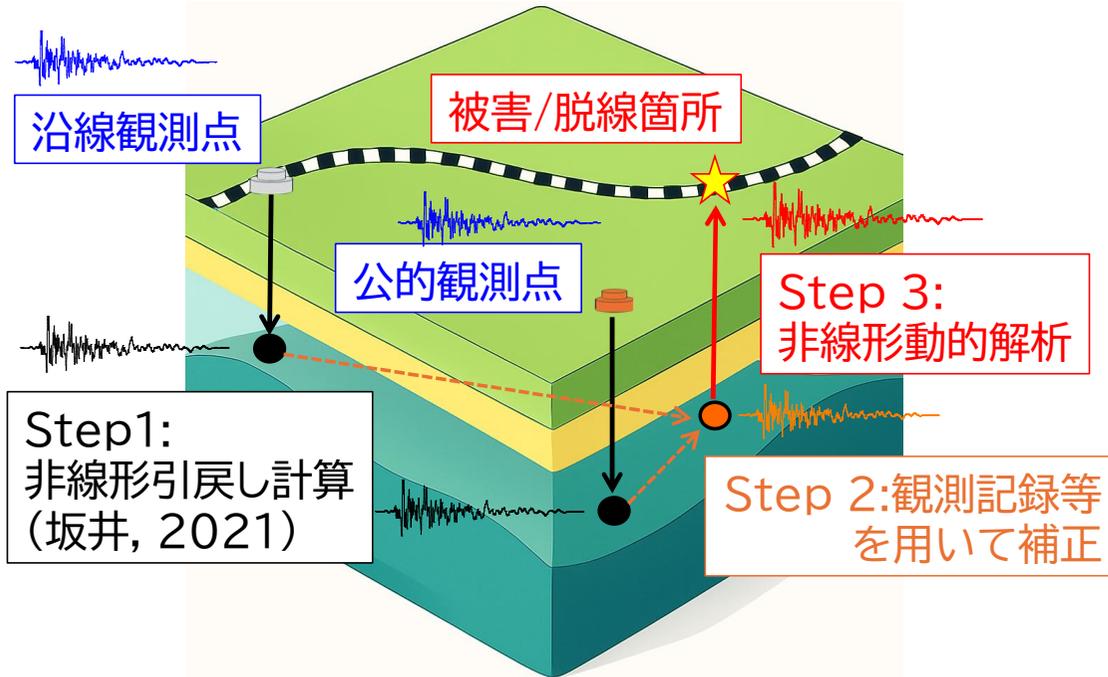
コの字型の極薄せん断土槽



1. 耐震設計 における活用例
2. 検証解析 における活用例
3. 全線評価 における活用例

## 2. 検証解析における活用例 ～実施手順～

大規模地震時の**構造物、付帯設備の損傷、車両脱線の要因分析等**で実施



**手順1** : 地震動評価 + 表層地盤の応答評価

**手順2** : 構造物シミュレーション

**手順3** : 走行性シミュレーション、付帯構造物シミュレーション

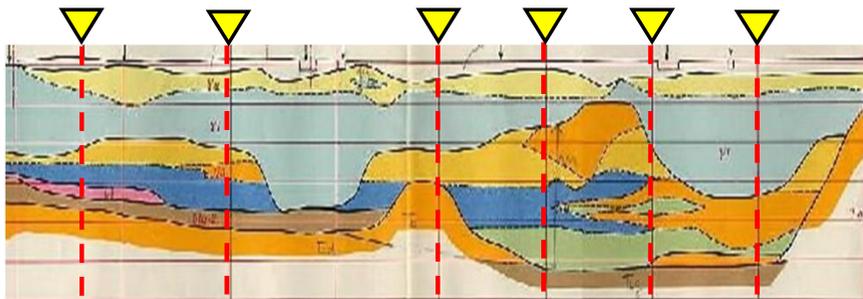
耐震設計と同様のモデル化手法を適用 ※ 限られた時間、調査・試験結果で実施

## 2. 検証解析における活用例 ～地盤のモデル化+妥当性確認～

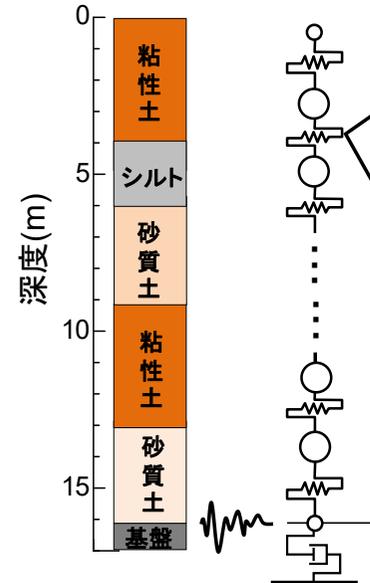
### (1) 既存調査を用いたモデル作成

発生直後の各種観測

- ・ 微動(地表、構造物情)
- ・ 微動アレー探査
- ・ 地震観測(数ヶ月程度) 等



既存のボーリング情報(主にN値, 土質分類)



- 初期剛性:  $G_0$   
N値  $\rightarrow V_s \rightarrow G_0$
  - 強度特性:  $\tau_f = \gamma_r * G_0$   
安田・山口市  
 $\rightarrow \gamma_{0.5} \rightarrow \gamma_r = \tau_f / G_0 = 2.5 * \gamma_{0.5}$
