

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

測上 翔太* 栢田 吉弘** 高橋 貴蔵*

Evaluation of Durability of Vibration Isolation Materials and Vibration Characteristics of Track Structure in Floating Track with Under Sleeper Pads

Shota FUCHIGAMI Yoshihiro MASUDA Takatada TAKAHASHI

Although a floating track with coil-spring units has excellent effects in reducing ground vibration, some cases have been reported in which rail corrugation occurs not only on the low rail but also on the high rail in some sharp curve sections. Therefore, we developed a floating track with under sleeper pads in order to reduce the occurrence of rail corrugation on high rails and the construction costs of the floating track with coil-spring units. In this paper, the fatigue durability and other properties of the vibration isolation materials (foamed EPDM and urethane) were evaluated, as well as the vibration characteristics of the track when a motorcar runs on the full-scale track.

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，防振材，耐久性，試験施工，振動特性

1. はじめに

列車走行時の騒音・振動対策として敷設される防振軌道のうち、低土被りや建物基礎に近接するトンネル区間または商業施設等に近接する駅部において、構造物あるいは構造物から地盤へ伝播する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^{1) 2)}が採用される事例が多い。コイルばね防振軌道は優れた振動低減効果を示す一方で、防振部材として用いられるコイルばね防振装置が比較的高価であることから、軌道の建設費が高くなる傾向にある。また、同軌道の構造形式には、PCまくらぎが埋め込まれた鉄筋コンクリート製のスラブあるいは鉄筋コンクリート製のスラブ上に構築したバラスト軌道を、コイルばね防振装置により離散的に支持するものがあるが、トンネル区間で広く採用されている前者の構造形式の場合、一部の急曲線区間において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する事例が報告されている³⁾。この要因として、レールとまくらぎから成る軌きょうの上下方向の支持ばね係数が大きいことにより、列車のばね下質量が軌道と共振し、波状摩耗の波長に相当する周波数帯で著大な輪重・横圧変動が励起されているためと考えられている。

上記のようなコイルばね防振軌道の適用における経済性（建設費）と保守性（波状摩耗）に関する課題を解決するため、これまでに在来線を対象として図1に示すフ

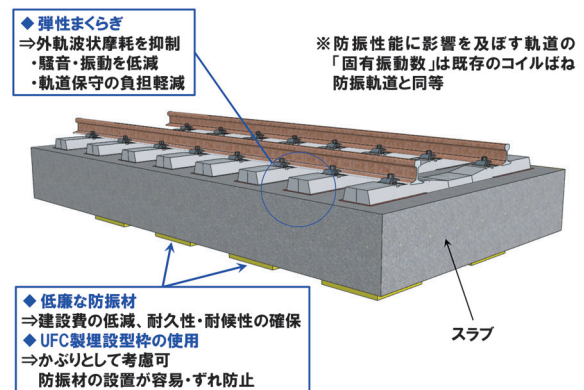


図1 フローティング弾直軌道の概要

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）を提案している⁴⁾。フローティング弾直軌道の開発にあたっては、地盤振動や波状摩耗に与える影響、ならびに防振材の長期的な耐久性などについて検討する必要がある。先行文献⁵⁾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した。地盤振動に関しては、コイルばね防振軌道と同等の振動低減効果を有し、波状摩耗に関してはコイルばね防振軌道よりも発生しにくく、弾性まくらぎ直結軌道と同等の抑制効果を有することを定量的に示した。本稿では、同軌道のスラブ下に適用する発泡エチレンプロピレンジエンゴム（以下、発泡EPDM）製または発泡ポリウレタンゴム（以下、発泡PUR）製の両防振材について材料特性を評価⁶⁾するとともに、実物大軌道上をモーターカーで走行した際の振動特性を評価⁴⁾した内容について報告する。

