

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

測上 翔太* 渡辺 勉** 田中 博文*** 高橋 貴蔵*

Reduction Effect of Ground Vibration and Rail Corrugation by Floating Track with Under Sleeper Pads

Shota FUCHIGAMI Tsutomu WATANABE Hirofumi TANAKA Takatada TAKAHASHI

Various types of vibration-reducing tracks have been developed to reduce noise and vibration during train running. Of these vibration-reducing tracks, although floating track with coil-spring units installed on conventional lines has shown excellent effects of reducing ground vibration, rail corrugation on the high rail has been observed in some sharp curve sections. Therefore, we have proposed a floating track with under sleeper pads in order to reduce the occurrence of rail corrugation on the high rail in floating track with coil-spring units. In this paper, we introduced the proposed floating track with under sleeper pads and evaluated its effectiveness in reducing ground vibration and rail corrugation by analytical methods.

キーワード：フローティング弾性まくらぎ直結軌道，地盤振動，波状摩耗，数値解析，構造設計，試験施工

1. はじめに

列車走行時の騒音や振動を低減することを目的として、弾性まくらぎ直結軌道¹⁾や防振スラブ軌道²⁾、フローティング・ラダー軌道³⁾等の防振軌道が広く実用化されている。また、コイルばね防振軌道^{4) 5)}といった比較的質量の大きな部材を防振材で離散的に支持する防振軌道もあり、高い振動低減効果を有している。これらのうち、低土被りのトンネルや建物基礎に近接するトンネル等において、列車の走行時に発生する地盤振動を積極的に低減することを目的とする場合、コイルばね防振軌道が採用される事例が多い。

コイルばね防振軌道は、PCまくらぎが埋め込まれたコンクリートスラブ（以下、スラブ）等をコイルばね防振装置により離散的に支持する軌道構造であり、ばね定数が5~7MN/m程度のコイルばね防振装置を用いることで、軌道の固有振動数を10Hz以下とすることが可能である。一般に振動体の固有振動数を小さくすると、外部への振動（地盤振動など）に対して広い周波数帯で振動低減効果が期待されることから、その他の防振軌道と比べて振動低減効果に優れている。一方で、コイルばね防振装置は一般に比較的高価であるため、住宅や学校、ホテル、駅部の店舗等に隣接し静穏な環境が求められる新設区間（主にトンネル区間）で限定的に敷設されているのが実態である。また、後述するように、一部の急曲線区間に敷設されたコイルばね防振軌道においては、

PCまくらぎ直結軌道と同様に、内軌だけではなく、外軌のゲージコーナー部にも波状摩耗が発生している事例が報告されている⁶⁾。そのため、騒音や振動の発生に加えて、乗り心地の低下に伴い、レール削正等の保守作業が新たに必要となる場合がある。

そこで筆者らは、コイルばね防振軌道の適用におけるこれらの経済性（建設費）と保守性（レール波状摩耗）に関する課題を解決するため、在来線を対象として、フローティング弾性まくらぎ直結軌道（以下、フローティング弾直軌道）を提案した⁷⁾。本稿では、数値解析によってフローティング弾直軌道の適用による地盤振動および波状摩耗の低減効果を試算するとともに、同軌道の試設計および試験施工を行った内容について報告する。

2. 提案した防振軌道の概要

図1に提案したフローティング弾直軌道の概要を示す。本軌道は、コイルばね防振軌道においてスラブに固定されているPCまくらぎを弾性まくらぎ化するとともに、発泡EPDM製または発泡ウレタン製の防振材でスラブを離散支持する構造である。まず、まくらぎに関しては、後述するように、コイルばね防振軌道と同じ急曲線区間において隣接して敷設された弾性まくらぎ直結軌道では外軌のゲージコーナー部に波状摩耗が発生しにくいことが確認されていることから⁶⁾、本軌道では弾性まくらぎを採用した。また、発泡EPDMおよび発泡ウレタンは、軌道パッドやまくらぎパッドで適用実績のある材料であり、別途実施した防振材の性能確認試験により、耐久性の観点から、本軌道に適用可能であることを確認している⁸⁾。軌道の固有振動数については、コイルばね

