

地盤振動および波状摩耗を低減可能な フローティング弾直軌道の開発

軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

主任研究員 湊上 翔太

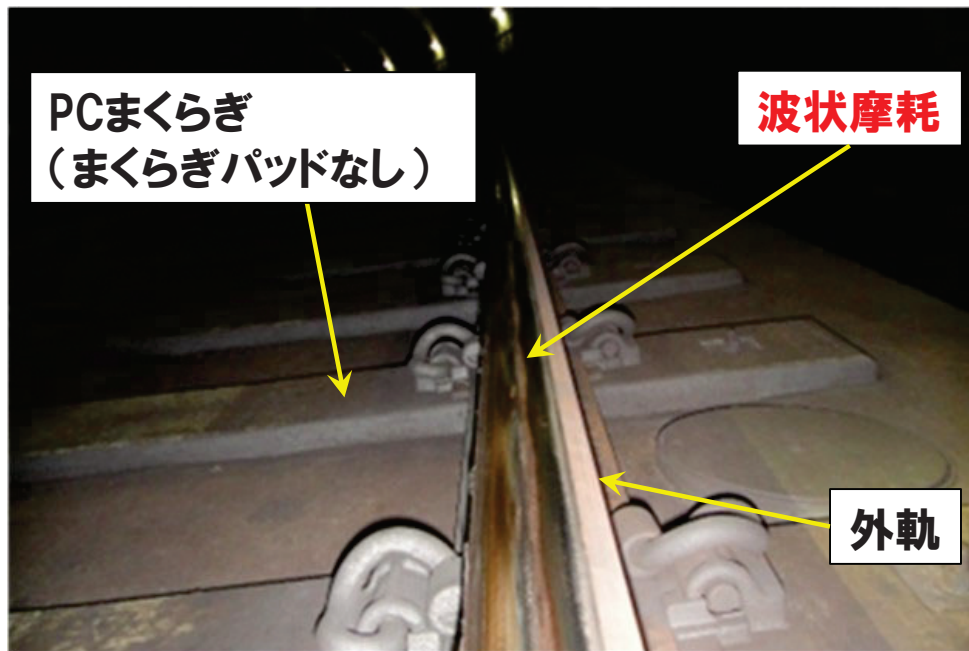


本日の発表

1. 研究の背景と開発のコンセプト
2. 数値解析による地盤振動低減効果の評価
3. 防振材の疲労耐久性・耐候性の評価
4. 数値解析による波状摩耗抑制効果の評価
5. フローティング弾直軌道の設計および試験施工
6. まとめ

1. 研究の背景と開発のコンセプト

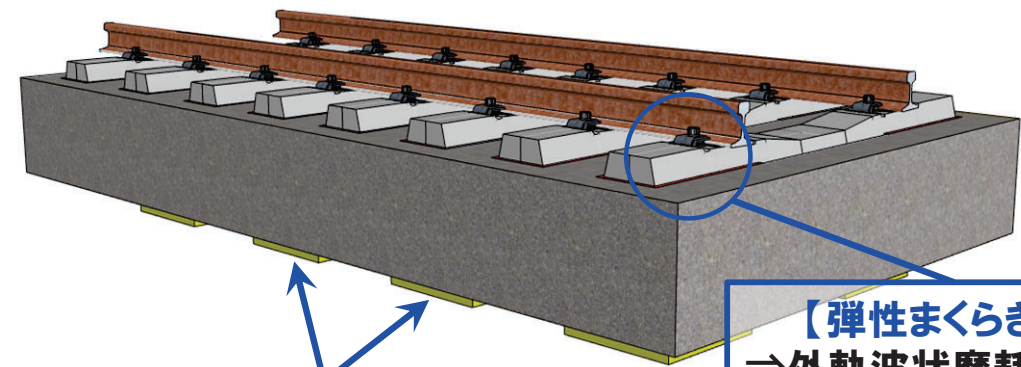
- 国内において、フローティングスラブ軌道(コイルばね防振軌道)は在来線のトンネル区間で適用事例が多い(⇒低土被りや建物基礎への近接等に対する**高度な地盤振動対策**)
- 防振装置は比較的高価であるため、**施工コストが高くなりやすい**
- 急曲線区間に敷設されたフローティングスラブ軌道では、PCまくらぎ直結軌道等と同様に、内軌だけではなく、**外軌にも波状摩耗の発生事例が報告されている**



