

継目部弾性まくらぎによる道床振動低減効果に関する考察

○ [土] 浦川 文寛 [土] 渡辺 勉 [土] 箕浦 慎太郎

[機] 佐藤 大悟 [機] 間々田 祥吾 [土] 河野 昭子 (鉄道総研)

Study on the Vibration Reduction Effect of the Ballast with Under Sleeper Pads at the Rail Joint

○Fumihiro Urakawa, Tsutomu Watanabe, Shintaro Minoura,

Daigo Sato, Shogo Mamada, Akiko Kono, (Railway Technical Research Institute)

In order to verify the vibration reduction effect of applying USPs (Under Sleeper Pads) to the rail joint, we measured the track acceleration as the train passing at the place where two types of USPs were installed in the sleepers of the rail joint. On the rail joint, the rail acceleration proportional to the train speed were measured due to the impact load. The results of the measurement and the mode analysis showed that the transfer function of the acceleration of the ballast and the roadbed to the rail acceleration peaks near the natural frequencies related to the vertical movement of the track, and the impact load transmission to the ballast and the roadbed decreases in the frequency band above 25 Hz including these peaks.

キーワード: まくらぎ下弾性材, レール継目, 衝撃荷重, 道床加速度, 路盤加速度

Key Words: USPs (Under Sleeper Pads), rail joint, impact road, ballast acceleration, roadbed acceleration

1. はじめに

既往研究¹⁾より, 車両通過時にレール継目部においては, 静止輪重 P_{SP} と高低変位による変動輪重 ΔP_{SP} に加え, 走行速度 V に比例する衝撃荷重 $\Delta P_{UNSP} (= P_{SP} \times \eta V / 100)$ が発生する. ここで, η は継目の凹凸形状が関係するパラメータである. 軌道沈下は輪重が道床や路盤に伝達することで進行するため, 図1に示すように, 中間部と比較してこの衝撃荷重 ΔP_{UNSP} の分だけ軌道沈下が進み, レール継目部付近で高低変位が発生する¹⁾. 本稿では, 継目部およびその前後まくらぎにまくらぎ下弾性材 (以下「USP (Under Sleeper Pad)」) を適用した際の, 道床と路盤への衝撃荷重伝達の低減効果を, 営業線での列車通過時の道床と路盤の

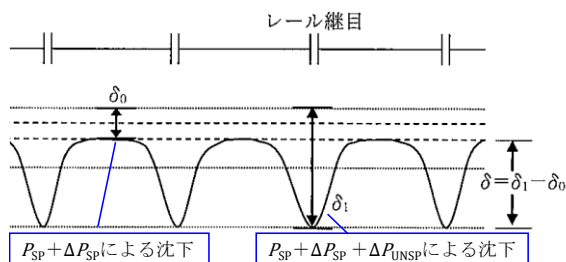


図1 レール継目部の高低変位¹⁾

振加速度測定により評価する。

2. USP による道床と路盤の振動低減効果

筆者らは文献²⁾にて, USP を適用することで, 道床とまくらぎの上下動に関する2つの固有振動数の40Hz付近と100Hz付近, およびその高周波側で, 道床と路盤の伝達関数 (出力/入力, ここでは出力を道床・路盤の振動加速度, 入力を輪重) が低下することを示した. この原理を模式的に示したものが図2である. 道床と路盤の伝達関数は, 軌道の固有振動数付近でピークとなる. USP を使用することでまくらぎの支持剛性が低下し, 固有振動数が下がって高

