

# 地震時の車両からの著大横圧に対する スラブ軌道のレールの水平抵抗特性

鉄道力学研究部 構造力学研究室  
主任研究員 成田 顕次

## 近年の大規模地震動の頻発に伴い、**新幹線の脱線**事象が発生

2004年 新潟県中越地震



「鉄道事故調査報告書」(航空・鉄道事故調査委員会)を抜粋して作成  
(<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acc/RA2007-8-1.pdf>)

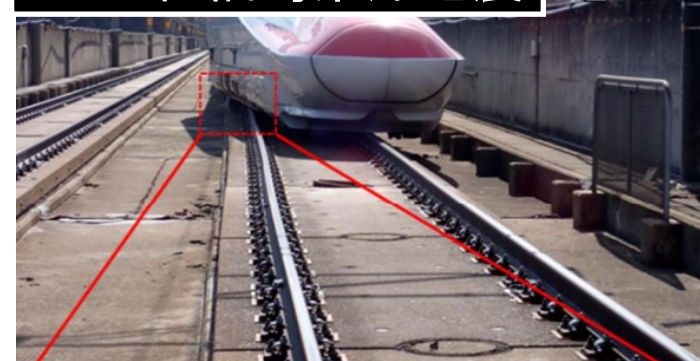
2016年 熊本地震



列車先頭部の状況

「鉄道事故調査報告書 説明資料」(運輸安全委員会)を加工して作成  
(<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/p-pdf/RA2017-8-2-p.pdf>)

2022年 福島県沖地震



「鉄道事故調査報告書 説明資料」(運輸安全委員会)を加工して作成  
(<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/p-pdf/RA2024-1-1-p.pdf>)

高速走行時の脱線⇒**甚大な被害**



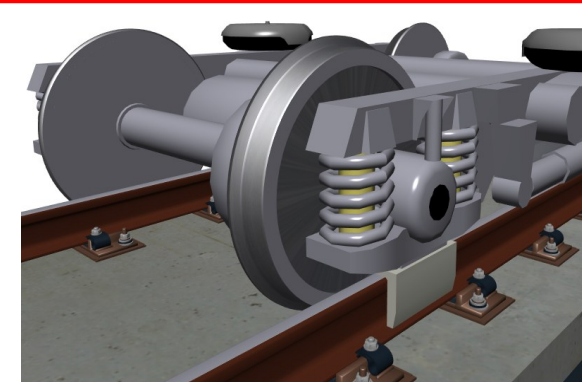
**鉄道システム全体**で脱線リスク低減

### 被害のリスク低減手段

① 早期地震検知システム

② 構造物の耐震補強

③ 軌道・車両の安全対策



リスク低減手段により生じる**新たな課題**

## 地震時横圧の著大化

- 現行の横圧の想定範囲  
⇒ 車両から200kNの横圧が発生することを想定
- 大規模地震の頻度が高い
- 脱線後の被害軽減を目的に逸脱対策工を導入

著大横圧が軌道側に作用する可能性有

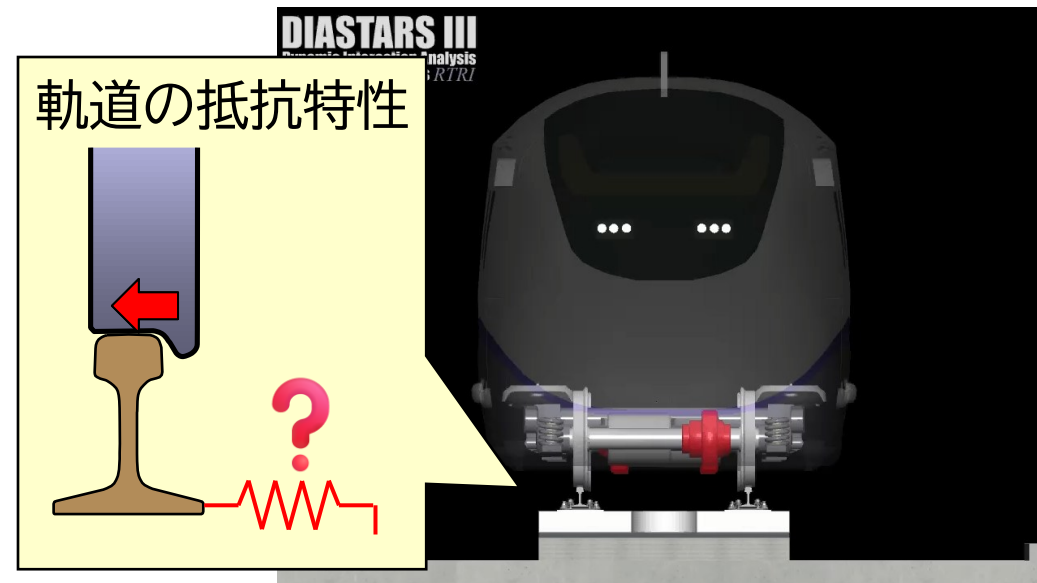
## 軌道の耐荷力や変形挙動は未解明

- 著大横圧に対するレールの抵抗特性, 軌道部材の破壊過程が未解明
- 軌道部材, 軌道スラブの著大横圧作用後の使用継続性が不明

## ■ 本研究の目的

軌道部材、軌道スラブの実物大試験による

車輪／レール間に左右方向の著大な力(横圧)が発生



著大横圧に対するレール抵抗特性, 軌道部材の破壊性状の把握

## 1.試験内容

## 2.試験方法

## 3.試験結果(破壊形態、耐荷力)

- ・レール締結装置単位における試験結果
- ・軌道スラブ単位における試験結果
- ・軌道スラブの埋込栓の引張耐力

## 4.まとめ

## 試験対象:新幹線用スラブ軌道

目的①: 載荷試験による力学的特性の把握

a) 基本的な力学特性

レール締結装置1組のみでの試験

b) 実環境における力学特性

1枚の軌道スラブ上(8締結状態)での試験

レール締結装置単位



軌道スラブ単位



目的②: 著大横圧作用後の軌道スラブの使用継続性の検討

載荷後の軌道スラブ上で埋込栓に対する引抜試験

損傷した軌道スラブ



引抜試験



## 1. 試験内容

## 2. 試験方法

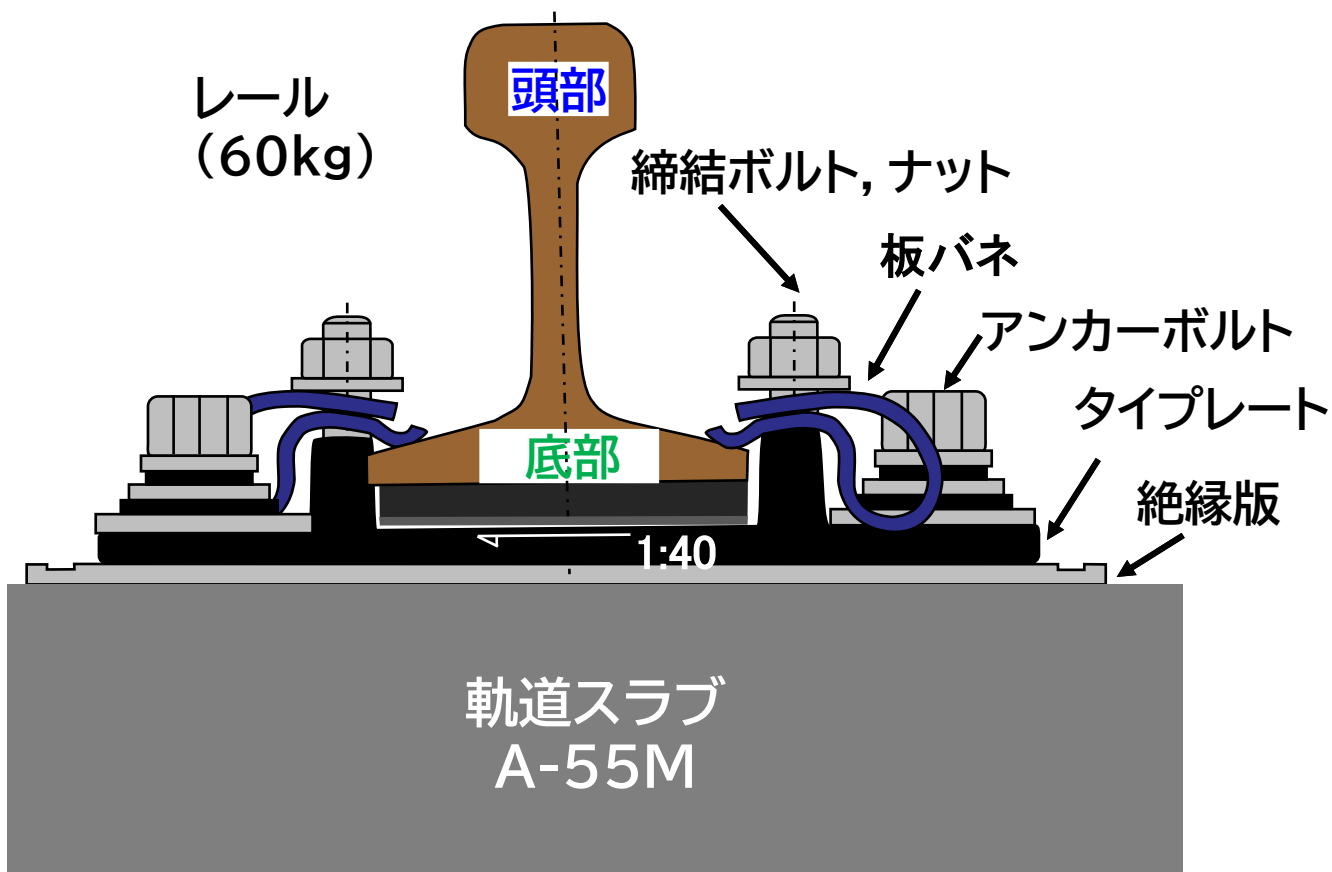
## 3. 試験結果(破壊形態、耐荷力)