フローティングスラブ軌道における外軌波状摩耗の例

【提案するフローティング弾直軌道】

軌道の「固有振動数」は既存のコイルばね防振軌道と同等



【低廉な防振材(PURまたはEPDM)】
⇒建設費の低減、耐久性・耐候性の確保

2. 数値解析による地盤振動低減効果の評価

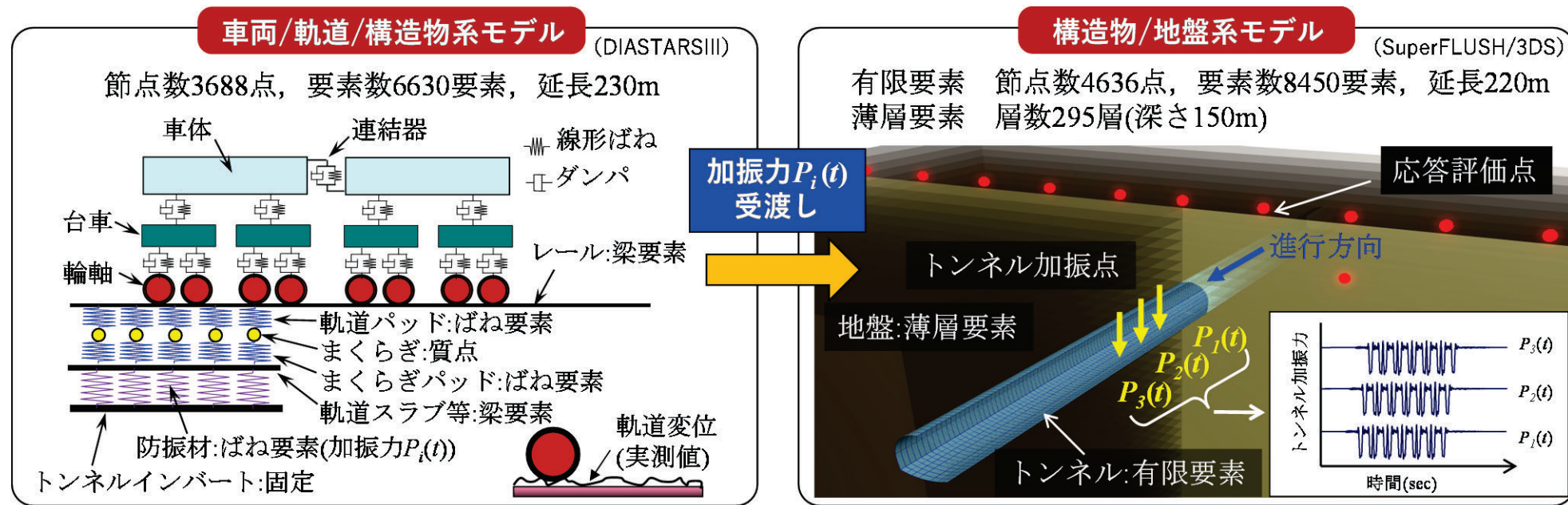
◆ 検討対象：トンネル区間（土被り：5.5m）
⇒過去に実車走行時の振動加速度を測定

◆ 3次元動的応答解析モデル

- ・ 車両／軌道／構造物系モデル (DIASTARSIII)
- ・ 構造物／地盤系モデル (SuperFLUSH/3D)

地盤モデル

地層	土質区分	深さ D (m)	N値	せん断波 速度Vs (m/s)
1	砂質粘土	0.0～2.2	6	145
2	シルト (地下水位以浅)	2.2～5.6	7	191
3	シルト (地下水位以深)	5.6～5.8	7	191
4	砂質粘土	5.8～14.7	7	153
5	砂質粘土	14.7以深	36	264



3次元動的応答解析モデル

2. 数値解析による地盤振動低減効果の評価

◆ 解析ケース

検討対象とした軌道種別一覧

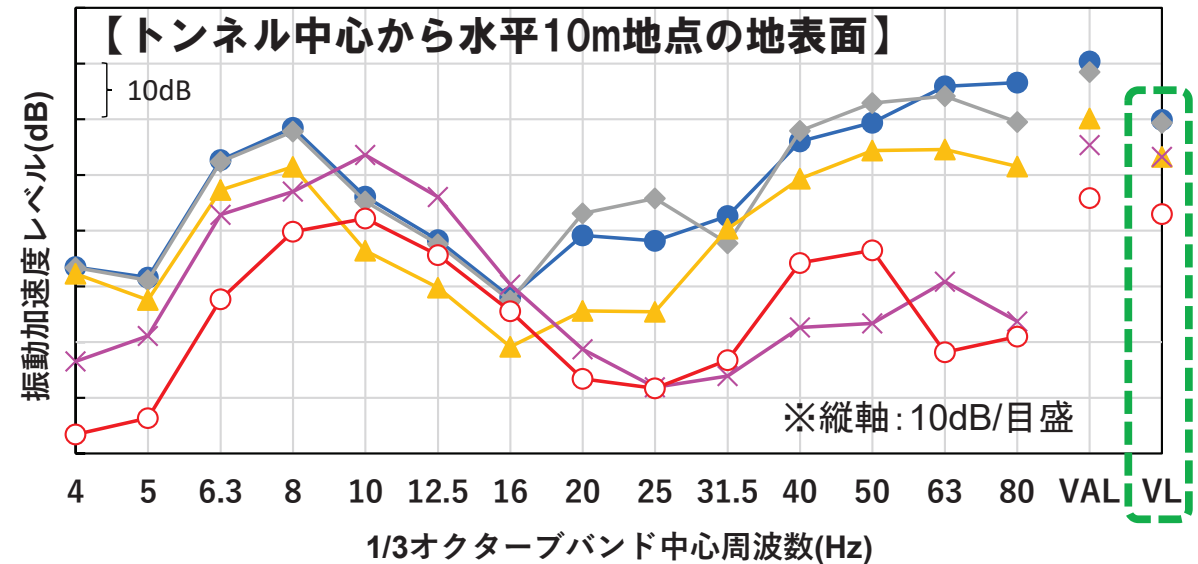
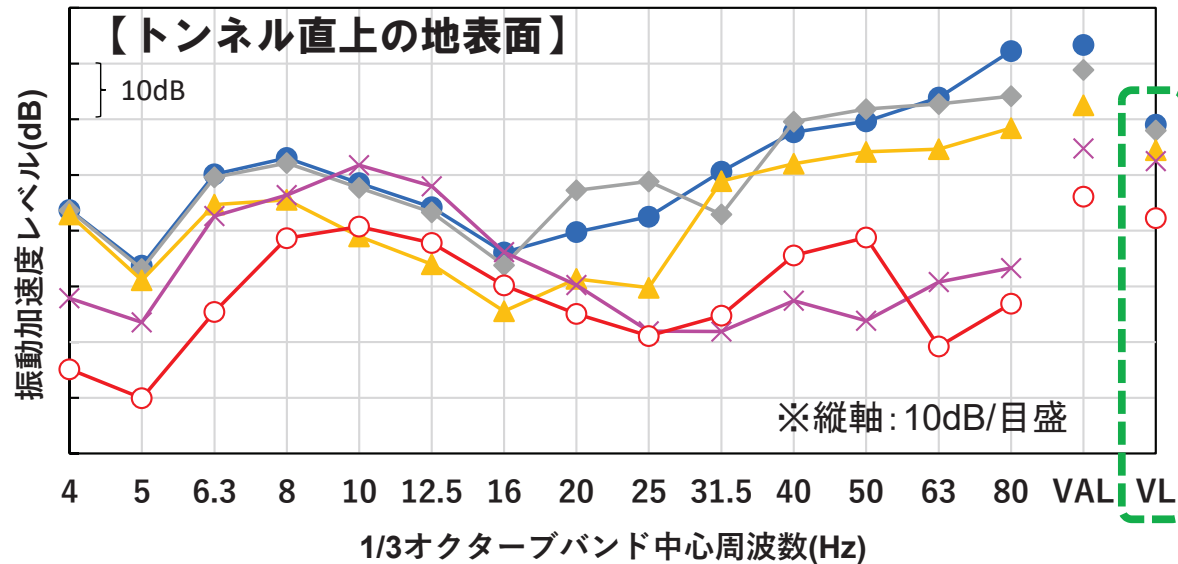
軌道種別		スラブ軌道	バラスト軌道	弾直軌道	コイルばね防振軌道	フローティング弾直軌道
締結間隔(mm)		625	580	700	625	625
軌道パッド(MN/m)		70	110	60	50	60
まくらぎパッド(MN/m)			—	30	—	30
バラスト道床(MN/m)		—	210	—	—	—
防振材 (スラブ下・コンクリート道床下)	ばね定数(MN/m)	—	—	—	6.6	6.6
	配置間隔(mm)				レール長手方向:1250	レール長手方向:1250

