

鉄道橋りょう・高架橋の耐震設計・診断の 信頼性に基づく安全率の設定法

鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
主任研究員 松本 星斗

- 研究の背景・目的
- 耐震安全率を用いた耐震性能照査法の提示
- 耐震安全率の目安値の算定
- 既設構造物の耐震診断への適用
- まとめ・成果の活用

研究の背景

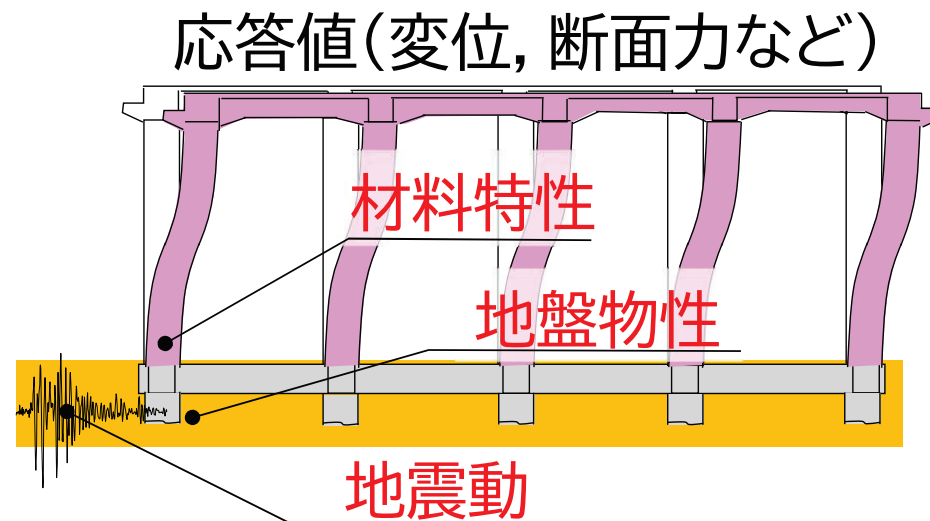
既設構造物の耐震診断

- 鉄道設計標準に準拠して行われる場面が多い
- 設計限界値 I_{Ld} と設計応答値 I_{Rd} を比較(性能照査)

$$\gamma_i \cdot \frac{I_{Rd}}{I_{Ld}} \leq 1.0$$

構造物係数 設計応答値 設計限界値
(重要度、社会への影響)

- 各種不確実性・不確定性に配慮するため、 I_{Ld} と I_{Rd} を算定する過程で、安全係数を設定



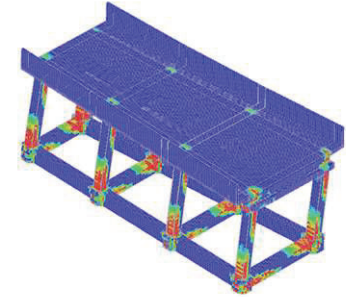
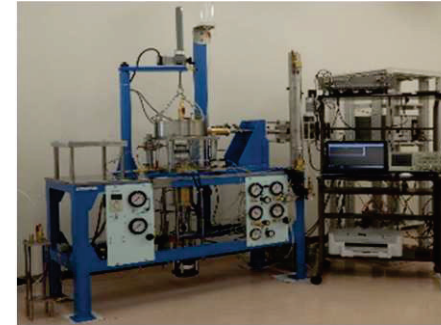
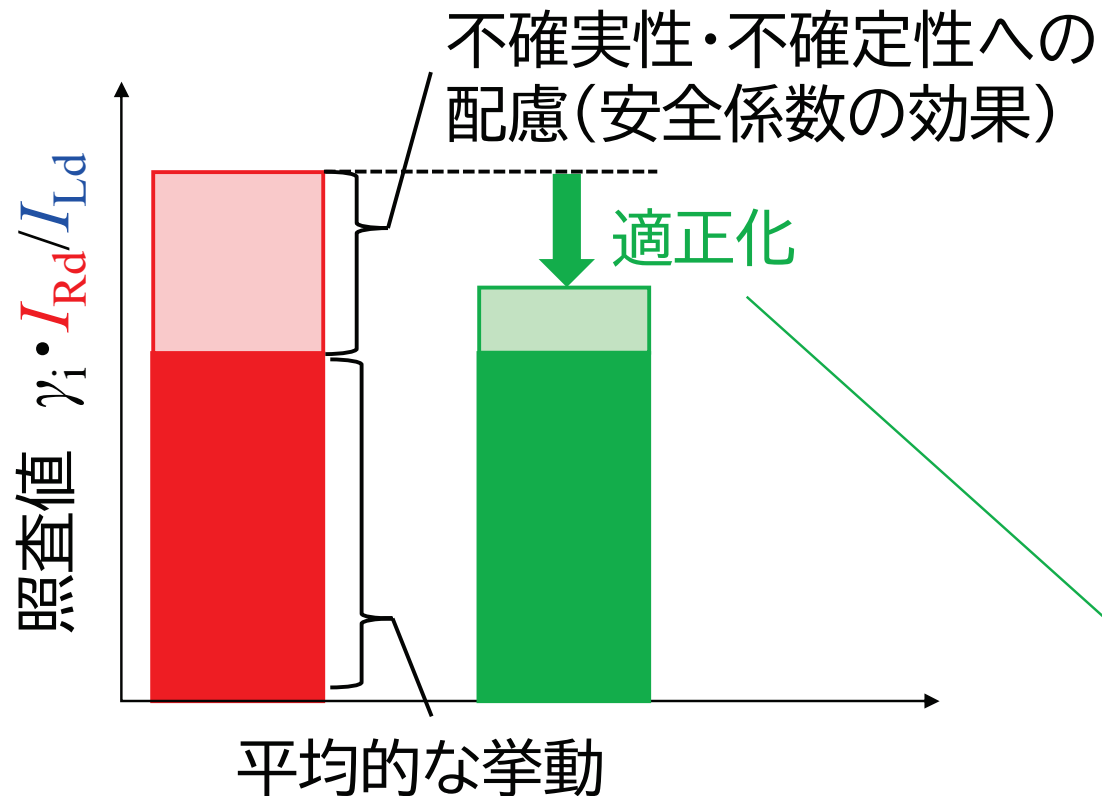
鉄道設計標準に記載の安全係数の標準的な値の例

