

シールドトンネルの耐震設計における 継手部の回転特性の設定方法

構造物技術研究部 トンネル研究室

副主任研究員 木下 果穂

目次

1. 研究の背景と目的
2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明
3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した
継手部の回転特性の設定法
4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例
5. まとめ

目次

1. 研究の背景と目的

2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明

3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した

継手部の回転特性の設定法

4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

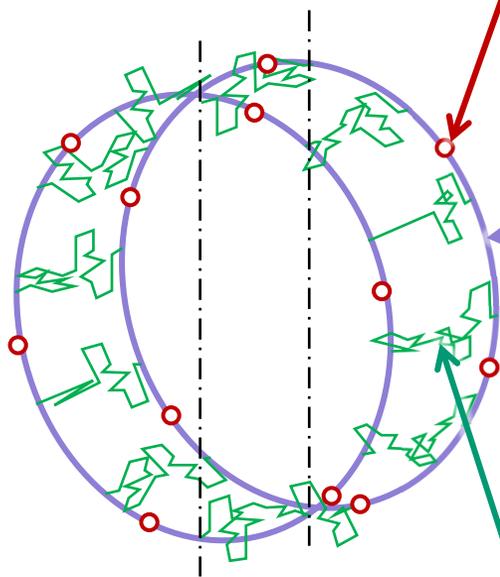
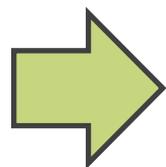
5. まとめ

1. 研究の背景と目的

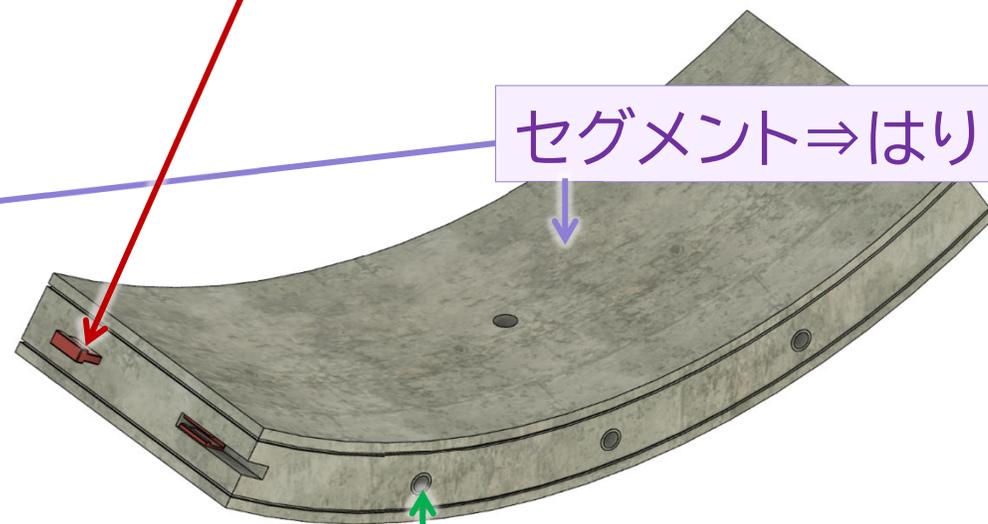
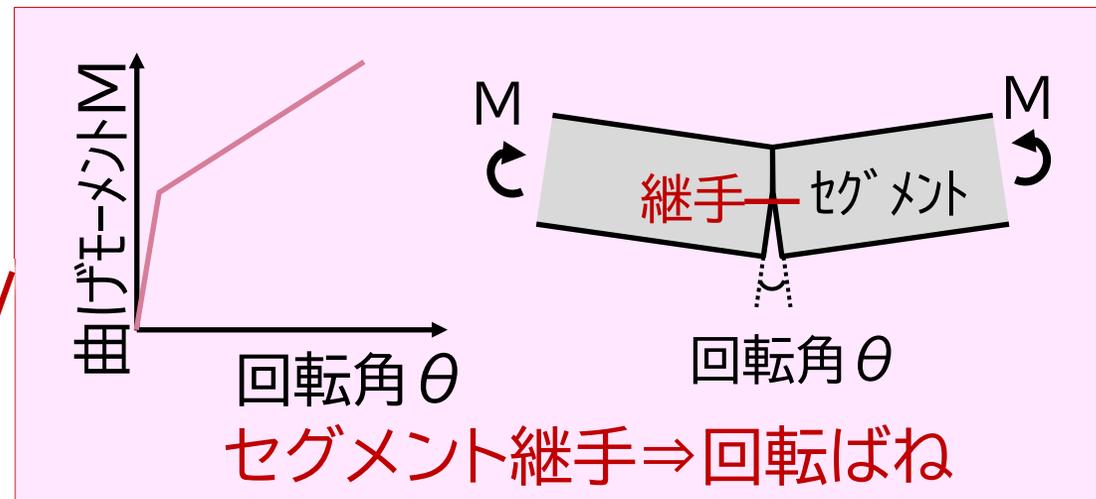
背景

◆ 鉄道シールドトンネルのセグメントの設計

- ・応答値算定には
「はりばねモデル」が用いられる



【はりばねモデル】



1. 研究の背景と目的

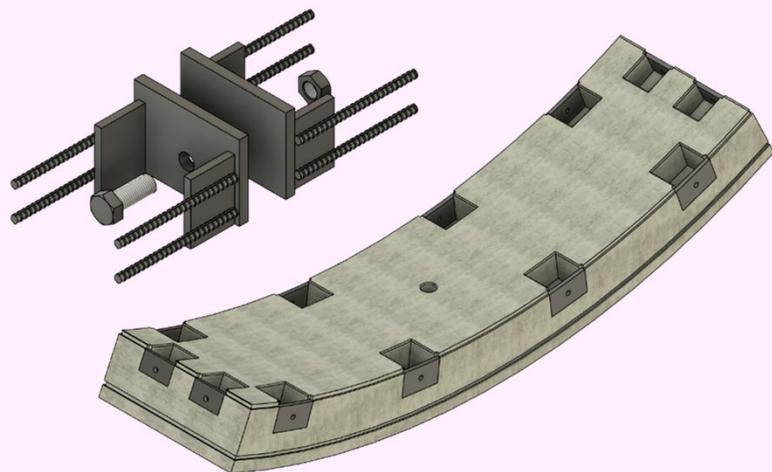
背景

◆セグメント継手

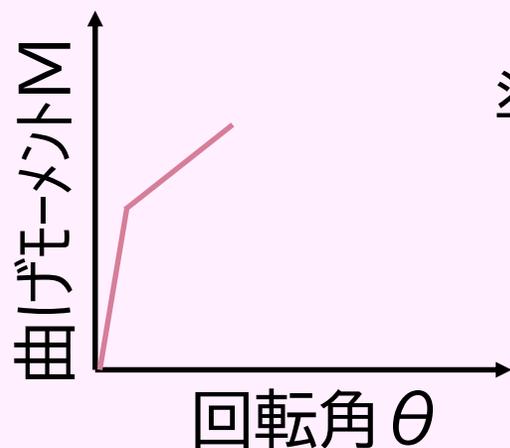
(従来)ボルト締結によるボルト継手が主流

(近年)ボルト締結を伴わない継手の事例が増加(例:軸方向挿入型継手)