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

** 材料技術研究部 防振材料研究室

2. 防振材の材料特性の評価

2.1 防振材の選定および供試体の寸法

フローティング弾直軌道に使用する防振材については、所定のばね特性を満足するとともに、使用環境における耐久性や、長期間の継続的な負荷に対する特性を考慮する必要がある。フローティング弾直軌道への適用を想定した場合、防振材には0.3~0.8N/mm²程度の圧縮応力が長期間に渡り負荷されることから、本検討では弾性材に作用する死荷重は異なるが、列車通過時の動的な負荷条件が比較的類似する、弾性まくらぎ用の弾性材の評価法⁷⁾を参考にした性能・耐久性評価に加え、クリープ特性および温度特性を評価することとした。

防振材の材質の選定にあたっては、軌道用の弾性材として使用実績のある複数の材料種を候補とした。先行文献⁵⁾における検討結果に基づき、防振材における静的ばね定数の目標値は6.6MN/mとした。そのため、同静的ばね定数の防振材の製作が容易で、かつ弾性まくらぎ直結軌道の弾性材や軌道パッドとしての使用実績がある発泡EPDMおよび発泡PURを防振材の候補とし、供試体を用いて適用可能性を評価した。なお、これらの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できると考えられる。

発泡EPDMの供試体については、既に軌道用の弾性材として実績がある製品の発泡倍率等を変えた開発品の1種類、発泡PURの供試体については、同様に実績のある製品で流通品の2種類とした（以下、それぞれEPDM、PUR①、PUR②とする）。

表1に実軌道を想定した防振材の荷重条件、表2に供試体の断面の発泡状態、主な物性値および実軌道において使用する際の受圧面積を示す。なお、軌道の設計条件等は次章に詳述する。供試体の厚さについては、コイ

ルばね防振軌道におけるスラブの鉛直変位の測定事例¹⁾を参考に、列車通過時におけるスラブの鉛直変位の最大値を約5mmと想定し、ゴム材料の弾性変形範囲を考慮してひずみ換算で10%程度となるように50mmとした。また、受圧面積は厚さ50mmの供試体において、下限荷重（軌道重量）から上限荷重（軌道重量+列車荷重）の荷重区間における静的ばね定数の目標値が6.6MN/mとなるように、開発品・流通品の単位面積当たりのばね定数（0.105N/mm³~0.081N/mm³）に応じて設定した。供試体は全て黒色であり、側面（切断加工面）がスポンジ状であるのに対して、上下面は成型型により無発泡の平滑な面（スキン層）である。

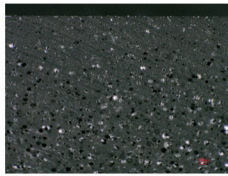
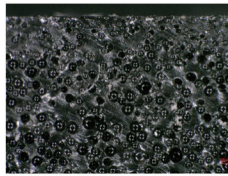
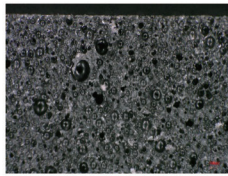
2.2 試験項目

表3に試験項目の一覧を示す。これらは、軌道における弾性体としての実用的な性能および耐久性を評価するための試験項目であり、それらの結果に対して材料物性の良否を判断するための目安値である指標値を示した。各試験における変化率に関する指標値は表中に示す通りとしたが、クリープ特性と温度特性については参考文献⁷⁾において指標値が定められていない。そこで、クリープ特性については疲れ強さに関する厚さの指標値を参照し、温度特性については各供試体の-10~40℃の範囲における静的ばね定数の変化率の相対比較を行うこととした。

表1 実軌道を想定した防振材の荷重条件

| 項目 | 荷重(kN) | 備考 |
|-----------------|--------|----------------|
| 設計軸重 | 170 | M-17 |
| 列車荷重 | 340 | 軌道5m(防振材8個)あたり |
| 軌道重量 | 153 | |
| 下限荷重(軌道重量) | 19.1 | 防振材1個あたり |
| 上限荷重(軌道重量+列車荷重) | 53.1 | |

表2 供試体の断面の発泡状態と主な物性

| 検討対象 | | EPDM | PUR① | PUR② |
|---------|-------|---|--|---|
| 断面の発泡状態 | |  |  |  |
| 物性 | 表面硬さ※ | A83.8 | A80.3 | A69.8 |
| | 比重 | 0.724 | 0.728 | 0.714 |
| | 引張強さ | 5.18 N/mm ² | 3.60 N/mm ² | 3.28 N/mm ² |
| | 吸水率 | 0.08% | 0.94% | 1.53% |
| 受圧面積 | | 81490mm ² | 80100mm ² | 63000mm ² |

