

加振周波数に着目したまくらぎ底面粘弾性材の 道床振動抑制効果の評価

河野 昭子* 鈴木 実** 浦川 文寛*

Evaluation of Reducing Effect of USP on Ballasted Track Vibration based on Loading Frequencies

Akiko KONO Minoru SUZUKI Fumihiro URAKAWA

Since resilient sleepers were applied to the railway lines, solid rubber has been mainly used for under sleeper pad (USP). Recently, cellular rubber is newly used for the material of USP. As for the cellular USP, it can absorb plastic deformation generated by the angular ballast grains which press into USP. The authors focused on dynamic viscoelasticity of the USP and evaluated characteristics with focus on loading frequencies. Referring to the evaluation results, the authors carried out cyclic loading test with 2 cases of frequencies on ballasted layer, using 2 types of loading plates with/ without USP. Furthermore the authors carried out vehicle running simulation by using simple vehicle-track model to evaluate reducing effect of USP on ballasted track vibration. These results show that USP has a good effect on reduction of ballast vibration and that the effect is predominantly at the cases of faster running velocity of vehicle and of larger stiffness of subgrade.

キーワード：弾性まくらぎ，粘弾性材，損失係数，道床振動加速度，バラスト軌道

1. はじめに

有道床弾性まくらぎの底面材は、従来、スチレンブタジエンゴムやポリウレタンゴムなどの無発泡の合成ゴムが使用されてきた^{1) 2) 3)}。これらに加え、近年、物性や特性が大きく異なる発泡ゴムを底面材に用いた弾性まくらぎの導入が進められている。発泡ゴムでは製品厚が10mm程度でも低弾性化が容易である他、バラスト粒子の食い込みによる適度な塑性変形が生じる特徴(図1)を有するものもある。

従来の有道床弾性まくらぎについては、まくらぎ底部の弾性化により列車走行荷重を支持する荷重分散範囲が広がり、車輪直下のまくらぎの荷重分担率が減少し、それにより道床沈下が抑制されることが確認されている。

また、有道床弾性まくらぎは、まくらぎから道床バラスト層に伝達する振動を低減すること、その低減効果が外力の周波数帯によって異なることが予想されるが、これらの動的な特性については明らかにされていない。

そこで本報告では、まず発泡ゴム製底面材(以下、USP)の材料自体の動的粘弾性を考慮した材料物性・特性の評価結果を示し、USPを載荷板下に貼付した条件下における道床バラスト層内部の挙動の観察結果を示す。更に、USPの材料特性評価で得られた値をパラメータとして用いたシミュレーション結果より、USPを用いたまくらぎの道床振動低減効果について評価した結果を示す。

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 材料技術研究部 防振材料研究室

なお本報告においては、以下、発泡ゴム製 USP を「USP」と記述する。

2. 動的粘弾性を考慮した USP の性能評価

USPの材料物性・特性を評価するために、USPと道床バラスト層との接触状態およびUSPの動的粘弾性を考慮した物性試験および特性試験を行った。ここで、供試体とするUSPはゲッツナー社製のSLB1510を用いた。

2.1 試験方法

2.1.1 静的支持弾性係数試験

道床層の凹凸面上での接触を考慮し、バラストを模倣した図2のバラスト形状板‘BP-M’を用いた圧縮試験を行い、単位面積当たりのばね定数に相当する静的支持

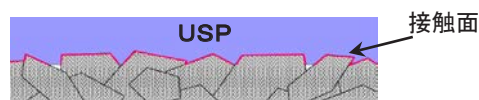
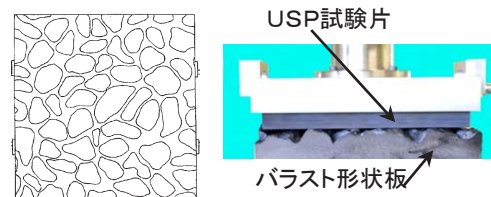


図1 道床層とUSPの接触面(イメージ)



(a)バラスト形状板表面 (b)バラスト形状板試験

図2 バラスト形状板試験

特集：鉄道力学

弾性係数を求めた。このバラスト形状板は土槽内で締め固めた粒度調整バラストを原型に鋳造したものである。

USP の圧縮試験は、図2に示すように、このバラスト形状板に USP 供試体を設置し、試験速度 0.01MPa/s で下限 0.01MPa, 上限 0.25MPa の圧縮を3回繰り返し、3回目の圧縮時の応力と変位から静的支持弾性係数を求めた。