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室
** 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
*** 軌道技術研究部 軌道管理研究室

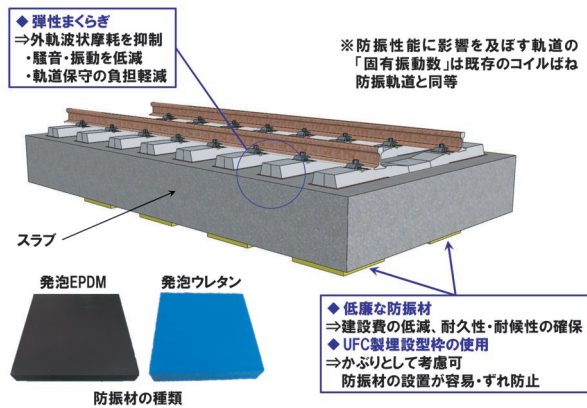


図1 フローティング弾直軌道の概要

防振軌道と同等の防振性能を有するように、10Hz以下として設計した。スラブの下に配置する防振材は、いずれも材料費がコイルばね防振装置の1/10程度となるため、軌道全体の建設費を30~40%程度削減することが可能となる。また、スラブ下面の防振材を設置する部分には、凹形状のUFC（超高強度繊維補強コンクリート）製埋設型枠⁹⁾を設けて、防振材を設置・固定した⁷⁾。

3. 数値解析による振動低減効果の評価

3.1 解析対象

既往の研究¹⁰⁾では、新幹線における低土被りのトンネル区間を対象として、車両、軌道、構造物、地盤を任意にモデル化することが可能な3次元数値解析モデルにより列車走行時の振動予測シミュレーションが行われている。フローティング弾直軌道は在来線を対象としているが、本研究では、はじめに新幹線用の車両・軌道と同トンネルを対象としたフルモデルの数値解析モデルを構築し、実測との比較からその妥当性を検証した。次に、在来線車両を対象として、軌道モデルを在来線用に置き換え、軌道構造の違いが地盤振動に及ぼす影響を評価した。

3.2 解析手法

3.2.1 概要

図2に3次元数値解析モデルの概要を示す。本研究では、車両／軌道／構造物系と構造物／地盤系で全体系を分割し、前者のモデル（車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII）で車両と軌道の動的相互作用を加味した構造物への加振力を求め、これを後者のモデル（地盤と構造物の動的相互作用解析プログラム SuperFLUSH/3DS）に入力して地盤振動を解析する手法を用いた。

3.2.2 車両／軌道／構造物系モデル

車両は車体、台車、輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパでリンクさせた3次元モデルとした。実測と