コンクリートの 材料係数 γ_c	鉄筋の 材料係数 γ_r	部材係数 γ_b	地盤調査 係数 γ_g
1.3	1.0	1.0~1.15	1.0~1.4

研究の背景

既設構造物の耐震診断

$$\gamma_i \cdot I_{Rd} / I_{Ld} \leq 1.0$$



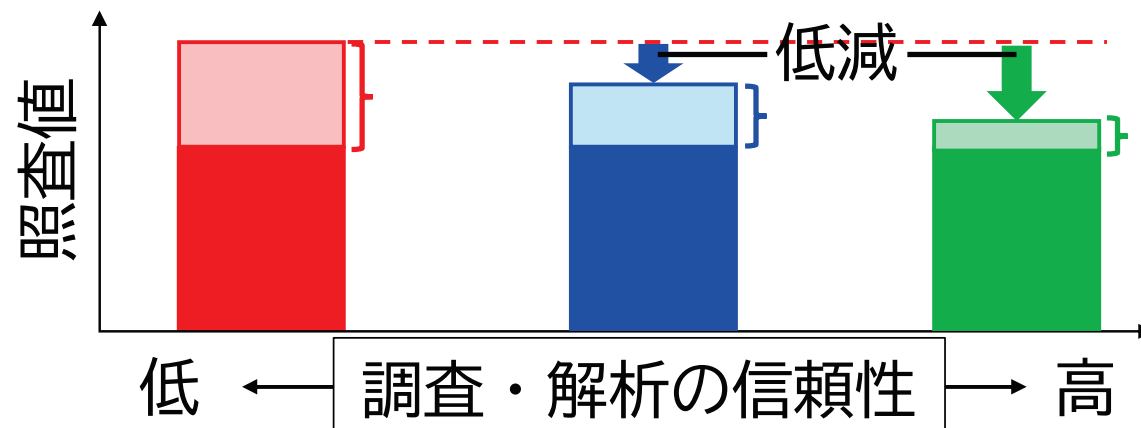
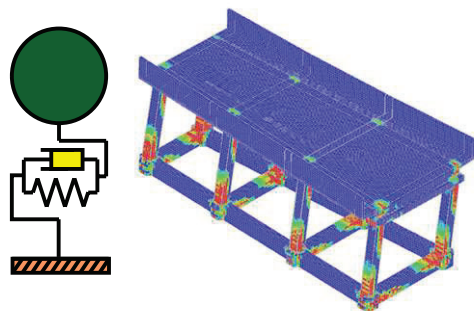
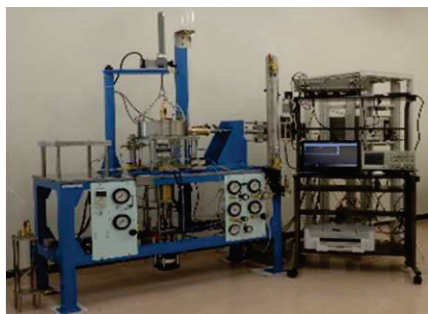
詳細な試験・調査・解析
→不確実性・不確定性は低下

安全係数を変化させて考慮

- ・コンクリートの実強度を計測: $\gamma_c \rightarrow 1.0$
- ・PS検層を行う: $\gamma_g \rightarrow 1.0$
- ⋮

不確実性・不確定性の減少により
照査値の適正化が可能

研究の目的



- ・さまざまな調査法・解析法
- ・さまざまな構造種別・照査項目

調査法・解析法ごとの信頼性(=個々の安全係数)が照査値に与える定量的な影響が不明

例えば…「地盤調査係数 γ_g が $1.4 \rightarrow 1.0 \Rightarrow$ 照査値も $1/1.4$ 」ではない



既設構造物の耐震診断の場面で、どのような調査・解析を行うことが有効か判断しづらい



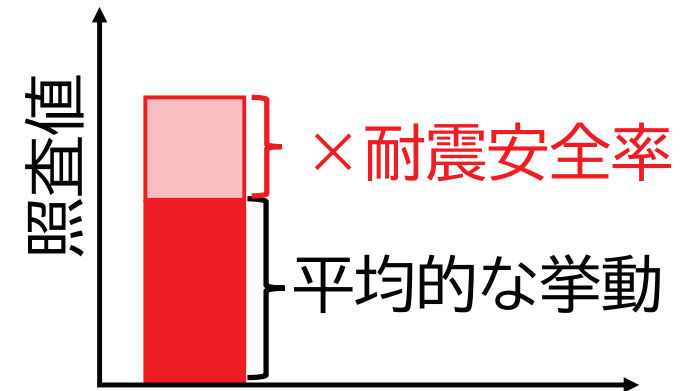
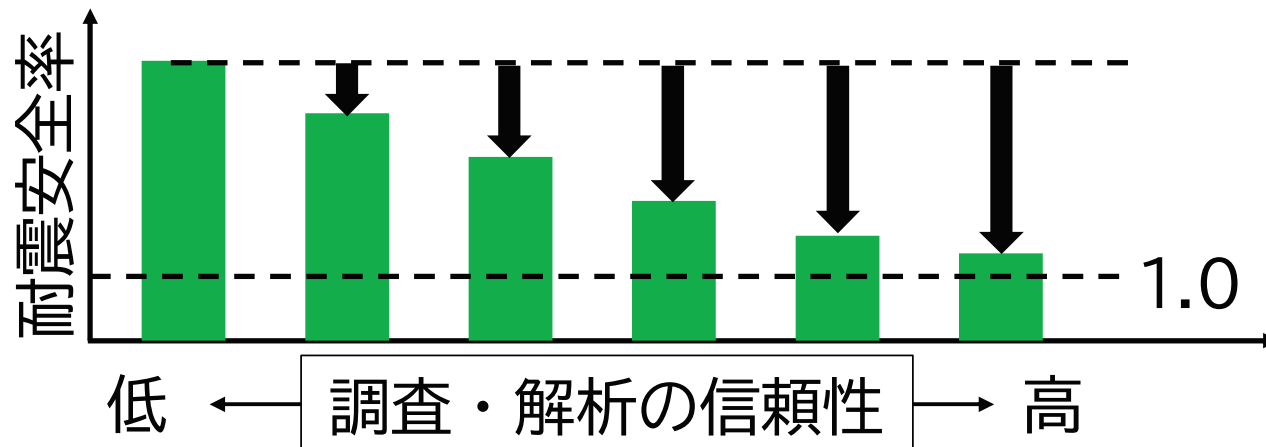
照査値に与える影響を「耐震安全率」として明確化した耐震性能照査法を開発

成果①耐震安全率を用いた耐震性能照査法の提示

Railway Technical Research Institute

提案法の照査式

$$\text{構造物係数} \gamma_i \cdot \text{耐震安全率} \gamma_{er} \cdot \underbrace{\text{応答値} I_R / \text{限界値} I_L}_{\text{安全係数無し(平均的な挙動)}} \leq 1.0$$