2.1.2 動的 support 弾性係数試験

(a) 低周波域動的 support 弾性係数試験

列車通過荷重のうち、台車の軸距の空間周波数に由来する 5 ~ 30Hz の低周波成分は、まくらぎや下部構造への応力伝搬挙動に影響するため、この帯域における USP の特性は、道床バラスト層や路盤の変形を予測する上で重要なパラメータとなる^{4) 5)}。そこで、バラスト形状板上に USP 試験片を置き、応力範囲 0.01 ~ 0.10MPa, 周波数 5, 10, 20, 30Hz にて3分間隔で約30秒間、荷重制御で正弦波加振し、動的 support 弾性係数と損失係数を求めた。

(b) 高周波域動的 support 弾性係数試験

列車通過荷重のうち、レール/車輪間の接触力などに

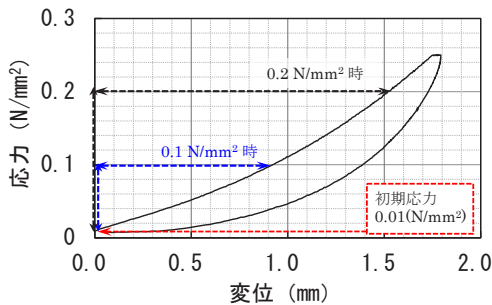
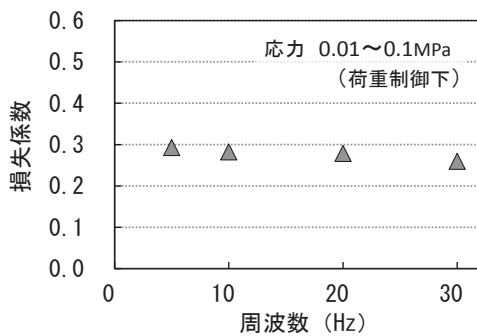
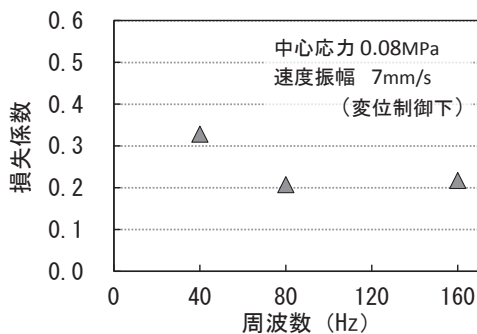


図3 USP の静的圧縮変形曲線



(a) 低周波域動的 support 弾性係数試験



(b) 高周波域動的 support 弾性係数試験

図4 試験結果より損失係数と周波数の関係

起因する高周波成分は、地盤振動や固体伝播騒音として伝搬するとされ、列車の振動・騒音の解析や低減対策時を予測する上で重要なパラメータとなる^{6) 7) 8)}。そこで、バラスト形状板上に USP 試験片を置き、平均応力 0.08MPa, 速度振幅 7mm/s にて 40, 80, 160Hz の各周波数で 30 秒間、変位制御で正弦波加振し、各々の動的 support 弾性係数と損失係数を求めた。

2.2 試験結果

2.2.1 静的 support 弾性係数

バラスト形状板を用いた USP の静的 support 弾性係数試験結果より応力-変位の関係を図3に示す。

図より上限応力が通勤型電車相当の 0.1N/mm² 時 (応力増分 0.098N/mm²) には 0.098 N/mm³, 0.2 N/mm² 時 (応力増分 0.126N/mm²) には 0.126 N/mm³ となった。

これらの結果より、本報告4章の示すシミュレーションにおいては、まくらぎ底面-道床間のばね値を求める上で、本試験で得られた値を採用することとする。

2.2.2 損失係数

バラスト形状板を用いた USP の動的 support 弾性係数試験結果より損失係数の値を図4に示す。図(a)は低周波域、図(b)は高周波域に着目した試験結果を示す。

図より損失係数は、低周波域(10-30Hz)では、0.3から0.25と徐々に減少し、高周波域(40-160Hz)では、40Hzで0.33と増加するが、80Hzと160Hzでは0.2前後であった。