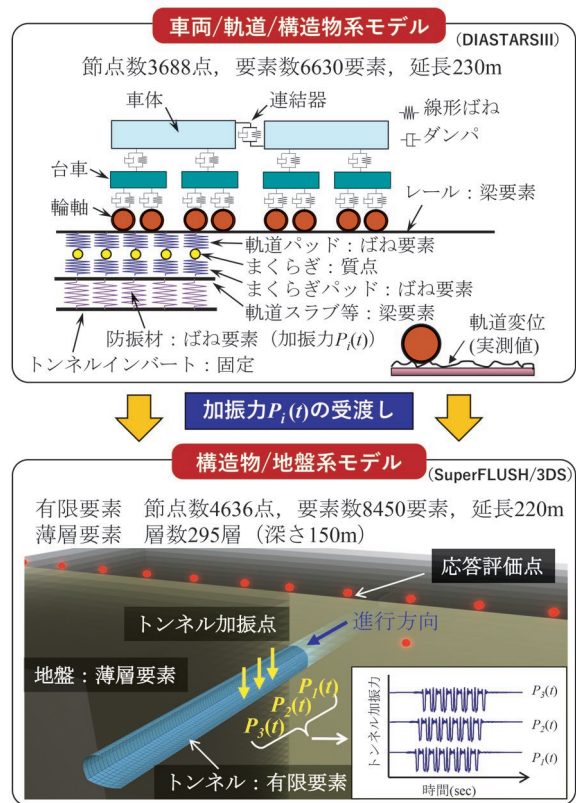


図2 3次元数値解析モデルの概要

の整合性の確認においては車両長25m、輪重60kN程度の一般的な新幹線車両6両編成とし、走行速度は230km/hとした。また、軌道構造の違いが地盤振動に及ぼす影響の評価においては車両長20m、輪重40kN程度の一般的な通勤車両6両編成とし、走行速度は80km/hとした。

表1に解析対象とした軌道構造の一覧を示す。軌道を構成するレール／軌道スラブまたはスラブは梁要素で、軌道パッド／まくらぎパッド／CAモルタル／バラスト道床／防振材はばね要素で、まくらぎは質点で、スリッパ（スラブの間に挿入する継手用鋼棒）はバー要素でモデル化した。ここで、コイルばね防振軌道およびフローティング弾直軌道については、スラブの1ブロックの長さを20mとし、左右レールのスラブの下に2締結間隔（1250mm）で防振材を配置した（軌道5mあたり8個）。なお、コイルばね防振軌道の敷設実績⁴⁾より、防振材1個あたりのばね定数は6.6MN/mとした。各フローティング軌道の固有振動数はコイルばね防振軌道およびフローティング弾直軌道ともに9.3Hzである。

構造物については、トンネル躯体のモデル化の有無が加振力 $P_i(t)$ に与える影響は些少であったことからトンネル躯体はモデル化していない。よって、軌道の最下層のばね要素の下端は固定とした。また、解析に用いた減衰定数（構造減衰）は2%とした¹⁰⁾。

表 1 解析対象とした軌道構造

軌道種別		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	
締結間隔 (mm)		625	580	700	625	625	
軌道パッドばね定数 (MN/m) ※1		70	110	60	50	60	
軌道スラブ または スラブ	寸法 (mm)	幅2000×奥行4930 ×高さ190		-	-	幅2500×奥行20000 ×高さ480	幅2500×奥行20000 ×高さ410 ※2
	配置間隔 (mm)	5000				20000	20000
	弾性係数 (N/mm ²)	31000				31000	31000
	ポアソン比	0.2				0.2	0.2
	密度 (g/cm ³)	2.4				2.4	2.4
まくらぎ	配置間隔 (mm)	-	580	700	-	625	
	質量 (kg) ※3	-	160	240	-	240	
まくらぎパッド (MN/m) ※1		-	-	30	-	30	
バラスト道床 (MN/m) ※3		-	210	-	-	-	
CAモルタル	弾性係数 (N/mm ²)	2000		-	-	-	
	厚さ (mm)	50		-	-	-	
スラブ下の 防振材	ばね定数 (MN/m) ※4	-	-	-	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	
スリップバー ※5	断面積 (mm ²)	-	-	-	5655	5655	
	断面二次モーメント (mm ⁴)	-	-	-	319000	319000	
上下1次固有振動数 (Hz)		240	161	70	9.3	9.3	

※1：片側1締結あたり、※2：スラブを矩形断面とした場合の高さ、※3：まくらぎ1本あたり、※4：片側2締結あたり、※5：スラブの間に挿入する継手（φ30mm鋼棒8本分）

3.2.3 構造物/地盤系モデル

表2に解析に用いた構造物/地盤系モデルの材料物性値を示す。構造物はNATM工法により構築された一般的な鉄道用トンネルである。トンネル躯体はシェル要素で、地盤は薄層要素でモデル化した。ここで、地盤下方の半無限性を模擬するために、最下層には地盤の質量密度とせん断波速度から決まる底面粘性境界を設けた。解析に用いた減衰定数（構造減衰）はトンネル躯体については3%とし、地盤については過去の解析事例や実測との整合性等を踏まえて4%とした¹⁰⁾。本解析では、トンネル躯体を模擬したシェル要素上に、車両/軌道/構造物系モデルで抽出した軌道の最下層のばね要素の反力を加振力 $P_i(t)$ として入力し、列車走行時の地盤振動を再現した。

