

継目部まくらぎの弾性化による軌道部材の動的応答への影響評価

○ [機] 佐藤 大悟 [機] 間々田 祥吾 [土] 鈴木 実

[土] 渡辺 勉 [土] 浦川 文寛 [土] 箕浦 慎太郎 (鉄道総研)

Effect on vibration characteristic of track components
by introducing sleeper with elastic rubber at rail joint on ballasted track

○Daigo Sato, Shogo Mamada, Minoru Suzuki, Tsutomu Watanabe,
Fumihiro Urakawa, Shintaro Minoura, (Railway Technical Research Institute)

Under sleeper pads (USPs) have been installed to reduce the vibration from sleepers to substructures. In recent years, some USPs molded by foam rubbers have been examined for applying them to the ballasted tracks. In this study, the sleepers with USP have installed at the rail joints in conventional line. The effects of reducing the ballast settlement have being evaluated. At the same time, the changes of the vibration characteristics of rails, sleepers and track bed at rail joints through trains running were evaluated. The results indicate that the introduction of the USP increases the vibration of the sleepers from 63Hz to 500Hz and decreases the vibration of the track bed above 500Hz.

キーワード：まくらぎ，まくらぎ下弾性材，バラスト軌道，レール継目，路盤振動

Key Words : sleeper, under sleeper pad, ballasted track, rail joint, track bed vibration

1. 緒言

バラスト軌道では，保守の軽減と騒音振動の低減を目的として，プレストレストコンクリート製まくらぎの底部にゴム製弾性材 (Under Sleeper Pad, 以下 USP) を接着した有道床弾性まくらぎが導入されている。これまで，低廉化や¹⁾²⁾，発泡ゴム製等の材料が検討され，バラスト軌道の沈下抑制に関する評価も行われている³⁾。さらに，有限要素法による数値解析で弾性まくらぎ導入時のバラスト・路盤部への振動伝達特性等に関する評価や，営業線の施工基面での振動伝達特性に関する実測結果も報告されている⁴⁾⁵⁾。

これに対して，著者らは，USP のレール継目部 (以下，継目部) への適用による道床沈下抑制効果の検証および道床沈下進み予測手法の提案を目的として，在来線バラスト軌道において継目部へ USP を導入し，沈下特性に関わる評価を進めているところである。これに関連して，本稿では，継目部での USP 導入による各軌道部材の振動特性への影響評価のため，営業線にて列車走行試験を行った。以下，詳細を報告する。

2. 試験箇所の概要

2.1 USP の敷設条件

走行試験は，在来線の有道床バラスト軌道 (60kg レール) の直線区間における連続した継目部を対象に実施した。表 1 に，各継目部へ導入した USP の概要を示す。条件 1 を

USP 無しの条件とし，条件 2, 3 は USP①，条件 4, 5 は USP ②をそれぞれまくらぎ底面に貼付した弾性まくらぎを敷設した。ただし，条件 2～5 で敷設した弾性まくらぎは，図 1 に示すように各条件ともレール継目部直下と前後各 3 本の計 7 本である。

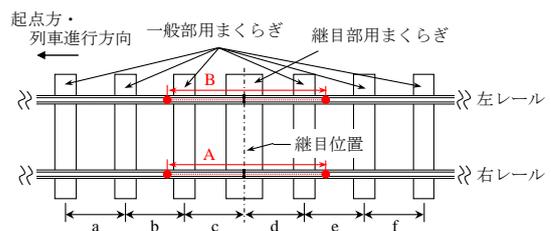
2.2 継目部の状況

継目部においては，継目を介したレール頭頂面の高さの変化 (以下，レール凹凸) や遊間量の違い等によって車輪通過時に発生するレール振動の大きさ等が変化すると考えられる。そこで，以下のとおり継目部付近のレール凹凸お

表 1 各条件の USP 種

条件	USP 種 (10Hz 時の動特性)
条件 1	無し
条件 2,3	USP①* (支持弾性係数 0.14N/mm ³ , 損失係数 0.21)
条件 4,5	USP②* (支持弾性係数 0.18N/mm ³ , 損失係数 0.28)

*発泡ウレタンゴム製



A, B : レール凹凸測定箇所 (全長1000mm, 2.2 (1)項)
a~f : 締結間隔測定箇所 (2.2 (2)項)