⇒従来のボルト継手を基本とした回転ばね特性の設定方法を準用する事例



【ボルト継手の例】



【回転ばね特性の例】

準用



【軸方向挿入型継手の例】

1. 研究の背景と目的

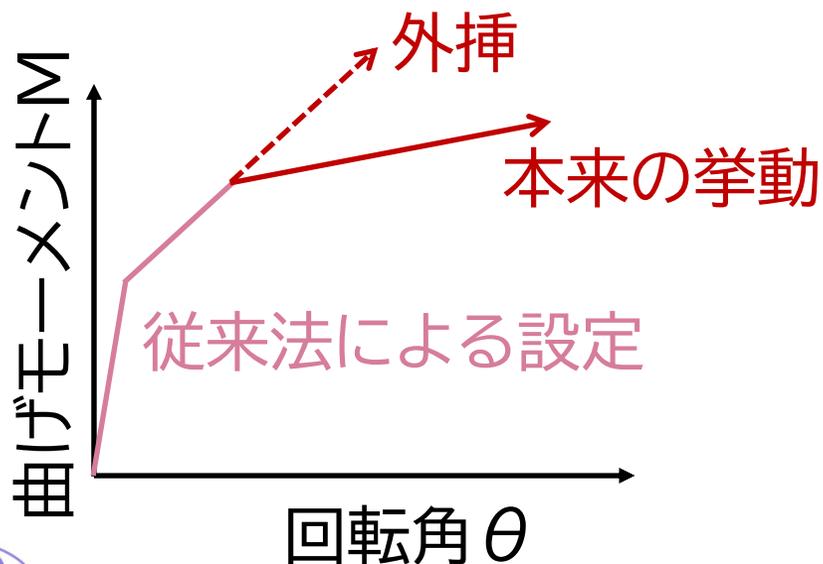
目的

- ◆ 従来のボルト継手の回転ばね特性の設定方法の準用
⇒ 軸方向挿入型継手の 実状に即した回転ばね特性の設定方法 の提案

○期待できる効果

- ・ 応答値を適切に評価
- ・ RCセグメントの適用範囲の拡大
⇒ 設計の合理化・低コスト化

⇒ 特殊なセグメントが必要(コスト大)



⇒ RCセグメントが採用可

目次

1. 研究の背景と目的

2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明

3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した

継手部の回転特性の設定法

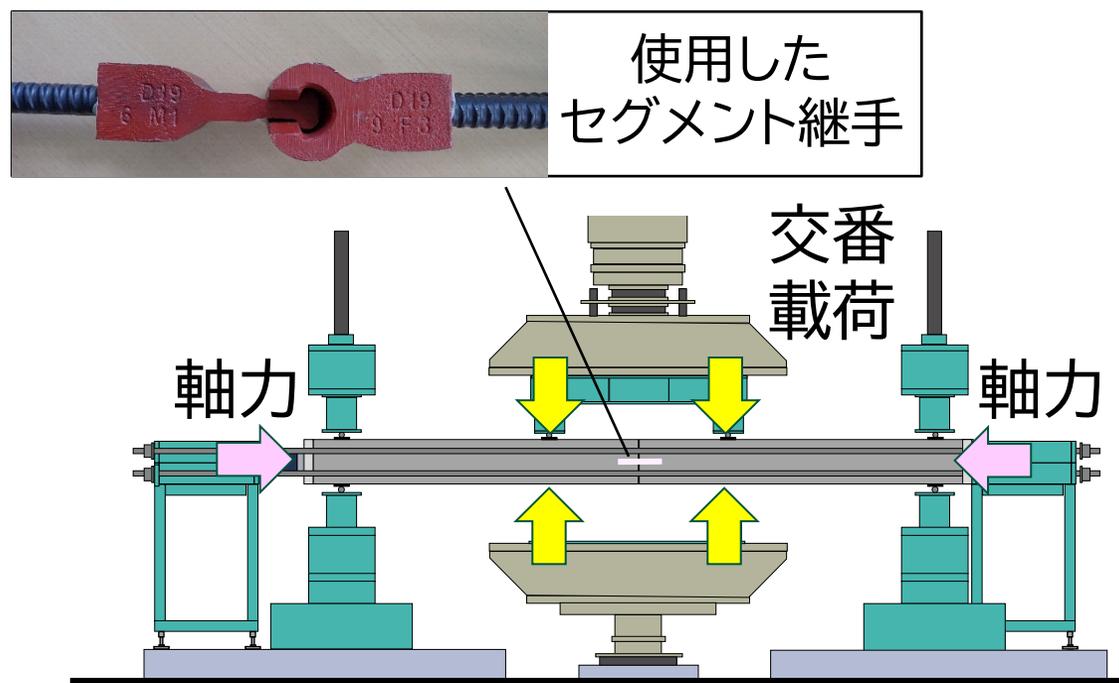
4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

5. まとめ

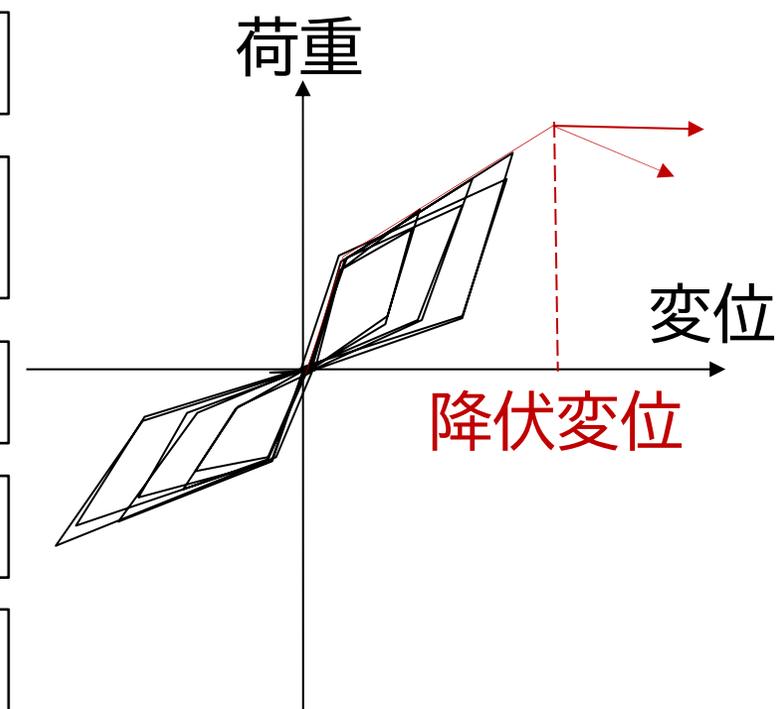
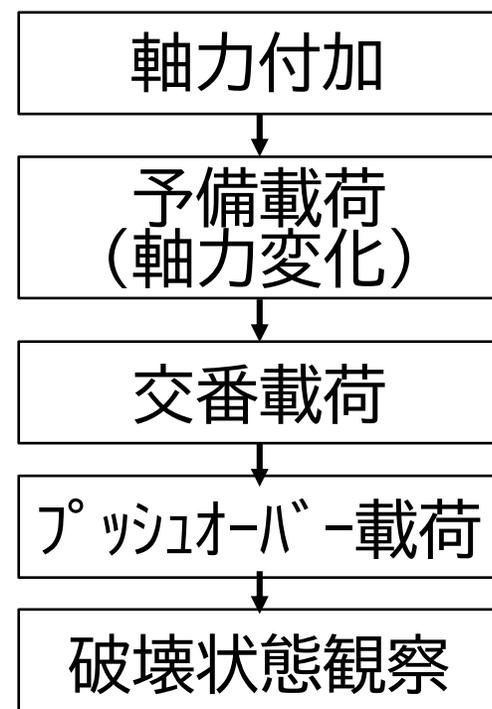
2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明

◆ 挙動の解明 ・ 軸方向挿入型継手を用いた実物大継手曲げ試験を実施

- ・ 実験ケース : 2ケース(継手のアンカー筋の付着強度を変更)
- ・ セグメント継手 : 日本シールドセグメント技術協会管理の継手を使用
- ・ 载荷装置 : 軸力付加 + 交番载荷が可能な装置を使用