3.3 解析結果

3.3.1 実測との比較

はじめに、本解析手法の妥当性を確認するため、新幹線車両が弾性まくらぎ直結軌道上を230km/hで走行した際の振動測定の結果と比較した¹⁰⁾。図3にトンネル直上の地表面における振動加速度レベルの実測結果と解析結果の比較を示す。同図より、63Hzや80Hzにおいて解析値が実測値を下回る結果となったが、その他の周波数帯では解析値は実測最小～実測最大の範囲に概ね収まっていることが分かる。以上より、一部の周波数帯における応答が解析と実測で異なるものの、軌道構造の違いが地盤振動に与える影響を相対的に評価するには十分

表 2 構造物/地盤系モデルの材料物性値

(a) トンネル

対象	厚さT (m)	弾性係数 E_T (kN/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ_T (kN/m ³)	減衰定数 h_t (%)
覆工*	0.5	24.2	0.2	23	3
インバート	0.45	24.2	0.2	23	3

(b) 地盤

地層	土質区分	深さD (m)	N値	単位体積重量 γ_g (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h_g (%)
1	砂質粘土	0.0~2.2	6	18	145	4
2	シルト (地下水位以浅)	2.2~5.6	7	19	191	4
3	シルト (地下水位以深)	5.6~5.8	7	19	191	4
4	砂質粘土	5.8~14.7	7	18	153	4
5	砂質粘土	14.7以深	36	19	264	4

なモデルと考え、本解析モデルを用いて検討を進めることとした。

3.3.2 各軌道構造における地盤振動の比較

図4に在来線車両が各軌道構造上を80km/hで走行した際の、トンネル直上の地表面における地盤振動の試算結果を示す。振動加速度レベルのオーバーオール値（VAL）や、人の感覚補正を加えた振動レベル（VL）で比較すると、スラブ軌道が最も大きく、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の順に小さくなった。これは、スラブ軌道

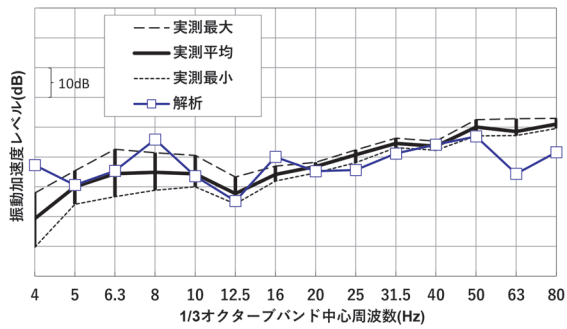


図3 実測結果と解析結果の比較¹⁰⁾

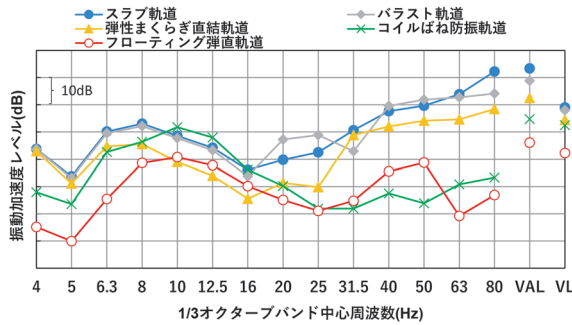


図4 各軌道構造における地盤振動の比較

に比べて軌道の固有振動数が小さく、周辺へ伝播する振動が低減されたためと考えられる。コイルばね防振軌道やフローティング弾直軌道では、スラブの下の防振材による軌道の支持ばね定数の低下に加えて、スラブによる線路方向に対する軌道の曲げ剛性の向上に伴い荷重分散効果が高まり、バラスト軌道や弾性まくらぎ直結軌道に比べて地表面の振動加速度レベルが大きく低減したと考えられる。さらに、フローティング弾直軌道に関しては、弾性まくらぎ化による軌道の支持ばね定数の低下や軌道の曲げ剛性等の影響による複合的な効果により、コイルばね防振軌道よりも広帯域で振動加速度レベルが低下する傾向が見られた。また、振動レベル (VL) を比較した場合、フローティング弾直軌道の方がコイルばね防振軌道より 10dB 程度低下した。

