

鉄道橋りょう・高架橋の 地震時回転挙動の現象解明

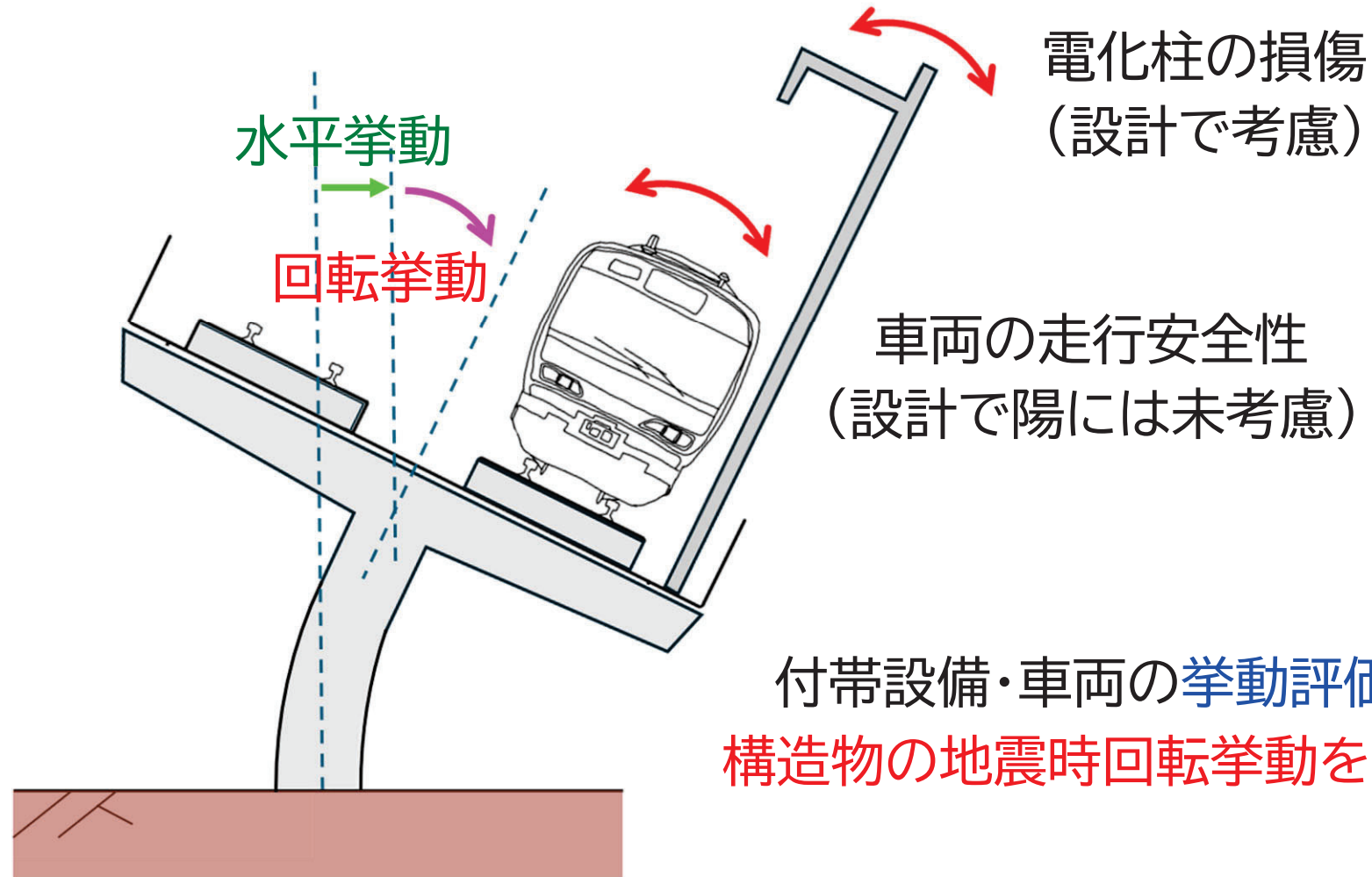
鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
研究員 山下 大輝

1. 研究の背景
2. 回転挙動に影響を及ぼす要因の分析
 - ① 構造形式の影響
 - ② 周波数依存性
 - ③ 基礎・地盤の影響
 - ④ 構造物の塑性化の影響
3. 実構造物における回転挙動の分析
 - ⑤ 実構造物の計測に基づく回転挙動の現象把握
 - ⑥ 設計モデルを用いた回転挙動の再現性
4. まとめ

研究の背景(地震時回転挙動の影響)

Railway Technical Research Institute

構造物の地震時回転挙動が付帯設備(電化柱, 高欄等), 車両の挙動に影響を与える

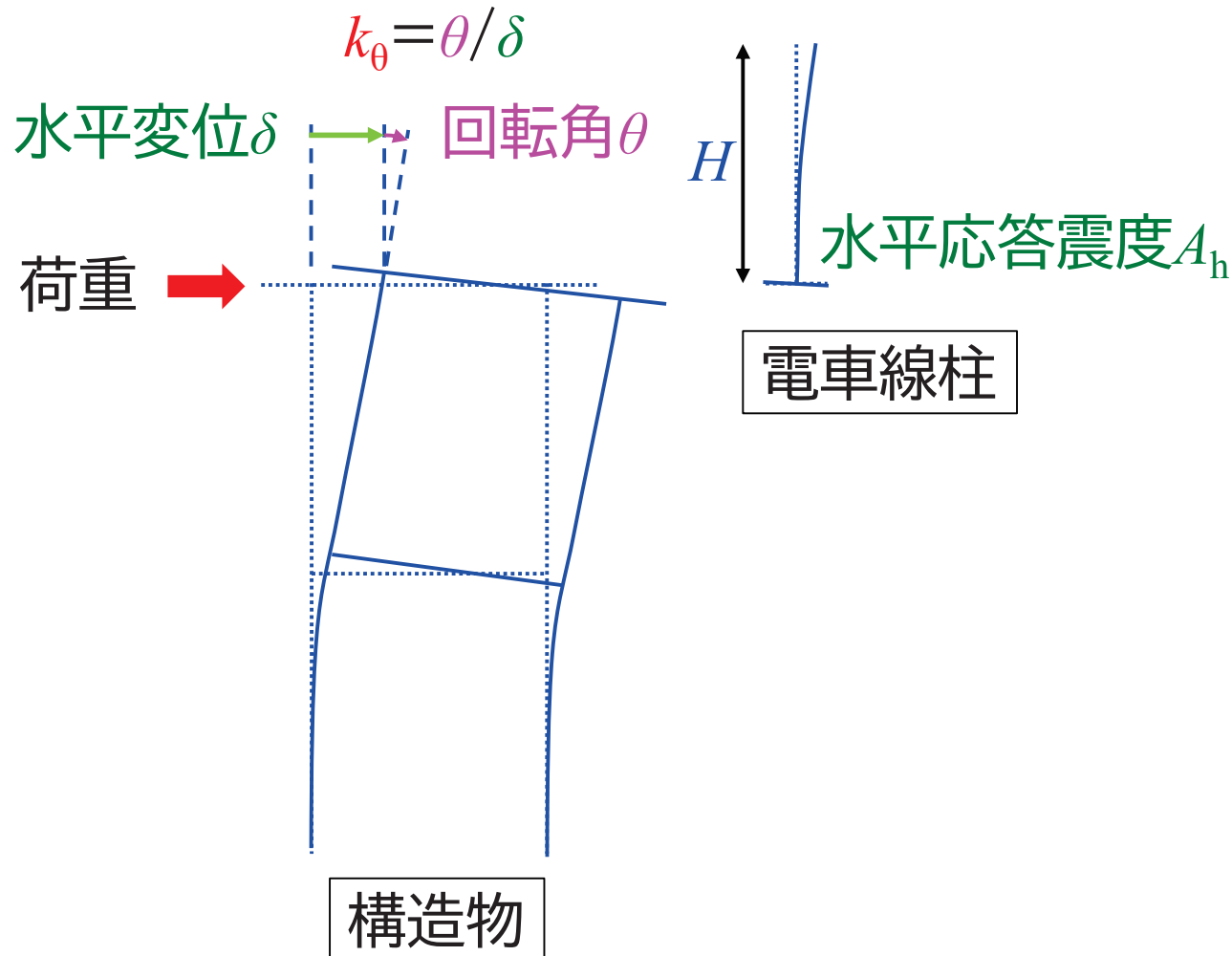


付帯設備・車両の挙動評価を高度化するためには、
構造物の地震時回転挙動を適切に考慮する必要がある

研究の背景(耐震標準・電柱指針※での回転挙動の扱い)