2. 数値解析による地盤振動低減効果の評価

◆ 軌道諸元の違いによる比較

- 車両:一般的な在来線通勤車両(輪重40kN/車両長20m/6両編成)
- 走行速度:80km/h

—●— スラブ軌道 —●— バラスト軌道 —▲— 弾性まくらぎ直結軌道 —×— コイルばね防振軌道 —○— フローティング弾直軌道



軌道構造の違いによる地盤の振動加速度レベルの比較

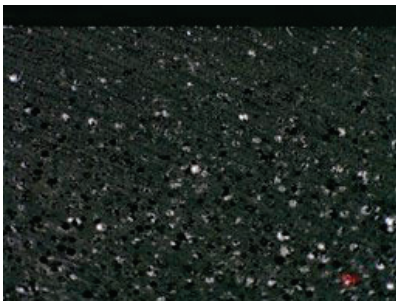
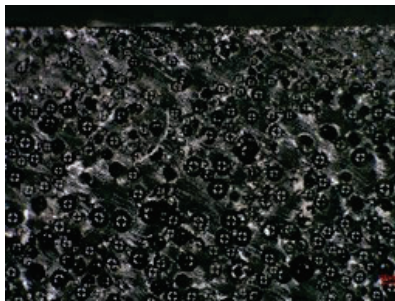
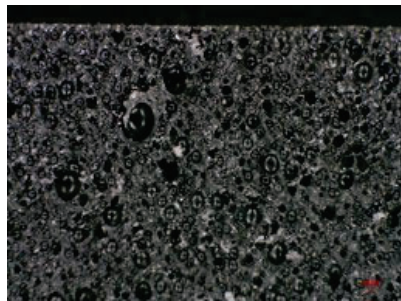
- 弾性まくらぎ化や軌道の曲げ剛性等の違いにより、フローティング弾直軌道の振動加速度レベルはコイルばね防振軌道と比べて広帯域で低下する傾向が見られた。
- コイルばね防振軌道と比べて、**フローティング弾直軌道**の場合は振動レベルVLが10dB程度低下した。

3. 防振材の疲労耐久性・耐候性の評価

◆ 選定した防振材

- ・発泡EPDM製【国内】（開発品（発泡倍率を調整））
 - ・発泡ウレタン製【海外（PUR①）・国内（PUR②）】（ともに流通品）
- ⇒いずれも軌道パッドとまくらぎパットで適用実績のある材料

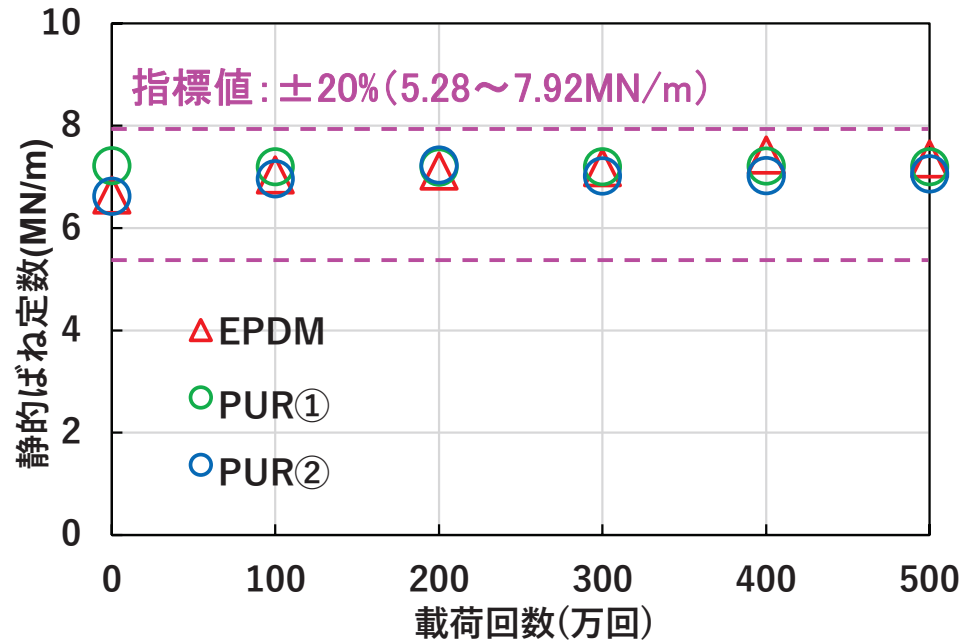
検討対象とした防振材

材料種別		EPDM	PUR①	PUR②
断面の発泡状態				
物性	表面硬さ	83.8HDA	80.3HDA	69.8HDA
	比重	0.724	0.728	0.714
	引張強さ	5.18MPa	3.60MPa	3.28MPa
	吸水率	0.08%	0.94%	1.53%