これらの結果より、本報告4章で示すシミュレーションにおいては、まくらぎ底面-道床間の減衰係数を求める上で、USP の損失係数として 0.2 ~ 0.3 の値を用いることとする。

3. USP の道床振動低減効果の実験的評価

2章で材料物性・特性を評価した USP を用いて、土槽内に敷き込んだバラスト層を用いた実験を行い、2通りの周波数の繰返し荷重下における道床振動加速度の低減効果を評価した。

3.1 試験方法

3.1.1 模型バラスト層の構築

模型バラスト層は図5に示すように、幅 1000mm, 奥行 300mm の土槽内に敷設し、層厚は実物軌道と同様に 250mm とした。バラスト碎石は、新品の安山岩バラストを用いた。

道床振動加速度を測定するセンサは、図6に示すように、模型バラスト層の構築過程で、層厚 100mm の段階で表層に設置した。その後、バラスト碎石を追加した。

3.1.2 載荷板

載荷板には一辺 300mm の正方形板を用いた。載荷荷

重を測定するために、図7に示す多層構造とした。

載荷板条件は2通りとし、底面板にUSPまたは比較条件としてコンクリートを貼付した。なお、2通りの条件における載荷板の質量の差を小さくするために、USP条件ではスティール板を、コンクリート板条件ではアルミ板を用いたところ、載荷板全体の重さは、それぞれ約24kg、21kgとなった。

3.1.3 載荷装置と載荷条件

載荷装置は、鉄道総研が所有する軌道動的載荷装置を用いた。

荷重条件は最小荷重1kN、最大荷重20kNの正弦波とし、載荷周波数は7Hz、20Hzとした。

3.2 試験結果

図8に道床振動加速度の測定結果の一部(載荷51回～60回)を示す。

図8(a)より7Hz載荷において、載荷板がコンクリート板の場合、下向きピーク値が 0.9m/s^2 、上向きピーク値が 1.2m/s^2 程度であるのに対して、USPの場合は、それぞれ 0.8m/s^2 、 0.8m/s^2 程度となっている。

同様に図8(b)より20Hz載荷において、載荷板がコ



図5 土槽内に敷設したバラスト層



図6 加速度センサの埋設

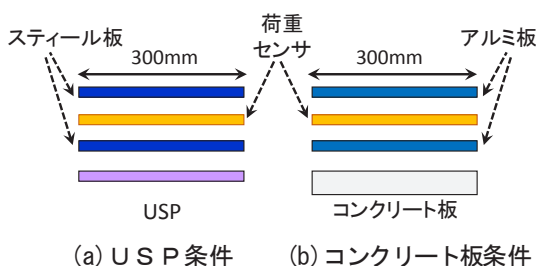


図7 載荷板条件

ンクリート板の場合は下向きピーク値が 3.9m/s^2 、上向きピーク値が 2.8m/s^2 程度であるのに対して、USPの場合は、それぞれ 2.6m/s^2 、 1.8m/s^2 程度となり、7Hz載荷に比較して2～3倍の値となっている。

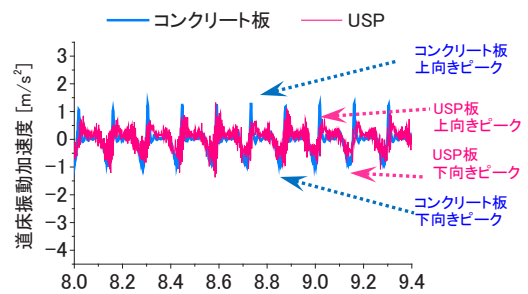
また上記の上向きと下向きのピーク値の和を道床振動加速度の振幅値とし、USPの場合の振幅値の、コンクリート板の場合に対する減少率を求めると、7Hz載荷で24%、20Hz載荷では34%となり、20Hz載荷の場合で減少率が大きくなる。