Railway Technical Research Institute

※電車線路設備耐震設計指針・同解説



- ① 構造物のプッシュ・オーバー解析
- ② 降伏時の水平変位 δ , 回転角 θ 算定
- ③ 回転水平比 k_{θ} を算定

$$\text{回転水平比 } k_{\theta} = \text{回転角 } \theta / \text{水平変位 } \delta$$

- ④ 水平応答震度 A_h の算定
- ⑤ 電車線柱の応答震度 A_h の補正

$$A_h' = A_h \times (1 + k_{\theta} \times H)$$

H : 電柱高さ

k_{θ} 大 $\Rightarrow$ 電車線柱の応答増大

研究の背景(耐震標準・電柱指針での回転挙動の扱い)

Railway Technical Research Institute

構造物応答(回転水平比 k_θ)の評価にはプッシュ・オーバー解析が必要

以下の表を参考に、回転水平比 k_θ を設定することも可能※

構造形式	基礎形式	構造物高さ	$k_\theta = \theta / \delta$	$1 + k_\theta \times H$
1層ラーメン	1柱1杭	6.6m	0.053	1.53
1層ラーメン	細径群杭	7.9m	0.035	1.35
2層ラーメン	細径群杭	16.2m	0.017	1.17
橋脚(降伏部位:<体基部)	太径群杭	8.0m	0.072	1.72
橋脚(降伏部位:杭基礎)	太径群杭	8.0m	0.060	1.60

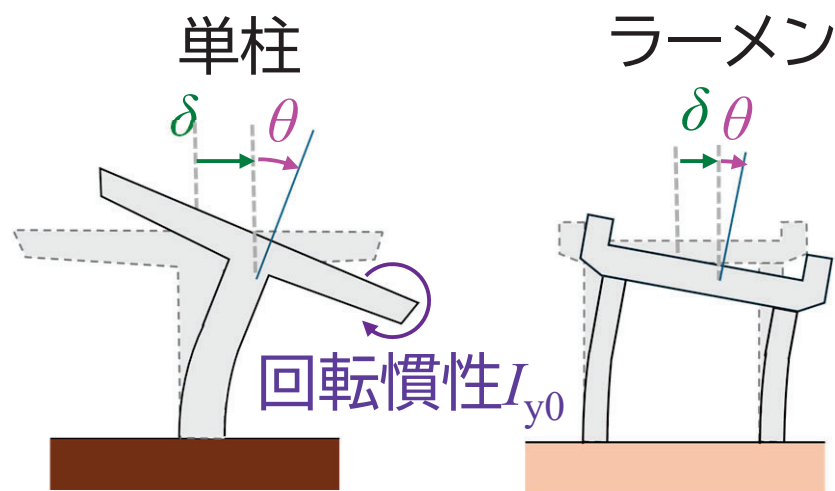
($H=10\text{m}$ の場合)

※電車線路設備耐震設計指針・同解説(一部加筆)

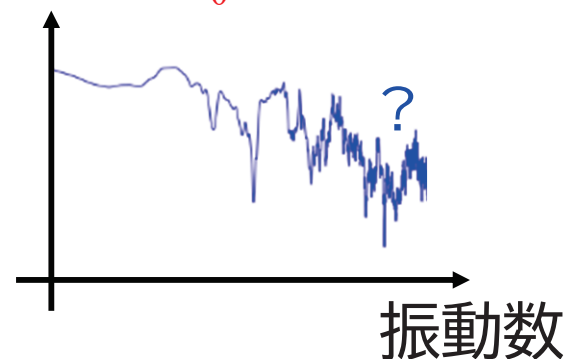
- 限られた事例の提示に留まる
- 各種の条件(構造形式, 地盤, 周波数特性, 部材の非線形化等)が
回転水平比 k_θ に与える影響程度は未確認

研究の目的

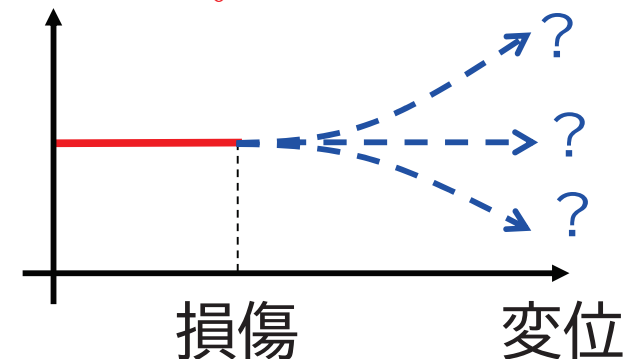
付帯設備の挙動評価の高度化, 回転挙動を意識した構造物設計のための,
構造物の地震時回転挙動の現象解明(理論, 解析, 実測に基づく検討)



回転水平比 k_{θ}



回転水平比 k_{θ}



①構造の影響(構造形式, 回転慣性)

③基礎・地盤の影響

②周波数依存性

④構造物の塑性化の影響

⑤実構造物の計測に基づく回転挙動の実現象を把握

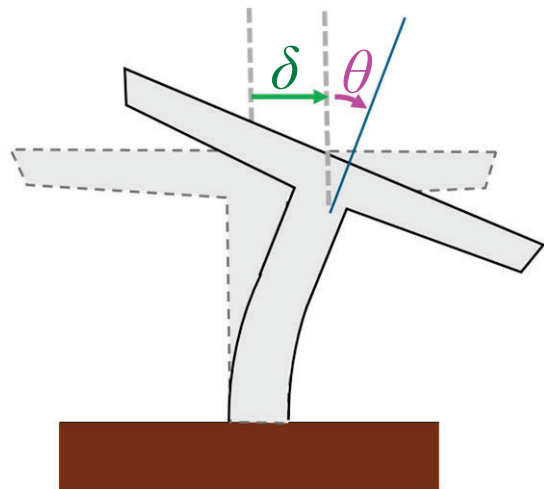
⑥設計モデルを用いた回転挙動の再現性の検証

目次

1. 研究の背景
2. 回転挙動に影響を及ぼす要因の分析
 - ① 構造形式の影響
 - ② 周波数依存性
 - ③ 基礎・地盤の影響
 - ④ 構造物の塑性化の影響
3. 実構造物における回転挙動の分析
 - ⑤ 実構造物の計測に基づく回転挙動の現象把握
 - ⑥ 設計モデルを用いた回転挙動の再現性
4. まとめ

①構造形式の影響(単柱橋脚)