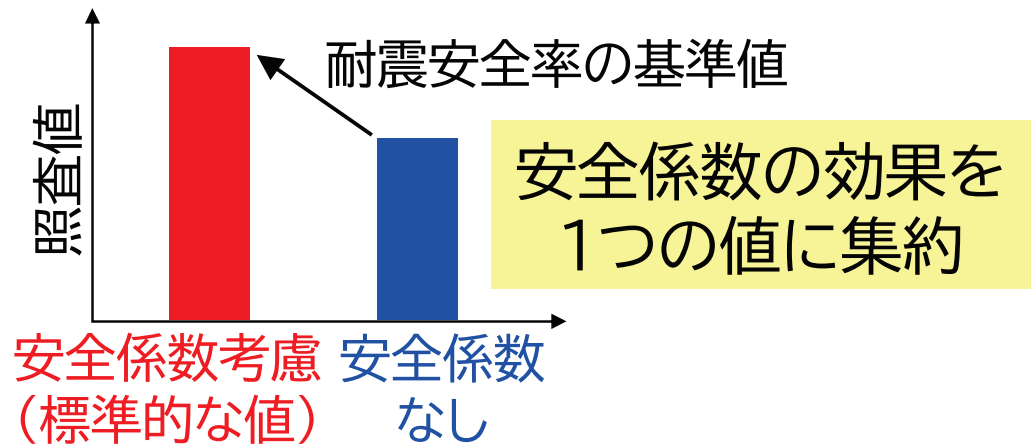


調査法・解析法が有する不確実性・不確定性が
照査値の変動に与える影響を γ_{er} の大小として明確化

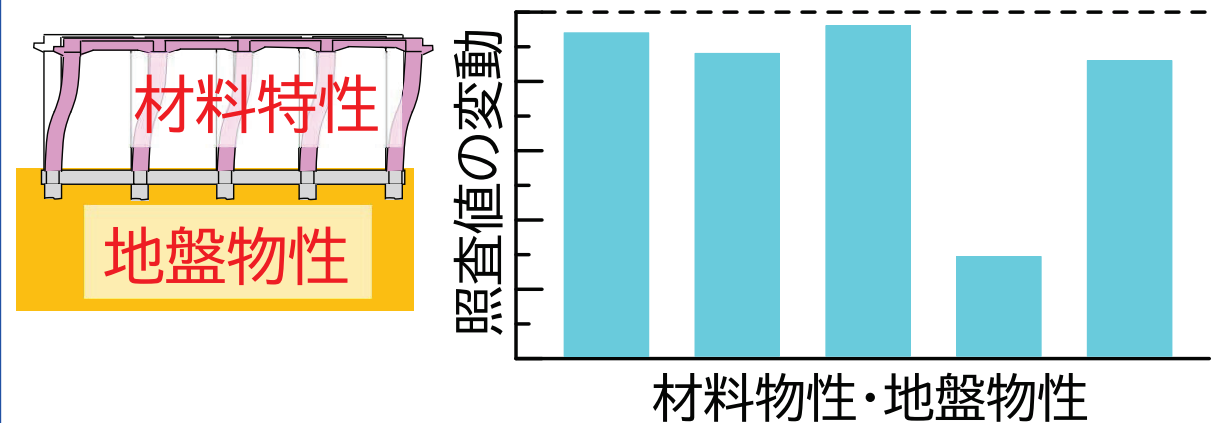
適材・適所な調査・解析を選択しやすくなる(調査法、解析法選択の意思決定をサポート)