ここで、7Hzおよび20Hz載荷条件における道床振動加速度波形をフーリエ変換した結果より、振幅値を図9に示す。

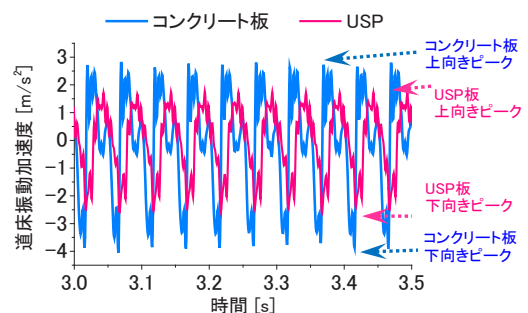
図9(a)の7Hz載荷の場合、いずれの載荷板条件でも、載荷周波数である7Hzの整数倍の周波数において振幅値がピークを示すが、コンクリート板の場合、7Hzにおいて 0.29m/s^2 、14Hzにおいて 0.37m/s^2 と、14Hzで最も大きい振幅値を示している。

他方、USPの場合、7Hzにおいて 0.31m/s^2 とコンクリート板の場合より若干大きい振幅値を示すが、14Hzでは 0.24m/s^2 でコンクリート板の65%程度の値に低減する。更に21Hz以降では振幅値は著しく減少し、特に20～60Hzにおいて、コンクリート板の30～40%程度の値に減少する。

次に図9(b)の20Hz載荷の場合、ここでも載荷周波数である20Hzの整数倍の周波数において振幅値がピークを示すが、コンクリート板の場合、20Hzにおいて 1.7m/s^2 、40Hzにおいて 1.6m/s^2 程度の値を示し、60Hz以降は急激に減少し、 $0.3\sim 0.5\text{m/s}^2$ の値を示す。



(a) 7Hz載荷



(b) 20Hz載荷

図8 道床振動加速度測定波形の一部

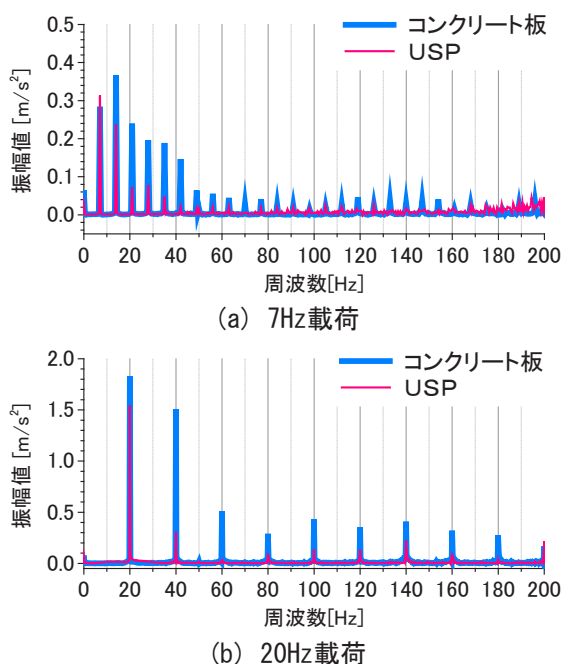


図9 道床振動加速度のフーリエスペクトル

他方、USP の場合、20Hz において 1.5m/s^2 程度の値を示し、コンクリート板条件との差異は小さいが、40Hz 以降では著しく減少し、 $0.1 \sim 0.3\text{m/s}^2$ の値を示す。

以上より、USP による道床振動加速度の低減効果を周波数ごとに評価した場合、14Hz より高い周波数帯で低減効果が顕著となることが示された。

4. USP の道床振動低減効果の解析的評価

前章において、USP による道床振動加速度低減効果が、周波数帯によって異なることを示した。これらの周波数帯による違いが、実現場における列車走行荷重下でどのような影響を与えるか評価するために、簡易な解析モデルを用いた車両走行シミュレーションを行い、道床振動加速度の減少率について、路盤剛性および車両走行速度に着目した評価を行った。

4.1 解析方法

4.1.1 解析モデル

図 10 に本解析で用いた簡易な車両／軌道動的応答モデル⁹⁾を示す。

車両部分は半車体質量と一台車および前後車輪で構成され、レール部分はティモシェンコ梁でモデル化されている。まくらぎから道床バラスト層は、まくらぎおよび道床を上中下に分割した質点とし、並列のばねダンパで接続されている。

4.1.2 解析条件

表 1 に解析条件を示す。路盤条件は 3 通り、車両走行

速度も 3 通りとした。車両諸元は近郊型特急列車を想定し、従来値を用いた¹⁰⁾。

まくらぎ要素と道床上層部要素の間のばね係数と減衰係数を表 2 に示す。USP なしの条件では、コンクリートまくらぎを想定した従来値¹⁰⁾とし、USP ありの条件は、2 章で示された実際の USP の損失係数に、参考条件として 0.1 および 0.4 を加え、全部で 5 通りとした。