図 1 敷設条件の概要

よび締結間隔を測定した。

(1) レール凹凸

レール凹凸は、図1中のAおよびBに示すように、継目の前後500mm、計1000mm長のレール頭頂面の高さ方向の変化を測定した。測定箇所は、継目前後の両端を結ぶ直線上(レール踏面の幅方向中央)とした。図2に各条件の継目部におけるレール凹凸の測定結果(夜間実施)を示す。なお、図1に示すよう、起点方を背に右側に位置するレールを右レールとする。各図の中央付近でレール凹凸が顕著に変化している箇所は継目を示し、継目の間隔を遊間量(mm)としてグラフより読みとった。その結果、各条件とも継目を介して起点方レールの高さは低くなること、各継目の遊間量は4mm~14mmとばらつきが認められた。

(2) 締結間隔

締結間隔は、図1に示すように継目部直下のまくらぎ(継目用まくらぎ)を含めた前後各3本を対象にa~fの箇所を対象に測定した。表2に、締結間隔の測定結果を示す。こ

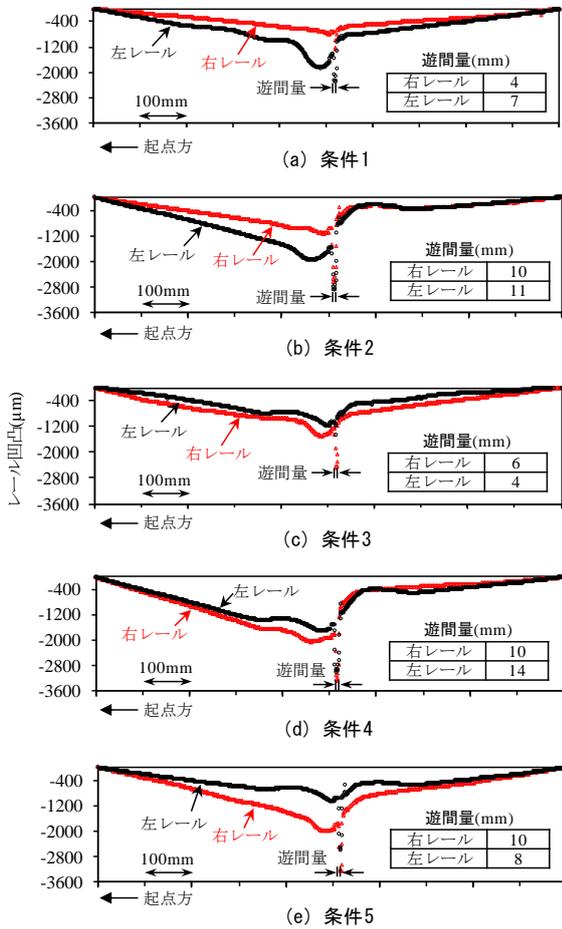


図2 レール凹凸および遊間量の測定結果(夜間実施)

表2 継目部付近の締結間隔(mm)

条件	測定箇所					
	a	b	c	d	e	f
条件1	440	450	440	470	435	430
条件2	500	490	480	460	410	400
条件3	560	565	560	500	510	500
条件4	400	410	450	450	410	420
条件5	495	500	490	510	490	480

の結果、例えば条件2でa部が500mmであるのに対しf部は400mmであるなどばらつきが大きいことが確認された。

3. 列車走行試験

継目部へのUSPの導入による列車走行時のレール、まくらぎ、路盤の各振動特性および継目部近傍での発生音への影響を評価するため、営業線にて走行試験を行った。

3.1 試験方法

表3に、測定点の概要を示す。また、図3~図5に試験および測定状況を示す。

各測定点について、レール振動(VR1, 2)は、図4に示すように継目板を挟んだ2点(VR2が起点方)とした。まくらぎ振動(VM)は、図4に示すように継目部直下を対象とし、路盤振動(VG)は、図5に示すようにVMを設置したまくらぎ底面から300mm下方とした。継目部付近の発生音(S)は、図3に示すように近接側レールより3m離れ、レールレベル(R.L.)+0.45mの高さとした。なお、VM、VGおよびSの各測定点は継目と同一断面上に設定した。

表3 測定点の概要

測定点	表記
レール振動(継目前)	VR1
レール振動(継目後)	VR2
まくらぎ振動(継目部直下)	VM
路盤振動(継目部直下まくらぎ底面より300mm下方)	VG
近傍音(近接側レールより3m離れ、高さ: R.L.+0.45m)	S