成果②耐震安全率の目安値の算定

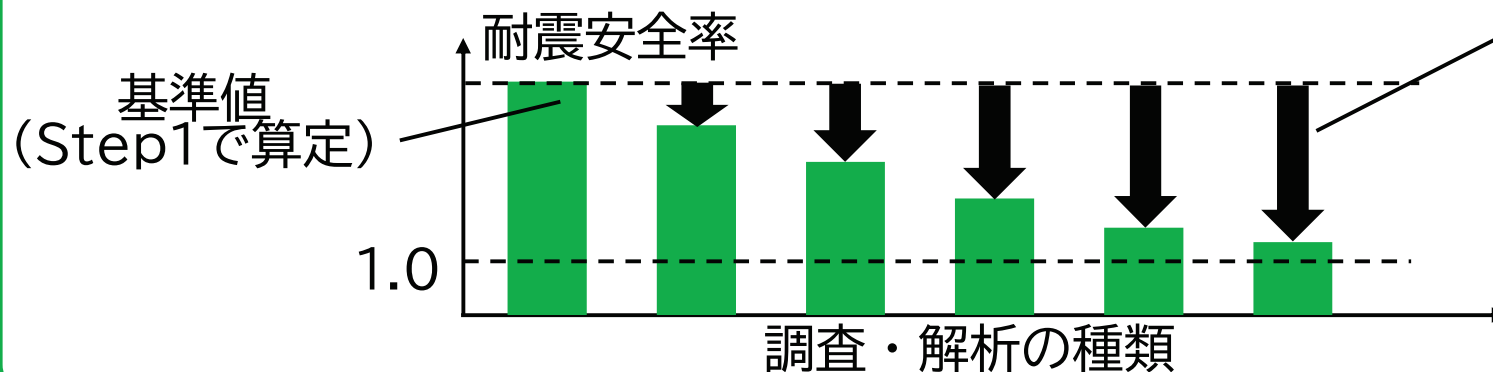
Step1:基準値の算定



Step2:材料物性、地盤物性ごとの感度分析



Step3:調査・解析法ごとの耐震安全率算定



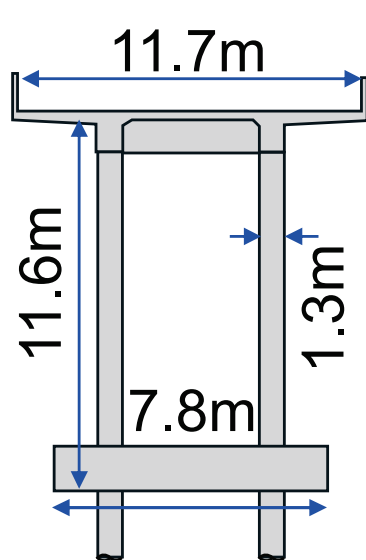
物性値ごとの感度に応じて、基準値を低減

Step1～3の手順により、**耐震安全率**(今回提案)を調査・解析法ごとに**算定可能**

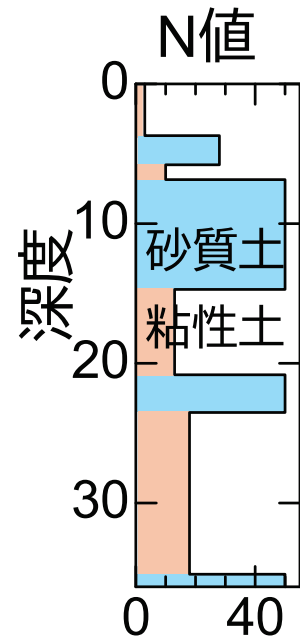
成果②耐震安全率の目安値の算定例

検討条件

- RCラーメン高架橋(G4地盤)
- 照査項目
 - ・L2地震動に対する部材回転角
 - ・L1地震動に対する降伏震度

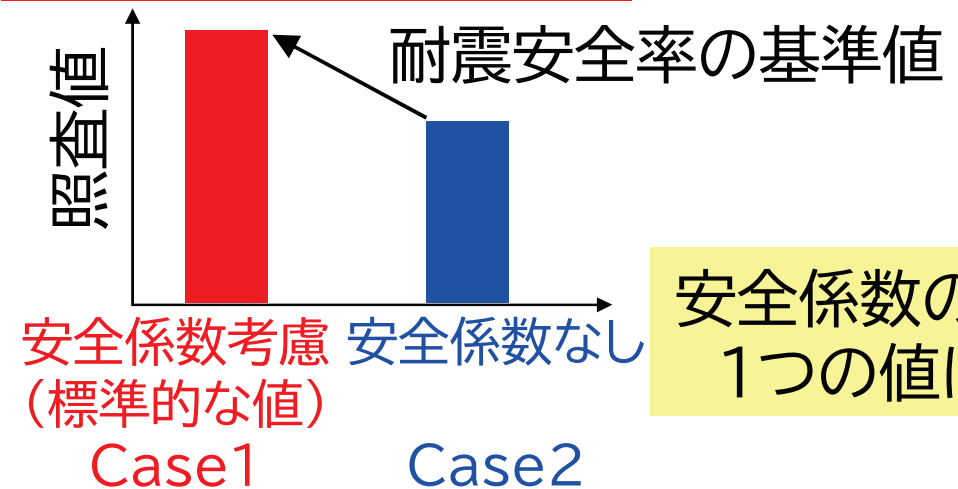


杭径: 1.3m
杭長: 34m



G4地盤

Step1:基準値の算定

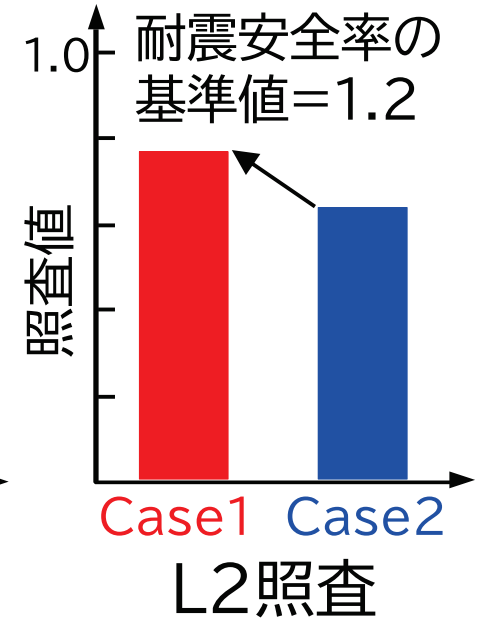
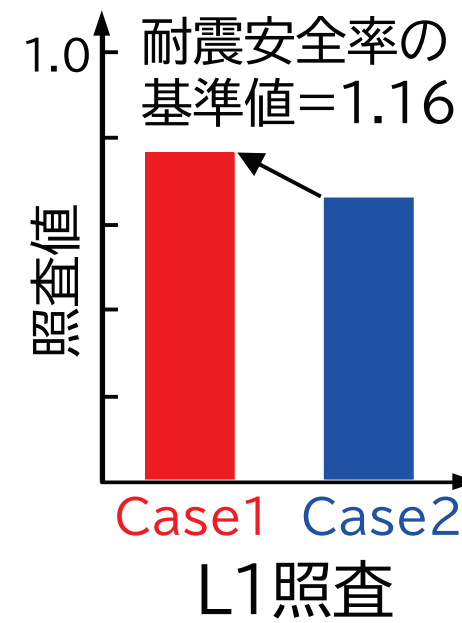
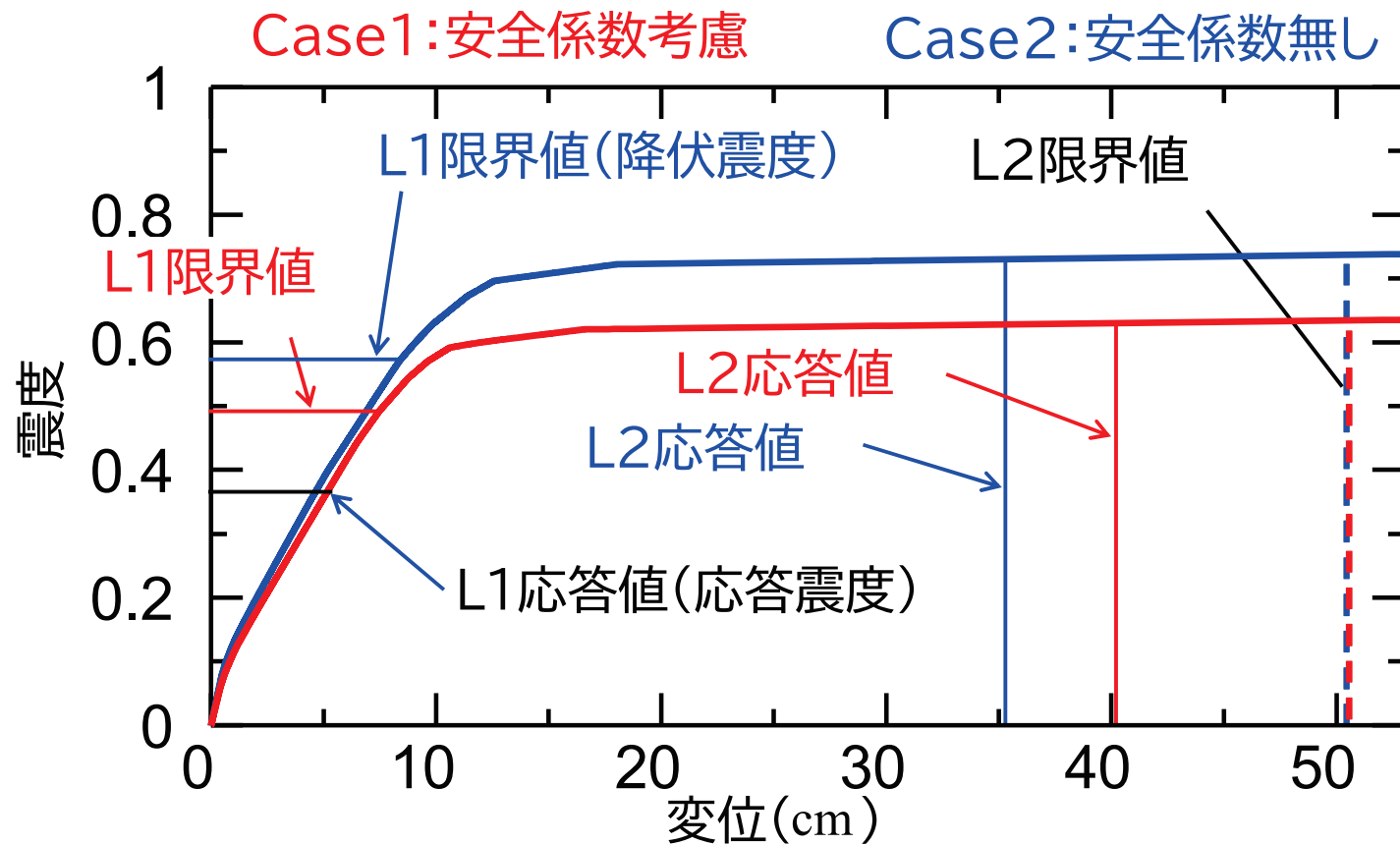


Case	材料係数 γ_c	部材係数 γ_b	地盤調査 係 γ_g	材料修正 係数 ρ_m
1	1.3	1.15	1.4	1.0
2	1.0	1.0	1.0	1.2