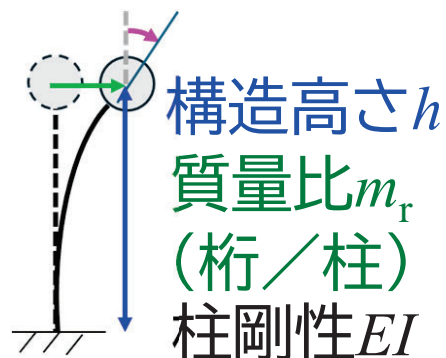
回転水平比 $k_\theta = \theta / \delta$



モデル化

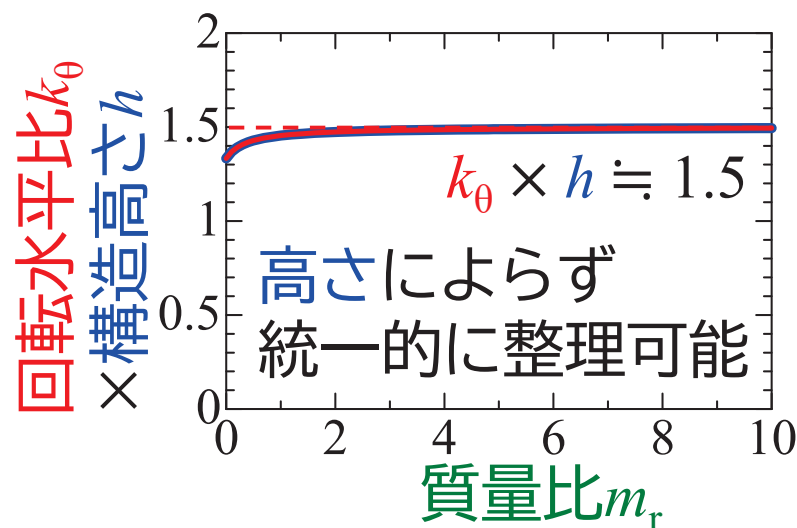
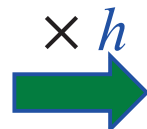
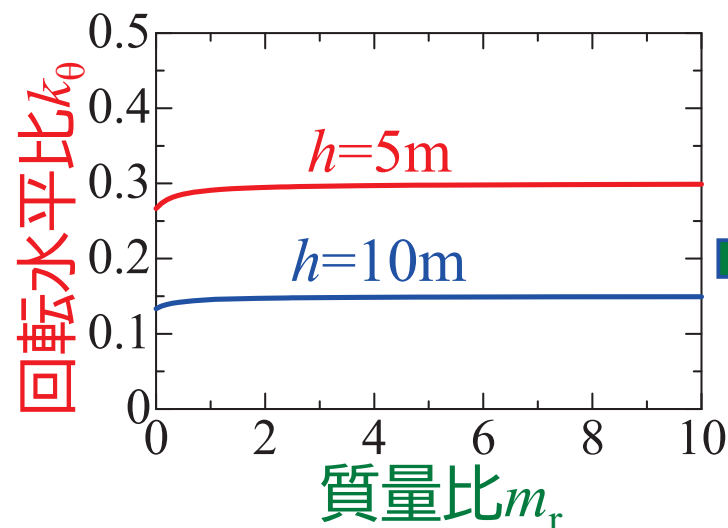


- ・桁: 集中質量
- ・柱: 一様剛性
- ・基礎固定



$$\text{回転水平比 } k_\theta \times h = \frac{4(3m_r + 1)}{8m_r + 3}$$

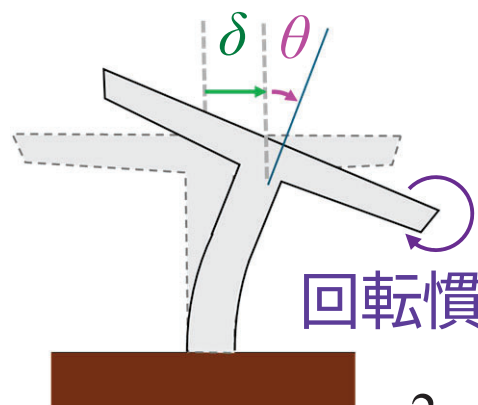
- ・柱剛性に依存しない



- ✓ 単柱構造では
 $k_\theta \times h \doteq 1.5$

- ✓ 回転水平比 k_θ は
構造高さ h に反比例

①桁の回転慣性の影響



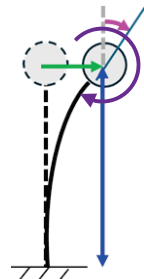
モデル化



- ・桁: 集中質量
- ・柱: 一様剛性
- ・基礎固定

回転慣性 I_{y0}

回転慣性 I_{y0}

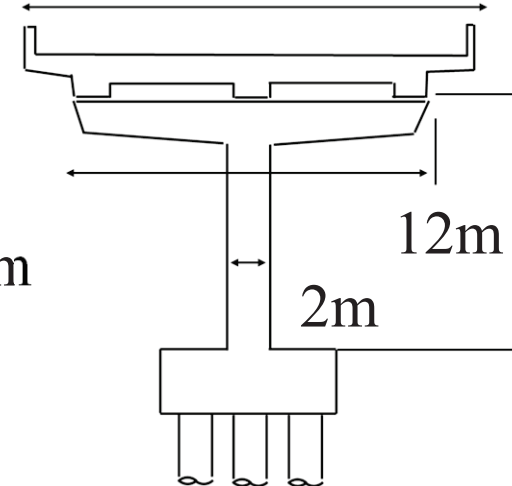
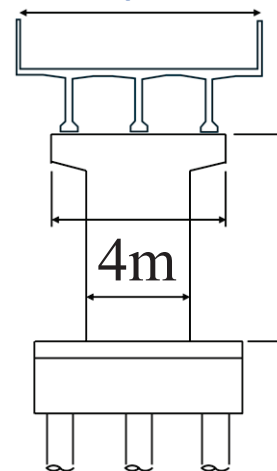


$$k_{\theta} \times h = f(m_r, I_{y0}/mh^2)$$

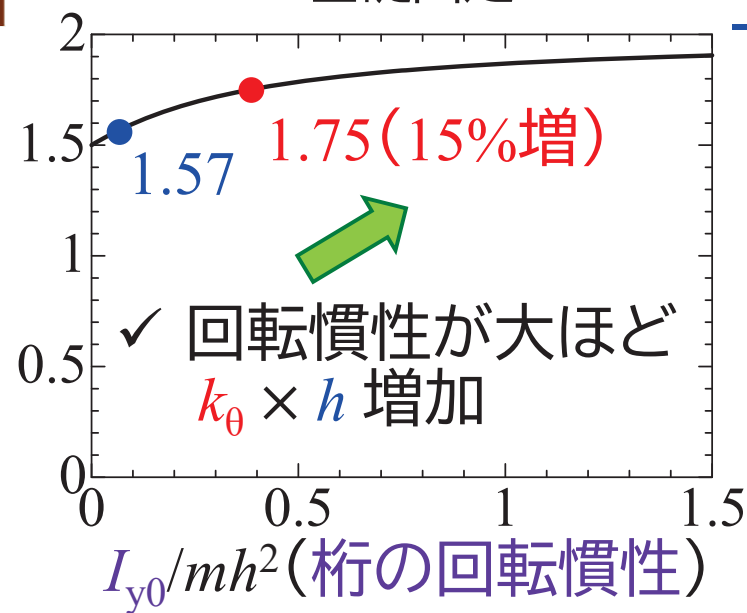
一般的な単柱橋脚 桁幅の広い橋脚

10m

22m

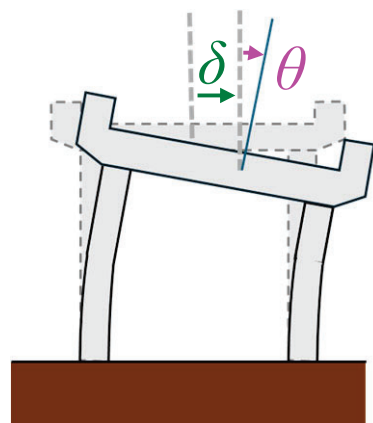


回転水平比 k_{θ}
× 構造高さ h



- ✓ 一般的な鉄道橋りょうでは回転慣性の影響は数%程度,
桁幅の広い橋りょうでは15%程度増加

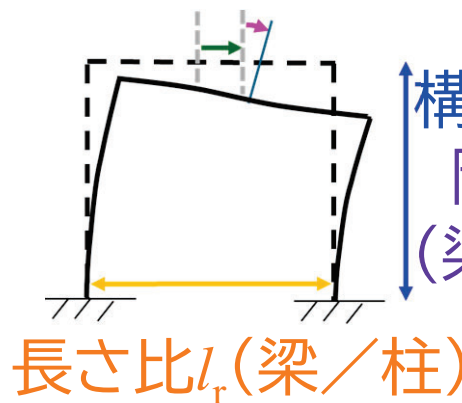
①構造形式の影響(ラーメン構造)