4. 理論解析による波状摩耗低減効果の評価

4.1 直結系軌道における外軌波状摩耗の発生事例

急曲線の軌道では、軌道構造に関わらず、内軌の頭頂面に波状摩耗が発生する事例が多いことが広く知られている。一方で、曲線の外軌に波状摩耗が発生する事例は稀であるが、これまでの調査により、幾つかの路線では外軌のゲージコーナー部にも波状摩耗が発生している事例が確認されている⁶⁾。具体的には、同じ急曲線区間において隣接して敷設されたコイルばね防振軌道と弾性まくらぎ直結軌道、あるいは PC まくらぎ直結軌道とバラ



図5 外軌波状摩耗の発生事例(コイルばね防振軌道の例)

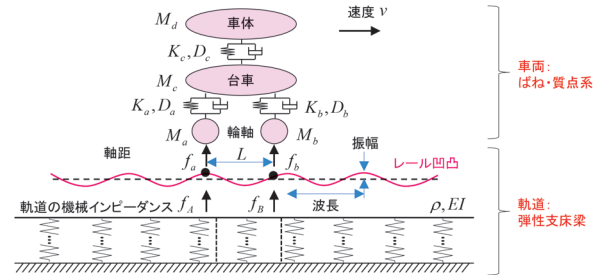


図6 軌道・車両の相互作用を考慮した理論解析モデル

スト軌道を比較すると、内軌ではいずれの軌道でも頭頂面に波状摩耗が発生していたが、コイルばね防振軌道と PC まくらぎ直結軌道では外軌のゲージコーナー部に波状摩耗の発生が確認された (図5)。このように、まくらぎ下に配置したまくらぎパッドやバラストの有無が外軌波状摩耗の発生状況に関与しており、特にまくらぎ直下に弾性材が配置されていない直結系軌道では、外軌波状摩耗が発生しやすいことが複数路線の現地調査の結果から示唆されている。

4.2 解析手法

4.2.1 解析条件

レールが規則的な間隔で摩耗するには、軌道上を鉄道車両が走行する際に、特定波長のレール凹凸の振幅を増幅させる何らかの成長機構があると考えられる。この成長機構を解明するため、既往の研究¹¹⁾では図6に示すような軌道・車両の動的相互作用を考慮した理論解析モデルを構築し、レールの摩耗量がレール・車輪間の接触力に比例すると仮定して、輪重変動を解析している。その結果、波状摩耗の成長要因には、①軸距間でのレール波動の干渉、②軌道弾性支床の反共振現象、③軌道・車両全体系の反共振現象、④車両系の反共振現象の4種類が存在することが示されている。

表3に本解析に用いる軌道の弾性支床モデルのパラメータを示す。軌道構造は、PC まくらぎ直結軌道 (一段弾性支床)、弾性まくらぎ直結軌道 (二段弾性支床)、コイルばね防振軌道 (二段弾性支床) およびフローティング弾直軌道 (三段弾性支床) の4種とし、弾性支床梁としてモデル化した。ここで、弾性支承の段数はレール

表 3 軌道の弾性支床モデルのパラメータ

軌道構造	PCまくらぎ直結軌道	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
軌道の弾性支床モデル	一段弾性	二段弾性	二段弾性	三段弾性
レール締結装置間隔(m)	0.625	0.7	0.625	0.625
レール種別	50kgN	50kgN	50kgN	50kgN
軌道パッド(MN/m) ^{※1}	60	60	50	60
まくらぎ(kg) ^{※1}	-	120	-	120
まくらぎパッド(MN/m) ^{※1}	-	30	-	30
スラブ(kg) ^{※1}	-	-	920	830
スラブ下の防振材(MN/m) ^{※2}	-	-	6.6	6.6