※ゴム硬度計A型による測定値

表 3 試験項目

| 試験項目 | | 主な試験条件 | 指標値 |
|--------|--|---|----------------------|
| 浸水加振 | 静的ばね定数(MN/m) | 下限荷重～上限荷重相当の荷重を1Hzで24時間載荷後、下限荷重相当の荷重を作用させ24時間静置 | ±20%以内 ^{※1} |
| 耐熱性 | 引張強さ(N/mm ²) | 70°Cの空气中に96時間暴露 | |
| | 100%モジュラス ^{※2} (N/mm ²) | | |
| 耐水性 | 引張強さ(N/mm ²) | 室温の水道水中に96時間浸漬 | |
| | 100%モジュラス ^{※2} (N/mm ²) | | |
| 耐アルカリ性 | 引張強さ(N/mm ²) | 室温の飽和Ca(OH) ₂ 水溶液中に96時間浸漬 | |
| | 100%モジュラス ^{※2} (N/mm ²) | | |
| 疲れ強さ | 静的ばね定数(MN/m) | 下限荷重～上限荷重相当の荷重を3Hzで500万回載荷 | 5%以下 ^{※3} |
| | 厚さ(mm) | | |
| クリープ特性 | 厚さ(mm) | 下限荷重相当の荷重を40°C環境で載荷 | 測定のみ |
| 温度特性 | 静的ばね定数(MN/m) | 下限荷重～上限荷重相当の荷重を-10～40°C環境で載荷 | |

※1：試験前に対する変化率（正値は試験前の数値より増加，負値は試験前の数値より減少を示す）

※2：伸び100%時の応力

※3：初期変形後の厚さに対する変化率，クリープ特性は初期変形後から1000時間までの厚さの変化率を評価

2.3 試験結果

2.3.1 浸水加振

表4に試験結果の一覧を示す。ここでは、防振材が降雨や漏水などによる湿潤環境で列車荷重を受けることを考慮し、水中の供試体に対して下限荷重（軌道重量）～上限荷重（軌道重量+列車荷重）相当の動的荷重を繰り返し載荷する浸水加振試験の実施前後における静的ばね定数の変化率を確認した。表4より、試験後の静的ばね定数の変化率はEPDMが-5.4%，PUR①が-2.1%，PUR②が-21.4%となり、EPDMおよびPUR①は指標値を満足したが、PUR②は指標値を満足しなかった。このような差が生じた要因について、各材質における水との親和性の違いの他、内部の気泡が連続か独立かの違い（吸水率の差）によるものと推察される。

2.3.2 耐熱性，耐水性，耐アルカリ性

防振材の耐性として、耐熱性，耐水性，耐アルカリ性を評価した。この試験では、厚さ2mmのダンベル状の試験片（図2）を作製し、表3に示す条件で試験を実施した前後の引張強さおよび100%モジュラスの変化率を確認した。表4より、いずれの供試体も耐熱性に関する変化が比較的大きかったが、耐熱性，耐水性，耐アルカリ性に関する変化率は±20%以内であり、指標値を満足した。

2.3.3 疲れ強さ

列車荷重の繰り返し載荷に対して、比較的初期の段階における弾性材の変形特性等を評価するため、表3に示す試験条件により500万回（通過トン数：8500万トン相当）の繰り返し載荷試験を行った。その際、100万回の載荷毎に下限荷重（軌道重量）相当の荷重を負荷した状態で8時間静置（夜間の列車が走行しない時間での復元を想定）した後、静的ばね定数および厚さを測定した。図3に静的ばね定数の変化率，図4に厚さの変化

表 4 各試験における変化率の結果一覧

単位：%

| 試験項目 | | 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% | 4.4 | 0.7 | 2.6 |
| クリープ特性 | 厚さ | 以下 | 1.0 | 0.5 | 0.7 |