成果②耐震安全率の目安値の算定例

Step1:基準値の算定

- この例では、安全係数の効果が降伏震度(L1限界値)の差, L2応答値の差に現れる



成果②耐震安全率の目安値の算定

Step2:物性値ごとの感度分析

RC部材、地盤物性の剛性、強度について感度分析

コンクリート強度、ヤング率、鉄筋強度、地盤の変形係数、地盤のせん断強度の

5つの物性値をそれぞれ μ , $\mu + \sigma$, $\mu - \sigma$ に変化させて解析

→それぞれの物性値のばらつきに対する照査値の感度を分析

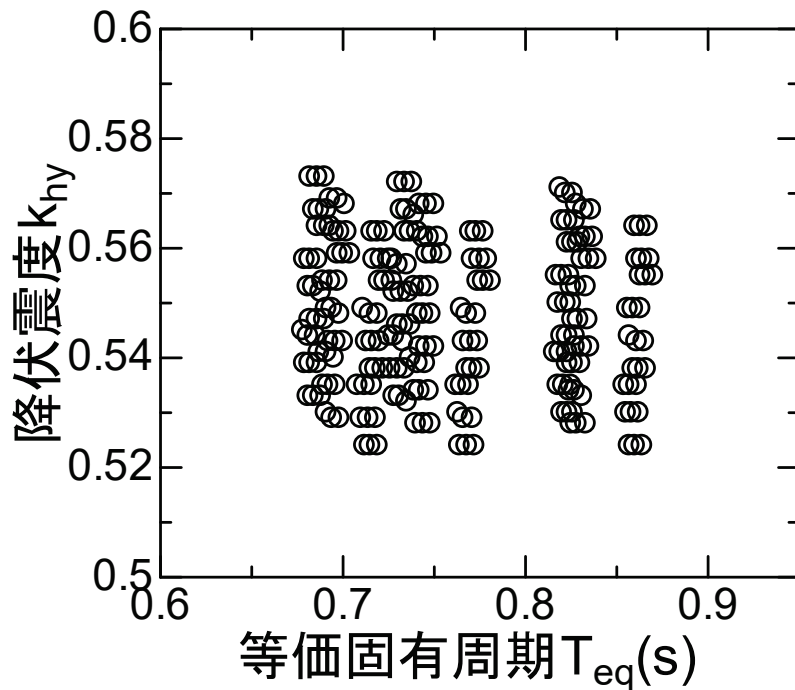
物性値	平均 μ	変動係数
コンクリート強度	設計基準強度 $\times 1.2$	$\pm 15\%$
鉄筋強度	JIS規格下限値 $\times 1.14$	$\pm 4\%$
ヤング率	設計標準 $\times 1.0$	$\pm 10\%$
地盤の変形係数	設計標準 $\times 1.0$	+100% -50%
地盤のせん断強度	設計標準算定式 $\times 1.0$	$\pm 10\%$