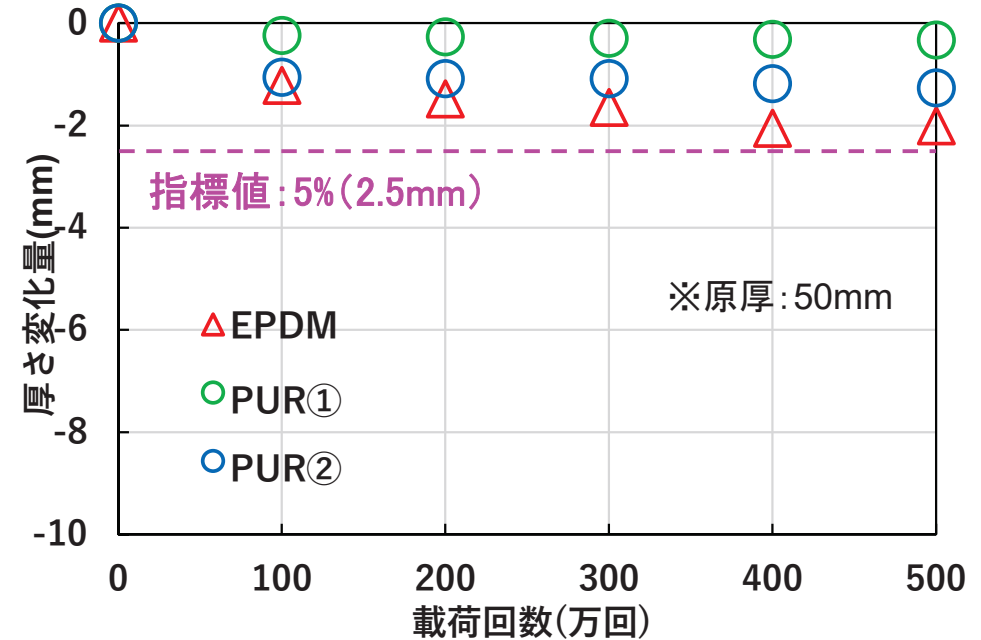
3. 防振材の疲労耐久性・耐候性の評価

◆ 物性試験

➤ 疲れ強さ



いずれも $\pm 20\%$ 以内

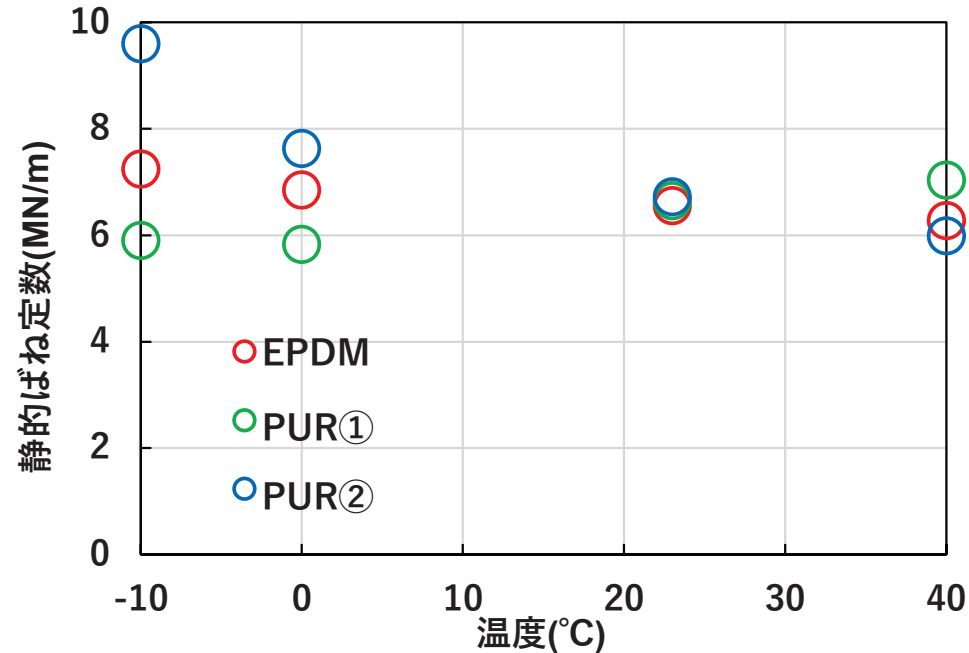


へたり量 $\leq 5.0\%$
※500万回後・無負荷時
(EPDM : 2.3%, PUR①: 0.22%, PUR②: 1.7%)

3. 防振材の疲労耐久性・耐候性の評価

◆ 物性試験

➤ ばね定数（温度の影響）



常態時（23℃）に対する-10～40℃の静的ばね定数の変化率は
EPDMが最も小さい（10%以下）

試験結果一覧

試験項目	評価項目	指標値	EPDM	PUR①	PUR②
浸水加振	静的ばね定数	±20%以内	-5.4	-2.1	-21.4
耐熱性	引張強さ		14.3	13.2	7.9
	100%モジュラス※		16.8	18.4	17.7
耐水性	引張強さ		-3.7	-2.6	-7.1
	100%モジュラス※		-0.8	9.8	8.1
耐アルカリ性	引張強さ		-0.5	-4.6	-4.7
	100%モジュラス※		2.3	0.3	2.5
疲れ強さ	静的ばね定数		10.7	-0.3	6.6
	厚さ	5%以下	4.4	0.7	2.6
クリープ特性	厚さ		1.0	0.5	0.7