【継手曲げ試験概要】

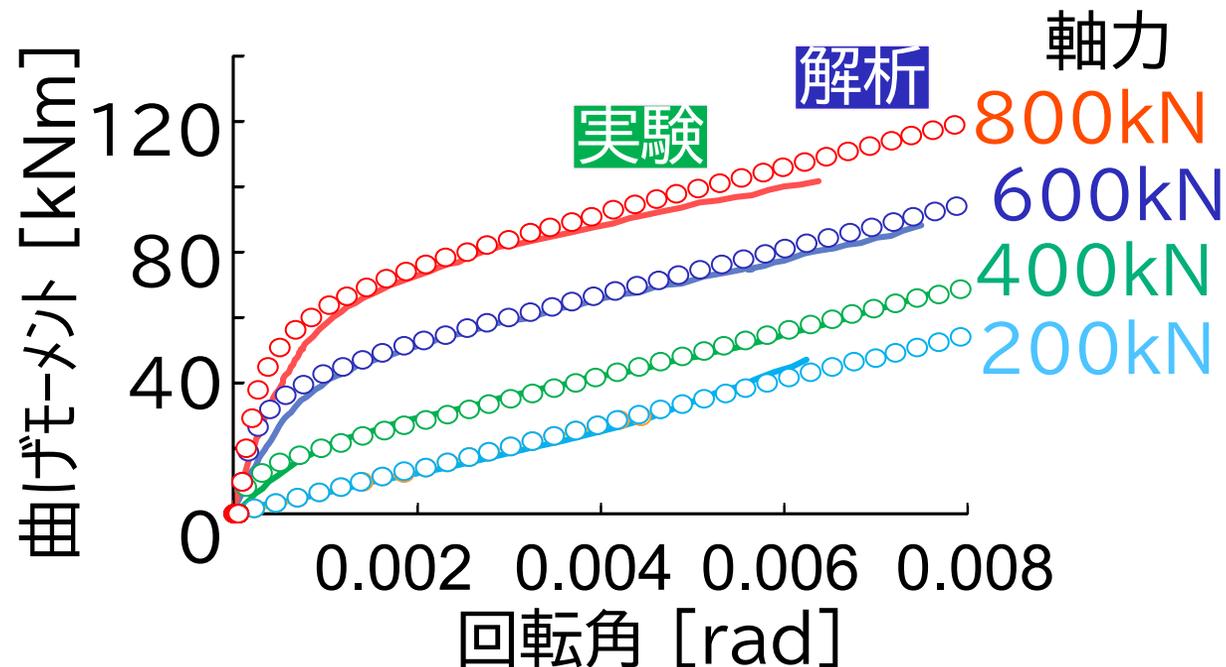
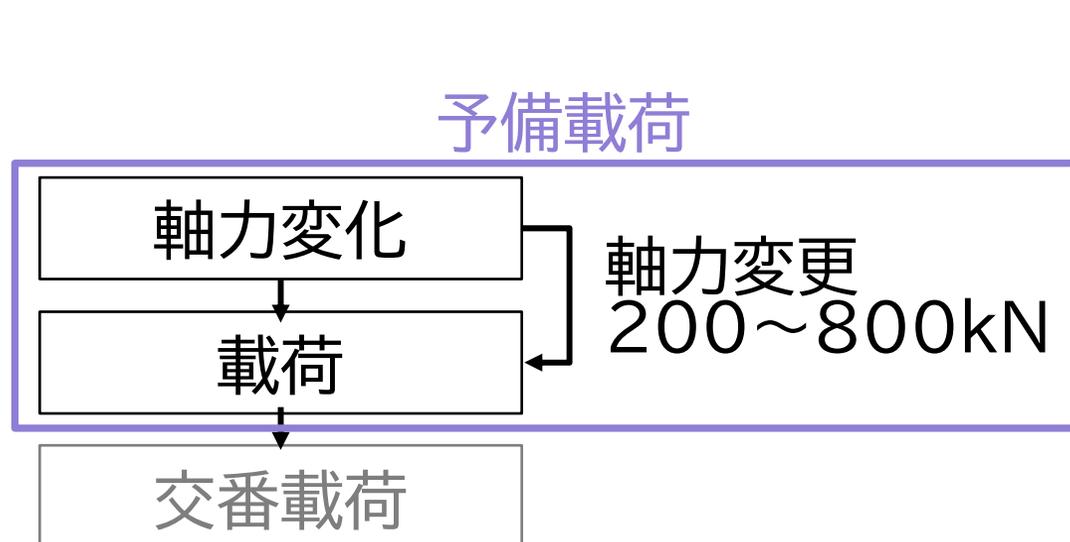


【载荷ステップ】

2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明

◆ 継手曲げ試験の結果(軸力の影響)

- ・設計実務では設計軸力毎の回転特性の設定が必要
⇒ 軸力の影響を予備载荷(許容応力度レベルまで载荷)により確認



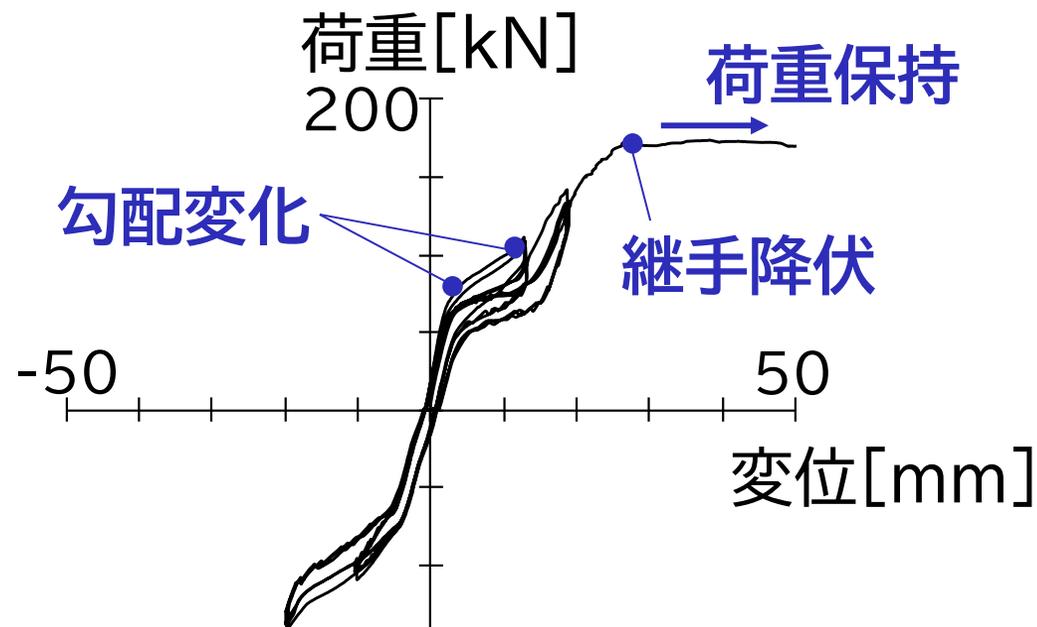
- ・軸力による継手の回転特性の変化を確認
- ・FEM(後述)により軸力の変化の影響を表現できることを確認