※ μ 、 σ の値は統計調査から決定

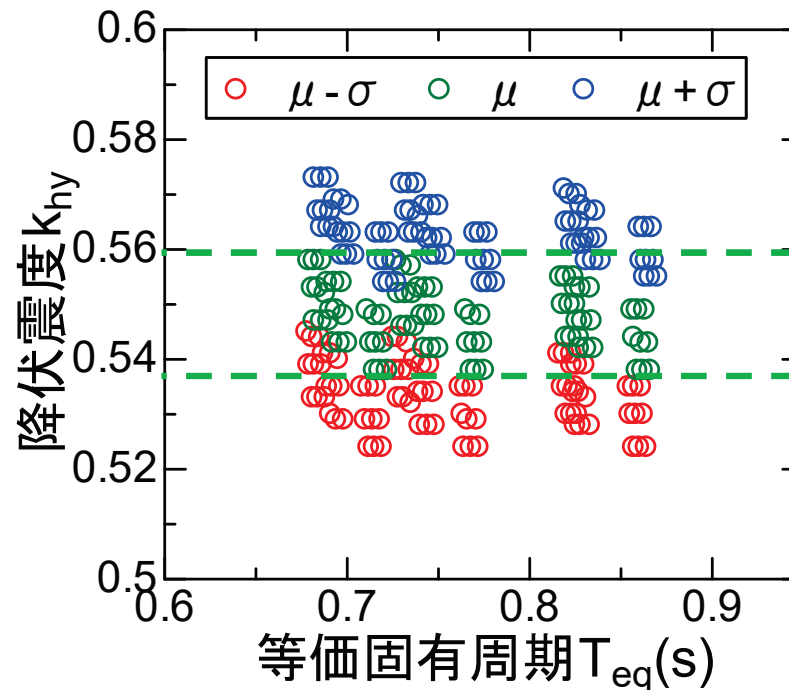
成果②耐震安全率の目安値の算定

Step2:物性値ごとの感度分析

降伏震度・等価固有周期に対する感度の例

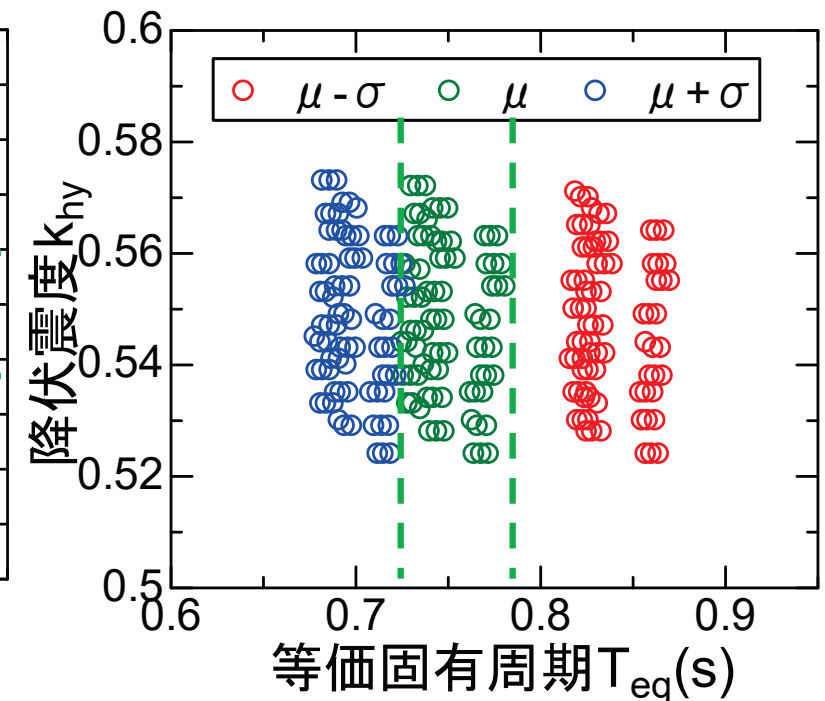


全ての物性値が変動



鉄筋強度が確定

降伏震度の変動小



地盤の変形係数が確定

等価固有周期の変動小

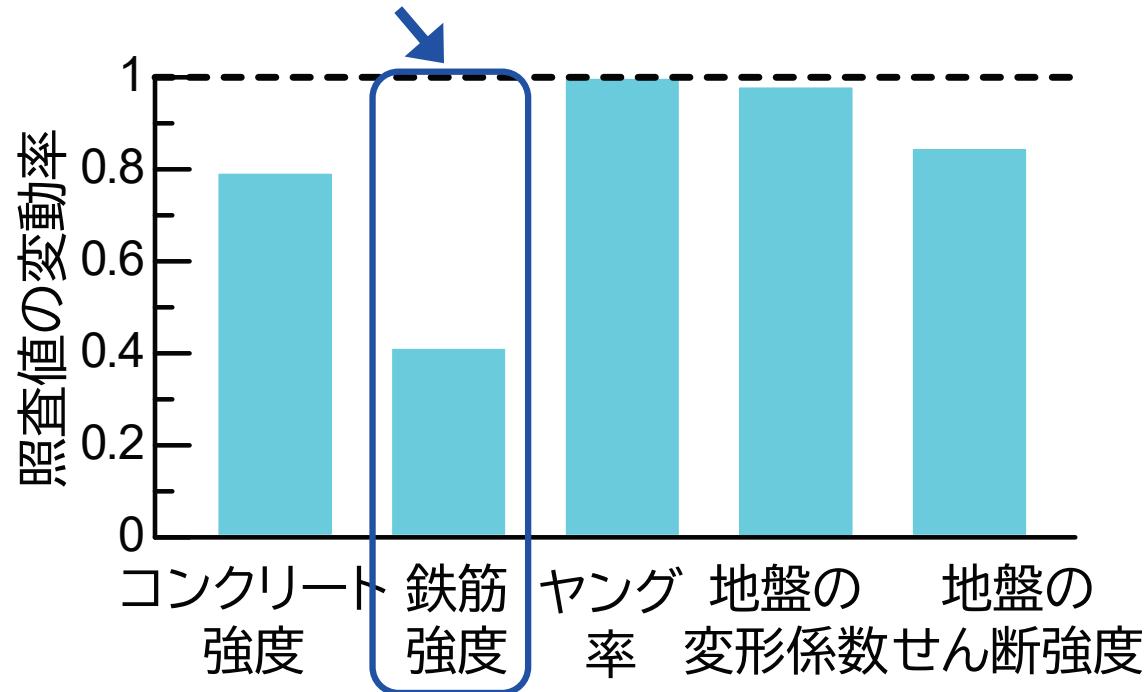
成果②耐震安全率の目安値の算定

Railway Technical Research Institute

Step2:物性値ごとの感度分析

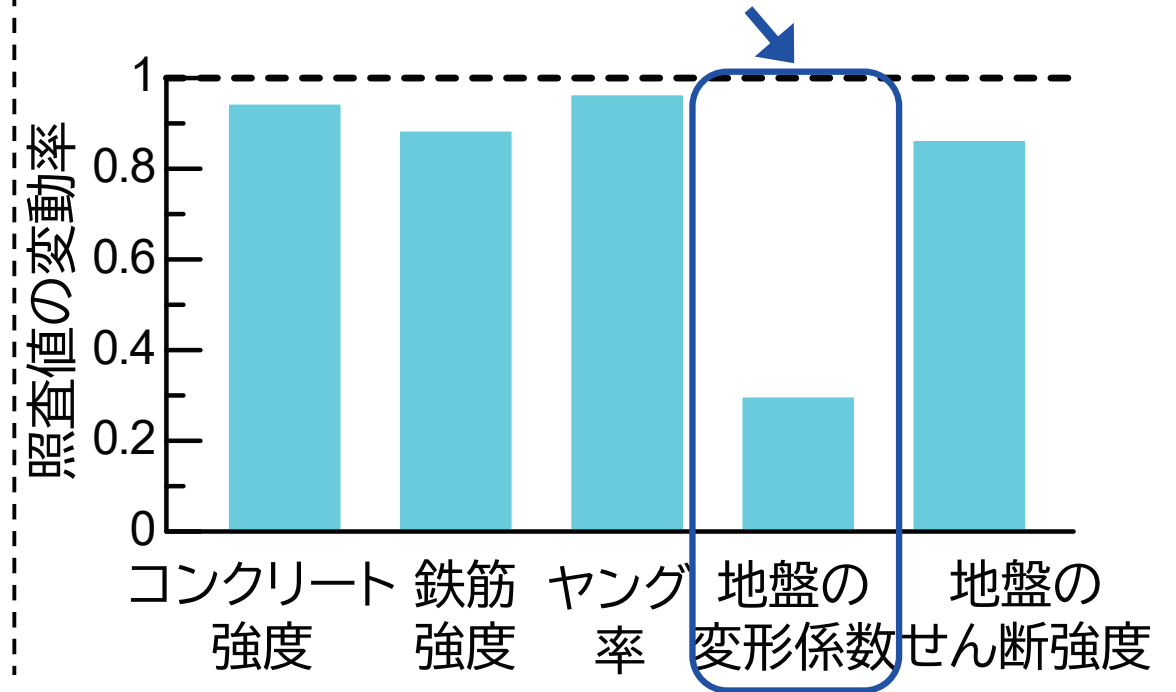
L1照査

鉄筋強度の感度が相対的に大



L2照査

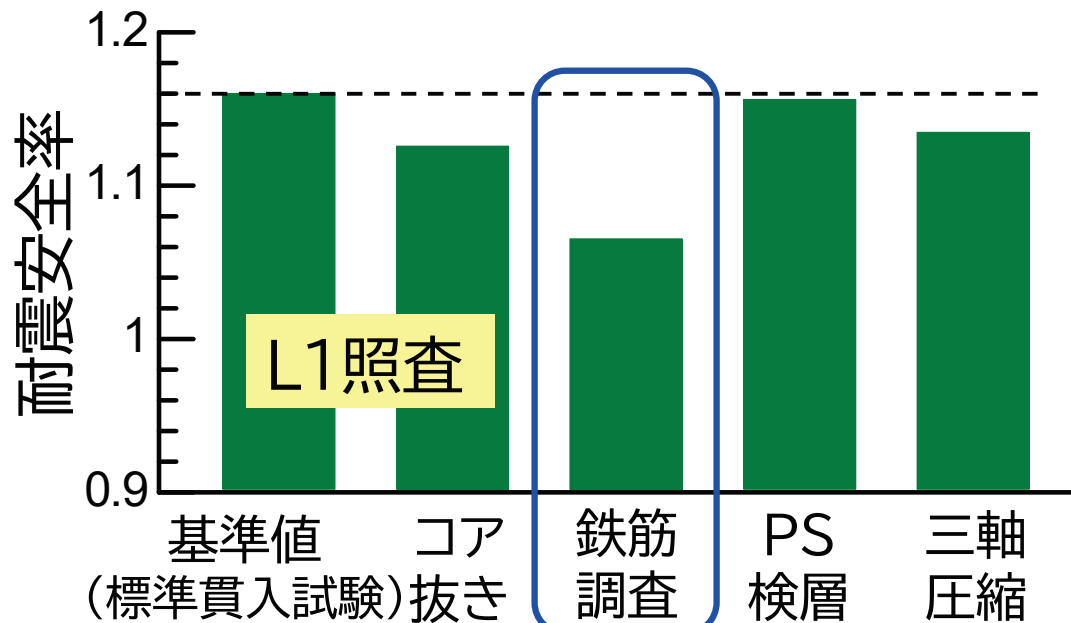