図 2 ダンベル状の試験片

量を示す。500万回載荷後の静的ばね定数の変化率はいずれの供試体も±20%以内であり、指標値を満足した。また、厚さの変化率はEPDMの場合に4.4%（約2mm）であったが、いずれの供試体も指標値（5%，2.5mm）を満足した。なお、500万回載荷前後における無負荷時の厚さの変化量（へたり量）はEPDMが2.3%，PUR①が0.2%，PUR②が1.7%であった。以上より、疲れ強さに関する変化はPUR①が最も小さかった。

2.3.4 クリープ特性

今回選定した発泡EPDMや発泡PURなどの樹脂材料は、継続的な負荷が作用すると、時間の経過とともに変形量が漸増（クリープ変形）すると考えられる⁸⁾。そこで、静的圧縮クリープ試験により、下限荷重（軌道重

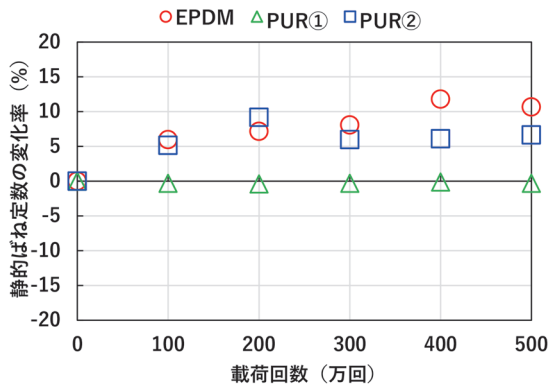


図3 静的ばね定数の変化率（疲れ強さ）

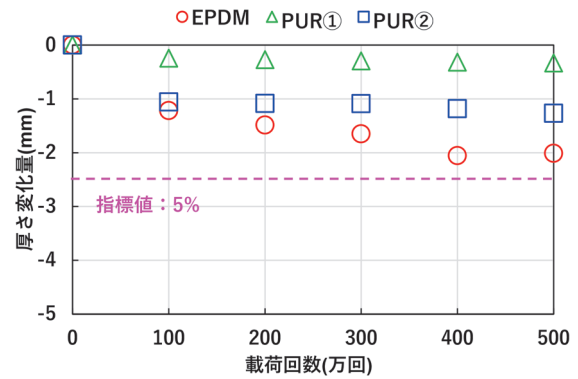


図4 厚さの変化量（疲れ強さ）

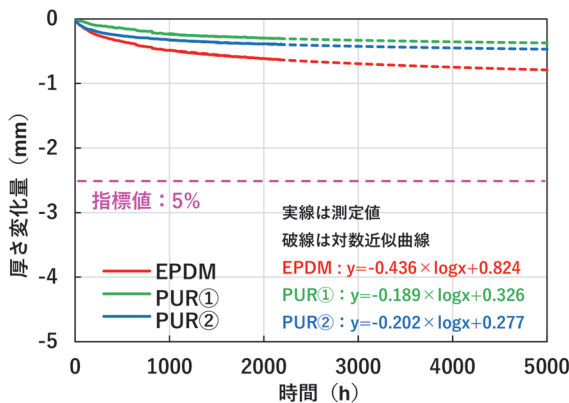


図5 厚さの変化量（クリープ特性）

表5 厚さの変化量（クリープ特性）

| | 変化量(mm) | | |
|--|----------------|----------------|----------------|
| | EPDM | PUR① | PUR② |
| 初期変形 | 2.00 | 1.89 | 2.08 |
| クリープ変形 (24~1000時間) | 0.49 (1.0%) | 0.24 (0.5%) | 0.32 (0.7%) |
| クリープ変形 (50年(438,000時間(h)) 後の推定値) | 1.64 (3.3%) | 0.74 (1.5%) | 0.86 (1.7%) |