➡ 多様な設計軸力に対し継手曲げ試験とFEM解析の併用により対応可能

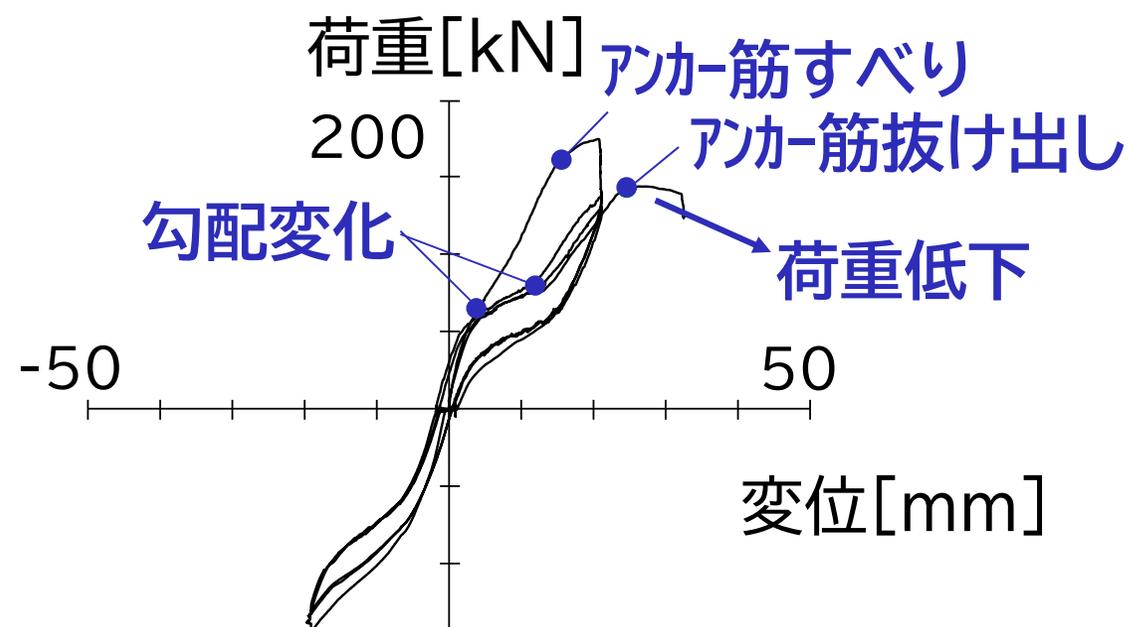
2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明

◆ 継手曲げ試験の結果(交番载荷+プッシュオーバー载荷)

【case1 継手の降伏強度 < 付着強度】



【case2 継手の降伏強度 > 付着強度】



- 勾配変化を有する複雑な挙動←セグメント・継手金物の接触に起因
- 弾性域での繰返し载荷は最大荷重に影響を与えない
- [case1 継手降伏⇒荷重保持] + [case2 引抜け⇒荷重低下]

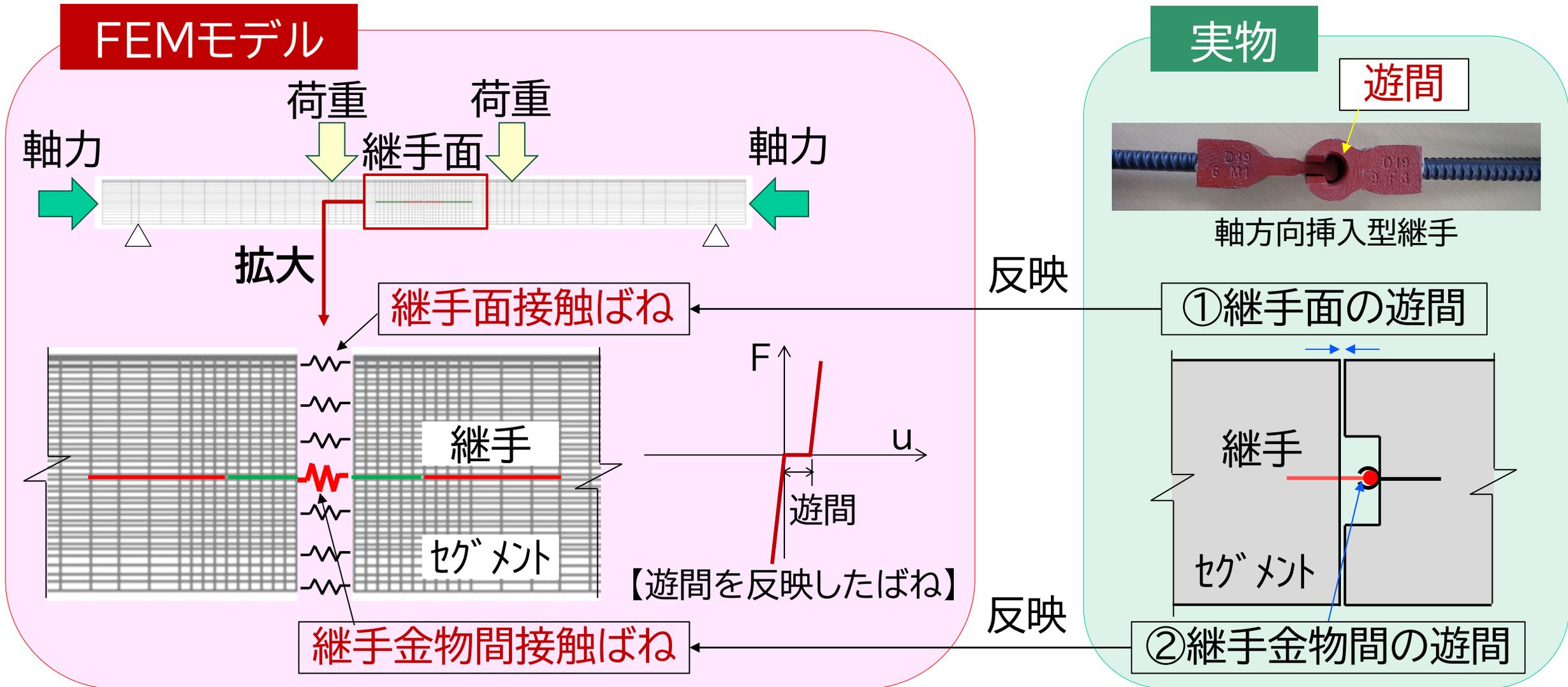
➡ 継手曲げ試験の結果から継手アンカー筋降伏を限界点とすることを判断

目次

1. 研究の背景と目的
2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明
- 3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した
継手部の回転特性の設定法**
4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例
5. まとめ

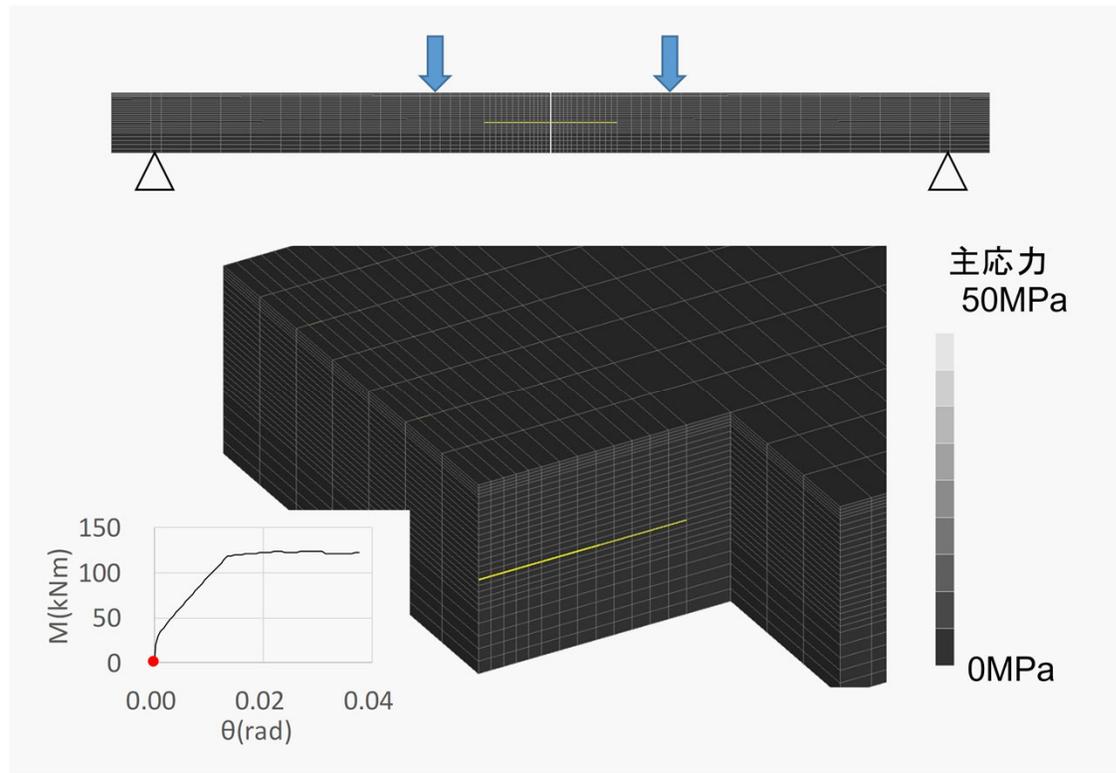
3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した継手部の回転特性の設定法