  - 非線形パラメータ  
GHE-S標準パラメータ  
(野上・室野, 2009)
- | $C_1(0)$ | $C_2(0)$ | $C_1(\infty)$ | $C_2(\infty)$ | $\alpha$ | $\beta$ |
|----------|----------|---------------|---------------|----------|---------|
| 1.000    | 0.830    | 0.170         | 2.500         | 2.860    | 3.229   |

1 or 2次元モデルの作成

### (2) 妥当性の確認

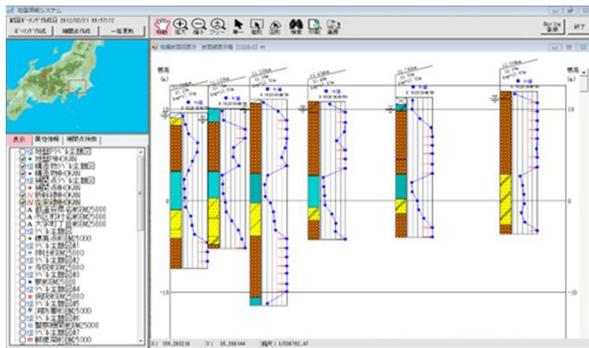
- 線形モデル : 観測結果の固有周期、H/Vスペクトル等の整合確認  $\rightarrow$  モデル修正
- 非線形モデル : 解析結果  $\Leftrightarrow$  観測記録、被害状況との整合確認  $\rightarrow$  モデル修正

耐震設計におけるモデル化手法を用いて、被害メカニズムを説明可能

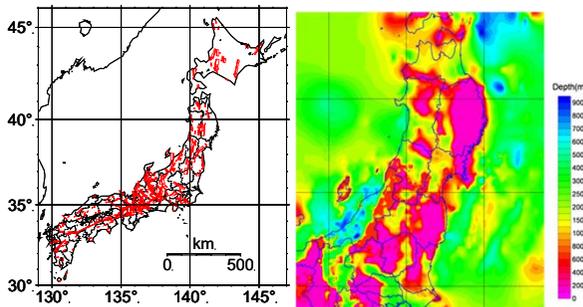
1. 耐震設計 における活用例
2. 検証解析 における活用例
3. 全線評価 における活用例

# 3. 全線評価における活用 ～鉄道地震災害シミュレータ～

長区間の全線評価 → 耐震補強の優先順位、復旧計画の策定など



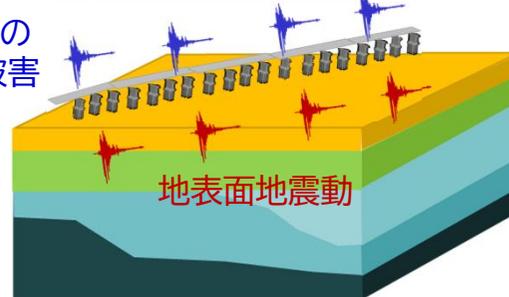
表層地盤情報(約20万点)