- ・レール締結装置単位における試験結果
- ・軌道スラブ単位における試験結果
- ・軌道スラブの埋込栓の引張耐力

## 4. まとめ

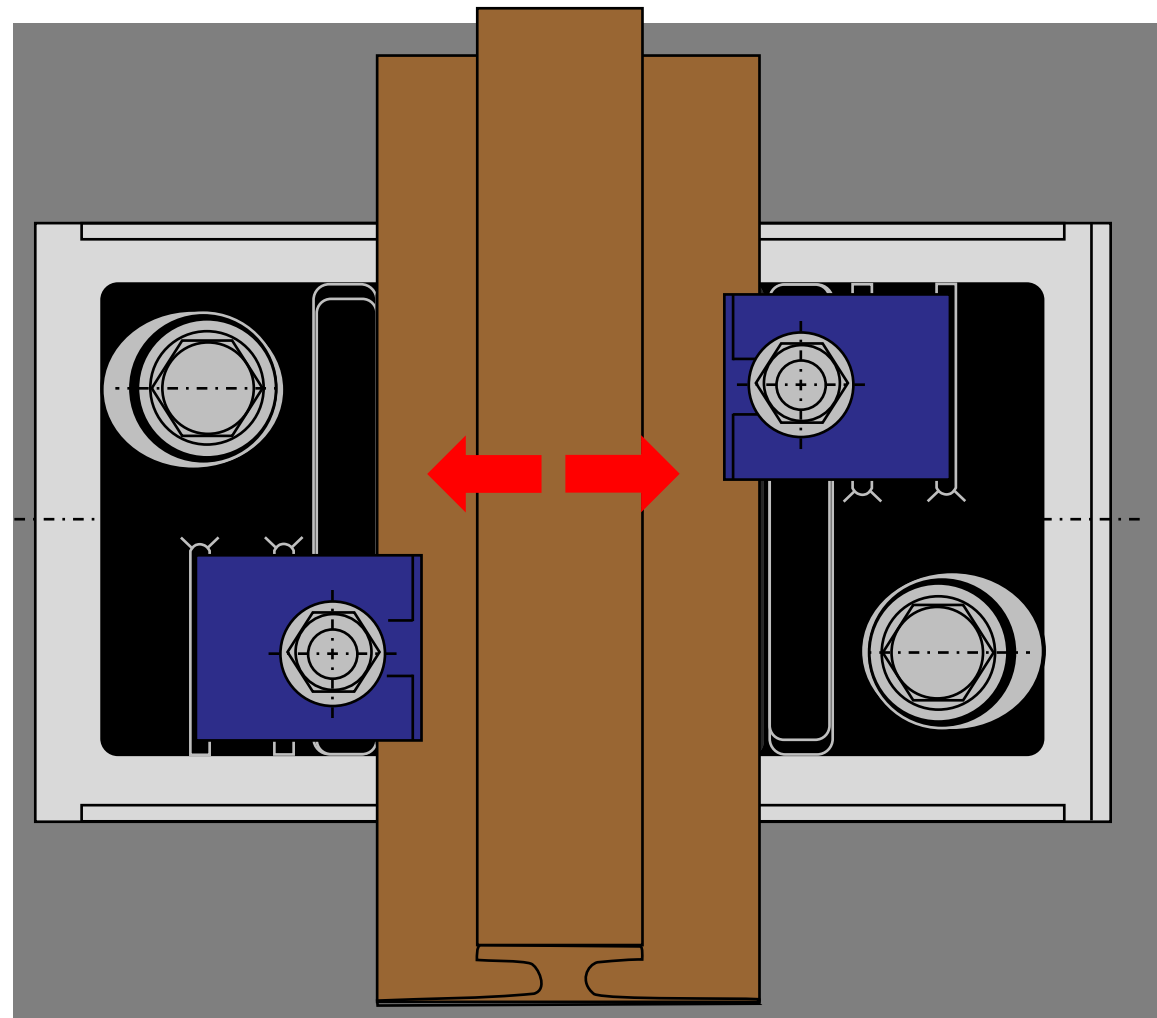
# 試験供試体の概要

## 直結8改(低)形レール締結装置



←軌間内側(スラブ中央側)

軌間外側(スラブ端部側)→



# 載荷方法

## 脱線前～後に発生する**著大横圧**

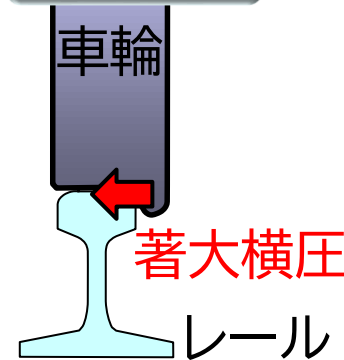
■脱線後に車輪, モーター等は**レールに接触**  
レールの**頭部**, **底部**に著大横圧が発生