※1：片側1締結あたり、※2：片側2締結あたり

と路盤（剛体）の間に設ける弾性材の数（片レールあたり）である。車両は、狭軌（軌間 1067mm）を走行する一般的な通勤形車両としてモデル化した。

4.2.2 レール波状摩耗の成長要因の分析方法

図 6 に示した軌道・車両の動的相互作用を考慮した理論解析モデルを用いることで、レール・車輪間の鉛直方向の接触力（輪重）変動を算出できる。Archard の摩耗則により、レールが接触力に比例して摩耗すると仮定すれば、レール上を車両が走行した際の走行後のレール凹凸の振幅は走行前に比べて式 (1) に示す倍率となる。

$$\kappa = |1 + C_w H| \quad (1)$$

ここで、 C_w は単位輪重あたりのレール摩耗量、 H は理論解析モデルから得られるレール凹凸の振幅に対する接触力（輪重）変動の伝達関数である。既往の研究¹¹⁾ においては、単位接触力あたりのレール摩耗量 C_w は凹凸の波長によらず一定と仮定しており、本論文においてもこれを参考に $C_w = 10^{-15} \text{m/N}$ とした。また、 κ をここでは「凹凸振幅増幅係数」と称することとする。 κ は、ある波長の凹凸があるレール上を車両が走行した際に、 $\kappa > 1$ ならばその凹凸の振幅が増加し、 $\kappa < 1$ ならば振幅が減少することを示す関数である。この κ が 1 以上で極大となる波長においてレールが規則的に摩耗し、レール波状摩耗として成長すると考えられる。

次に、凹凸振幅増幅係数の極大が出現する場合に、車両の輪軸が N 回走行したとすると、レール凹凸振幅は、式 (1) より、式 (2) で表すことができる。

$$\kappa^N = (1 + C_w H)^N = (1 + \varepsilon)^N \cong 1 + N\varepsilon \quad (2)$$

ここで、1 回の輪軸の通過によるレールの摩耗量 ($C_w H$) は十分に小さい値として $\varepsilon = C_w H$ と置換し、Taylor 展開の 1 次の項までで表現している。すなわち、

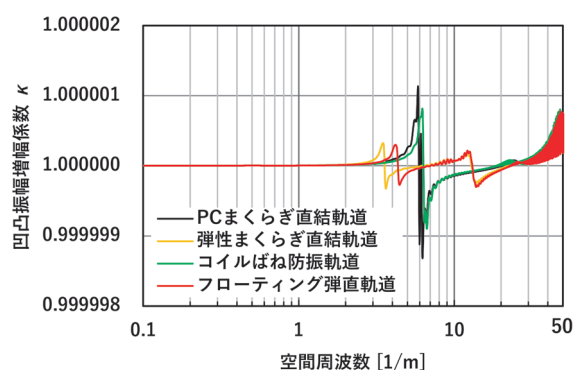


図 7 凹凸振幅増幅係数の比較

同じ条件において N 回走行後で比較するならば、レール波状摩耗の成長度合いは ε を用いて近似的に評価できると考えられる。 ε をここでは「レール波状摩耗成長度合い係数」と称する。この指標が大きいほど、着目した成長要因におけるレール波状摩耗の成長度合いは大きく、同じ走行条件（通トン）においても、早期に波状摩耗が成長し、顕在化するものと考えられる。

4.3 解析結果

図 7 に各軌道構造における凹凸振幅増幅係数 κ の計算結果を示す。ここで、線形および走行速度については、4.1 節に示した過去に外軌に波状摩耗が確認された区間を想定し、曲線半径 185m、走行速度 40km/h とした。これより、同図の PC まくらぎ直結軌道およびコイルばね防振軌道は内外軌に波状摩耗が確認されたケース、弾性まくらぎ直結軌道は内軌にのみ波状摩耗が確認されたケースの結果となる。