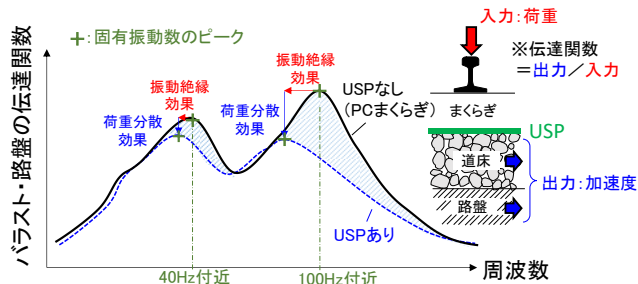


図2 USPによる伝達関数の低減効果²⁾

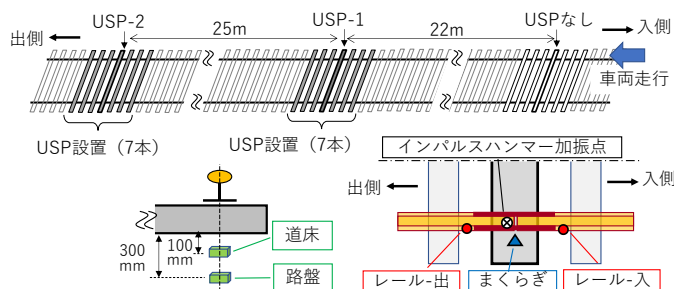


図3 列車通過時の軌道各部の加速度応答測定

表1 USPの動ばね特性

条件	USPの動ばね(10Hz 載荷時)		備考
	支持弾性係数*	損失係数	
USPなし	—	—	
USP-1	0.14 N/mm ³	0.21	発泡ウレタンゴム製 ゲッツナー社製
USP-2	0.18 N/mm ³	0.28	SLB-1510

※単位面積当たりのばね定数

周波側の伝達関数が低下する（所謂「振動絶縁効果」）。また、レール変位が増加してより広範囲のまくらぎが荷重を支持する所謂「荷重分散効果」によりピークも低下し、その結果、図2の網掛け部で伝達関数が低下する。

このように、道床と路盤の振動低減効果を評価する上では、軌道の固有振動数が重要であるため、次章の営業線での測定では、まずインパルスハンマーによる加振応答測定を行って固有振動数を抽出する。その後、列車通過時の振動測定結果とその周波数分析結果と固有振動数を比較する。ここで、衝撃荷重と周波数の関係は明確に定義されていないが、本稿では、前章で述べた R_{sp} 、 ΔR_{sp} 、 ΔP_{UNSP} の関係より、 R_{sp} と ΔR_{sp} の最短波長をそれぞれ 2.1m（軸距）、3m（マヤ車の偏心矢で実用上検出可能な軌道変位の最短波長）、列車速度を 100km/h（27.8m/s）と仮定した場合の最大載荷周波数 13Hz（ $\approx 27.8\text{m/s} / 2.1\text{m}$ ）以上を衝撃荷重 ΔP_{UNSP} と定義する。

3. 列車通過時のレール継目部の応答測定

3.1 測定条件

在来線の有道床軌道のレール継目部（支え継）を対象に、USPなしとあり（USP-1、USP-2）による加速度応答を比較する。図3に示すとおり、列車が進入する側を「入側」、退出する側を「出側」とし、入側から連続した3継目に対し、USPなし、USP-1、USP-2の3条件を設定した。USPは、1条件毎に継目直下とその前後3本（計7本）のまくらぎに対して設置した。USPの物性については表1を参照のこと。振動加速度の測点は、継目板両端付近のレール腹部：「レール入／出」、レール締結部付近の継目部まくらぎ上面：「まくらぎ」、およびレールと継目部まくらぎ交点のまくらぎ底面から深さ100mm：「道床」、300mm：「路盤」をとり、それぞれ鉛直方向の加速度を測定した。加速度測定に使用したセンサは、レールはリオン社製 PV-94、まくらぎ・路盤はリオン社製 PV-85、道床はPCB社製 356A44

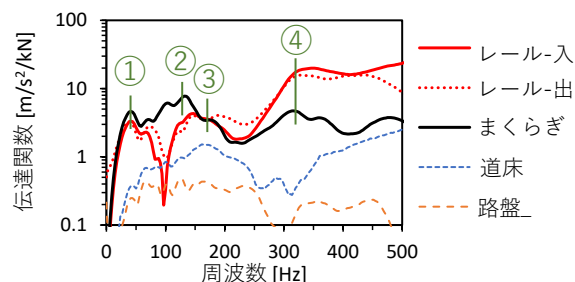
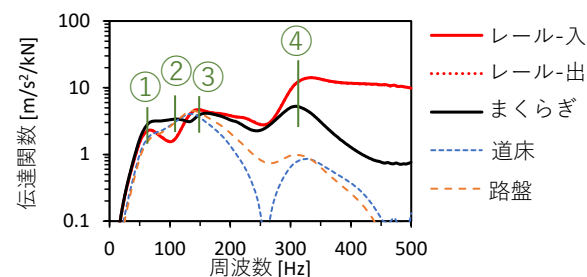
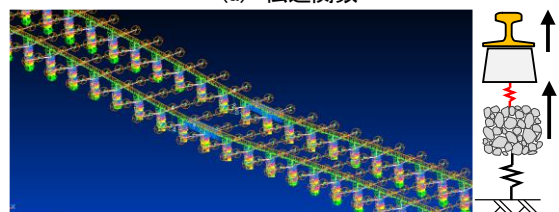