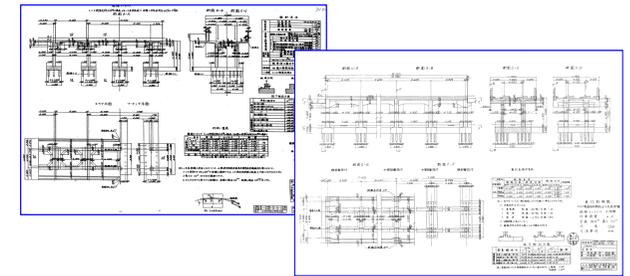
断層情報・深部地盤情報

## 構造物挙動シミュレーション

構造物の  
応答・被害

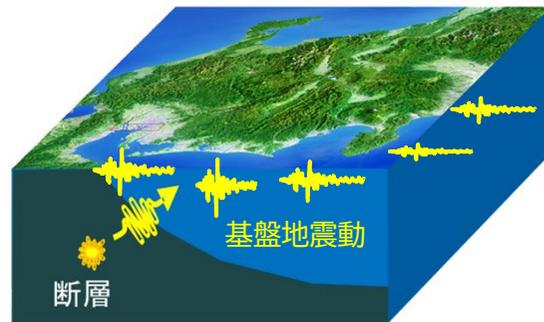


地表面地震動



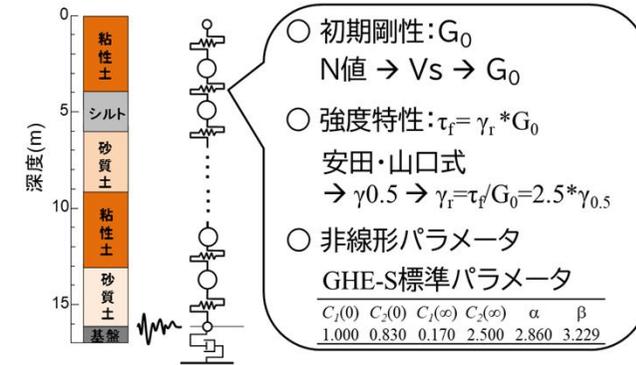
構造物情報(橋梁・高架橋、盛土)