- ◆ FEMモデル ・ 継手面での接触挙動を考慮可能なモデル(遊間も考慮可能)

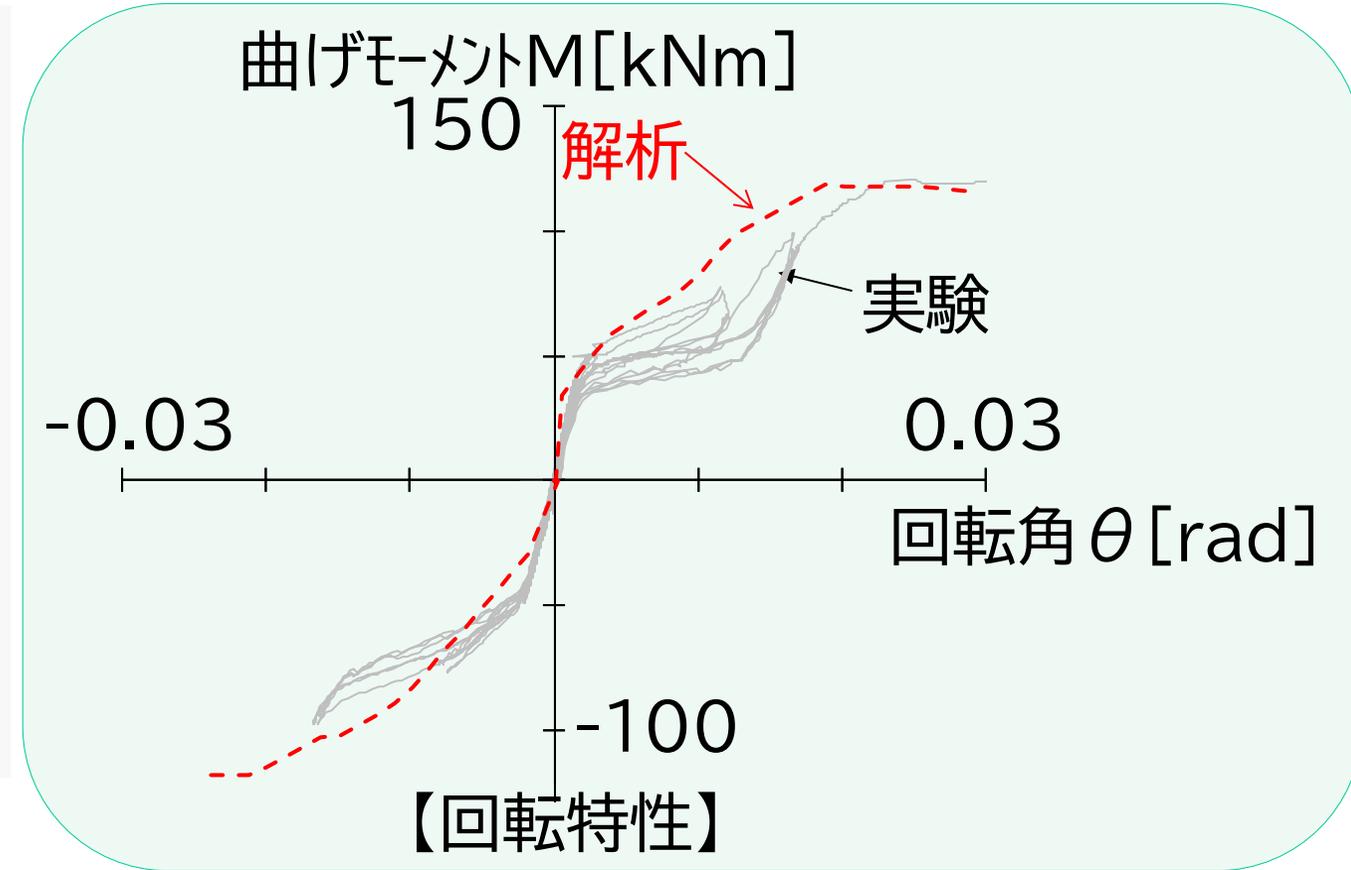


3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した継手部の回転特性の設定法

◆ 妥当性検証 ・ 提案FEMによる継手曲げ試験の再現解析を実施



【解析結果例－変形・応力】



【回転特性】

・ 継手面での接触挙動を考慮することにより実験の挙動を再現可能

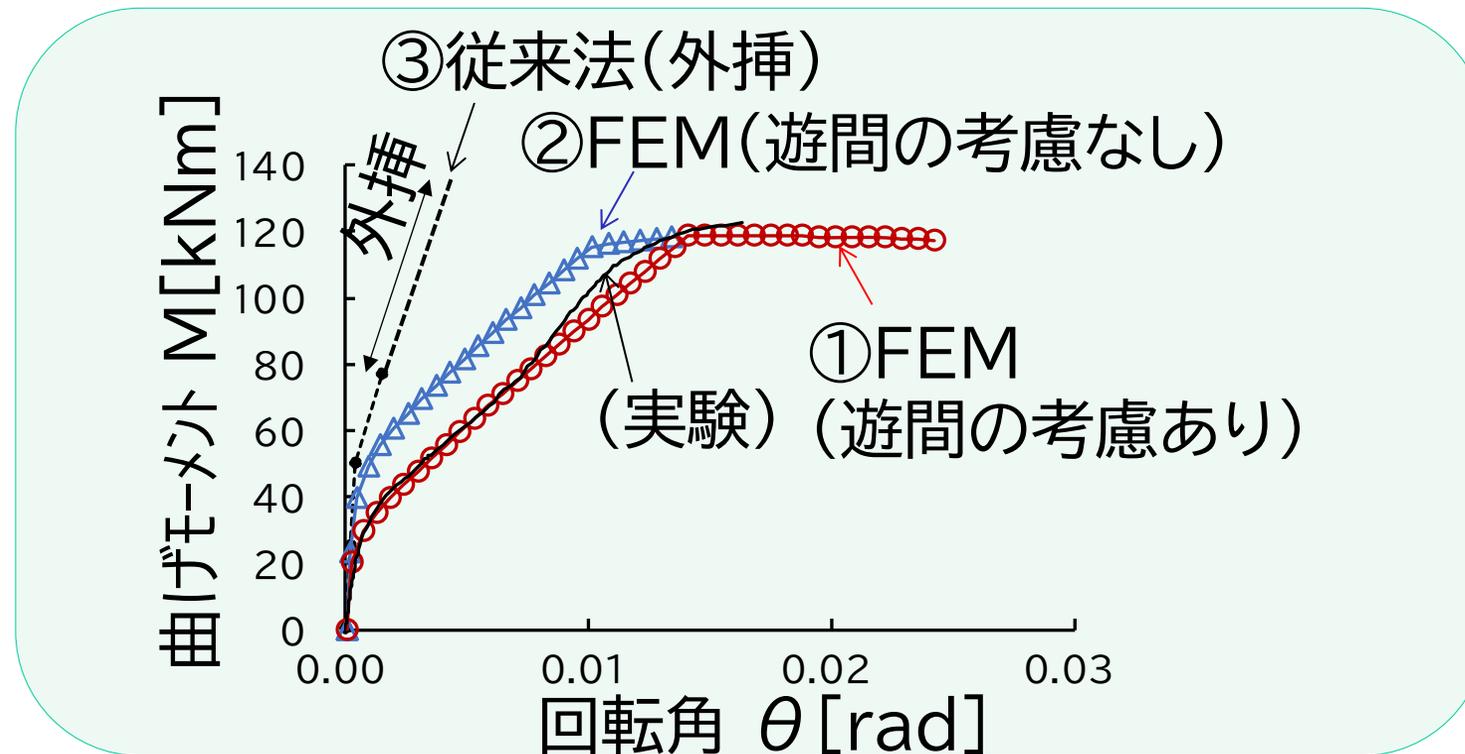
➡ 提案FEM手法の妥当性を確認

3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した継手部の回転特性の設定法

◆ 継手部の回転特性の比較

- ・算出断面力: ①FEM(遊間あり) < ②FEM(遊間なし) < ③従来法(外挿)
- ・継手の遊間は施工状況により異なる

⇒ 本検討では②FEM(遊間なし)を使用し従来法よりも応答値を緩和



3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した継手部の回転特性の設定法

◆ 継手部の回転特性の設定法

継手曲げ試験実施(1ケース)