## レール**頭部**, **底部**を載荷試験

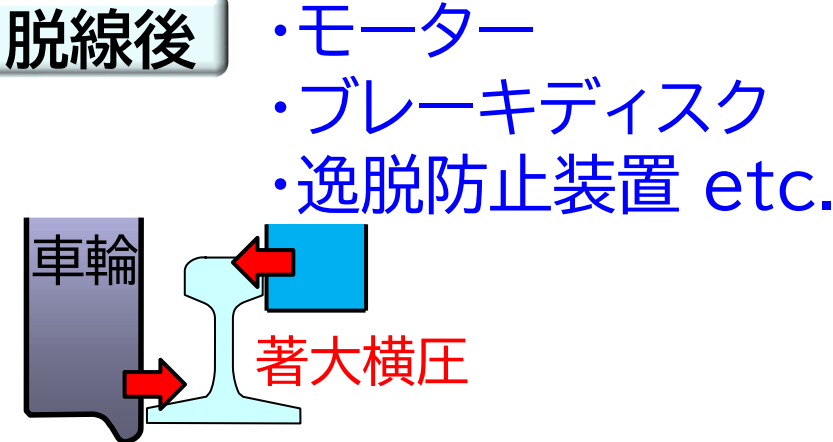
### レール**頭部**載荷



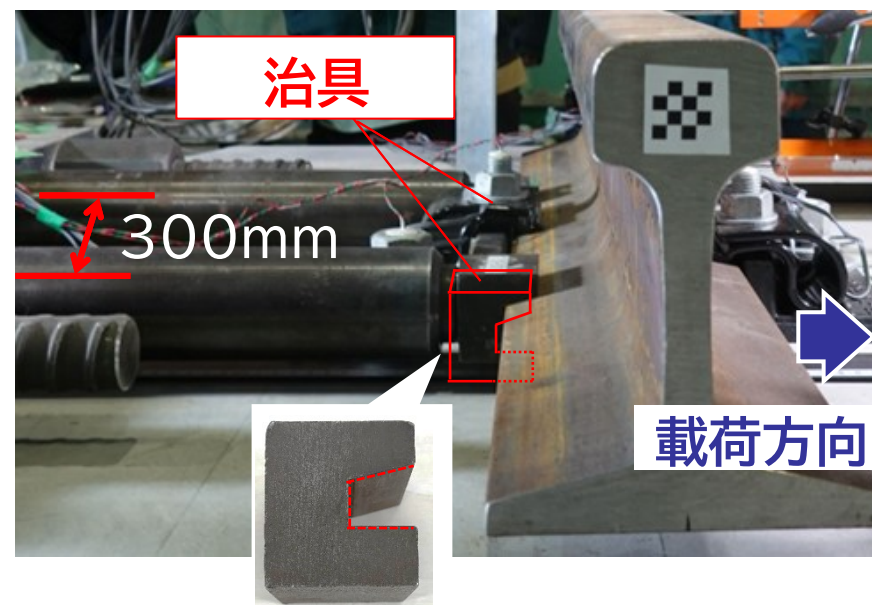
### 脱線前



### 脱線後



### レール**底部**載荷



# 測定項目、測定方法

## 測定項目

荷重、変位、ひずみ

## 载荷位置

×  $PH_C$ : レール頭部

×  $PB_{L,R}$ : レール底部

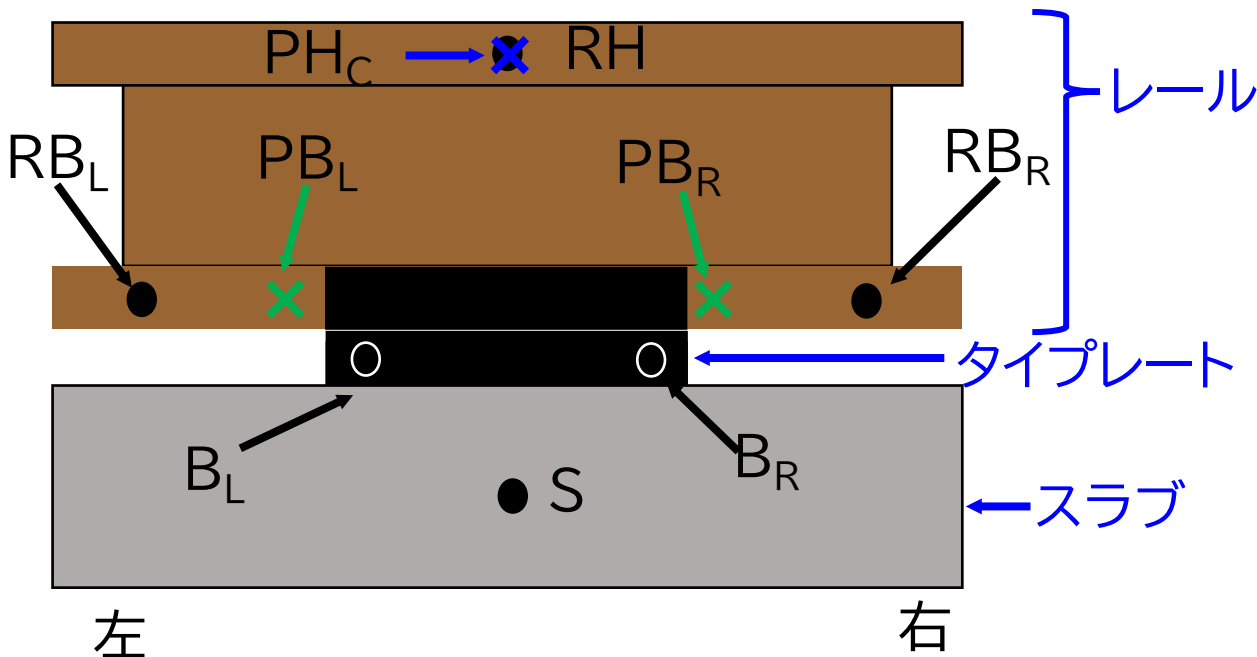
## 変位測定位置

●  $RH$ : レール頭部

●  $B_L, B_R$ : タイプレート

●  $RB_L, RB_R$ : レール底部

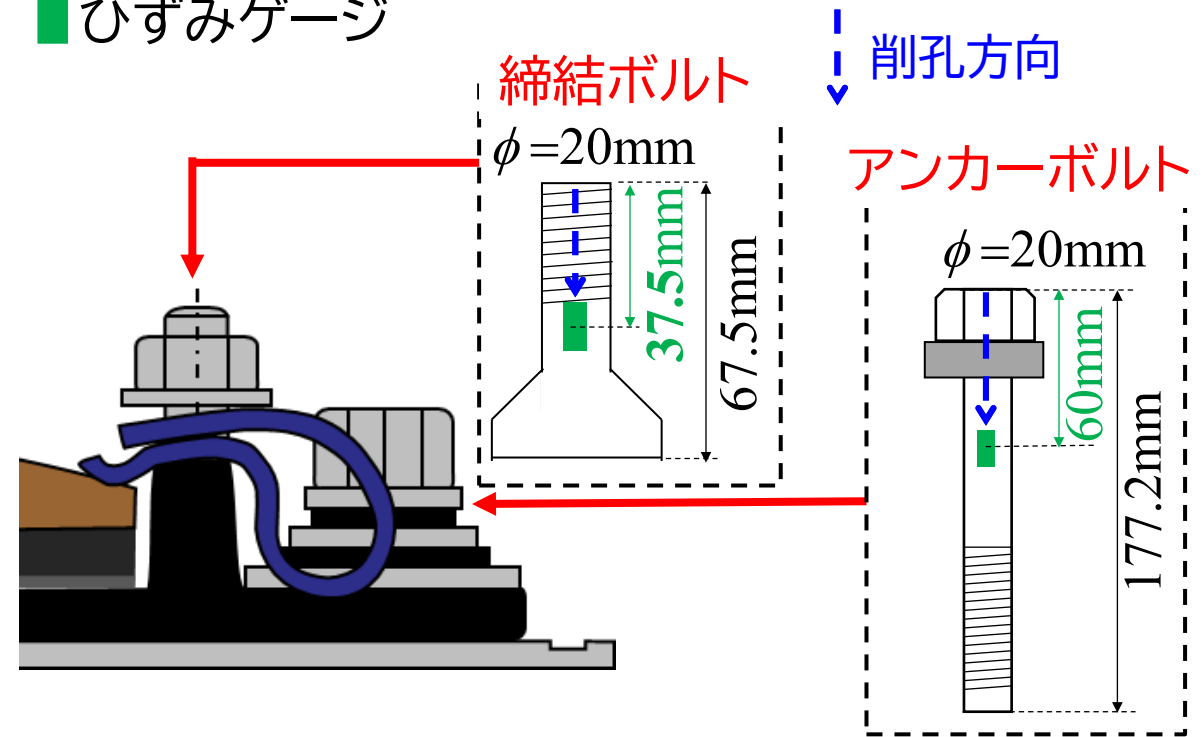
●  $S$ : 軌道スラブ



## ひずみ測定位置

事前に各ボルトの引張試験を行い、ひずみから軸力を推定するための校正係数を算定

■ ひずみゲージ



# 検討ケース

載荷位置, 載荷方法, 載荷方向, 締結トルクをパラメータとして8ケース設定<sup>[1]</sup>

赤枠: 報告するケース

## レール頭部載荷

### ■レール締結装置単位(1締結)

載荷方法	載荷方向	締結トルク
漸増載荷	軌間内→外	通常(60N・m)
漸増載荷	軌間内→外	低下(30N・m)
漸増載荷	軌間外→内	通常(60N・m)
繰り返し載荷	軌間内→外	通常(60N・m)

### ■軌道スラブ単位(8締結)

載荷方法	載荷方向	締結トルク
繰り返し載荷	軌間内→外	通常(60N・m)

## レール底部載荷

### ■レール締結装置単位(1締結)

載荷方法	載荷方向	締結トルク
漸増載荷	軌間内→外	通常(60N・m)
繰り返し載荷	軌間内→外	通常(60N・m)

### ■軌道スラブ単位(8締結)

載荷方法	載荷方向	締結トルク
繰り返し載荷	軌間内→外	通常(60N・m)

1.試験内容

2.試験方法

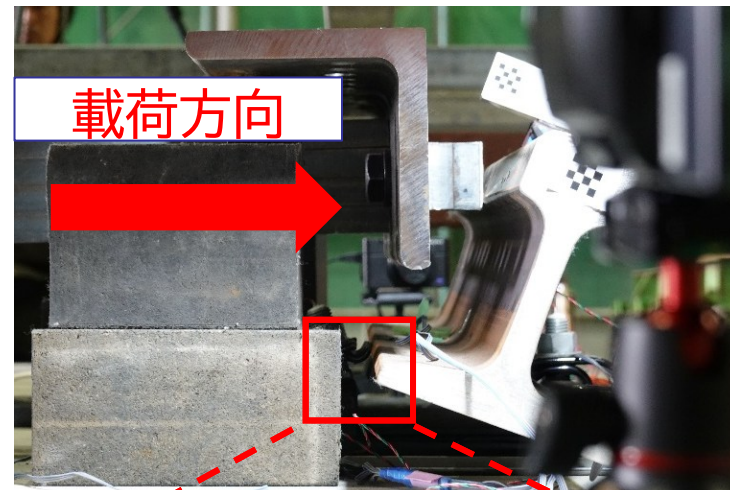
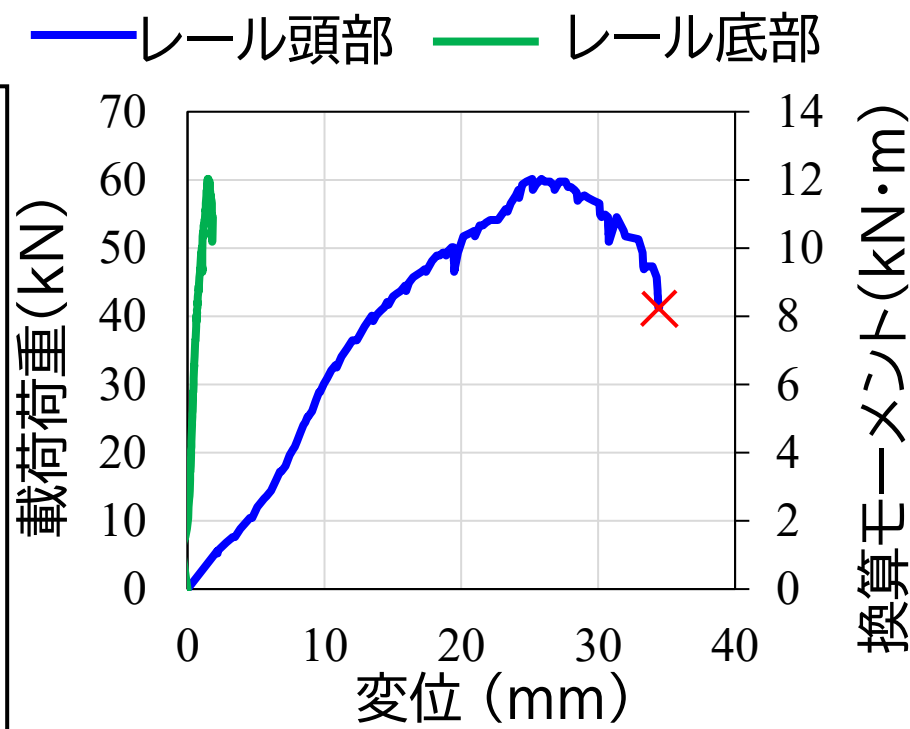
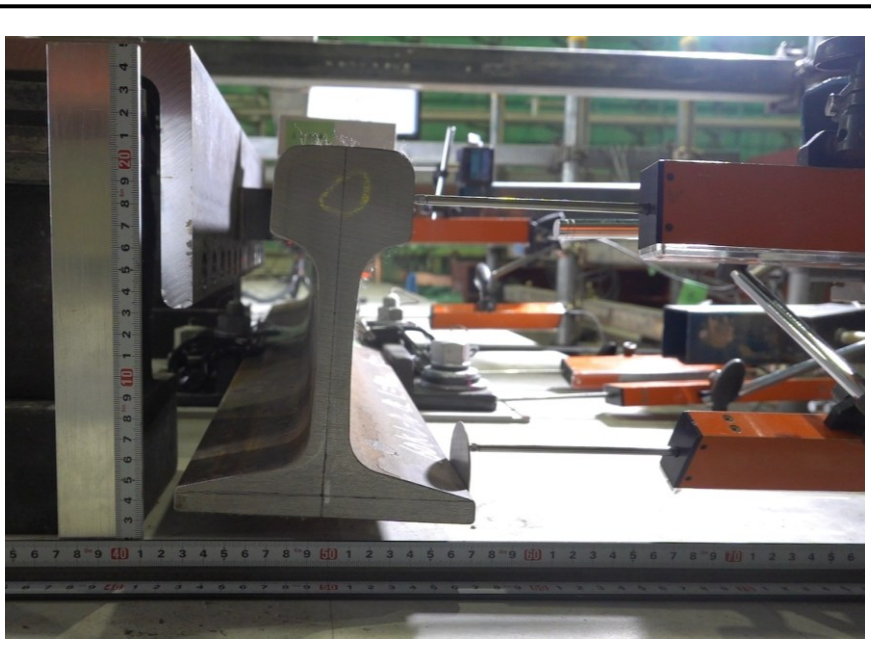
3.試験結果(破壊形態、耐荷力)