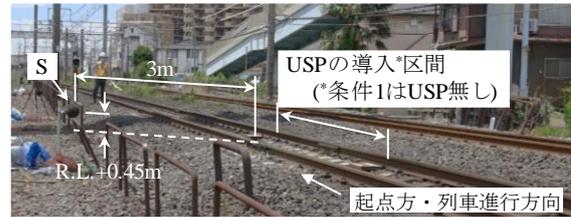


図3 試験状況

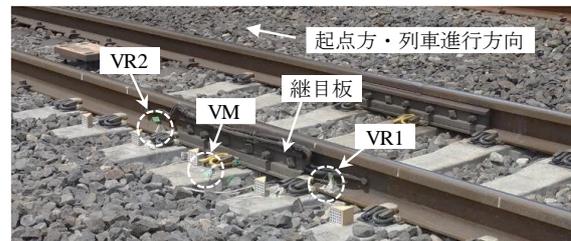


図4 レールとまくらぎの振動測定状況

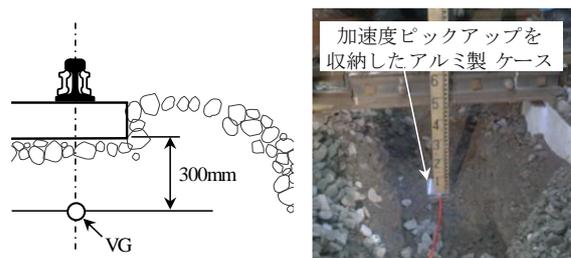


図5 路盤振動の測定状況

測定は、代表的な近郊型通勤車を対象に行った。測定で得られたデータより、1/3 オクターブバンド周波数分析（以下、周波数分析）によって、先頭車の一位台車通過中における各振動加速度レベルおよび騒音レベルのいずれも最大となったときのパワースペクトル（dB）を求めた。周波数分析において、振動加速度は時間重み付け特性を Fast、周波数重み付け特性を F、近傍音は時間重み付け特性を Fast、周波数重み付け特性を A とした。先頭車の一位台車を対象としたのは、測定現場が停車駅に近く編成通過中の速度変化が大きかったためである。

3.2 試験結果

(1) 振動特性の変化

図6に、各条件でのレール、まくらぎおよび路盤の周波数分析結果（パワースペクトル）を示す。なお、各グラフは各条件で得られた速度約90km/hでの6試番分の周波数分析結果に対して、1/3 オクターブバンド中心周波数ごとの振動加速度レベル（dB）を算術平均して求めたものである。この結果、以下の点が確認された。

- ①レールの振動加速度（VR1, VR2）について、各条件とも低周波側から800Hz付近まで周波数の増加とともに値が大きくなり、800Hz以上の帯域ではほぼ同等の大きさを示した。各条件の差異としてUSP有りの条件2～5では、31.5Hz～125Hzの帯域でUSP無しの条件1より高い値を示した。
- ②まくらぎの振動加速度（VM）について、各条件とも80Hz～315Hzでピークを示した。各条件の差異としてUSP有りの条件2～5では、31.5Hz～400Hzの帯域でUSP無しの条件1より高い値を示した。
- ③路盤の振動加速度（VG）について、各条件とも50Hz～1kHzの値が高く、USP有りの条件2～5では125Hz以下の帯域でUSP無しの条件1より高い値を示し、630Hz以上の帯域では条件2～5が低い値を示した。

①と②について、過去の知見によれば、レールの振動加速度は1kHz付近の1次 pinned-pinned 共振周波数まで増加し⁶⁾、2kHz以上では車輪からの振動伝達の影響も考えられる⁷⁾。また、まくらぎのレール加振力に対するアクセラrensは、500Hz以下の帯域で低周波数側から1次剛体モード、1次曲げモードのピークを示す⁸⁾。本結果でも同様の傾向が確認され、31.5Hz～125Hzでレールの振動加速度が条件2～5で増加したのはまくらぎ振動に起因したためと推察される。

図6で示した各パワースペクトル（dB）の大小は、例えば図2に示した各継目部の状況の影響を受けることが考えられる。つまり、レール加振力が大きいほど各測定点のパワースペクトルは大きくなる。そこで、USP有無によるまくらぎおよび路盤の振動加速度の違いに着目するため、レールの振動加速度を基準として各条件を比較した。

図7に、各条件のまくらぎおよび路盤のレールに対する振動加速度の周波数応答関数（Frequency Response Function, FRF）による結果を示す。ただし、レールの振動加速度レベ