⇒ 破壊モード 確認, 継手の接触挙動のパラメータ取得

※挙動を把握できている場合は不要

継手曲げ試験の再現FEM解析

⇒ FEMの妥当性確認

各設計断面に対応した条件でFEMを実施

⇒ 各設計断面に対応した回転ばね特性を算出

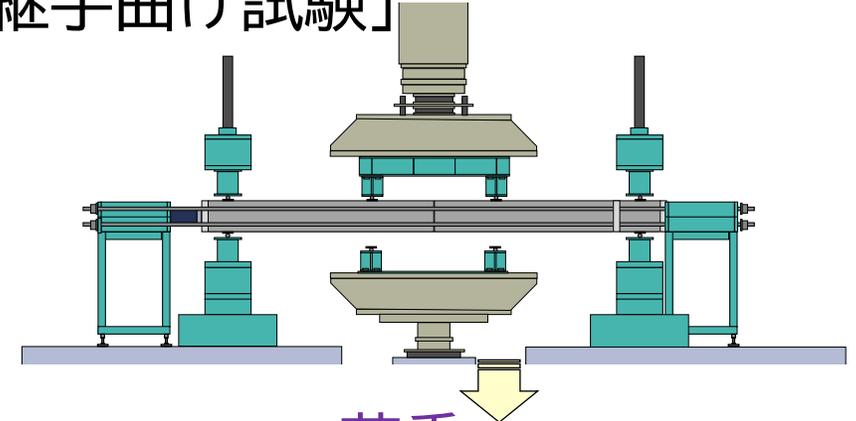
構造解析(はりばねモデル)

活用

照査

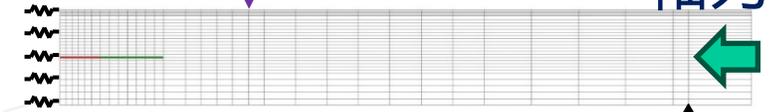
活用

[継手曲げ試験]



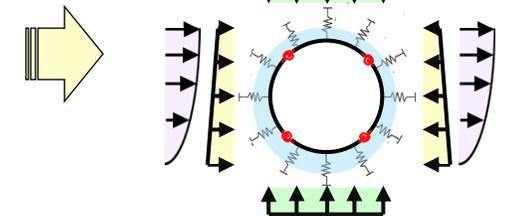
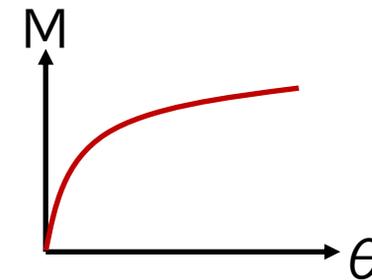
[FEM解析] 荷重

軸力



[回転ばね特性]

[構造解析]



目次

1. 研究の背景と目的
2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明
3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した
継手部の回転特性の設定法
4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例
5. まとめ

4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

鉄道構造物等設計標準・同解説 トンネル・シールド編

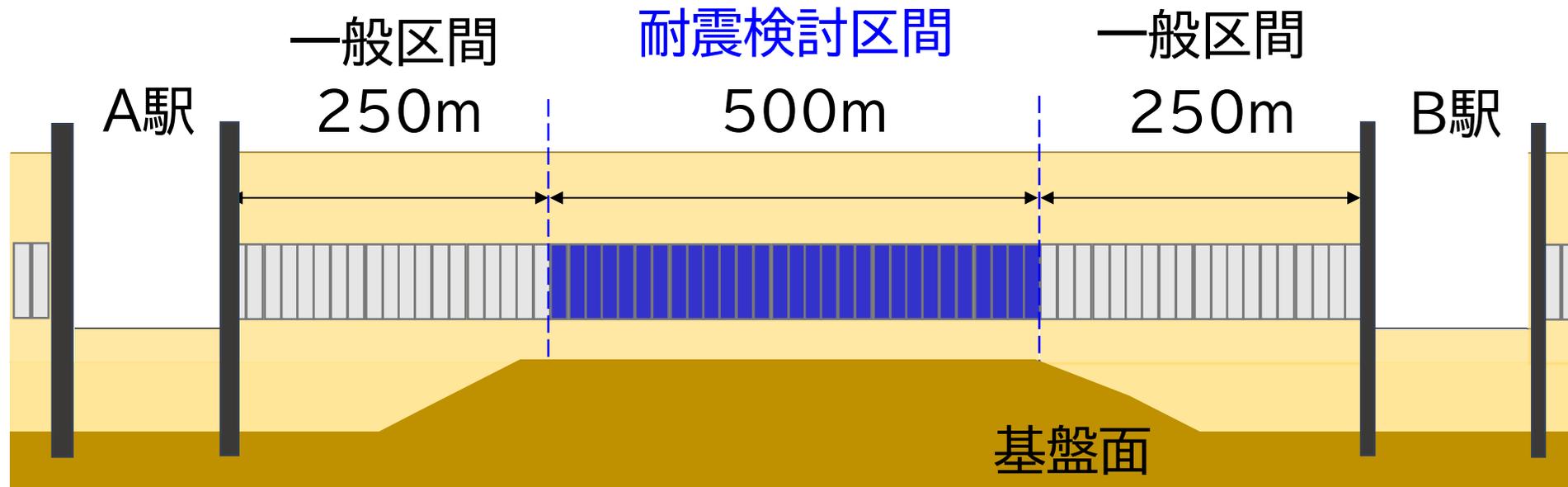
◆ 8.4 地震の影響を受けやすいシールドトンネル

- ・ 一般には地震の影響を考慮しなくてよいものと考えられる
- ・ 地震の影響を受けやすいシールドトンネルについては、地震の影響を適切に設定して設計応答値を算定し、性能照査を行う必要がある

⇒ 今回は地盤の変位が大きい条件を想定してトンネル横断方向の試設計を実施した
(今回提案の手法を適用)