- ・レール締結装置単位における試験結果
- ・軌道スラブ単位における試験結果
- ・軌道スラブの埋込栓の引張耐力

4.まとめ

# レール頭部載荷(レール締結装置単位)

## 荷重変位関係

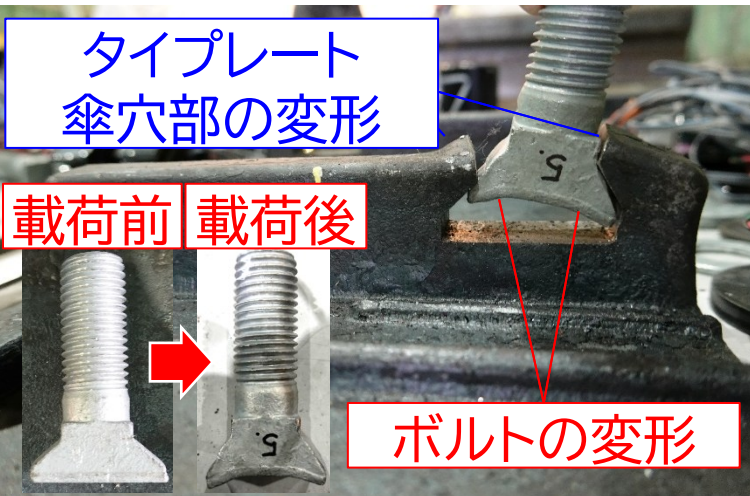
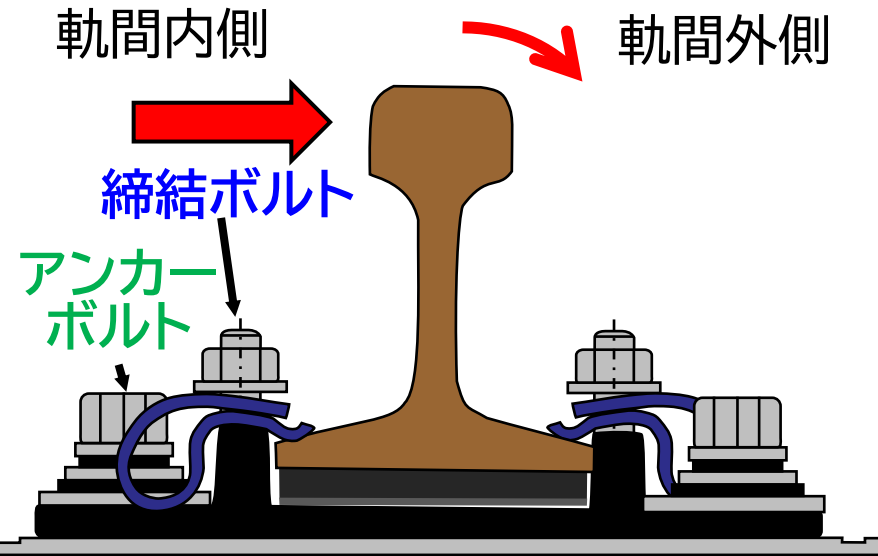


### 基本的な力学特性

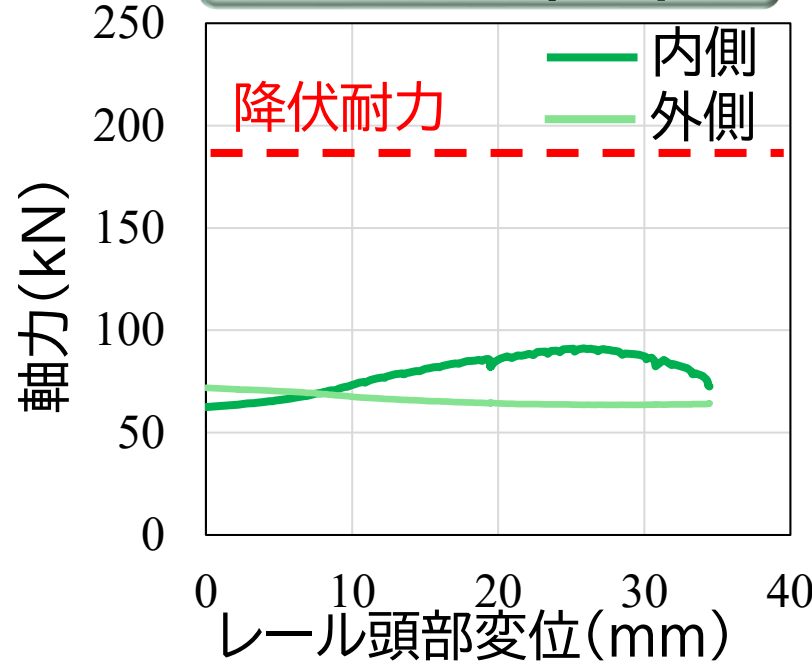
- レール頭部変位は荷重に比例して増加
  - レール底部変位は僅かに増加
  - 破壊形態:レールが板ばねから脱離
- 小返りが発生