量)相当の荷重を連続負荷した際の厚さの変化を確認し、長期的な変化量を推定した。

図5に静的圧縮クリープ試験による厚さの変化量、表5に初期変形とクリープ変形による厚さの変化量を併せて示す。ここで、図5における試験開始1000時間後から2200時間までの測定値を対数近似し、2200時間以降を外挿することにより、50年(438,000時間(h)、スラブの設計耐用年数相当)後の厚さ変化量を推定した。測定値を実線、外挿した対数近似曲線を破線で示す。表5より、試験開始1000時間後の厚さの変化量、50年後の厚さの変化量ともに、EPDMはPUR①やPUR②と比較するとやや大きな数値となったが、いずれも5%以下であり、指標値を満足した。

2.3.5 温度特性

樹脂材料は温度によって特性が変化するため、ここでは23℃時の静的ばね定数に対する-10~40℃の範囲の静的ばね定数の変化率を確認した。

図6に静的ばね定数に対する変化率を示す。この温度範囲における静的ばね定数の変化率は、EPDMが±10%、PUR①が±12%であったのに対して、PUR②は低温側(-10℃)で43%の顕著な増加がみられた。そのため、低温の環境に敷設する場合、PUR②よりもEPDMやPUR

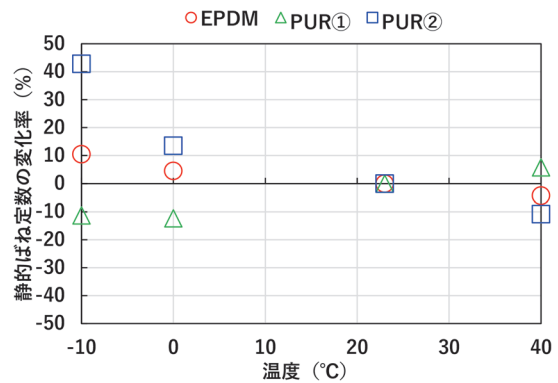


図6 静的ばね定数の変化率（温度特性）

①を使用するのが望ましいと考えられる。

2.3.6 まとめ

以上より、EPDMおよびPUR①は全ての評価項目で指標値を満足したが、PUR②は浸水加振時における静的ばね定数の変化率が指標値を満足しなかった。さらに、EPDMとPUR①の2種を比較すると、EPDMは温度特性、PUR①は疲れ強さやクリープの特性が優れていた。

3. モーター走行時の振動特性の評価

3.1 軌道の設計および試験敷設

鉄道構造物等設計標準・同解説「軌道構造」⁹⁾に基づき、フローティング弾直軌道の構造設計を行った。

表6に設計条件，図7に一般図を示す。本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，レールは50kgNレール，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（EPDM製を使用）のばね定数は6.6MN/mとした。

また，まくらぎにはD型弾直軌道用（防振箱付き）¹⁰のものを用いた。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鉄筋コンクリート構造の仕様として定められている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，スラブ下の防振材を設置する部分には，コンクリートのかぶりとして考慮可能な凹形状のUFC（超高強度繊維補強コンクリート）製埋設型枠¹¹を設けることで，まくらぎ下のスラブの厚さを増加させることなく，防振材のずれ止め機能を付与し，既存のコイルばね防振軌道と同等のレール高さとなる構造とした。

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。上記のとおり設計し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（高架区間）に約5mの延長で試験敷設した⁵。

3.2 測定概要

試験敷設したフローティング弾直軌道において，モーターカー走行試験を行い，軌道の動的挙動および振動特性を評価した。

図8に計測機器の設置位置，図9にモーターカー走行試験の様子を示す。モーターカー（TMC-200B型）の軸距は3.5m，自重は約11.8ton（2輪軸）である。測定項目は，フローティング弾直軌道におけるレールの鉛直変位（端部・中央部）およびスラブの鉛直変位（端部・中央部），フローティング弾直軌道およびスラブ軌道（低ばね型軌道パッド15MN/mを使用）の軌道脇（高架橋）と軌道中心から12.5m地点（地盤）の加速度とした。ここで，フローティング弾直軌道におけるレールの鉛直変位についてはスラブに対する相対変位を測定した。また，周波数分析器を用いて，測定した加速度のオクターブバンド分析を行った。モーターカーの走行速度は40km/hとし，進行方向はスラブ軌道側からフローティング弾直軌道側とした。なお，高架区間に隣接するバラスト軌道の直下で測定した地盤のN値は，深さ0.5～1.5mで10～20，1.5m以深で50以上であった。