なお、本解析のパラメータとなる減衰係数については、式 (1) において、USP を用いたまくらぎの共振周波数を 100Hz ¹¹⁾ として求めた値である。

$$c = \eta \frac{k}{2\pi f} \quad (1)$$

ここで、 C は減衰係数、 k はばね係数で、 η は損失係数、 f は共振周波数を示す。

4.2 解析結果

4.2.1 USP による道床振動低減効果の評価

図 11 に、解析結果より、路盤剛性 150MN/m^3 、車両走行速度 122km/h および 100km/h の条件における道床上層部振動加速度波形の例を、USP なしの条件と USP あり（損失係数 0.3）の条件について合わせて示す。

図より、いずれも前軸および後軸通過時に道床振動加速度がピークを示すが、その値は、 100km/h 走行の場合、USP なしで -1.9m/s^2 、USP ありで -1.8m/s^2 、 122km/h 走

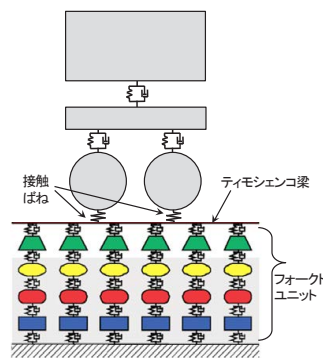


図 10 車両／軌道動的応答モデル

表 1 解析条件

路盤条件 (K30 値)	70, 110, 150 MN/m^3
走行速度	90, 100, 122 km/h

表 2 解析における USP のパラメータ

	USP なし	USP あり				
ばね係数 N/m	—	6×10^6				
損失係数	—	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4
減衰係数 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	—	954.9	1909.9	2387.3	2864.8	3819.7

行の場合は、USP なしで -2.9m/s^2 、USP ありで -2.6m/s^2 となっている。このピーク値に着目した場合、USP なしに対する減少率は、100km/h 走行で 9%、122km/h 走行で 12%である。

ここで図 11 の各波形をフーリエ変換した結果より、周波数と振幅値の関係を図 12 に示す。

図 12 では、100km/h 走行で 11Hz、122 km/h 走行で 13Hz 付近に最も大きなピークが見られるが、これは図 11 の波形で見られる、前軸と後軸の軸間の距離に起因するものである。また、これに次ぐピークとして、100km/h 走行で 53Hz 付近、122km/h 走行で 64Hz 付近にピークが見られるが、これは図 11 の波形で見られる、前軸と後軸の通過時の衝撃成分の時間幅に由来するものと考えられる。

図より、いずれのピークも USP ありの条件で減少する傾向が見られ、特に 122km/h 走行において振幅値の減少が明らかとなっている。また、この 2つのピーク以外でも、100km/h 走行の 25Hz 付近、122km/h 走行の 33Hz および 54Hz 付近においても、USP ありの場合で振幅値が減少する傾向が見られる。

なお、いずれの走行速度においても、周波数 120Hz 以上の帯域では、USP による減少傾向が不明瞭となる。

4.2.2 走行速度が減少率に与える影響

図 11 に示す道床振動加速度波形における正のピーク値と負のピーク値の和を道床振動加速度の振幅値とし、路盤剛性 150MN/m^3 の条件における USP の損失係数の関係を、走行速度 3 通りについて図 13 に示す。

図より、いずれの条件においても、USP ありの場合に振幅値が減少する傾向が見られる。USP なしの場合の振幅値は、90km/h 走行で 1.8m/s^2 、100km/h で 2.4m/s^2 、122km/h 走行で 3.8m/s^2 の値を示し、USP の損失係数が増加するのに伴い、減少する傾向が明らかである。この減少傾向は、走行速度が速い条件ほど顕著となるが、振幅値自体は、損失係数 0.4 を仮定した条件においても、走行速度による相対差は、若干縮小する程度である。

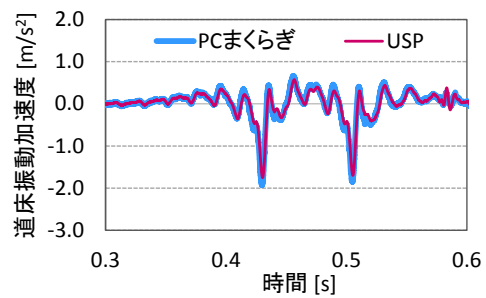
ここで図 14 に、図 13 における各 USP 条件における、USP なしの条件に対する道床振動加速度の減少率を示す。