モデル化



- ・梁: 集中質量
- ・柱: 一様剛性
- ・基礎固定

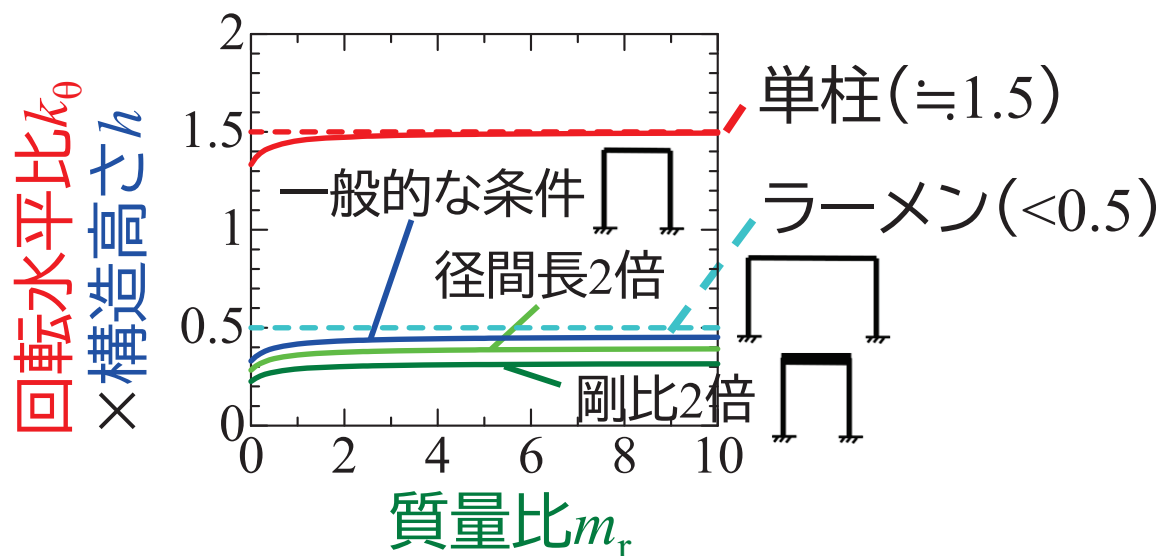


構造高さ h
剛比 k_r
(梁/柱)