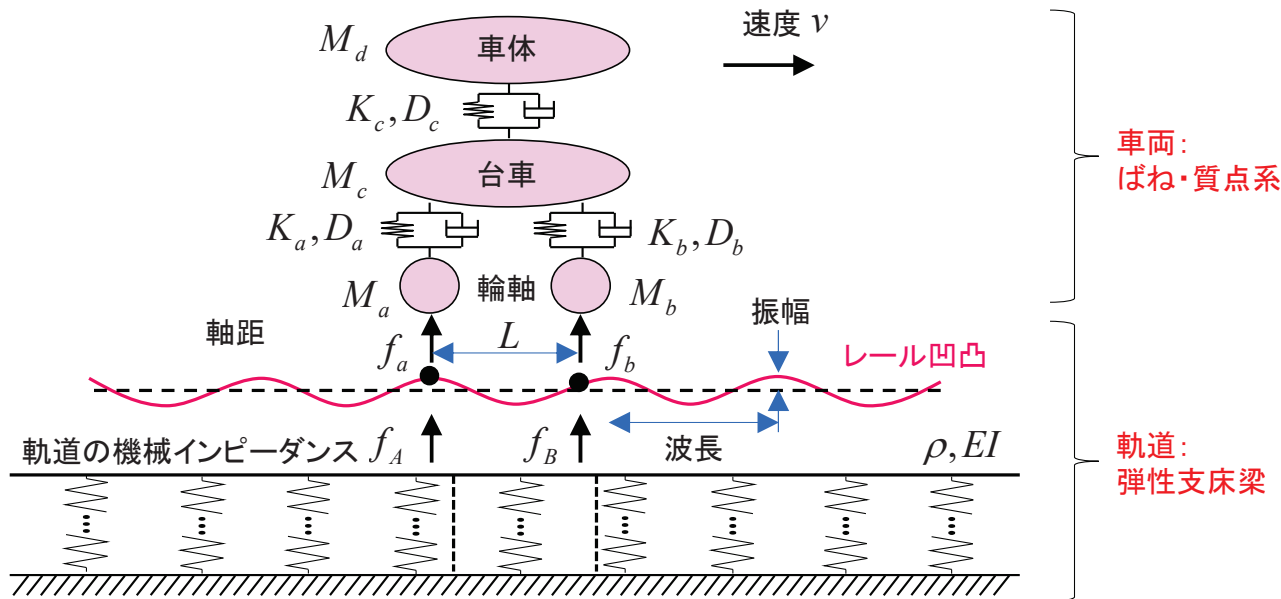
※伸び100%時の応力

良好な疲労耐久性・耐候性

4. 数値解析による波状摩耗抑制効果の評価

◆ 理論解析による凹凸振幅増幅係数(κ)※の試算

➤ レール・車輪間の鉛直方向の接触力(輪重)変動を算出



軌道・車両の相互作用を考慮した理論解析モデル※

※網干光雄, 田中博文: レール波状摩耗の成長機構解析のための弾性支床梁モデルの検証, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.883, DOI: 10.1299/transjsme.19-00331, 2020.

凹凸振幅増幅係数(κ)の算定式

$$\kappa = |1 + C_w H|$$

κ : 凹凸振幅増幅係数

C_w : 単位輪重あたりのレール摩耗量

H : レール凹凸振幅に対する輪重変動
(前輪, 後輪の平均値)の伝達関数



$\kappa > 1 \Rightarrow$ 凹凸振幅が増加(成長)