# レール頭部載荷(レール締結装置単位)

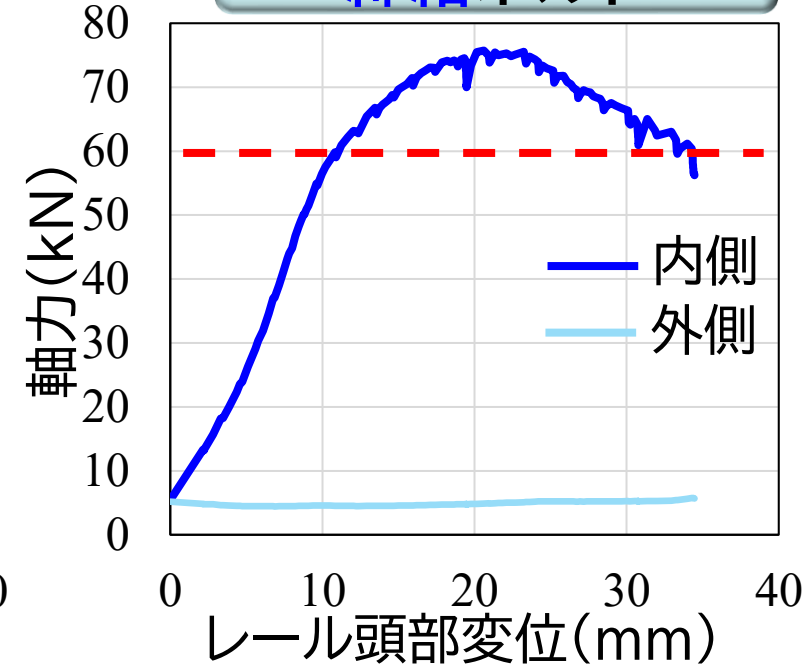
## 軸力変位関係



### アンカーボルト



### 締結ボルト



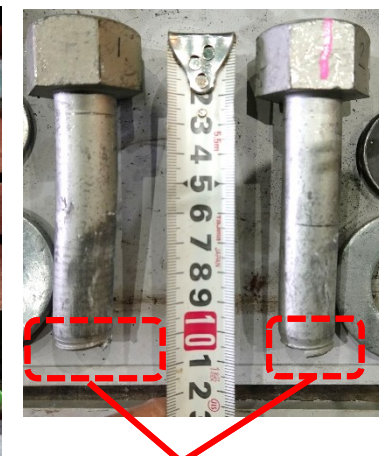
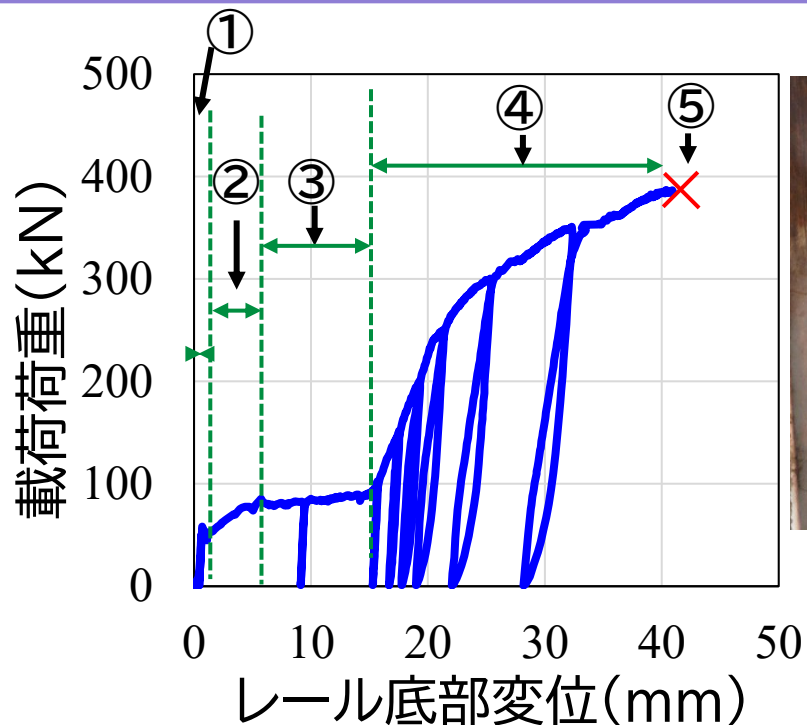
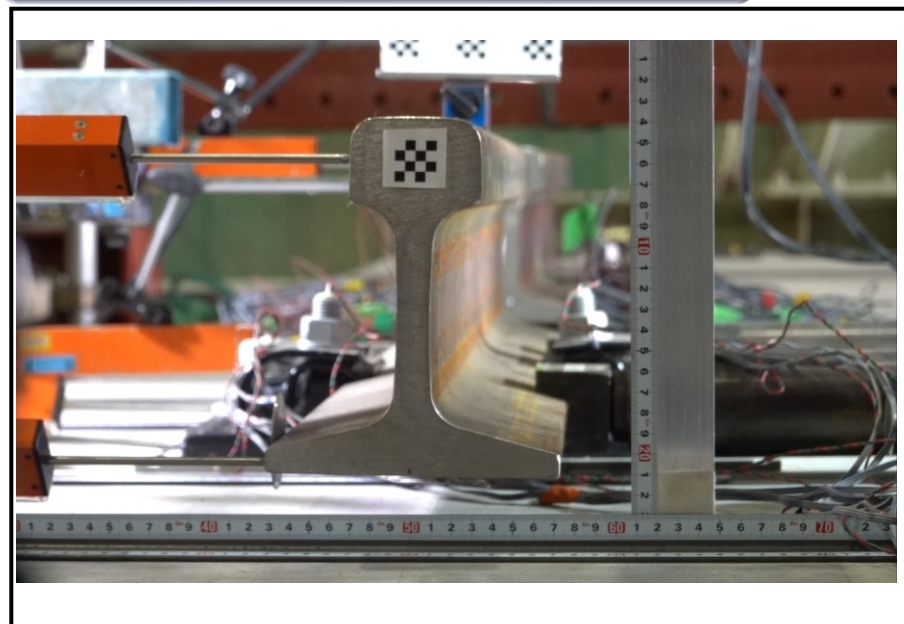
### 基本的な力学特性

- アンカーボルトの軸力は概ね一定で推移
- レール頭部変位10~15mmで締結ボルトは降伏

- ①レールの小返り, ②締結ボルトの軸力は増加
- ③締結ボルトは降伏, ④ボルト, タイプレートの塑性化

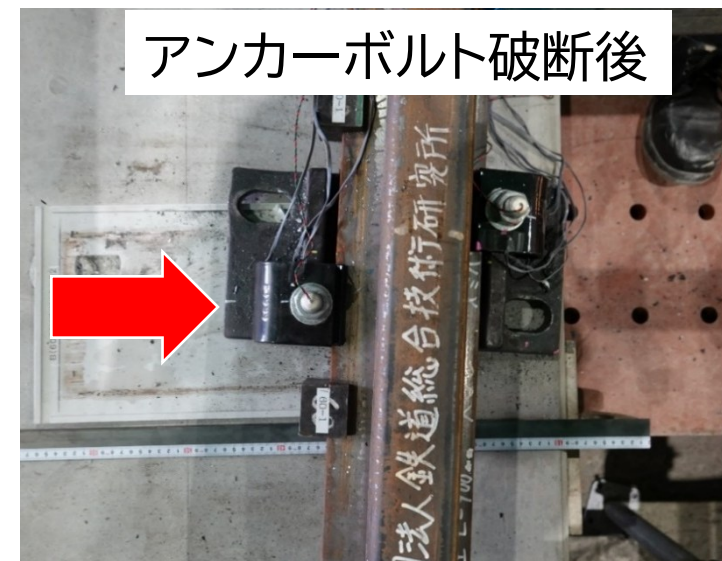
# レール底部載荷(レール締結装置単位)

## 荷重変位関係



ねじ山部で破断

アンカーボルト破断後

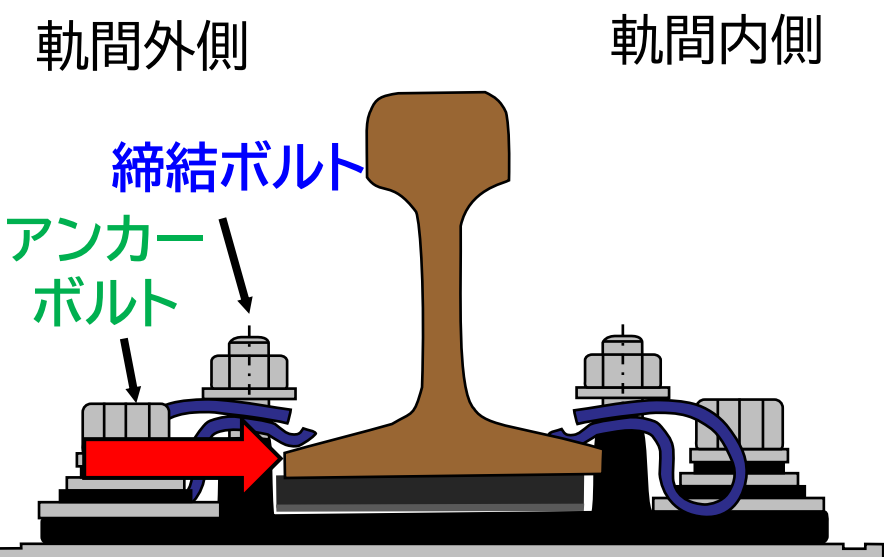


## 基本的な力学特性

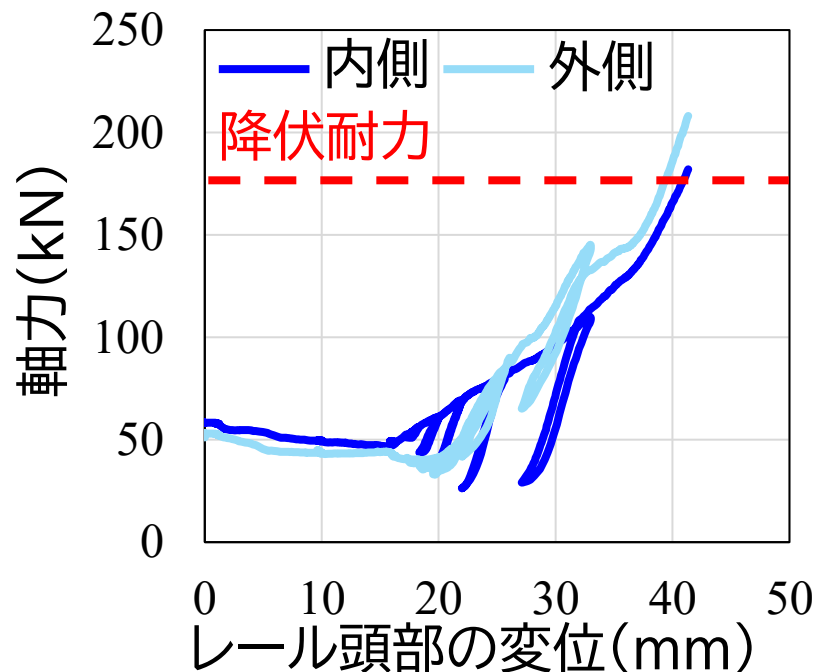
- レール底部の変位は荷重に比例して増加
- 破壊過程は ①初期滑動過程 ⇒ ②座金接触過程  
⇒ ③二次滑動過程 ⇒ ④タイププレート接触過程  
⇒ ⑤アンカーボルトが破壊
- 載荷荷重300kNで軌道スラブにひび割れが発生