ルはVR1とVR2のパワー平均値とした。この結果、図7(a)より、条件2～5は条件1と比較して63Hz～500Hzの帯域で値が大きくなり、USPの導入によって同帯域でまくらぎ自体の振動が大きくなること示された。また、図7(b)より、条件2～5は条件1と比較して63Hz以上の帯

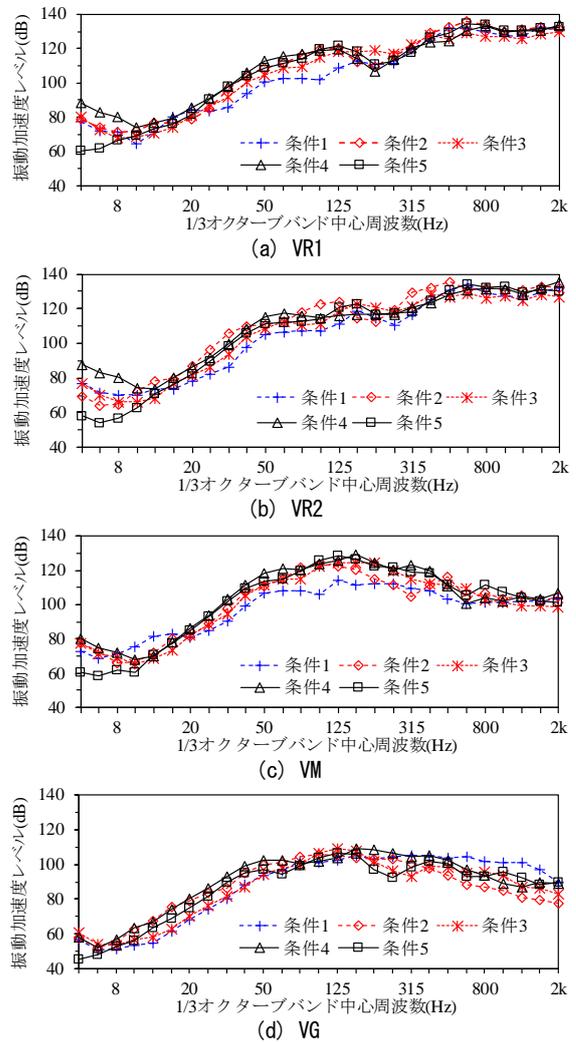


図6 周波数分析結果

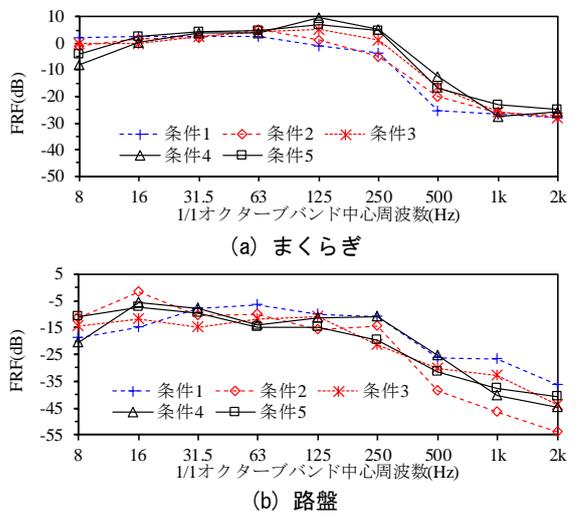


図7 FRFによる比較結果

域で値が小さくなり、USPの導入によって同帯域で路盤振動が低下することが示唆された。USP種の違いについては、図7よりまくらぎ自体の振動はUSP②の方が125Hz～250Hzでわずかに振動しやすいと考えられた。路盤振動の低減量については、本結果からは明確な傾向は認められなかった。この原因として、バラストとまくらぎの接触状況が異なる等、各条件でのまくらぎの敷設状態の違いが考えられる。また、継目の遊間量の違いによる車輪通過時のレール振動の周波数特性への影響も不明である。これらを考慮すると、USP種の違いに着目した評価を行うには、インパルスハンマーを用いた打撃試験等を行うことが望ましい。なお、両図とも63Hzより低い周波数では明確な差異は認められなかった。この原因として、速度約90km/hでの列車走行では、輪軸間距離(2100mm)や表2で示した締結間隔(400mm～565mm)の違いによる同帯域への影響が考えられた。