地盤の変形係数の感度が相対的に大



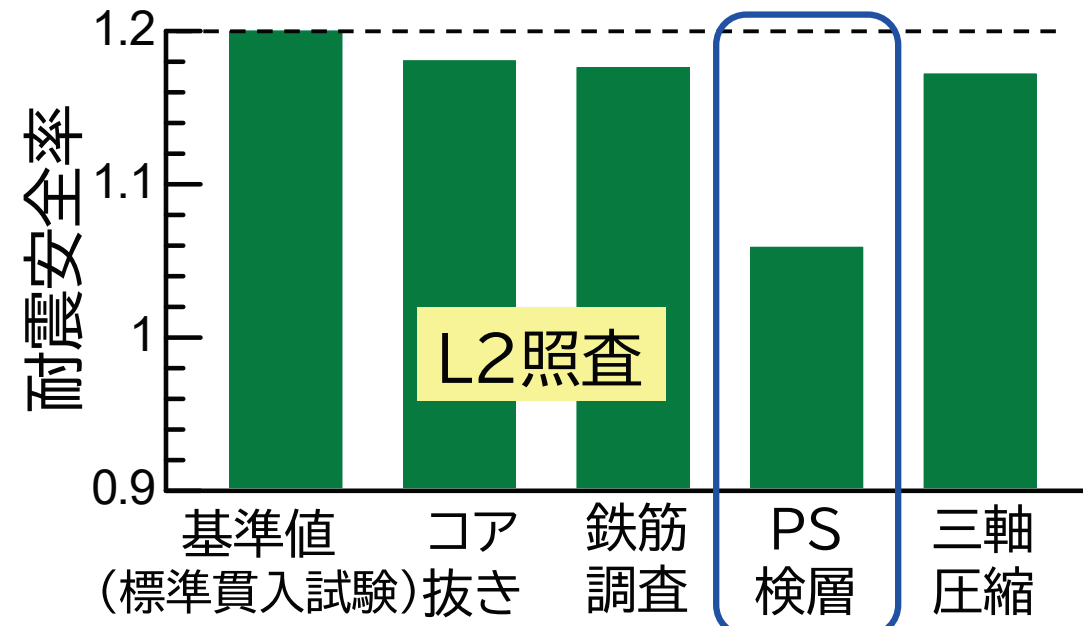
各物性値の変動が照査値の変動に与える影響を定量化

成果②耐震安全率の目安値の算定

Step3:調査法ごとの耐震安全率算定



鉄筋調査(ミルシートなどで実強度を確認)が有効

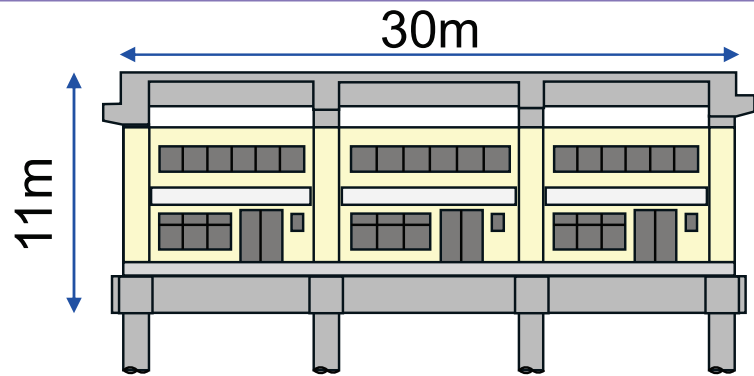


PS検層(地盤の剛性把握)が有効

照査項目ごとに有効な調査法が把握可能

成果③既設構造物の耐震診断への適用

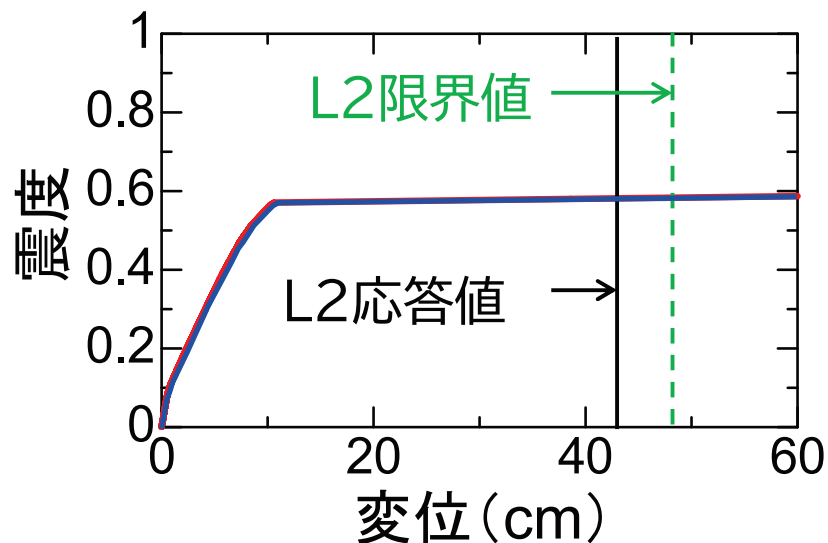
Railway Technical Research Institute



杭径: 1.3m 杭長: 34m
高架下店舗利用

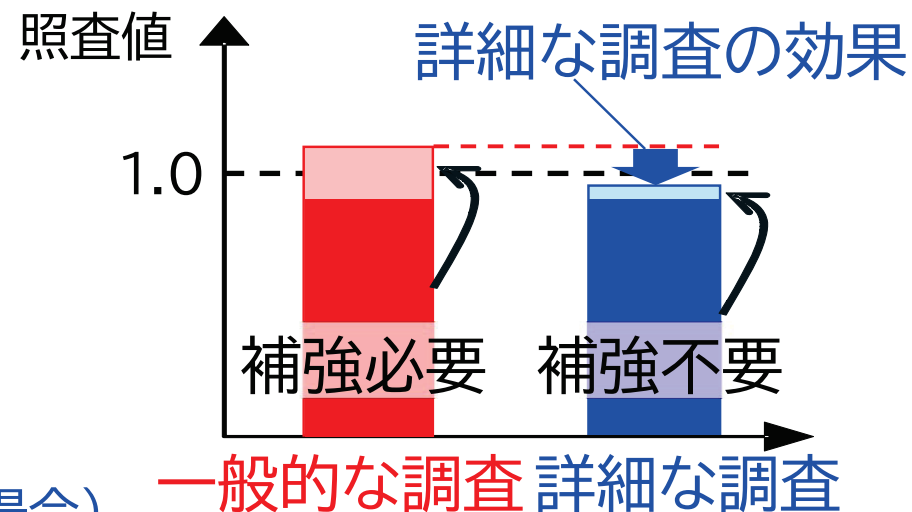
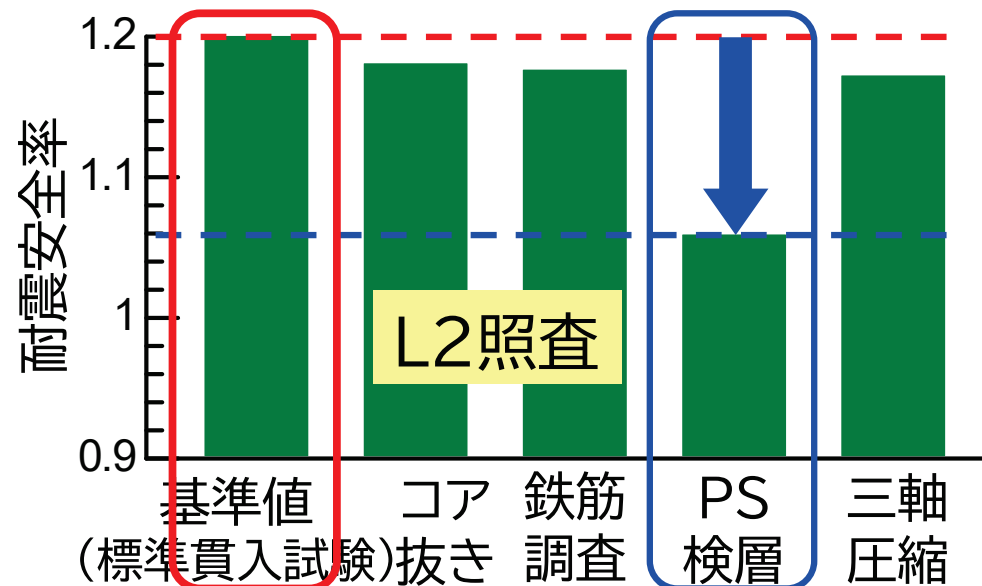
【一般的な調査】
・標準貫入試験