# レール底部載荷(レール締結装置単位)

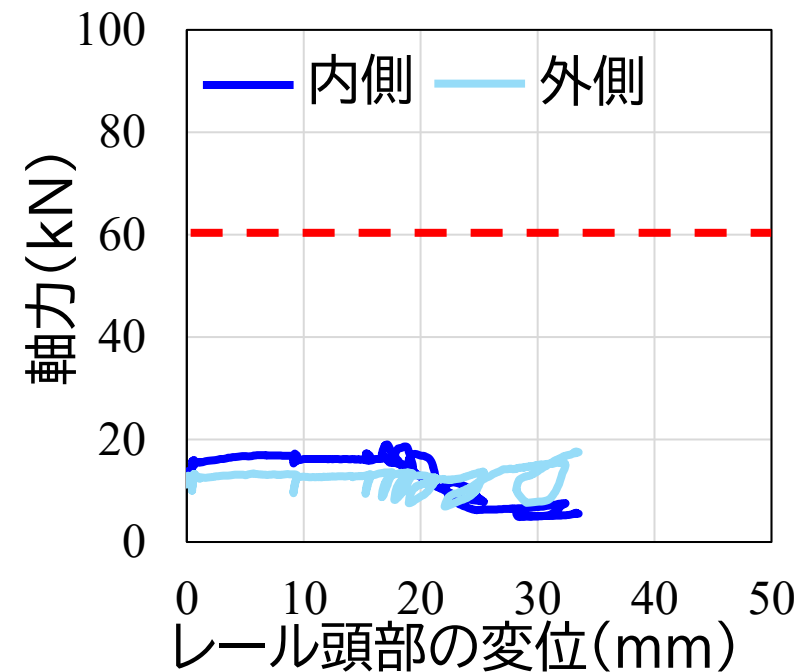
## 軸力変位関係



## アンカーボルト



## 締結ボルト



## 基本的な力学特性

- アンカーボルトの軸力は  
タイププレートがアンカーボルトに接触する(二次滑動過程)まで一定値
- 締結ボルトの軸力は変位増加に対して一定値

滑動, 接触過程を経て, 荷重がアンカーボルトに伝達し, アンカーボルトが破断

## 1.試験内容

## 2.試験方法

## 3.試験結果(破壊形態、耐荷力)

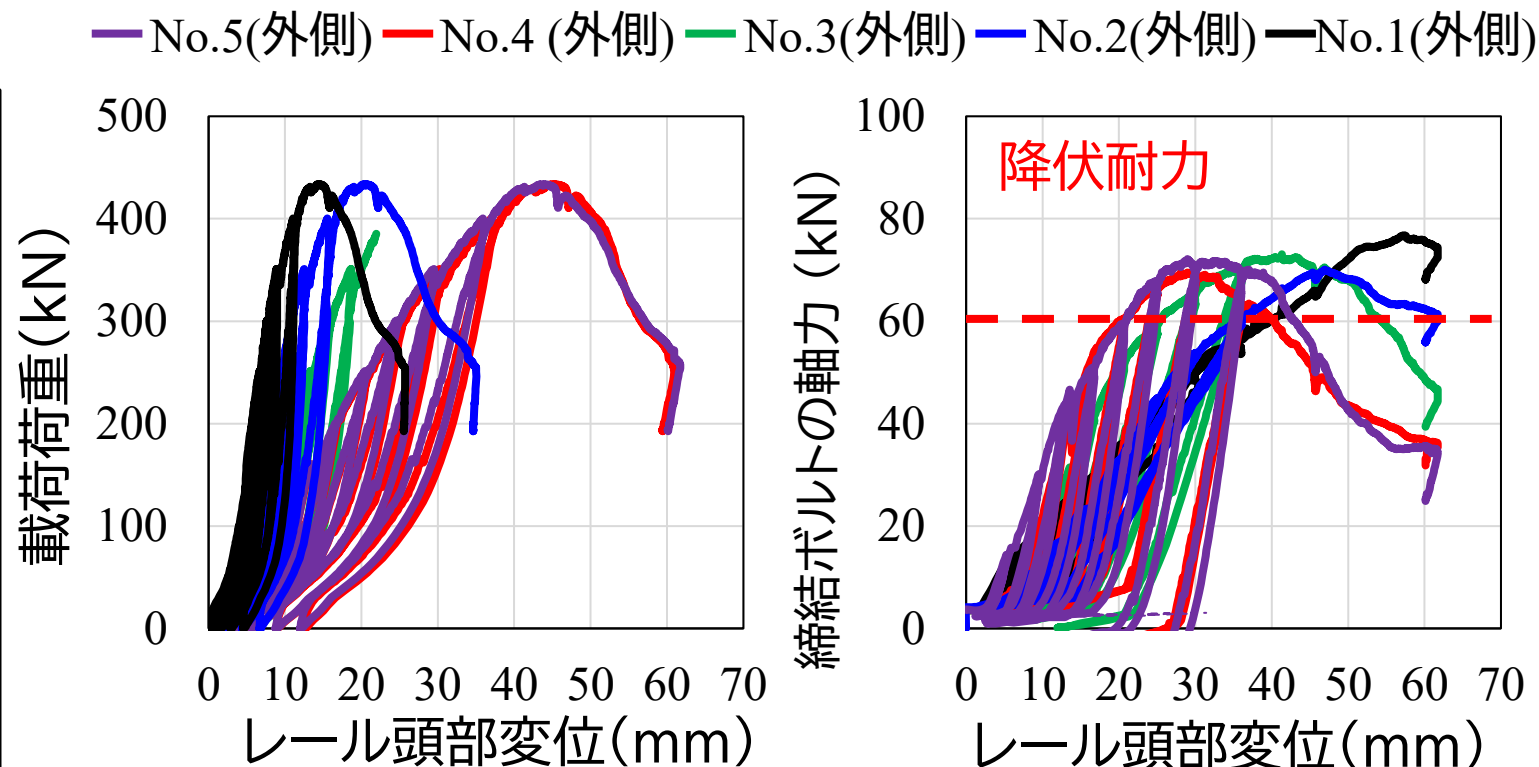
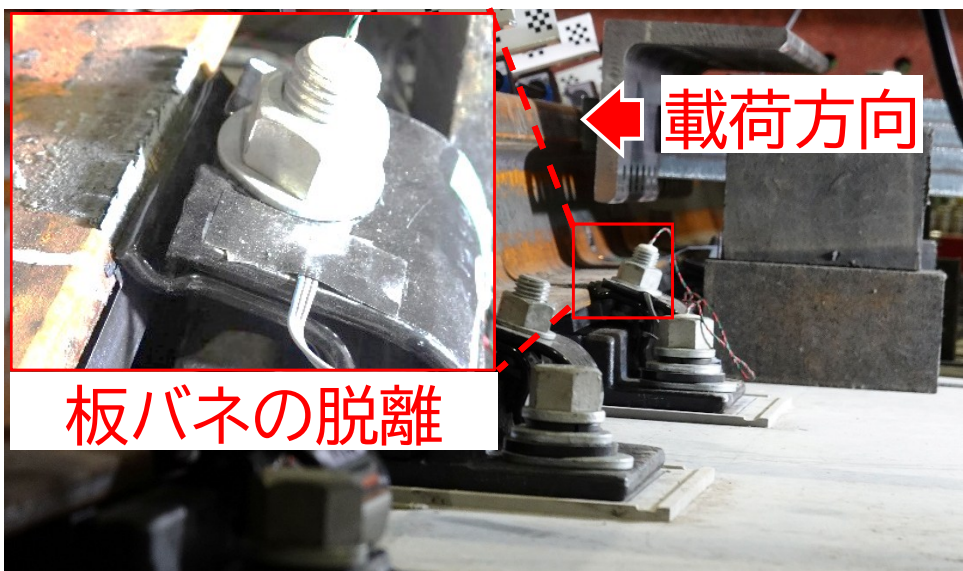
- ・レール締結装置単位における試験結果
- ・軌道スラブ単位における試験結果
- ・軌道スラブの埋込栓の引張耐力

## 4.まとめ

# レール頭部載荷(軌道スラブ単位)

## 荷重, 軸力変位関係

板ばねの脱離時の状況



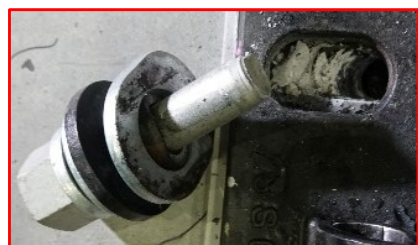
## 実環境における力学特性

- レール頭部の変位は, 全レール締結装置において荷重に比例して増加
- 載荷位置**(No.5,4)付近のレール**小返り**が**顕著**
- 載荷位置付近の締結ボルトから順に降伏耐力に到達
- 最大荷重450 kN**(レール締結装置単位の**最大荷重の7倍**)
- 軌道スラブに**ひび割れ**は発生していない

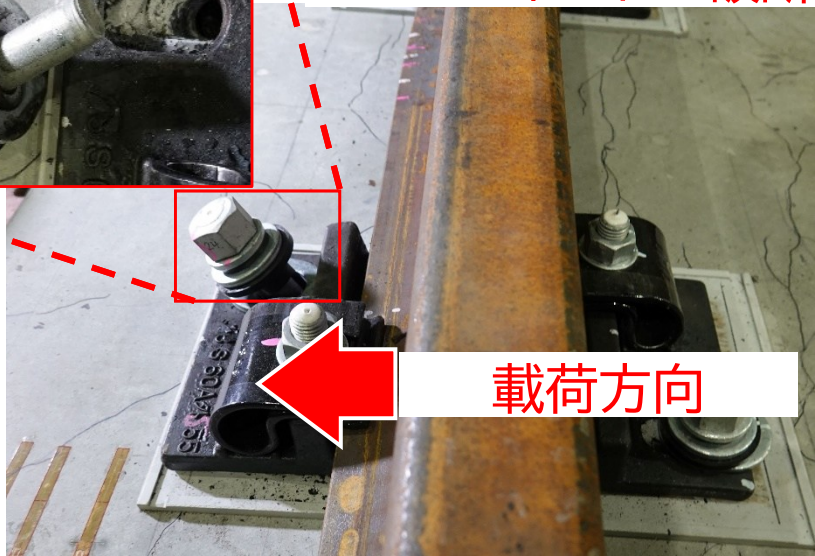
# レール底部載荷(軌道スラブ単位)