$\kappa < 1 \Rightarrow$ 凹凸振幅が減少

κ が1より大きく、かつ極大となる波長において
レール波状摩耗が成長

レール波状摩耗の成長度合いの評価方法を提案

$$\kappa^N = (1 + C_w H)^N = (1 + \varepsilon)^N \cong 1 + N\varepsilon$$

N : 輪軸の通過回数

ε : レール波状摩耗成長度合い係数



4. 数値解析による波状摩耗抑制効果の評価

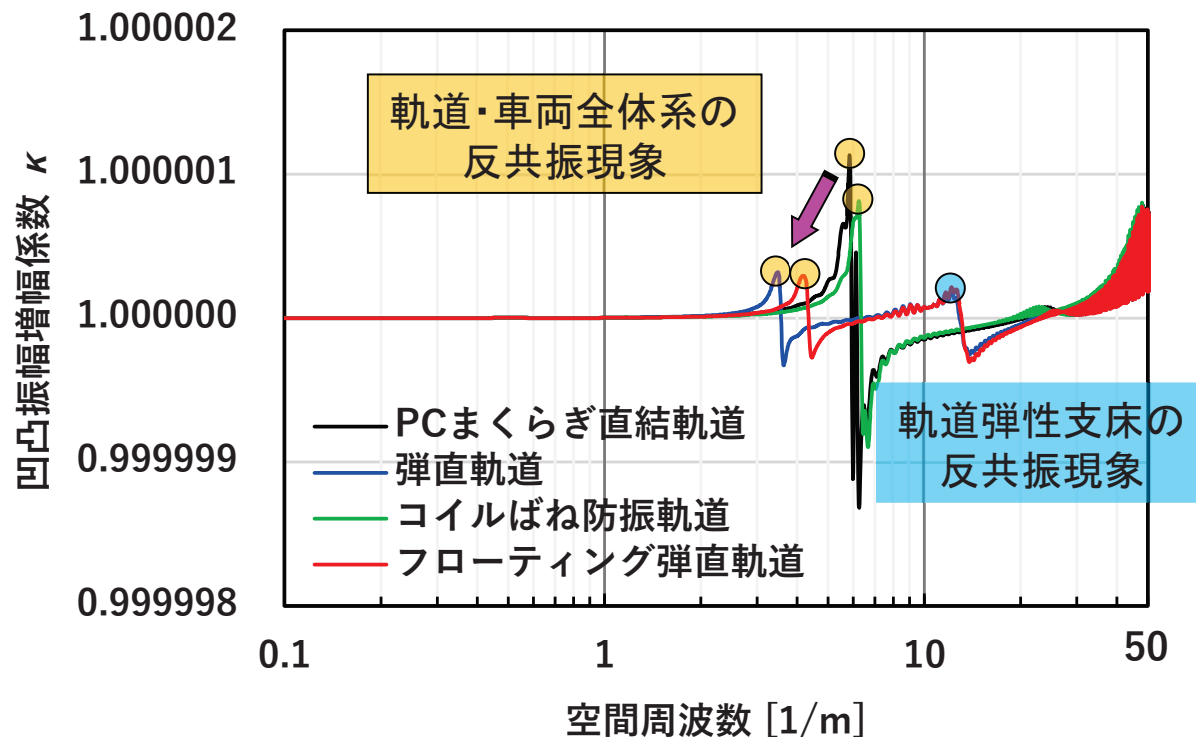
◆ 理論解析による凹凸振幅増幅係数(K)※の試算

検討対象とした軌道種別一覧

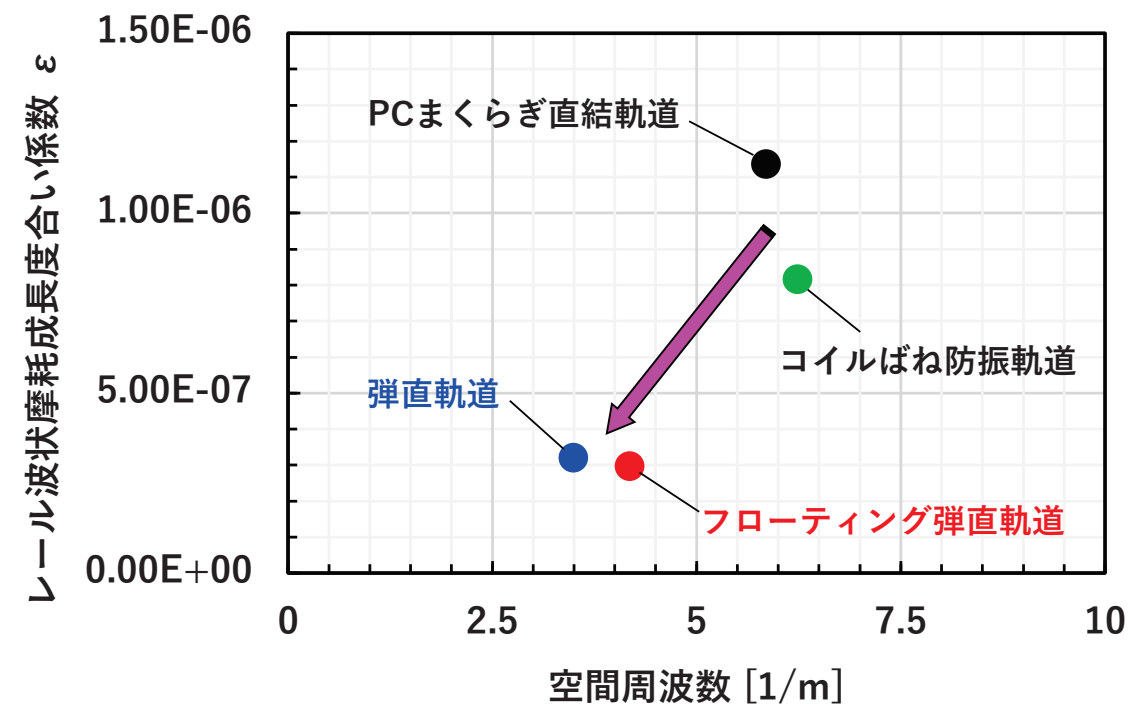
CASE	1-A	2-A	2-B	3-A
軌道構造	PCまくらぎ 直結軌道	弾直軌道	コイルばね 防振軌道	フローティング 弾直軌道
軌道の弾性支床モデル	一段弾性	二段弾性	二段弾性	三段弾性
締結間隔(mm)	625	700	625	625
軌道パッド(MN/m)	60	60	50	60
まくらぎパッド(MN/m)	—	30	—	30
防振材(MN/m) (スラブ下・コンクリート道床下)	—	—	6.6	6.6
実軌道における波状 摩耗の発生例	内軌/外軌	内軌	内軌/外軌	—

4. 数値解析による波状摩耗抑制効果の評価

◆ 軌道諸元の違いによる比較



凹凸振幅増幅係数の試算結果
(走行速度:40km/h)