## 地盤挙動シミュレーション



基盤地震動

## 地震動シミュレーション

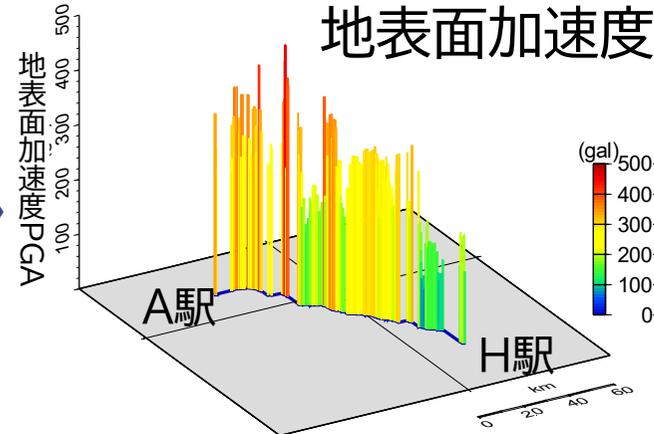
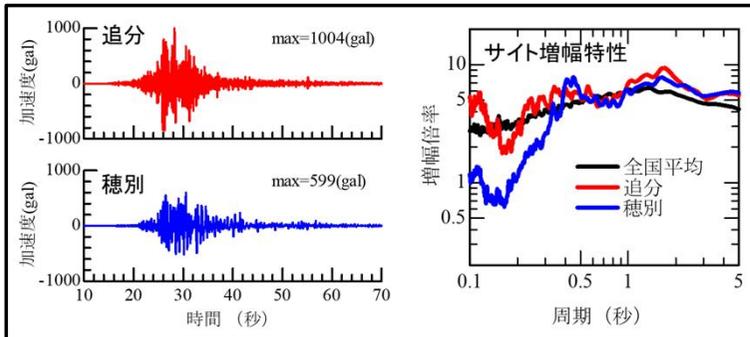
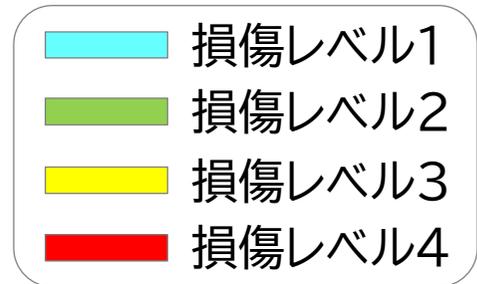
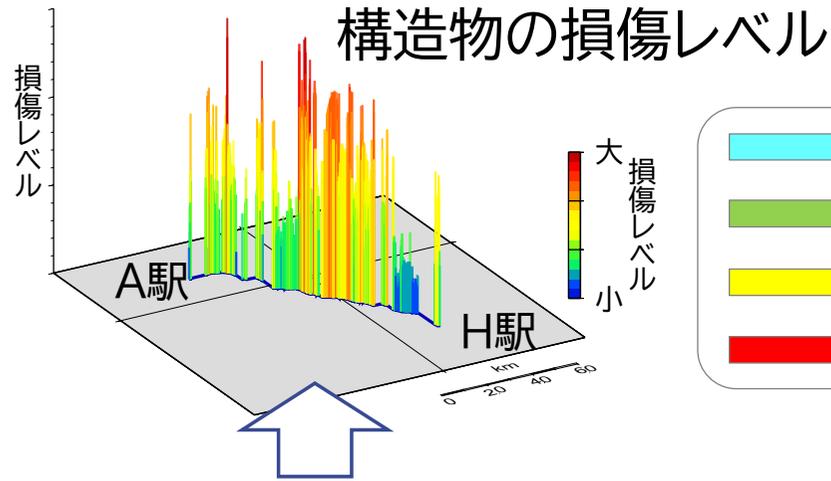