位置（端部・中央部）およびスラブの鉛直変位（端部・中央部），フローティング弾直軌道およびスラブ軌道（低ばね型軌道パッド15MN/mを使用）の軌道脇（高架橋）と軌道中心から12.5m地点（地盤）の加速度とした。ここで，フローティング弾直軌道におけるレールの鉛直変位についてはスラブに対する相対変位を測定した。また，周波数分析器を用いて，測定した加速度のオクターブバンド分析を行った。モーターカーの走行速度は40km/hとし，進行方向はスラブ軌道側からフローティング弾直軌道側とした。なお，高架区間に隣接するバラスト軌道の直下で測定した地盤のN値は，深さ0.5～1.5mで10～20，1.5m以深で50以上であった。

3.3 測定結果

表7にフローティング弾直軌道におけるレールおよびスラブの鉛直変位の最大値を示す。ここで，フローティング弾直軌道における軌道の支持ばね定数と車両重量か

表6 設計条件

| 構造種別 | RC構造 |
|----------------|------------|
| 軌間(mm) | 1067 |
| レール種別 | 50kgN |
| 設計軸重(kN) | 170 (M-17) |
| 締結間隔(mm) | 625 |
| 軌道パッド(MN/m) | 60 |
| まくらぎパッド(MN/m) | 30 |
| スラブ下の防振材(MN/m) | 6.6 |
| 設計耐用年数(年) | 50 |
| 列車本数(本/日) | 60 |
| 車両編成 | 16両編成 |