回転水平比 $k_\theta \times h = f(k_r, l_r, m_r)$

- ・構造高さ h に反比例
- ・ $k_\theta \times h$ で整理可能



✓ 一般的なラーメン構造では

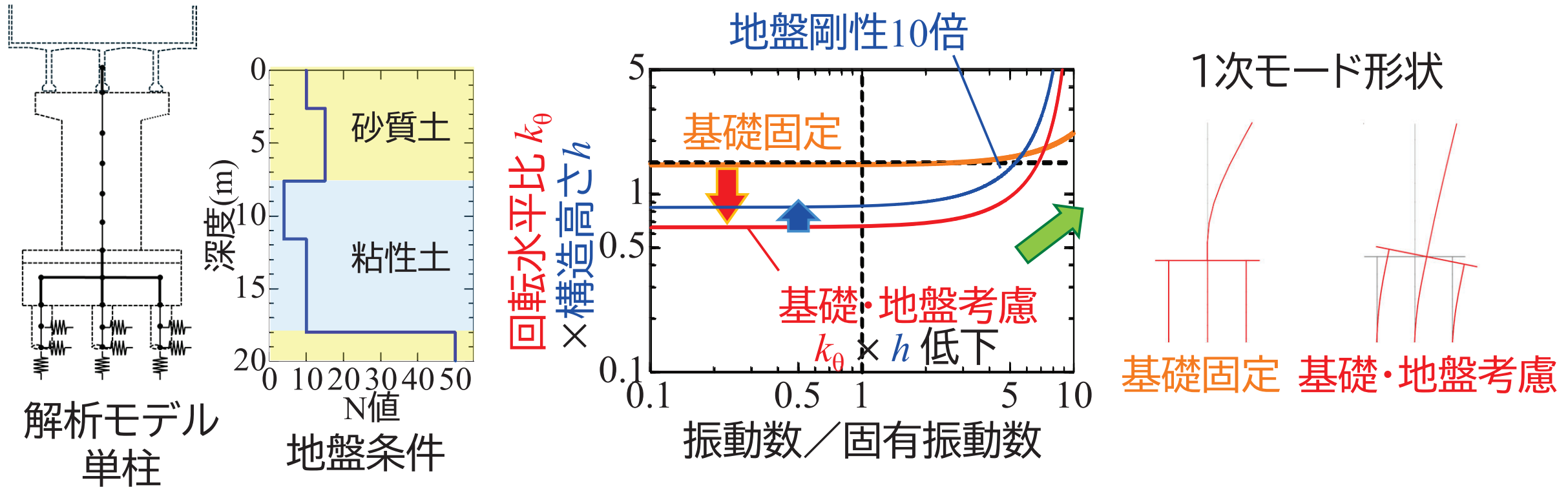
$$k_\theta \times h < 0.5$$

✓ 構造高さ h によらず

$k_\theta \times h$ で整理できる

②周波数依存性・③基礎・地盤の影響

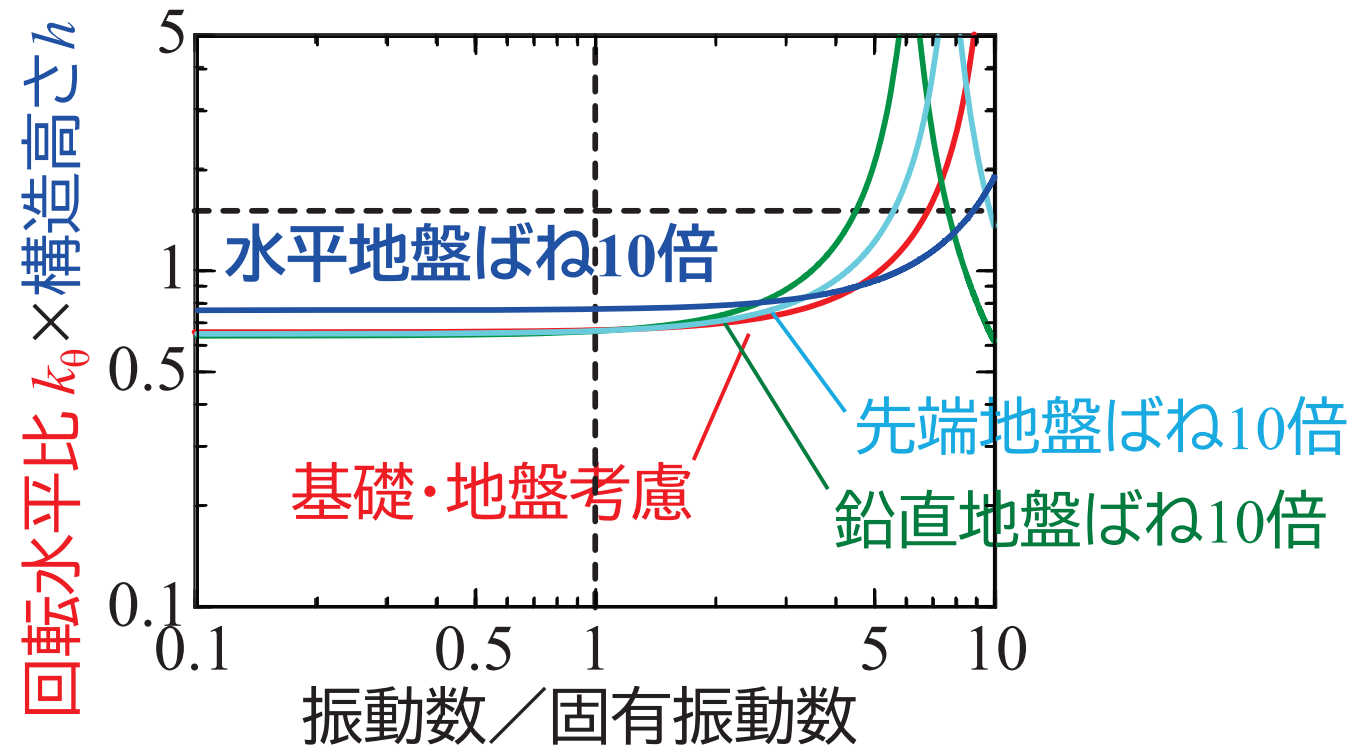
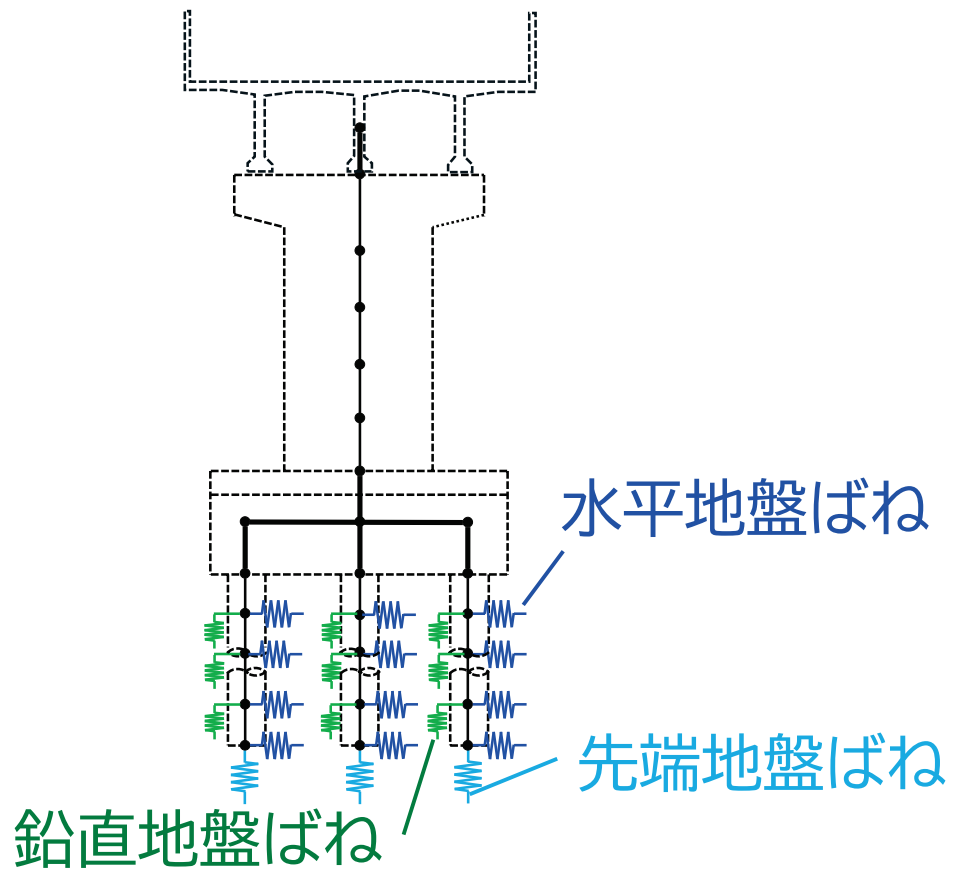
周波数応答解析により周波数依存性, 基礎・地盤の影響を把握