図より、いずれの条件でも USP の損失係数が大きくなるほど減少率も増加する傾向が明らかである。

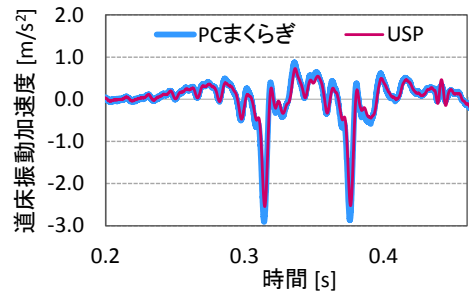
走行速度の条件で比較すると、90km/h 走行では減少率は 6.2 ~ 9.0 %、100km/h 走行で 7.6 ~ 11.4 %、122km/h 走行で 9.7 ~ 14.2%の値を示し、いずれの条件でも、USP の損失係数が大きくなるほど減少率が大きくなる傾向が明瞭であり、更に走行速度が速いほど減少率が大きくなる傾向が明らかである。

4.2.3 路盤剛性が減少率に与える影響

図 13、図 14 に示した 122km/h 走行条件における道床振動加速度の振幅値、および振幅値の USP なしの条件に

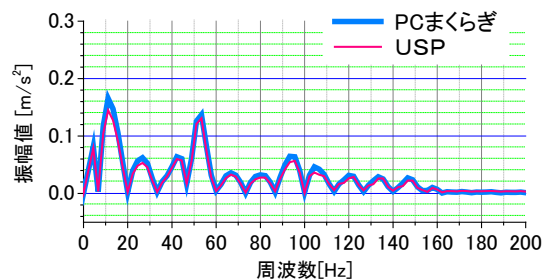


(a) 100km/h走行

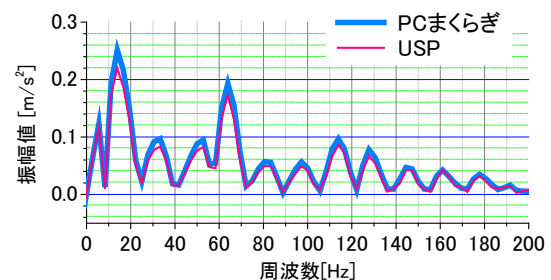


(b) 122km/h走行

図 11 道床振動加速度波形例（解析結果）



(a) 100km/h走行



(b) 122km/h走行

図 12 道床振動加速度波形のフーリエスペクトル

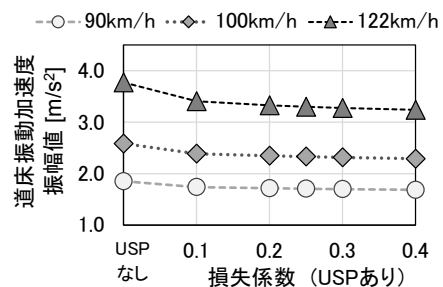


図 13 道床振動加速度の振幅値

特集：鉄道力学

対する減少率と損失係数の関係について、路盤剛性3通りの条件（図中凡例 K70, K110, K150）における結果から得られた傾向を図15および図16に示す。

まず図15より、いずれの条件においても、USPありの場合に振幅値が減少する傾向が見られる。USPなしの場合の振幅値は、路盤剛性 70MN/m³ で 3.8m/s², 110MN/m³ で 4.1m/s², 150MN/m³ で 4.6m/s² の値を示し、USPの損失係数が増加するのに伴い減少する傾向が明らかである。