図 7 より、PC まくらぎ直結軌道では空間周波数 5.9 [1/m] 付近、コイルばね防振軌道では 6.2 [1/m] 付近、弾性まくらぎ直結軌道では 3.5 [1/m] 付近、フローティング弾直軌道では 4.2 [1/m] 付近にそれぞれ明瞭な κ のピークが確認できる。これらは、③軌道・車両全体系の反共振現象によるピークであり、フローティング弾直軌道では内軌にのみ波状摩耗が確認された弾性まくらぎ直結軌道よりもさらに κ が小さかった。

図 8 に各軌道構造における③軌道・車両全体系の反共振現象によるピークの空間周波数とレール波状摩耗成長度合い係数 ε の関係を示す。同図より、実際に外軌波状摩耗が発生していた PC まくらぎ直結軌道およびコイルばね防振軌道では相対的に ε が大きく、外軌波状摩耗が発生していなかった弾性まくらぎ直結軌道では相対的に ε が小さいことが分かる。また、弾性まくらぎ直結軌道と同じまくらぎパッドが配置されているフローティング弾直軌道の ε は、弾性まくらぎ直結軌道と同程度であった。

以上より、フローティング弾直軌道は、弾性まくらぎ

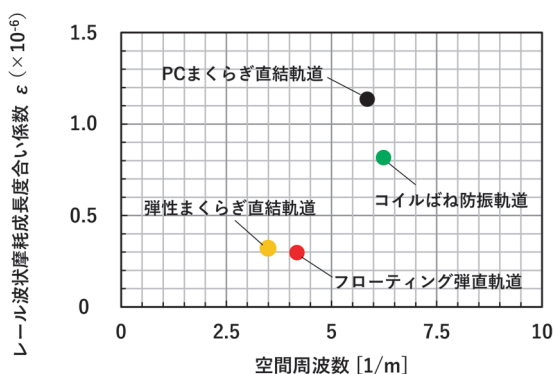


図8 レール波状摩耗成長度合い係数の比較



図12 施工後の状況

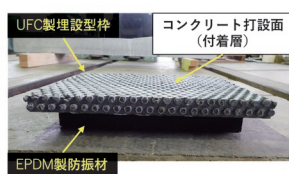


図9 防振材の設置イメージ

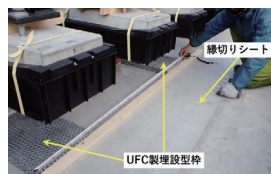


図10 埋設型枠の設置

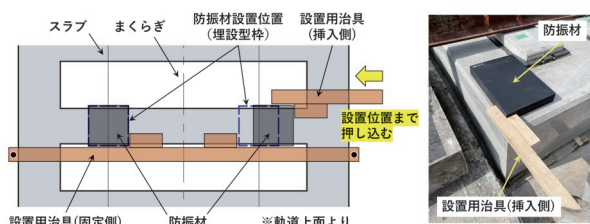


図11 防振材の設置方法

直結軌道と同等の波状摩耗低減効果を有すると考えられる。

5. 構造設計および実物大軌道の製作

前述したフローティング弾直軌道について、「鉄道構造物等設計標準・解説 軌道構造」¹²⁾に基づき試設計を行った。本試設計では在来線を対象とし、軌間を1067mm、設計軸重については電車荷重 (M-17) とした。その他、締結間隔は625mm、軌道パッドのばね定数は60MN/m、まくらぎパッドのばね定数は30MN/m、スラブ下の防振材のばね定数は6.6MN/mとした。また、スラブの厚さについては、目標とする軌道の固有振動数 (9.3Hz) に対して必要な軌道重量や照査の過程で判明した鉄筋の直径と曲げ半径等を考慮し、まくらぎ下で350mmとした。なお、コンクリートの設計基準強度は40N/mm²、鉄筋種別はSD345とした。

上記のとおり試設計を行ったフローティング弾直軌道について、日野土木実験所の試験線に約5mの延長で試験敷設した。埋設型枠にはダクタルフォーム FM/Cタイプ (太平洋セメント社製)⁹⁾を用い、外寸330×440×