- ✓ 高振動数ほど回転水平比が大きい
- ✓ 地盤を考慮すると回転水平比は低下する
- ✓ 良好地盤ほど回転水平比が大きい

地盤ばねの各要素の影響

地盤ばねの各成分(水平・鉛直・先端)が回転挙動に与える影響を整理

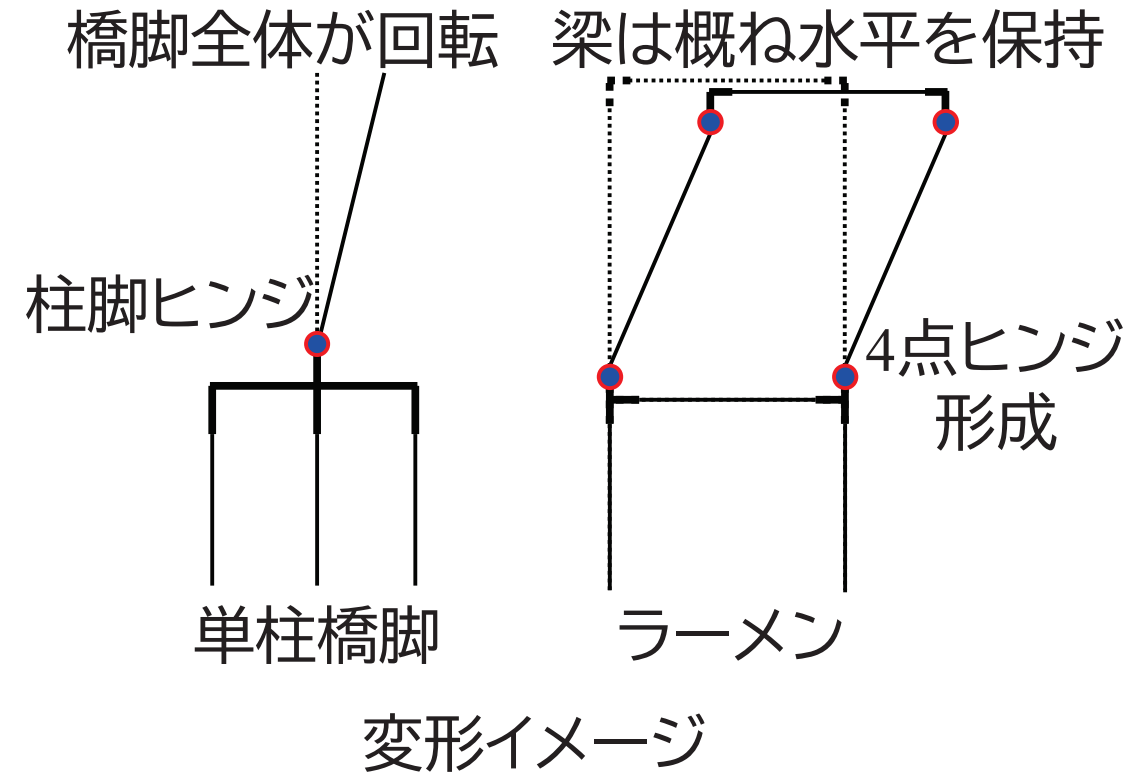
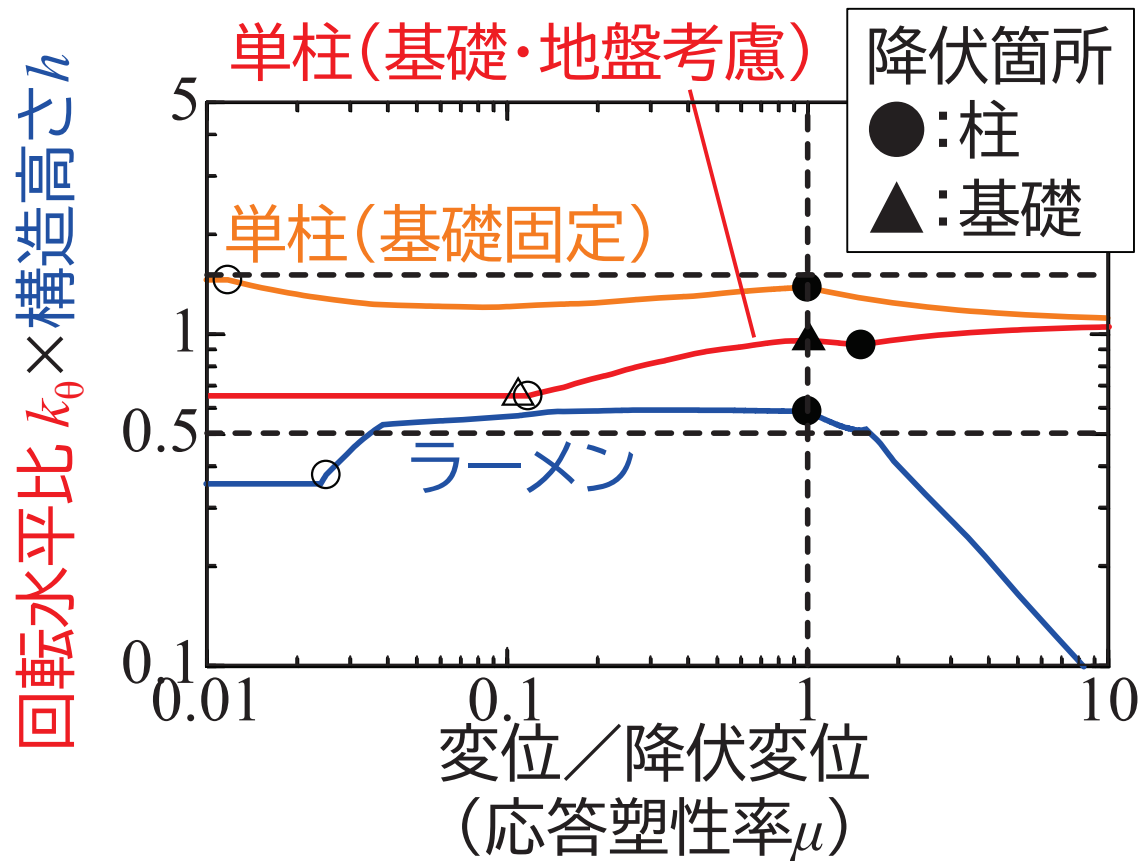


✓ 水平地盤ばねの影響が最も大きい

→ 地表面付近ほど水平変位が大きく、表層付近の水平地盤ばね剛性が重要

④構造物の塑性化の影響

プッシュ・オーバー解析により、部材の塑性化が回転挙動へ及ぼす影響を評価



- ✓ 塑性化後の回転水平比の変化は構造形式によって異なる
- ✓ 単柱: $k_\theta \times h \rightarrow 1$ 、ラーメン: $k_\theta \times h \rightarrow 0$

目次

1. 研究の背景
2. 回転挙動に影響を及ぼす要因の分析
 - ① 構造形式の影響
 - ② 周波数依存性
 - ③ 基礎・地盤の影響
 - ④ 構造物の塑性化の影響
3. 実構造物における回転挙動の分析
 - ⑤ 実構造物の計測に基づく回転挙動の現象把握
 - ⑥ 設計モデルを用いた回転挙動の再現性
4. まとめ

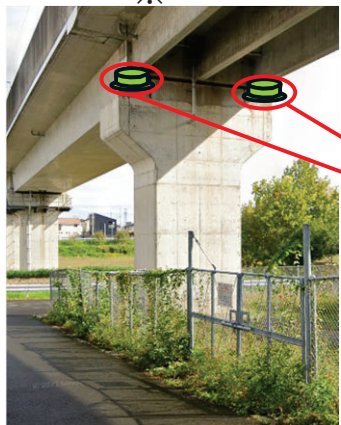
⑤実構造物の計測に基づく回転挙動の現象把握

Railway Technical Research Institute

※写真出典:Google Street View(2026/6/10閲覧)

常時微動計測による回転水平比 k_θ の算定

単柱※

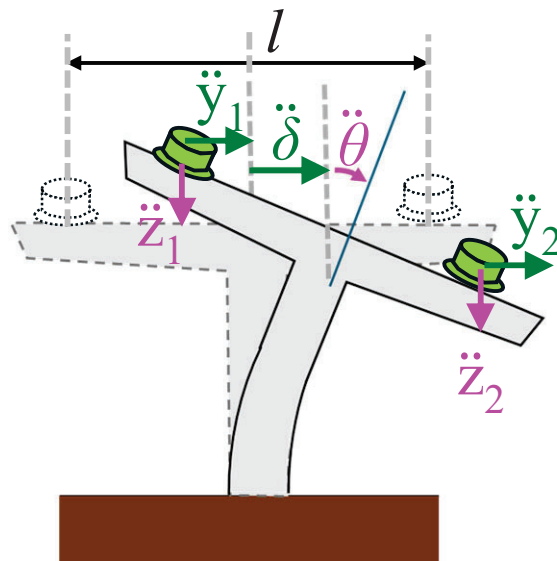


加速度計

ラーメン※



計測例



$$\text{水平加速度 } \ddot{\delta} = \frac{\ddot{y}_2 + \ddot{y}_1}{2}$$

$$\text{回転加速度 } \ddot{\theta} = \sin^{-1} \frac{\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1}{l} \approx \frac{\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1}{l}$$

$$\text{回転水平比 } k_\theta = \theta / \delta$$

計測対象

構造高さ h (m)	単柱 (基)	ラーメン (基)
$10 < h$	17	24
$10 \leq h < 15$	35	7
$15 \leq h < 20$	22	3
$20 \leq h$	7	—
計	81	34