また図16より、USPによる道床振動加速度の減少率は路盤剛性が高いほど大きくなる傾向がみられている。

このことから、路盤剛性が低い条件では、USPなしの条件における道床振動加速度の振幅値が大きく、加えてUSPによる減少率も小さい傾向が得られた。

5. まとめ

有道床弾性まくらぎの弾性材として導入が進められている発泡ゴム製 USP について、①動的粘弾性を考慮した材料物性・特性の評価、②载荷周波数を考慮した模型バラスト層における繰返し载荷実験、③列車走行速度を考慮したシミュレーションを行い、USPによる道床振動低減効果の評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) バラスト形状版を用いた試験において、USPの静的支持弾性係数、動的支持弾性係数および損失係数を求めた結果、静的支持弾性係数は概ね約 0.1N/mm³、損失係数は 0.2-0.3 の値であることが確認された。
- 2) 土槽内の模型バラスト層において、载荷周波数 7Hz および 20Hz の繰返し载荷試験を行った結果、USPによる道床振動低減効果が、特に 10Hz ~ 200Hz の周波数帯で顕著となった。
- 3) 簡易なモデルを用いた車両走行シミュレーションを行った結果、車両走行速度が高いほど道床振動加速度のピーク値は増加するが、USPによる道床振動の減少率も大きくなった。
- 4) 同様にシミュレーション結果より、道床振動の減少率に対する路盤剛性の影響を評価した結果、路盤剛性が低い条件では、道床振動加速度のピーク値は増加し、USPによる道床振動の減少率は小さくなった。

文献

- 1) 三浦重ほか：実用化有道床弾性まくらぎの開発，鉄道総研報告，Vol.4, No.5, 1990
- 2) 堀池高広，半坂征則ほか：低廉化有道床弾性まくらぎの開発，鉄道総研報告，Vol.12, No.3, 1998
- 3) 低廉化有道床弾性まくらぎ製作の手引き（案）：財団法人鉄道総合技術研究所，平成14年12月，1992

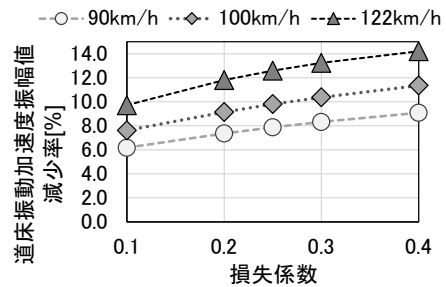


図14 道床振動加速度の減少率

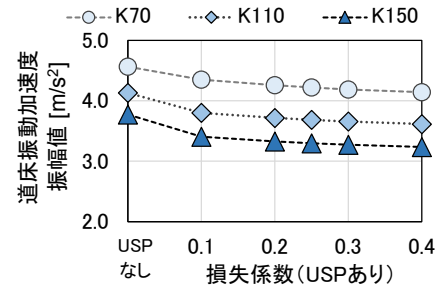


図15 道床振動加速度の振幅値

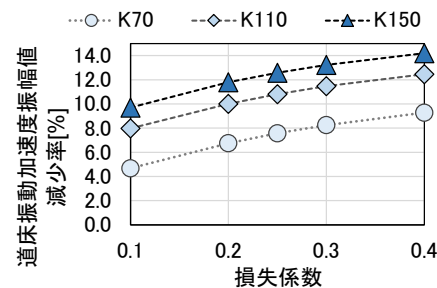


図16 道床振動加速度の減少率

- 4) 吉岡修，芦屋公稔：軌道の支持ばね係数低下が地盤振動低減に与える効果，鉄道総研報告，Vo.5, No.9, 1991
- 5) 田中博文，古川教，横山秀史，長谷川雅彦，金尾稔：新幹線沿線における環境振動低減のための軌道側対策と評価，鉄道総研報告，Vol.24, No.12, 2010
- 6) 半坂征則，佐藤大悟，間々田祥吾，鈴木実，長倉清：コンクリート高架橋における構造物音の予測手法，鉄道総研報告，Vol.24, No.9, 2010
- 7) 津野究，古田勝，藤井光治郎，日下部治：地下鉄振動による固体音の一予測例，鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2005)，S8-3-1, 2005
- 8) 渡辺勉，曾我部正道，徳永宗正，川口二俊：RC ラーメン高架橋の部材振動特性に関する解析的検討，鉄道総研報告，Vol.27, No.10, 2013
- 9) 石田誠，鈴木貴洋：軌道動的応答モデルを用いた軌道沈下予測モデル，第10回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2003) 講演論文集，pp.177-180, 2003
- 10) 河野昭子：普通継目部付近の軌道弾性化前後の道床沈下に関する解析的検討，鉄道力学論文集 No12, pp.1-8, 2013
- 11) 浦川文寛：弾性まくらぎによるバラスト軌道の振動低減効果に関する一考察，J-Rail2016, 2016