各軌道構造におけるレール波状摩耗
成長度合い係数の比較

フローティング弾直軌道においては、弾性まくらぎ直結軌道と同様に外軌波状摩耗の発生が抑制されることを確認した。

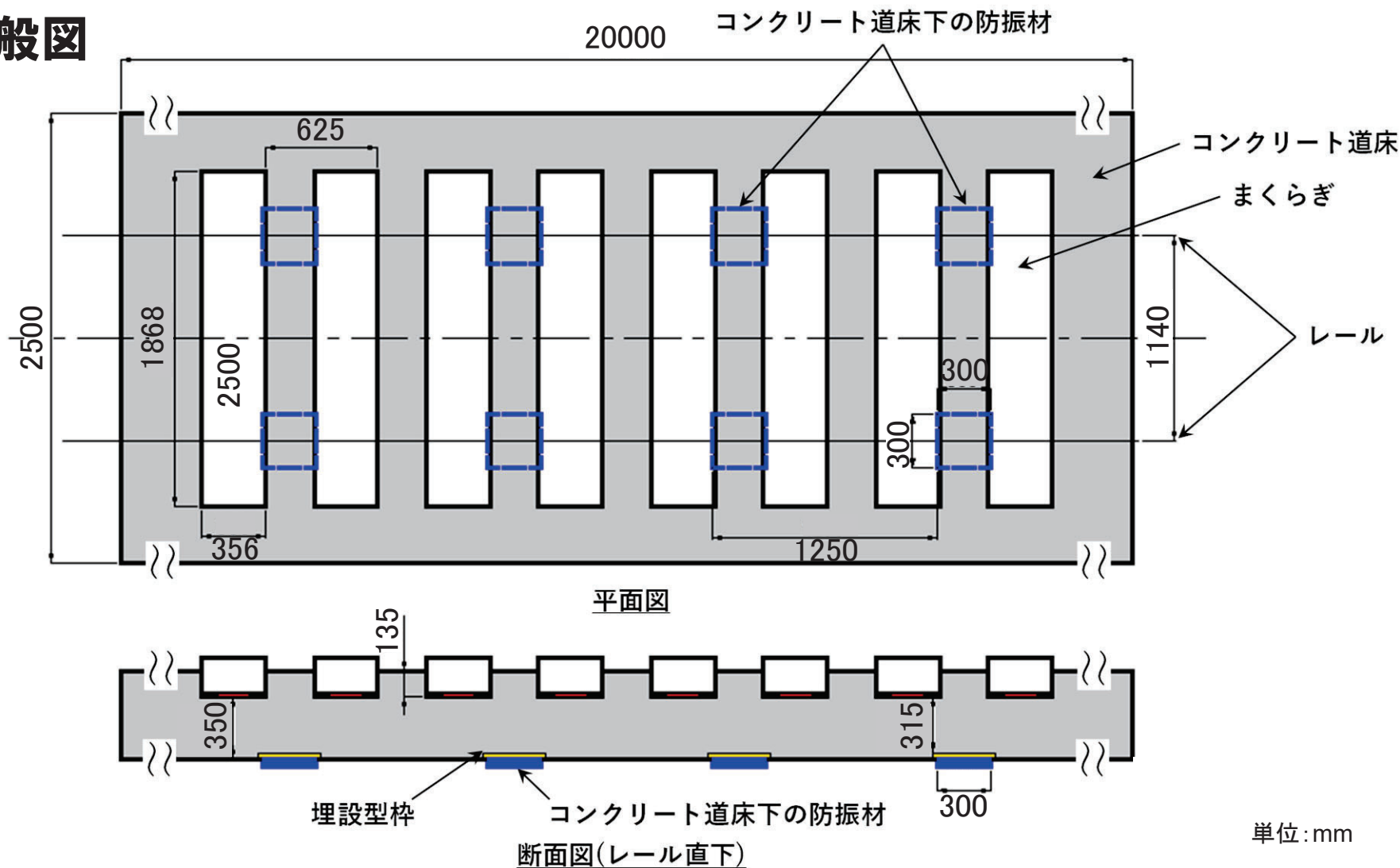
5. フローティング弾直軌道の設計および試験施工

◆設計条件および一般図

主な設計条件

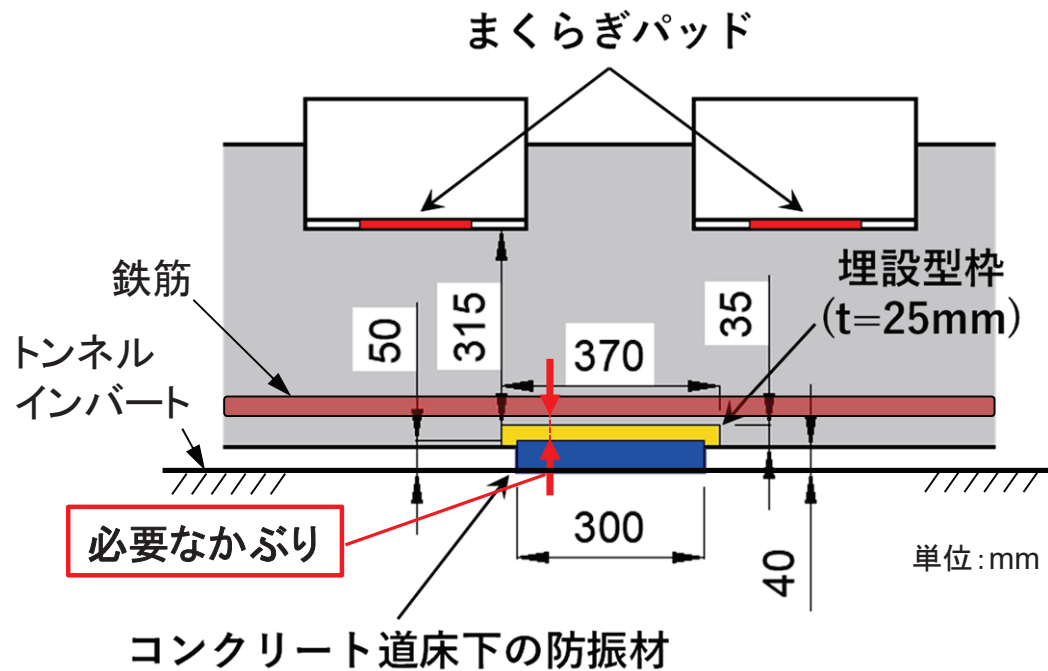
構造種別	RC構造
軸重	170kN(M-17)
軌道パッド	60MN/m
まくらぎパッド	30MN/m
防振材	6.6MN/m
固有振動数	9.3Hz

「鉄道構造物等設計標準・同解説(軌道構造)」に基づきコンクリート道床を設計



5. フローティング弾直軌道の設計および試験施工

◆ 設計条件および一般図



防振材設置部の拡大図

UFC製埋設型枠

コンクリート打設面
(付着層)



EPDM製防振材

防振材の設置状況

- UFC製埋設型枠の厚さは「かぶり」として考慮できる
⇒ **コンクリート道床を増厚する必要がない**
- 防振材はコンクリート道床側(埋設型枠の凹部)に固定する
⇒ **トンネルインバート側の土台(防振材固定用)を省略可**