## 荷重, 軸力変位

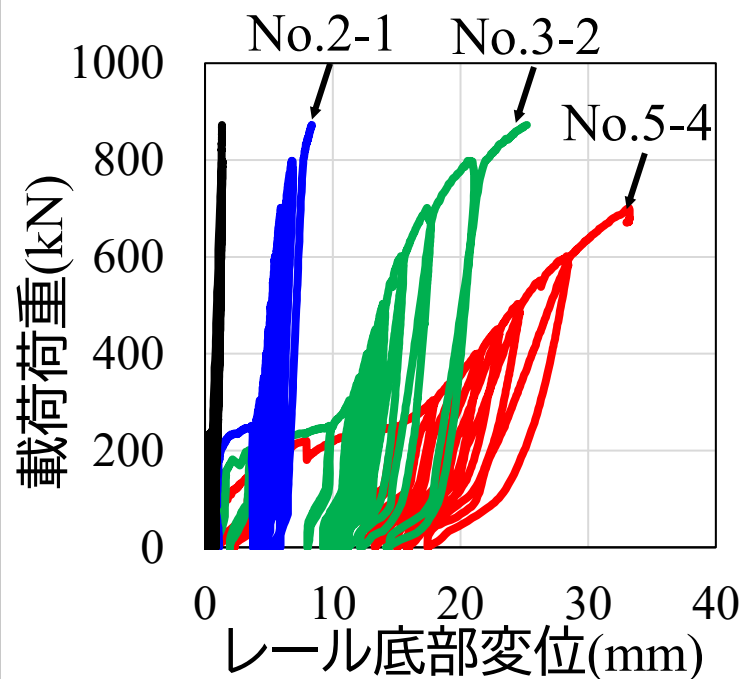
アンカーボルト破断状況



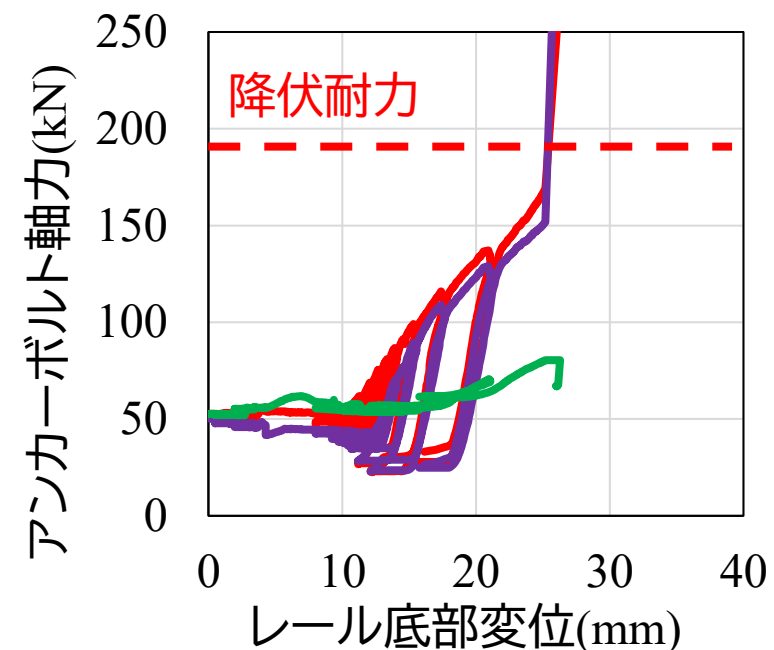
アンカーボルトの破断



荷重方向



— No.5(外側) — No.4(外側) — No.3(外側)



## 実環境における力学特性

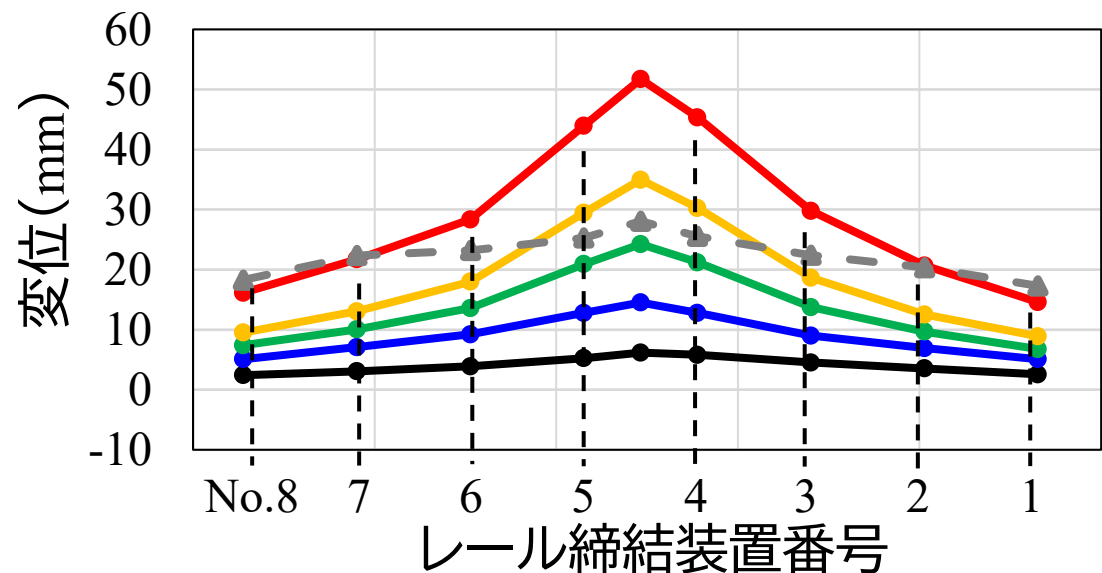
- 破壊過程はレール締結装置単位時と同様
- レール締結装置No.5,4のアンカーボルトが降伏耐力に到達
- 破壊荷重900kNでアンカーボルトが破断(No.4)  
レール締結装置単位時の2倍の荷重でアンカーボルトの破断が発生
- 軌道スラブにひび割れは発生している

# 荷重毎の変位分布(軌道スラブ単位)

## レール頭部

【荷重レベル】

- 50kN ● 150kN ● 250kN ● 350kN ● 430kN
- ▲ 残留変位(載荷試験後)



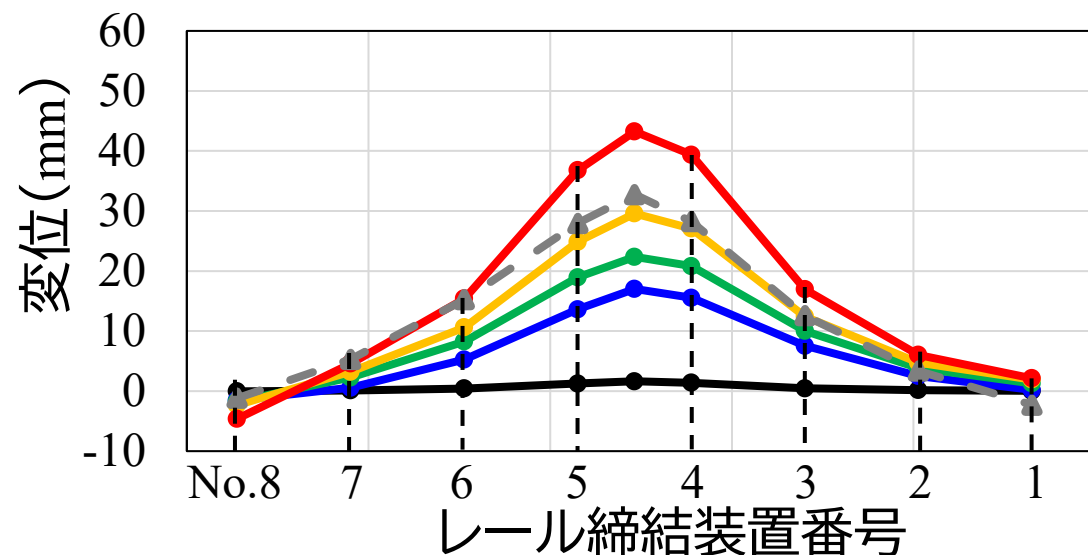
実環境における力学特性

○水平載荷に対してレール全長,  
全レール締結装置で抵抗

## レール底部

【荷重レベル】

- 100kN ● 300kN ● 500kN ● 700kN ● 870kN
- ▲ 残留変位(載荷試験後)