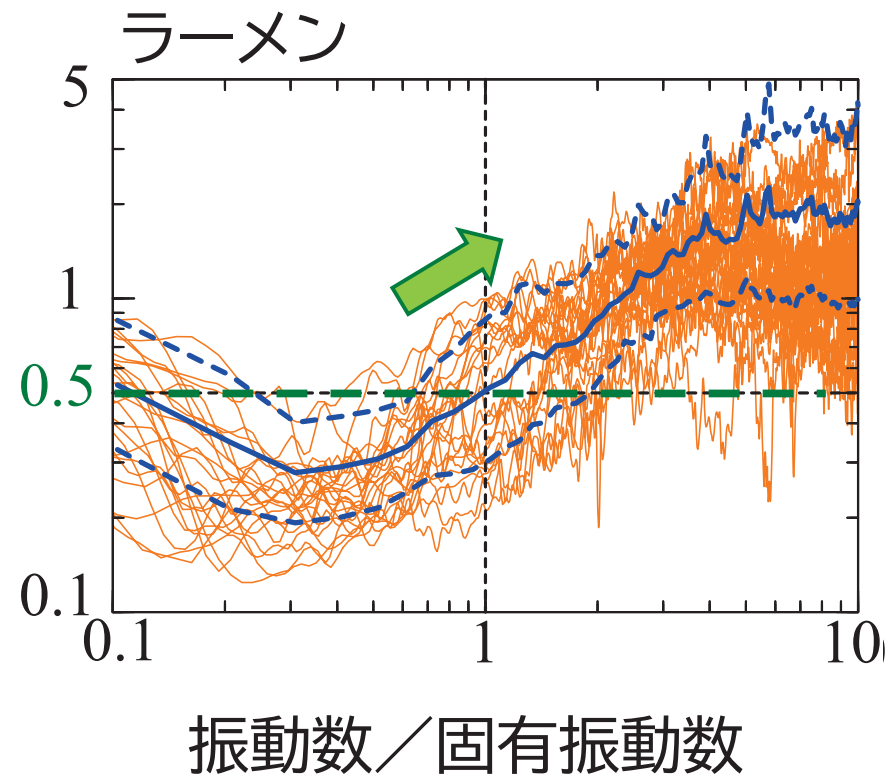
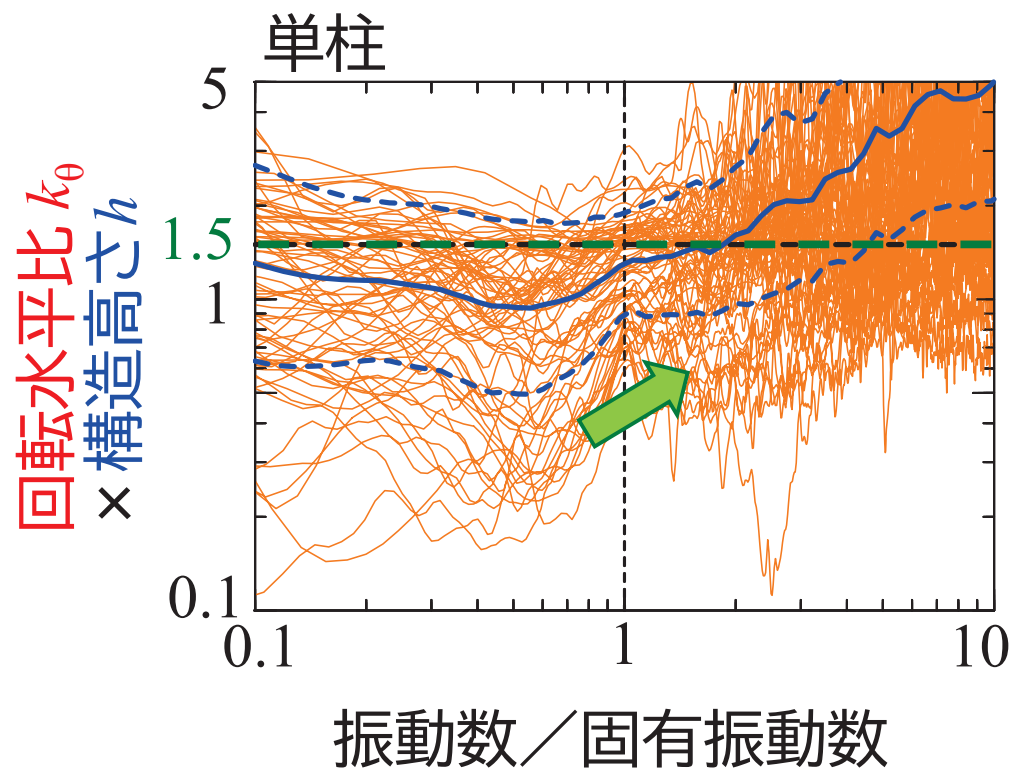
地盤条件:G2~G7

✓ 単柱81基、ラーメン34基
計115地点で計測

⑤実構造物の計測に基づく回転挙動の現象把握

Railway Technical Research Institute

理論・解析結果と比較するため、多数の実構造物を計測



✓ 理論・解析と同様の傾向を確認

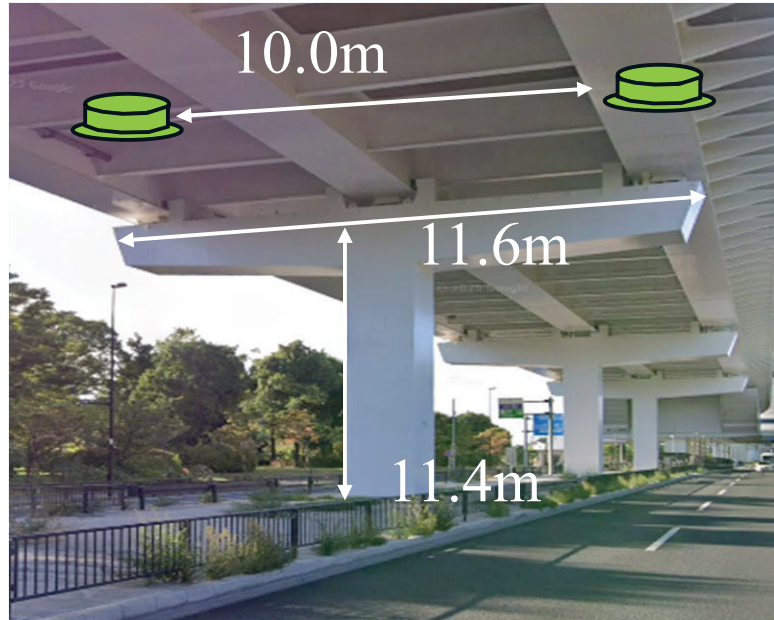
✓ 単柱 > ラーメン

✓ 高振動数ほど回転の影響が大きい

⑥設計モデルを用いた回転挙動の再現性

Railway Technical Research Institute

対象構造物



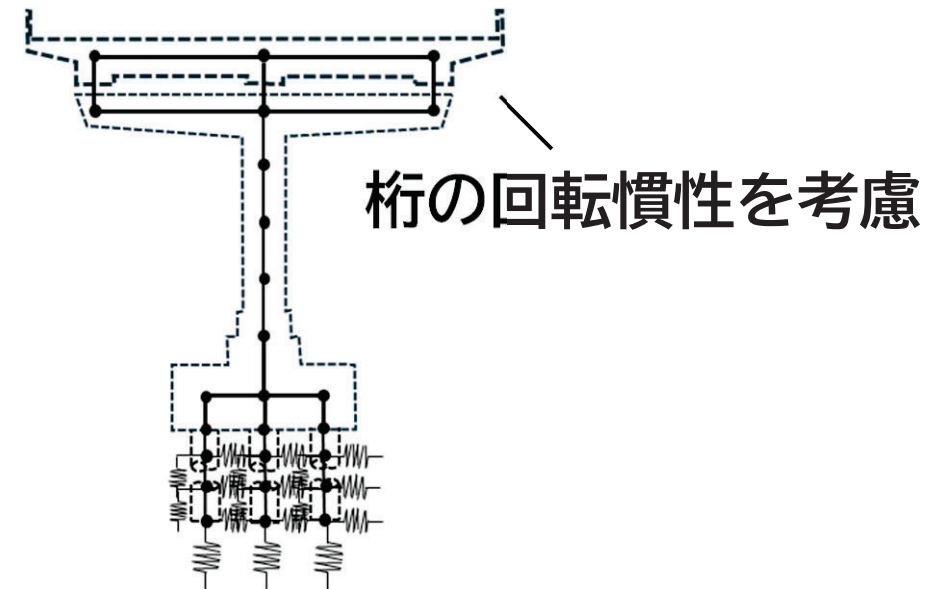
写真出典: Google Street View(2026/6/10閲覧)

計測結果(常時微動)