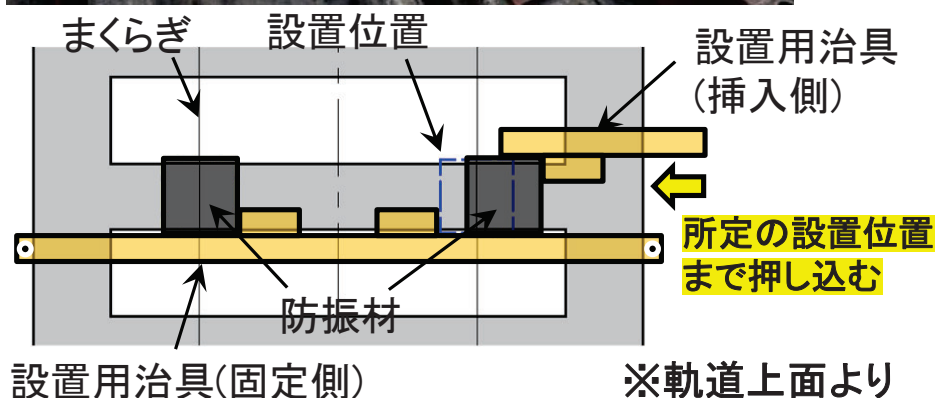
5. フローティング弾直軌道の設計および試験施工

◆ 試験施工（日野土木実験所）

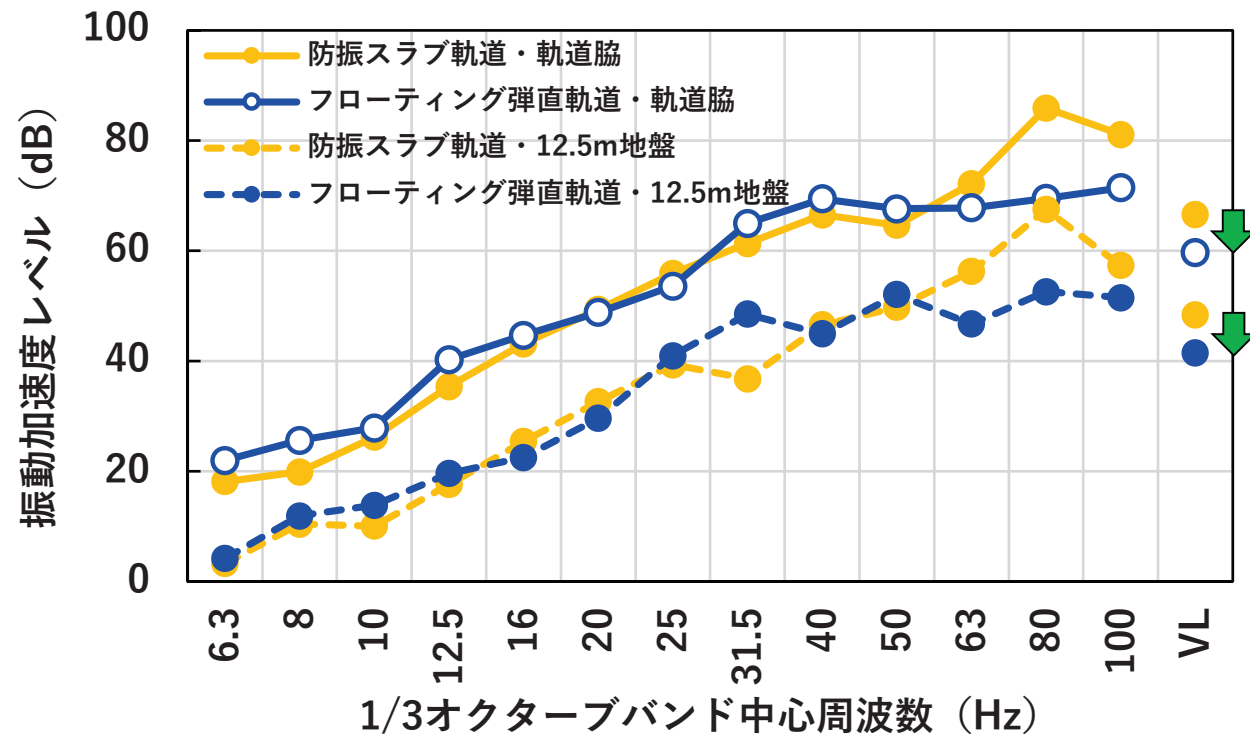
試験敷設延長：4.7m



防振材の設置



モーター走行試験



地盤の振動加速度レベルの測定結果

フローティング弾直軌道では振動レベルが約7dB低下

6. まとめと成果の活用

- 提案するフローティング弾直軌道はコイルばね防振軌道と比べて、広帯域で振動加速度レベルが低下し、トンネル直上（土被り5.5m/N値6程度）の地表面で振動レベルが10dB程度低下した。
- 防振材（発泡EPDM・発泡ウレタン）の疲労耐久性・耐候性を評価し、フローティング弾直軌道に適用可能であることを確認した。
- 軌道／車両の相互作用を考慮した理論解析により、本軌道では弾性まくらぎ化の効果により、外軌波状摩耗の発生が抑制されることを確認した。
- コンクリート道床の防振材設置部にUFC製埋設型枠を用いることにより、構造上必要なかぶり・道床厚を確保するとともに、良好な施工性を確認した。

新設トンネルや既設トンネルの延伸区間における防振対策として活用

参考文献

- ・ 瀧上翔太, 渡辺勉, 田中博文, 高橋貴蔵: フローティング弾性まくらぎ直結軌道による地盤振動および波状摩耗の低減効果, 鉄道総研報告, Vol.38, No.2, pp.17-23, 2024
- ・ 瀧上翔太, 柊田吉弘, 高橋貴蔵: フローティング弾直軌道における防振材の材料特性および軌道構造の振動特性の評価, 鉄道総研報告, Vol.39, No.2, pp.1-7, 2025