35mm、内寸 (凹部・内空側) 280×390×10mm、厚さ25mmとした。これより、防振材 (発泡 EPDM 製: 250×360×50mm, 6.6MN/m) の上部は埋設型枠の凹部に10mm埋め込まれる構造とした (図9)。施工にあたっては、はじめに高架橋上面にコンクリートの縁切り用シートを配置し、軌きょうの構築および埋設型枠の設置を行った (図10)。続いて、配筋およびコンクリートの打込みを行い、スラブを構築した。その後、打込み後7日目に型枠を取り外し、スラブをジャーナルジャッキで扨上して防振材を設置した。ここで、防振材の設置にあたっては、事前に防振材の上面に接着剤を塗布するとともに、防振材が埋設型枠下の所定の位置に配置されるように、図11に示す設置用治具 (固定側・挿入側) を用いてスラブの側面から防振材を挿入した。その後、スラブを降下させ、埋設型枠と防振材を接着させた。以上の施工方法により、問題なく防振材を設置できることを確認した (図12)。

6. まとめ

本稿では、在来線における地盤振動および波状摩耗対策として提案したフローティング弾直軌道について、解析的手法により地盤振動および波状摩耗の低減効果を定量的に評価した。本解析により、フローティング弾直軌道においては、弾性まくらぎ化による軌道の支持ばね定数の低下や軌道の曲げ剛性等の影響による複合的な効果により、コイルばね防振軌道よりも広帯域で地盤の振動加速度レベルが低下することを示した。また、レール波状摩耗の凹凸振幅増幅係数や成長度合い係数を比較することにより、フローティング弾直軌道は弾性まくらぎ直結軌道と同等の波状摩耗低減効果を有することを明らかにした。さらに、フローティング弾直軌道の試設計を行うとともに、試験線にて試験施工を行い、良好な施工性を確認した。

文 献

- 1) 安藤勝敏, 堀池高広, 須永陽一, 半坂征則: 着脱式弾性まくらぎ直結軌道 (D型弾直軌道) の開発, RRR, Vol.59, No.1, pp.10-13, 2002
- 2) 横山秀史, 岩田直泰, 芦谷公稔: 低ばね定数軌道パッドによる地盤振動低減効果: 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.29-34, 2008
- 3) 渡辺勉, 杉本一朗: 鋼鉄道橋の低騒音化, RRR, Vol.66, No.8, pp.14-17, 2009
- 4) 鈴木健司, 渡辺弘之, 塩川英世, 山本与一, 吉田成一郎, 峯垣明, 時弘みどり: コイルばね防振軌道の実験および設計・施工, 清水建設研究報告, Vol.73, pp.47-58, 2001
- 5) 測上翔太, 渡辺勉, 横山秀史, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣: フローティングスラブ軌道の適用による高速走行時の地盤振動の低減効果に関する研究, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.248-260, 2021
- 6) 田中博文, 清水惇, 古川敦, 菊地圭介, 地子給和行: 振動特性に着目した直結系軌道における急曲線外軌波状摩耗の発生要因の推定, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.15, pp.140-147, 2011
- 7) 測上翔太, 渡辺勉, 高橋貴蔵: フローティング弾性まくらぎ直結軌道の開発, 土木学会第78回年次学術講演会講演概要集, VI-1198, 2023
- 8) 栢田吉弘, 鈴木実, 測上翔太: フローティング弾性まくらぎ直結軌道用防振材の性能評価, 土木学会第78回年次学術講演会講演概要集, VI-1200, 2023
- 9) 一般財団法人土木研究センター: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた高耐久性薄肉埋設型枠「ダクトルフォーム」, 建設技術審査証明報告書, 2017
- 10) 渡辺勉, 曾我部正道, 横山秀史, 山崎貴之: 高速鉄道トンネル上の地盤振動に関する解析的検討, 鉄道力学論文集, Vol.18, pp.107-114, 2014
- 11) 網干光雄, 田中博文: レール波状摩耗の成長機構に関する理論解析, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.875, DOI: 10.1299/transjsme.18-00426, 2019
- 12) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善出版, 2012