固有振動数: 0.93Hz

$k_{\theta} \times h: 1.52$

解析モデル



設計標準に基づく
2次元梁-ばねモデル

⑥設計モデルを用いた回転挙動の再現性

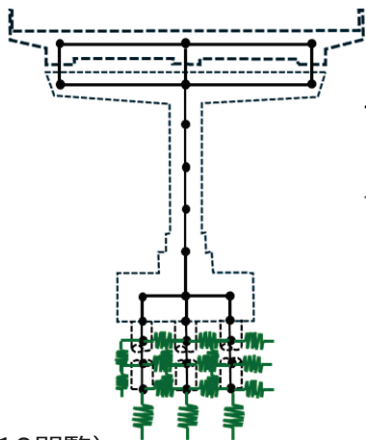
Railway Technical Research Institute

対象構造物



写真出典: Google Street View(2026/6/10閲覧)

解析モデル



解析結果

条件

$$k_{\theta} \times h$$

常時微動
(微小ひずみ)

設計モデル

0.89

地盤ばね剛性を補正

1.52

地盤ばね剛性を補正

実測を再現

計測結果: $k_{\theta} \times h = 1.52$

✓ 地盤ばね剛性を補正することで実現象を再現

✓ 設計時の解析モデルでも

回転挙動を適切に再現可能

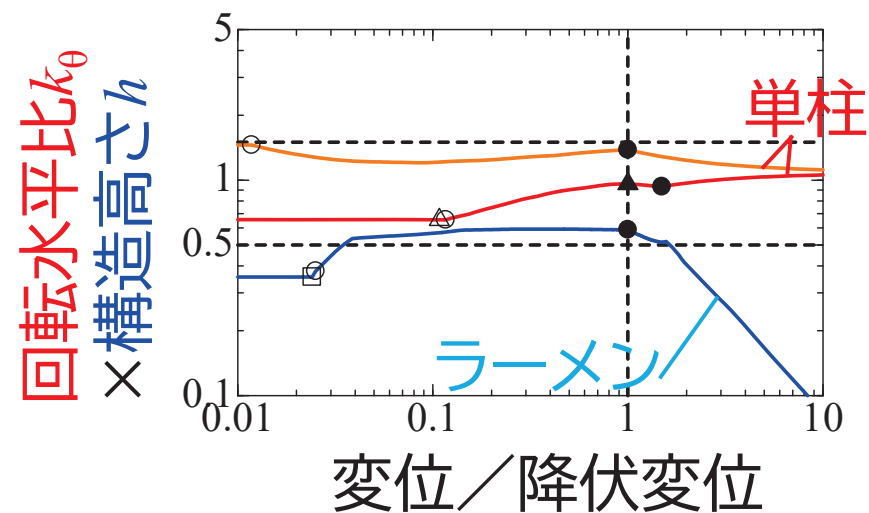
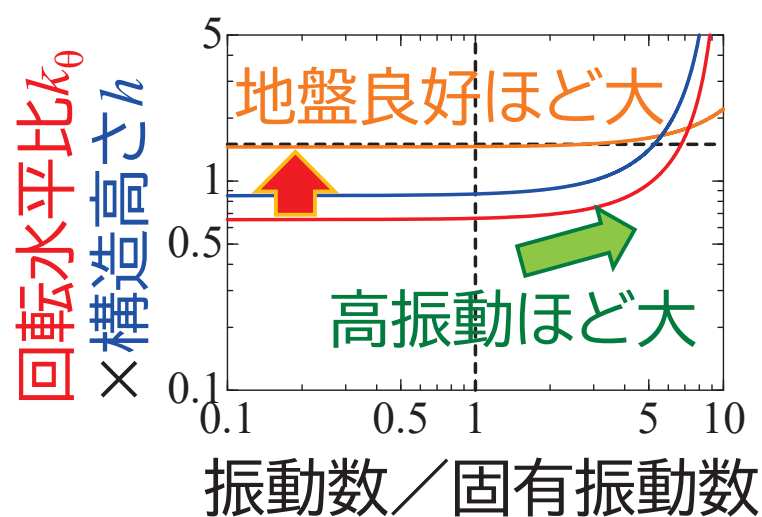
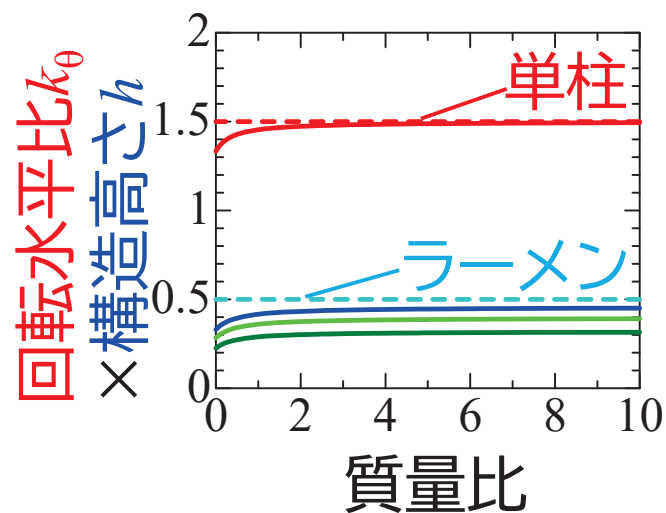
設計地震時
(大ひずみ)

設計標準の
地盤ばねを使用

通常設計

成果のまとめ

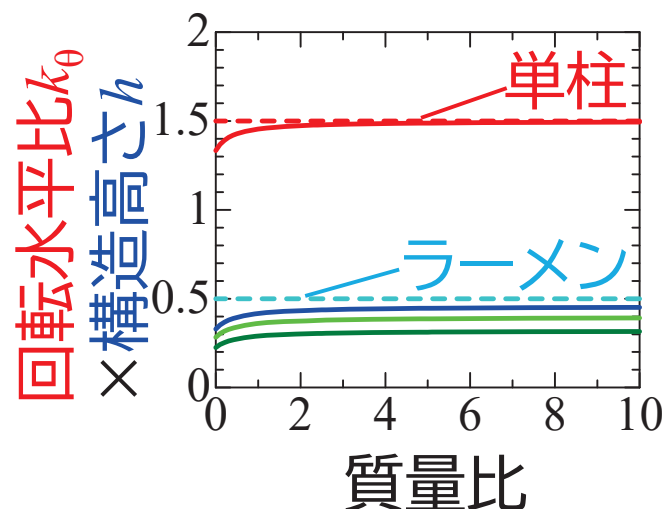
- $k_\theta \times h$ で統一的に整理可能
- 高振動数・良好地盤ほど回転の影響が大きい
- 実構造物の計測でも理論・解析と同様の傾向を確認
- 設計時の解析モデルでも回転挙動を再現可能
- 塑性化後の回転挙動は構造形式によって異なる



成果の活用

- 電柱指針の回転水平比設定の高度化
- 構造形式・地盤条件等を考慮した回転水平比 k_θ の定式化

➡ 構造高さ・地盤条件を考慮した評価の高度化



電車線路設備耐震設計指針・同解説

構造形式	基礎形式	$k_\theta = \theta / \delta$
1層ラーメン	1柱1杭	0.053
1層ラーメン	細径群杭	0.035
2層ラーメン	細径群杭	0.017
橋脚(降伏部位:<体基部)	太径群杭	0.072
橋脚(降伏部位:杭基礎)	太径群杭	0.060

- 1) 山下大輝, 坂井公俊: 鉄道橋りょう・高架橋の地震時回転挙動に関する基礎的検討, 土木学会論文集, Vol.81, No.13, 2025
- 2) 宇田周平, 山下大輝, 坂井公俊: 橋りょうの高さ・地盤条件・非線形性が地震時回転挙動に与える影響把握のための解析的検討, 土木学会論文集, Vol.82, No.13, 2026