【詳細な調査】
・PS検層



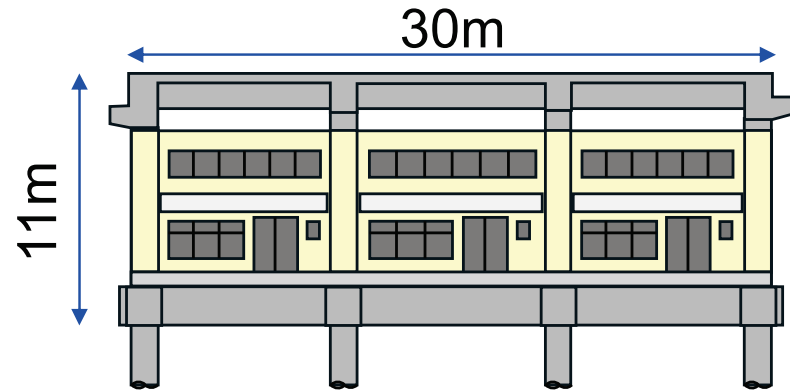
安全係数を含まない応答値／限界値

(PS検層で得られた特性値が標準貫入試験と同等だった場合)



成果③既設構造物の耐震診断への適用

Railway Technical Research Institute



杭径: 1.3m 杭長: 34m
高架下店舗利用

【一般的な調査】
・標準貫入試験

【詳細な調査】
・PS検層

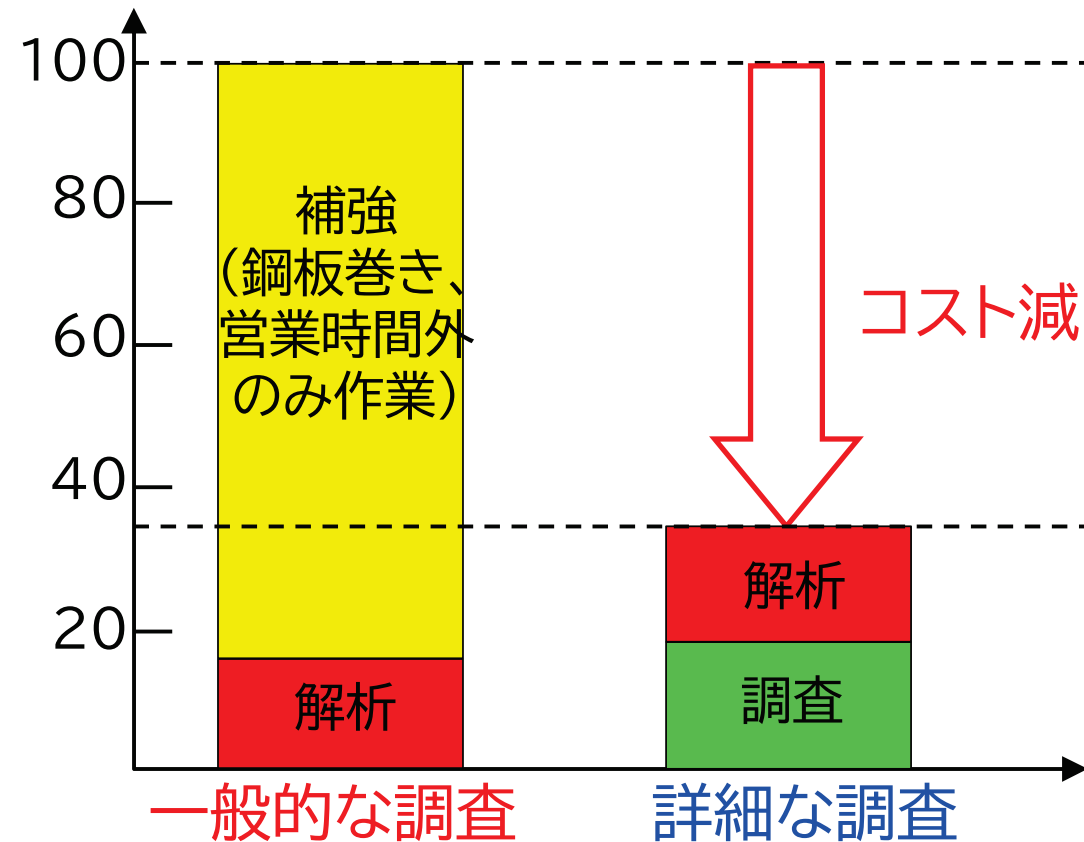


補強必要



補強不要

コスト(一般的な調査を基準)



耐震診断・耐震補強の経済化のためのインセンティブが働きやすくなる

- 【成果①】 耐震安全率を用いた照査法を提示
→調査, 解析法の信頼性が照査値に与える影響を明確化
- 【成果②】 耐震安全率の目安値の算定
→照査項目・調査法ごとに照査値に与える感度を定量化
- 【成果③】 既設構造物の耐震診断への適用
→調査を詳細に行うことでコストが削減できる例を確認



適材適所の調査、解析とそれを踏まえた
合理的かつ経済的な鉄道構造物の設計が可能に

本研究では、橋りょう・高架橋の部材回転角や降伏震度に関する検討を実施
今後は下記を実施予定

- 他の照査項目や構造種別, 解析法などについて耐震安全率の算定
- 鉄道総研がコンサルティング等で事業者へ技術指導(既設構造物の耐震診断)
- 手法として確立した後, 将来的には技術基準への反映を検討

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した

松本星斗, 和田一範, 坂井公俊: 調査法・解析法の信頼性に応じた鉄道橋りょう・高架橋の耐震性能照査法の提案, 令和8年度土木学会全国大会, 2026(発表予定)