4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

- ◆ 試設計の条件・・計画路線の一部区間に耐震検討があることを想定



4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

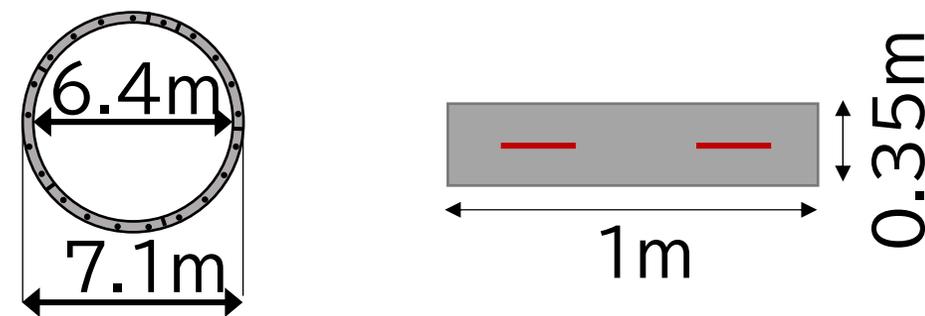
設計条件 ……砂質土中の単線シールドトンネル

◆ 構造条件

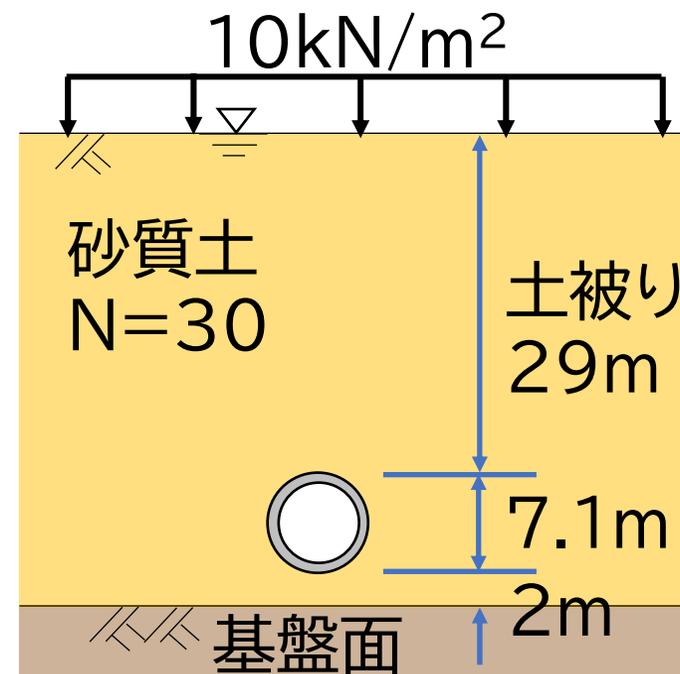
- トンネル径 : 外径 7.1m
- セグメント寸法 : 高さ 0.35m × 幅 1.0m
- セグメント配置 : 7分割
- コンクリート : $f'_{ck} = 48\text{N/mm}^2$
- セグメント継手 : 軸方向挿入型継手
- リング継手 : ボルト継手 M39(10.9)
- 継手数 : セグメント継手 7 / リング継手 25

◆ 地盤条件

- 土質区分 : 砂質土
- 土被り : 約30m
- 地下水位 : 地表面
- 耐震設計上の基盤面 : トンネル下2m

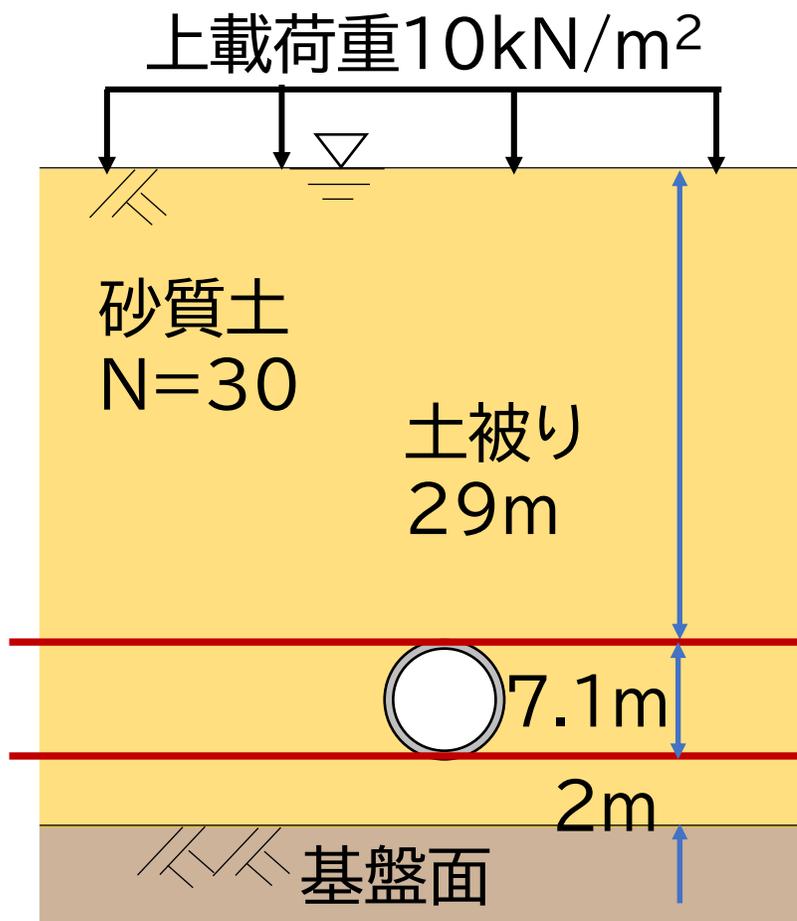


[トンネル断面] [覆工断面]

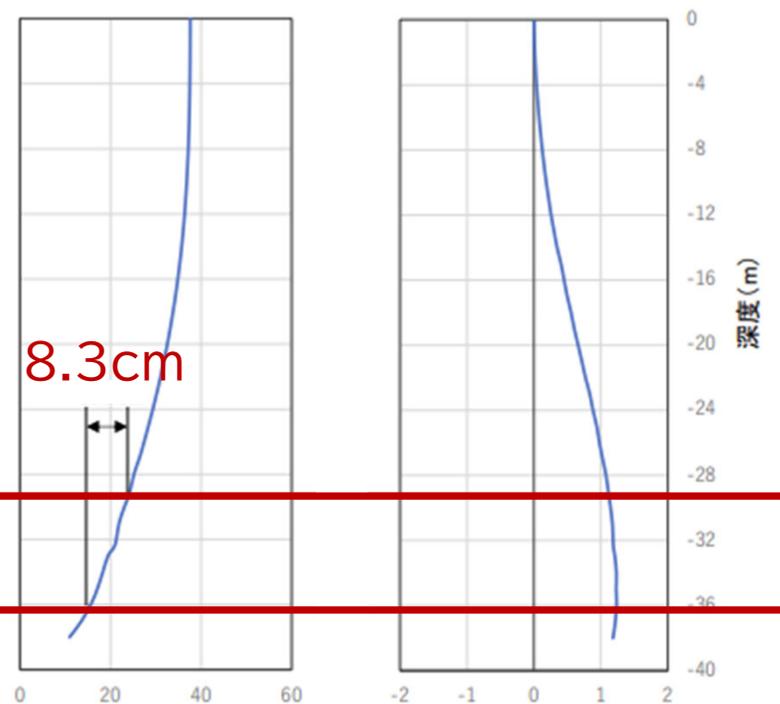


4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

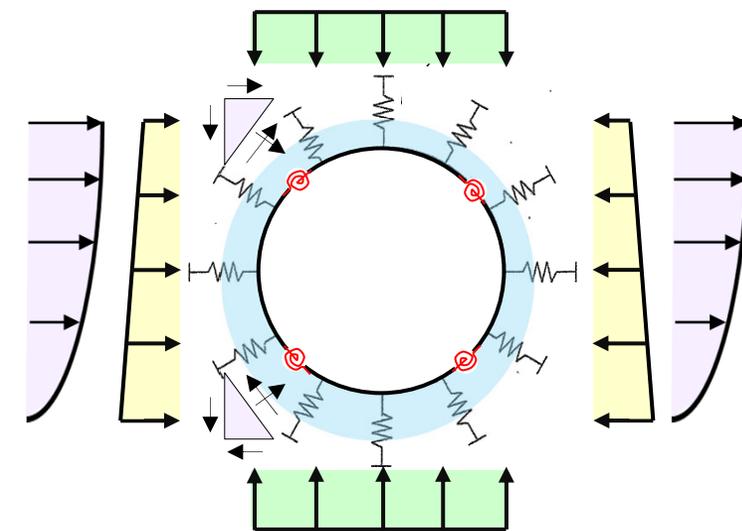
- ◆ 地盤応答解析・・・L2ス°クルⅡ地震動 → 最大相対変位8.3cm・層間変形角1.2%
※照査必要目安1/150以上(土木学会)



変位(cm) せん断ひずみ(%)