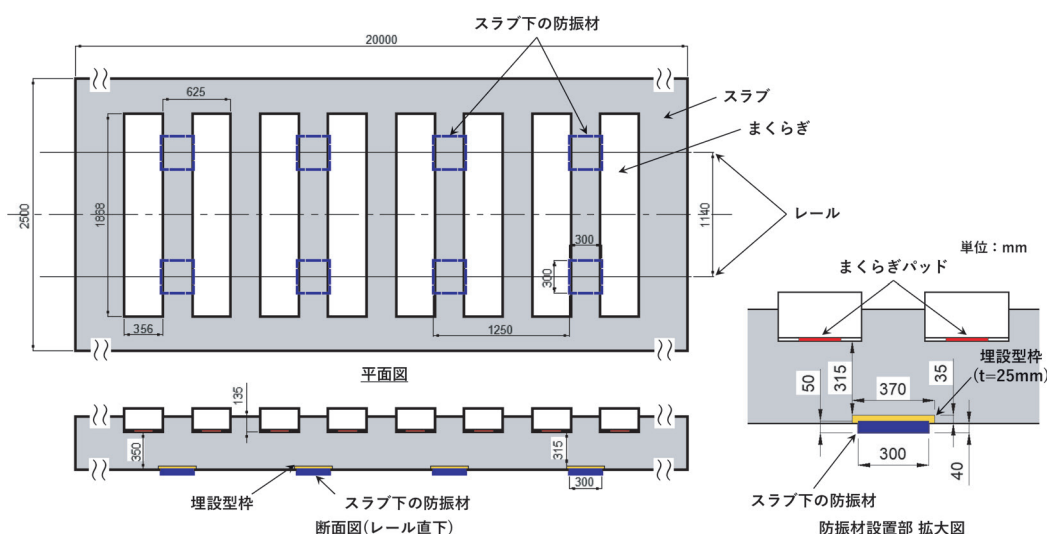


図7 フローティング弾直軌道の一般図

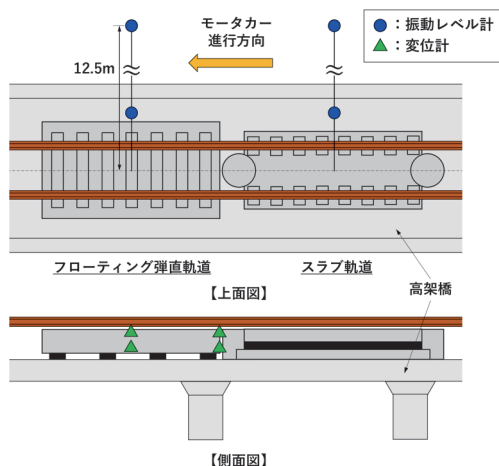


図8 計測機器の設置位置

ら算出した変位量（レール変位（スラブに対する相対変位）：約0.7mm，スラブ変位：約1.6mm）と実測値を比較すると，両者は概ね同等の値であった。

次に，図10各軌道における軌道脇および地盤（軌道中心から12.5m地点）の振動加速度レベルの比較を示す。同図より，特に50Hz以上の周波数帯において，フローティング弾直軌道における応答値が低下する傾向が見られた。また，人体による感覚補正を考慮した振動レベル（VL）はフローティング弾直軌道の場合，軌道脇および地盤（軌道中心から12.5m地点）ともにスラブ軌道の場合よりも7dB程度低下した。

以上より，フローティング弾直軌道を適用することにより，周辺へ伝播する振動が大きく低減されることを確認した。

4. おわりに

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，同軌道に適用する防振材の材料特性を評価するとともに，実物大軌道上をモータカーで走行した際の振動特性を評価した。以下に，本研究で得られた知見を示す。

- (1) フローティング弾直軌道のスラブの下に設置する防振材として，発泡EPDM製（1種類）および発泡ポリウレタンゴム製（2種類）の材料を選定し，材料特性に関する評価を行った。試験の結果，発泡EPDM製は温度特性，発泡ポリウレタンゴム製（うち1種類）は疲れ強さやクリープの特性が優れており，いずれもフローティング弾直軌道に適用可能であることを示した。
- (2) 実軌道上におけるモータカー走行試験の結果，フローティング弾直軌道はスラブ軌道と比較して，軌道脇および12.5m地点の地盤における振動レベ



図9 モータカー走行試験の様子

表7 鉛直変位の最大値

単位：mm

| 測定対象 | 端部 | 中央部 |
|------|------|------|
| レール※ | 0.81 | 0.95 |
| スラブ | 1.32 | 1.37 |

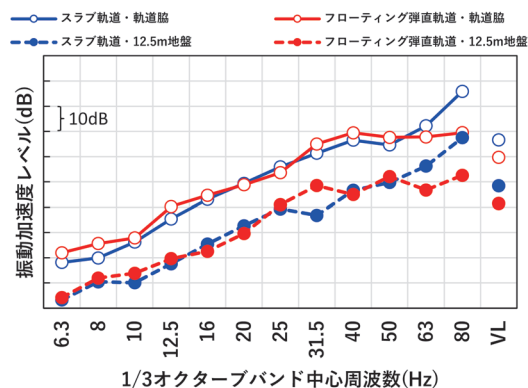


図10 軌道脇および地盤における振動の比較

ルが7dB程度低下し，高い振動低減効果を示すことを確認した。

文 献

- 1) 桃谷尚嗣，鈴木健司，名村明，藤井光治郎，安藤勝敏，芦谷公稔，堀池高広：コイルばね防振軌道の性能と評価，鉄道総研報告，Vol.15，No.4，pp.27-32，2001
- 2) 洲上翔太，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
- 3) 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
- 4) 洲上翔太，渡辺勉，高橋貴蔵：フローティング弾直軌道

- らぎ直結軌道の開発, 土木学会第 78 回年次学術講演会論文集, VI-1198, 2023
- 5) 測上翔太, 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
- 6) 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
- 7) 間々田祥吾, 半坂征則, 鈴木実, 栢田吉弘, 細田充: 弾性まくらぎ用弾性材の物性評価, 第 18 回鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2011, 2011
- 8) 渡辺健三: 各種加硫ゴムの応力緩和並びにクリープ特性について, 日本ゴム協会誌, vol.33, No.11, 1960
- 9) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善出版, 2012
- 10) 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
- 11) 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柵「ダクタルフォーム」, 建設技術審査証明報告書, 2017