実環境における力学特性

○水平載荷に対して載荷位置付近の  
レール締結装置のみが抵抗

レール頭部: 実現象としては8締結以上の**広範囲**で荷重に抵抗する可能性がある

レール底部: 載荷位置付近の**レール締結装置のみ**が抵抗

## 1. 試験内容

## 2. 試験方法

## 3. 試験結果(破壊形態、耐荷力)

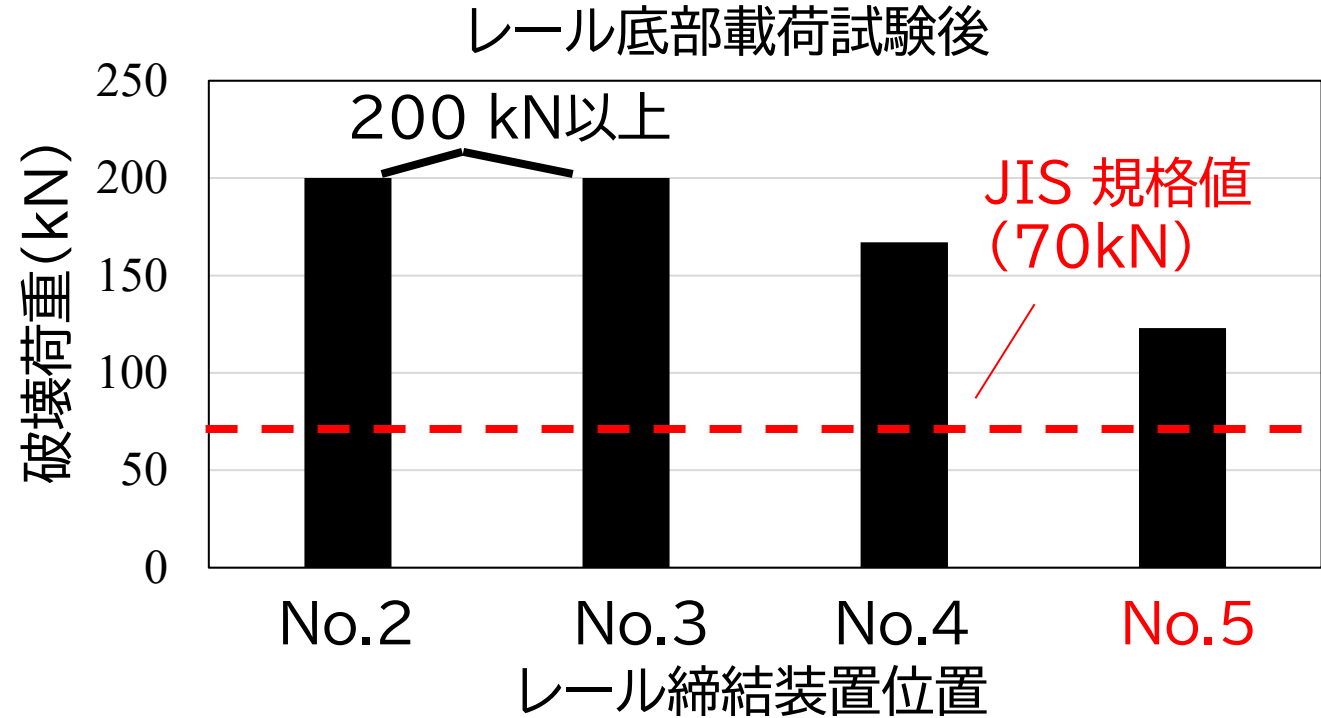
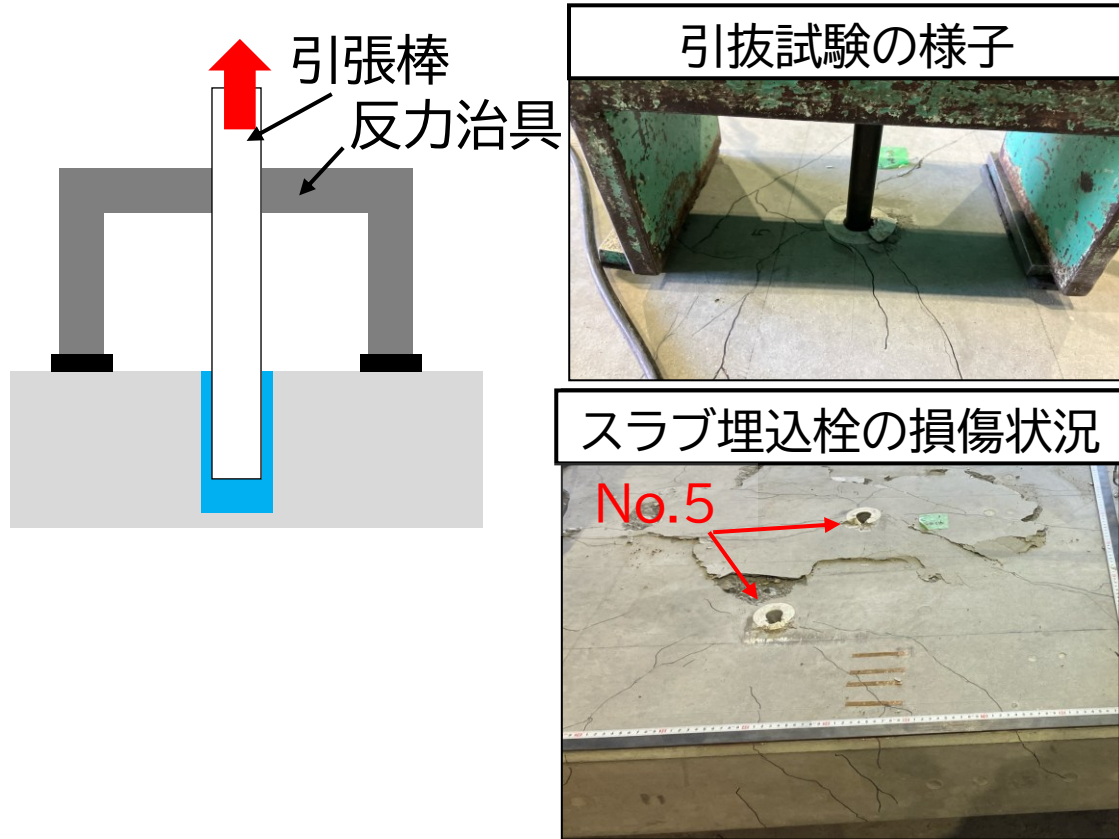
- ・レール締結装置単位における試験結果
- ・軌道スラブ単位における試験結果
- ・軌道スラブの埋込栓の引張耐力

## 4. まとめ

# スラブ埋込栓の引抜耐力

## 埋込栓の引抜試験

- JISに準拠した方法で実施
- ひび割れが発生した軌道スラブを対象



- 損傷後の軌道スラブの使用性
- 破壊荷重はNo.5,4はNo.2,3に比べて低い
  - JIS規格70kNを上回り, 損傷後の性能を確保

地震直後においては, 軌道スラブは一時的に使用可能である

## 1. 試験内容

## 2. 試験方法

## 3. 試験結果(破壊形態、耐荷力)

- ・レール締結装置単位における試験結果
- ・軌道スラブ単位における試験結果
- ・軌道スラブの埋込栓の引張耐力

## 4. まとめ

## 著大横圧に対するレール抵抗特性，軌道部材の破壊性状の把握

### ① 載荷試験による力学的特性の把握

#### ■ レール頭部に著大横圧が発生した場合

破壊形態: **レールの脱離**， 耐荷力: **60kN**/レール締結装置単位, **450kN**/軌道スラブ単位  
スラブ軌道のひび割れ: **なし**

レールの小返りが発生，板ばねを介して締結ボルトの軸力が増加。  
その後，締結ボルトは降伏，締結ボルト，タイププレートに変形が生じる

#### ■ レール底部に著大横圧が発生した場合

破壊形態: **アンカーボルトの破断**

耐荷力: **410kN**/レール締結装置単位, **900kN**/軌道スラブ単位

軌道スラブのひび割れ: **あり**

タイププレートの滑動過程を経て，アンカーボルトに荷重が伝達し破断する。

### ② 著大横圧作用後の軌道スラブの使用継続性の検討

#### ■ 損傷した軌道スラブの性能確認

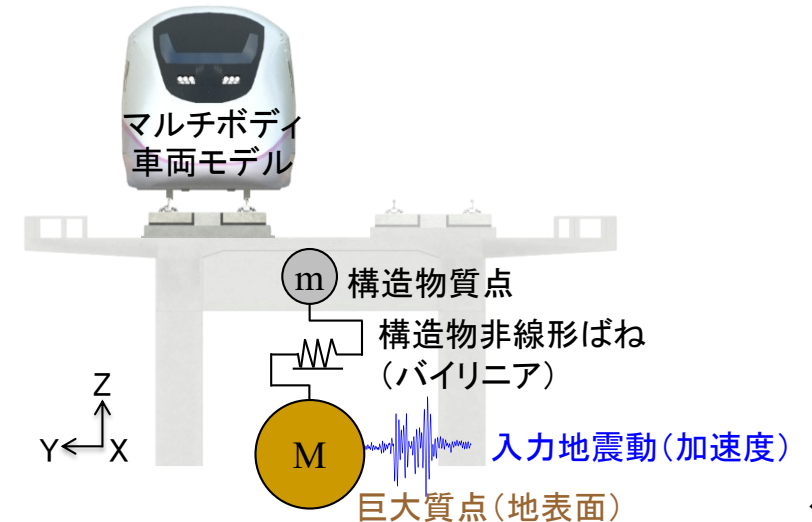
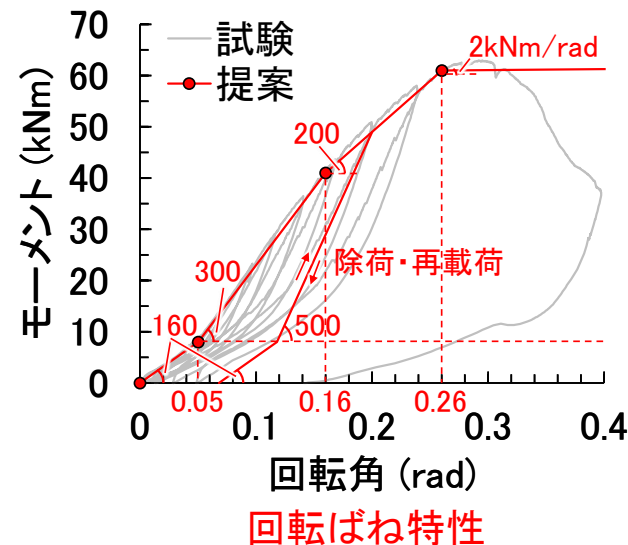
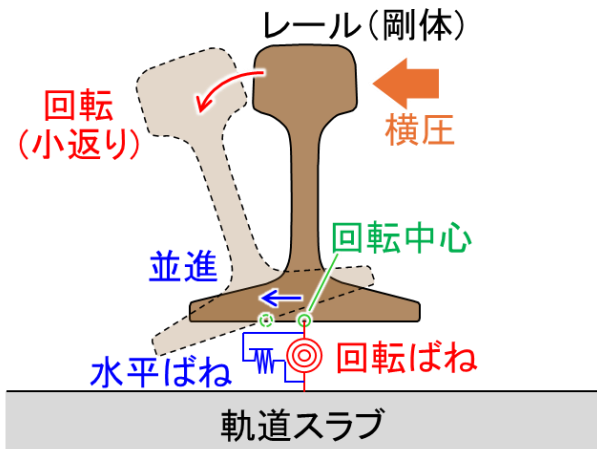
レール締結装置の交換のみで軌道スラブを一時的に使用できる可能性が有る

## ①数値解析モデルの構築

- 本実験を再現可能な数値解析モデルを構築
- 様々な車輪接触条件におけるレールの抵抗特性の把握

## ②脱線前後の車両挙動を表現可能な数値解析手法への組み込み

- レール支持ばねのモデル化が地震時の車両挙動に及ぼす影響を検討
- 各種逸脱対策工の定量評価



1. 成田顕次, 後藤恵一, 弟子丸将:地震時における車両からの著大横圧に対する新幹線スラブ軌道のレール抵抗特性および軌道部材の破壊性状, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第29号, pp. 203-210, 2025