耐震設計・検証解析と同様の手法

※ 長区間のモデルを自動作成

# 3. 全線評価における活用 ～全線評価～

例:沿線の揺れやすさ(サイト特性)を考慮した損傷レベルの評価



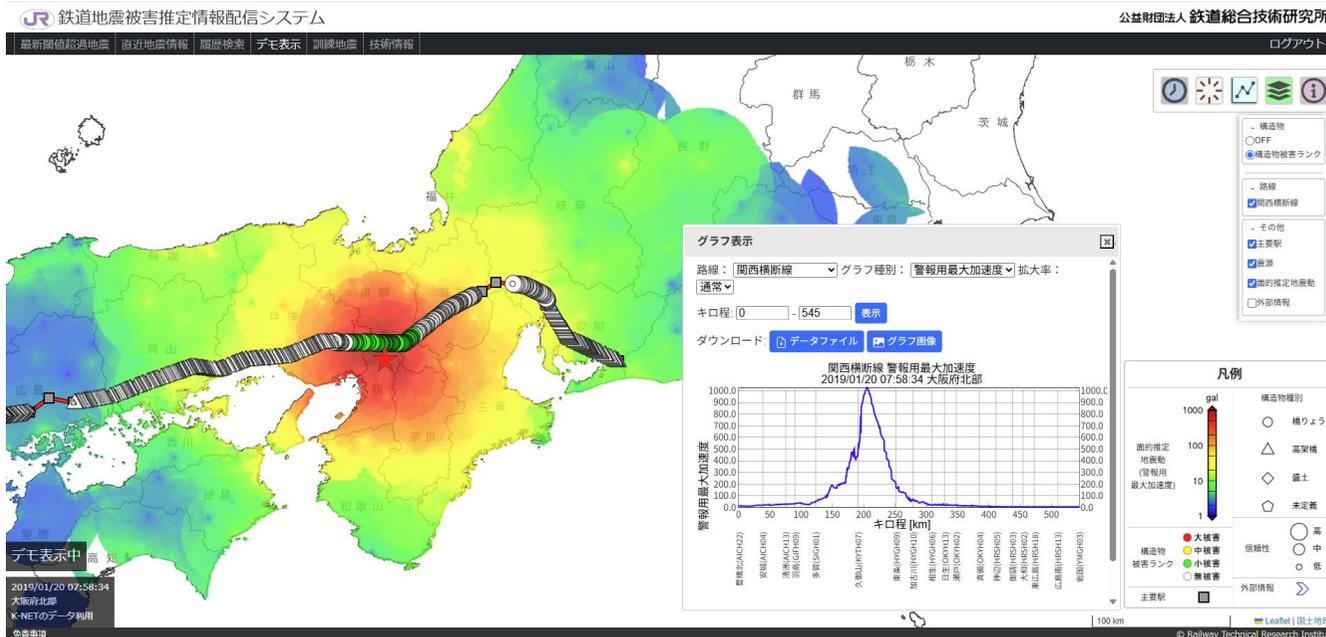
任意の地震  
(南海トラフ地震、首都直下地震等)に対する  
全線評価が可能

深部地盤のサイト増幅特性の評価

### 3. 全線評価における活用 ～被害推定情報の配信～

## 鉄道地震被害推定情報配信システム:DISERでの活用 (Damage Information System for Earthquake on Railway)

地震発生直後に全線の地表面の揺れや構造物被害を評価 → 配信



□ 地震動分布情報(一般公開)  
<https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd61/rd6110/rd61100120.html>

□ 構造物被害情報  
(契約事業者様向け)



初動対応への活用  
(点検箇所抽出, 運転再開判断等)

沿線地震計等と比較 → 精度向上

## 4. まとめ

### 鉄道分野における

#### 「地盤の動的解析の活用」と「妥当性の確認」について紹介

- 耐震設計 - 「構成モデル」「試験法」を提案 → ハイブリッド試験で妥当性確認
  - 妥当性確認のための定量的な誤差指標等を検討中
  - 二次元問題、有効応力解析への適用拡大
- 検証解析 - 耐震設計と同様のモデル化(限られた時間、調査・試験結果)
  - 観測結果を用いて線形モデルの妥当性確認
  - 被害等との比較により妥当性確認
- 全線評価 - 耐震設計と同様のモデル化(長区間を自動でモデル化)
  - 沿線地震計等との比較により妥当性確認、精度向上

# 参考文献

- 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009.
- 井澤 淳, 室野剛隆: 非線形動的解析のための地盤の変形特性試験に関する一考察 その1, 第50回地盤工学研究発表会, 2015.
- 鈴木 聡, 井澤 淳, 豊岡亮洋, 小島謙一: ハイブリッド地盤応答試験による土の変形特性試験方法の検討, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.
- 月岡 桂吾, 伊吹竜一, 井澤 淳: 成層地盤を対象とした 数値創成解の設定方法に関する考察, 第45回地震工学研究発表会, 2025.
- 井澤 淳, 土井達也, 伊吹竜一, 上村健太郎, スレン・ソッキアン: 損傷過程を考慮可能な鉄道盛土の地震時性能照査法に関する基礎的検討, 第16回日本地震工学シンポジウム, 2023.
- 土井達也, 井澤 淳, 伊吹竜一, 仙頭紀明, 阿部慶太, 飯島正敏: 薄い液状化層がトンネル、盛土の地震応答に及ぼす影響(その1: せん断土槽の開発), 第60回地盤工学研究発表会, 2025.
- 坂井公俊: 地盤の等価1自由度モデルを併用した逐次非線形解析に基づく基盤入力地震動の推定, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 77, No. 1, pp. 132-145, 2021.