(2) 近傍音特性の変化

USP有無による近傍音特性への影響について、図8に各条件の結果を示す。この結果、USP有りの条件2～5はUSP無しの条件1と比較して125Hz～250Hzでの値が大きかった。これは、前項に示したように125Hz～315Hzはまくらぎ振動の特徴的な帯域であり、USPの導入によって同帯域でまくらぎ自体の振動が増加したためと考えられる。一方、315Hz以上の帯域では、各条件のばらつきが大きく顕著な違いは認められなかった。前項に示したように、800Hz以上はレール振動特有の帯域であり、レール凹凸等の継目状態の違いがレール振動の周波数特性へ影響したことや、車輪等の列車からの影響が原因として考えられた。

以上より、USPの導入による継目近傍音への影響として、まくらぎ振動特有の315Hz以下における125Hz～250Hzの帯域で顕著な差異が確認された。一方、音全体としては継目状態の違い等の影響が大きいためと考えられ、レール振動に対する遊間量等の継目状態の影響を考慮した評価が必要と考えられる。

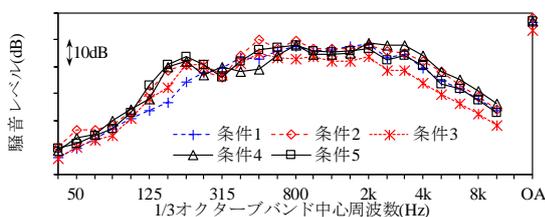


図8 近傍音の比較結果

4. まとめ

継目部へのUSPの導入による列車走行時のレール、まくらぎ、路盤の各振動特性および継目部近傍での発生音への影響を評価するため、営業線にて走行試験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ①レールの振動加速度について、800Hz以上での値が高かった。同帯域はレール特有の振動がおよび車輪からの振動伝達の影響が顕著であり、USP有無の差異は小

さいと考えられた。

- ②まくらぎの振動加速度について、80Hz～315Hzでの値が高く、レールの振動加速度に対する周波数応答関数の比較から、USPの導入によって63Hz～500Hzでまくらぎの振動は増加することが確認された。

- ③路盤の振動加速度について、レールの振動加速度に対する周波数応答関数での比較結果から、USPの導入によって63Hz以上で値が低下することが確認された。ただし、63Hzより低い周波数ではレールの締結間隔等のUSP有無以外の要因によってばらつきが生じ、明確な差異は認められなかった。

- ④継目部近傍での発生音は、USPの導入によってまくらぎ振動に起因した125Hz～250Hz付近で顕著な差異が確認された。ただし、全体音への影響が大きい500Hz以上では、レールや車輪からの発生音の寄与が高いほか、継目部遊間量等のレール継目状態の違いによる影響により、USP有無での明確な差異は確認できなかった。

今後は、インパルスハンマーを用いた打撃試験やレール継目状態の違いに着目した理論的な解析等によって、継目部へのUSP有無による各軌道部材への影響評価を行う。また、USP有無と道床沈下量との相関評価を行い、USPが道床沈下進みへ与える影響について評価を行う。

参考文献

- 1) 三浦重, 大石不二夫, 横田敦, 堀池高広: 実用形有道床弾性まくらぎの開発, 鉄道総研報告, vol.4, No.5, pp.9-17, 1990.
- 2) 堀池高広, 半坂征則, 柳川秀明, 安藤勝敏, 伊達和寛: 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, pp.35-40, 1998.
- 3) 須江政喜, 澁谷聡一, 熊倉孝雄: 有道床弾性まくらぎにおける弾性材の物性に関する研究, 第22回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2015.
- 4) 浦川文寛, 間々田祥吾, 鈴木実, 佐藤大悟, 河野昭子: 発泡ゴム系まくらぎパッドによるバラスト・路盤振動低減効果とその検証, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2, pp.727-737, 2018.
- 5) 佐藤大悟, 間々田祥吾, 鈴木実, 浦川文寛: 発泡ゴムを用いた弾性まくらぎによる有道床区間での振動騒音特性評価, 第28回環境工学総合シンポジウム講演論文集, セッションID105, 2018.
- 6) Batjargal Sodbilig, 阿部和久, 紅露一寛: まくらぎ配置がレールの振動・騒音特性に及ぼす影響, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.18, pp.23-30, 2014.
- 7) 末木健之, 北川敏樹, 川口二俊: レール継目部から発生する衝撃音の騒音・振動特性評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.5-10, 2016.
- 8) 本野貴志, 今城正嗣, 間々田祥吾: 有道床弾性まくらぎの分岐器への適用について, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.265-268, 2012.