【地盤応答解析結果】



⇒ 構造解析

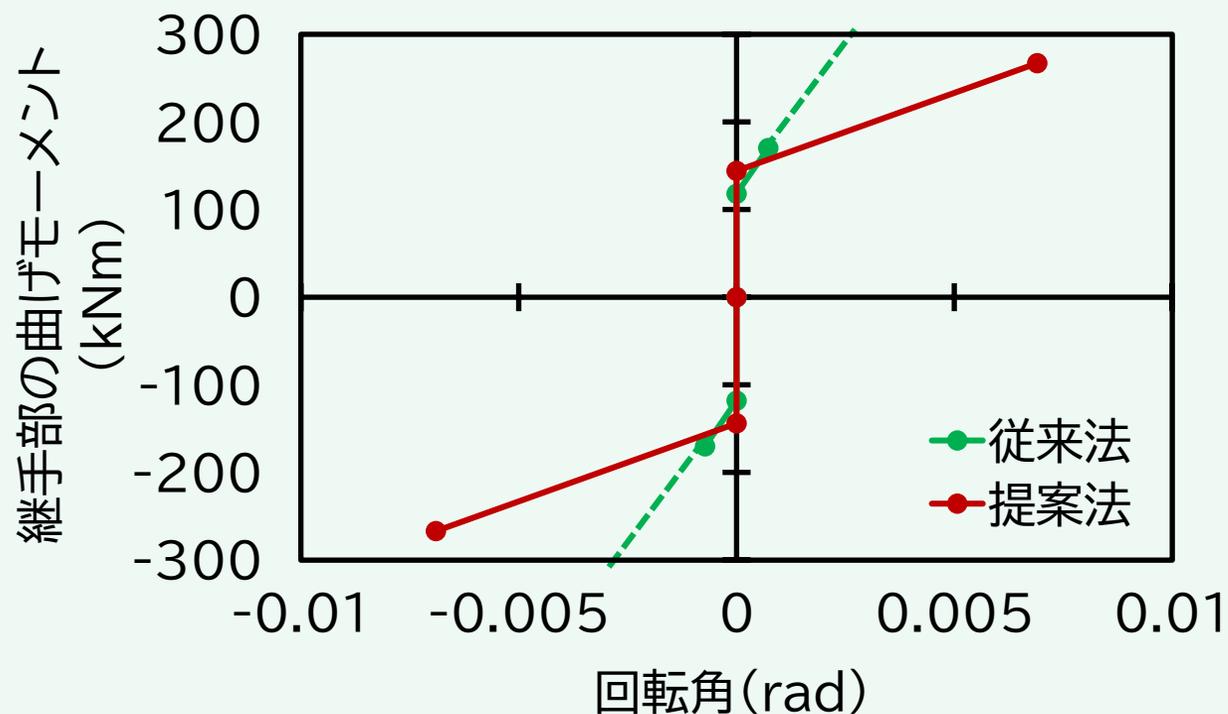
4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

◆ 応答値の算定 ……回転ばねの設定2ケース

モデル

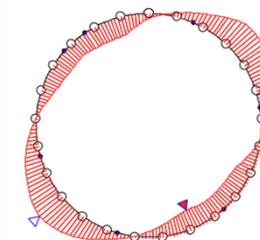
①従来法(外挿)

②提案法(FEM解析) ※ 設計上の処理(バリエー化)



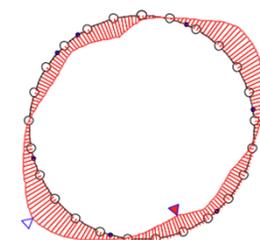
応答値

①従来法(外挿)



継手部最大M
348 kNm

②提案法(FEM解析)

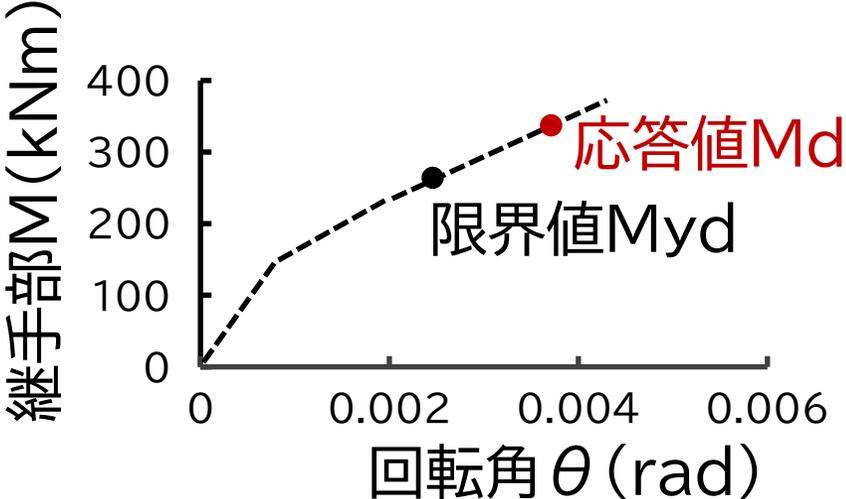
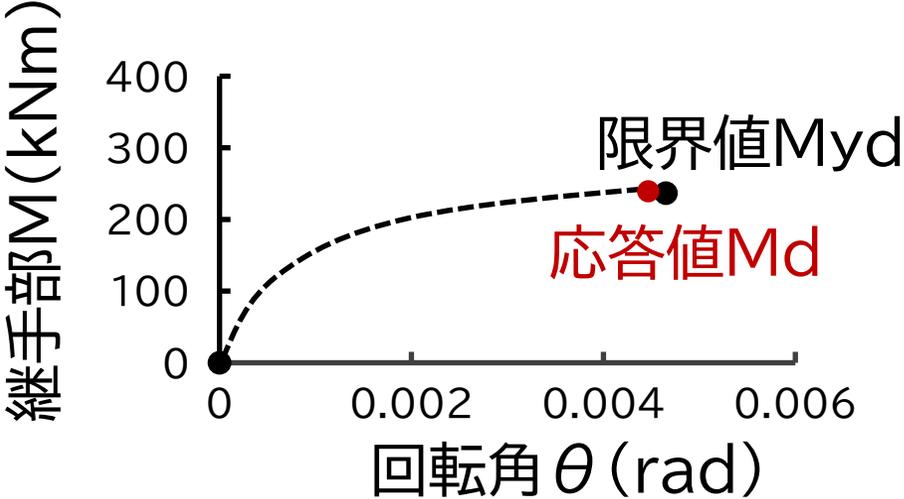


継手部最大M
238 kNm

4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

照査

※主断面(せん断)は値が小さいため省略

部材	①従来法(外挿)	②提案法(FEM解析)
主断面(曲げ)	0.90	0.97
セグメント 継手	1.31 (NG) 	0.99 (OK) 
リング継手	0.49	0.86



提案法によりRCセグメントが適用可能となる

目次

1. 研究の背景と目的

2. 継手曲げ試験による軸方向挿入型継手の挙動の解明

3. 継手曲げ試験とFEM解析を併用した

継手部の回転特性の設定法

4. 地盤の変位が大きい条件における耐震設計への適用例

5. まとめ

5. まとめと成果の活用

まとめ

- ① 軸方向挿入型継手の実状に即した回転ばね特性の設定方法を提案した
 - ・継手曲げ試験とFEMを組み合わせた継手の回転ばね特性の算出法を提案
 - ⇒ 継手の接触を考慮することで継手の挙動の精緻な再現が可能
 - ⇒ FEMにより設計断面に応じた継手の回転ばね特性の算定が可能
- ② 試設計により提案法によるRCセグメントの適用拡大を確認
 - ・地盤の変位が大きい条件においてセグメントの耐震設計を実施
 - ⇒ セグメント継手の応答値(断面力)の低減を確認
 - ⇒ 今回の条件ではRCセグメントの適用を拡大できることを確認

成果の活用

- ① 鉄道シールドトンネルの設計に活用できる
- ② 載荷試験・性能評価方法の標準化に活用できる
 - ・試験方法のマニュアル化(予定)