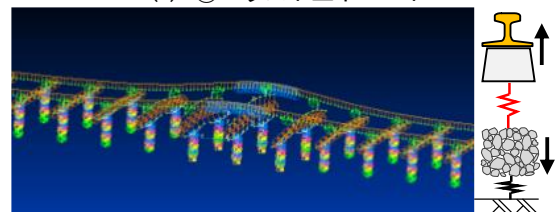
図4 インパルスハンマー試験による伝達関数(加速度/加振力)の測定結果と固有振動数の抽出 (USPなし)



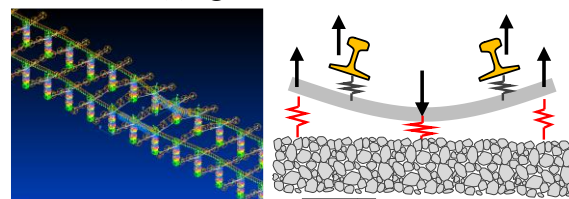
(a) 伝達関数



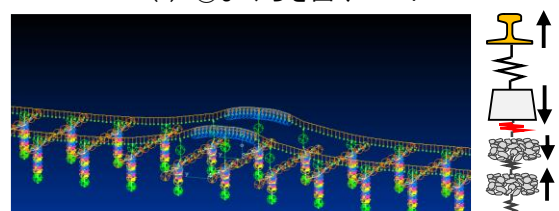
(b) ①バラスト上下モード



(c) ②まくらぎ上下モード



(d) ③まくらぎ曲げモード



(e) ④レール上下モード

図5 軌道のFEM解析結果

である。軌道線形は直線、レールは JIS 60kg、まくらぎはプレストレスと今クリート製、締結装置はファーストクリップである。列車は、11時～13時に当該試験箇所を通過した普通列車7編成を測定対象とした。

3.2 インパルスハンマー試験による固有振動数の抽出結果

インパルスハンマー（PCB 社製，086D50）にて出側の継目レール端部を鉛直下向きに加振し，各部の伝達関数（加速度／加振力）を測定した（図 4 参照）．さらに，図 5 に示す軌道の FEM（Nastran 使用）解析結果²⁾との比較より，上下動に関する 4 つの固有振動数，①バラスト上下モード（図 6(b)），②まくらぎ上下モード（図 6(c)），③まくらぎ曲げモード（図 6(d)），④レール上下モード（図 6(e)）を図 5 のとおり抽出した．固有振動数の抽出結果の一覧を表 2 に示す．表より，各モードの固有振動数は，①バラスト上下モードは 50Hz 付近，②まくらぎ上下モードは 100Hz 付近，③まくらぎ曲げモードは 150Hz 付近，④レール上下モードは 300Hz 付近に存在することが分かる．ただし，列車通過時の固有振動数は，輪軸質量によりインパルスハンマー加振時よりも下がることに注意されたい³⁾．また，プレロードのないインパルスハンマー試験では浮きの影響が大きいため，条件間の伝達関数や固有振動数の差には言及しない．

3.3 列車通過時の加速度応答の測定結果

ここでは USP の有無による，(1)時刻歴応答の最大値，(2)周波数応答の比較を行う．図 6 に，レール入の 1 編成通過時の加速度測定結果を示す．当該試験箇所の出側に停車駅があり，先頭車両が試験箇所を通過した後，後続車両は減速しながら通過したため，測定した 7 編成では，先頭台車の速度 V は 90km/h 前後だったが，最終台車は編成によって 50km/h～90km/h の範囲でばらつきが生じた（図 6 参照）．そこで，(1)最大値の比較では速度との関係を調べるため最終台車を，(2)伝達関数の比較では 7 編成の平均をとるため先頭台車の測定値を参照することとした．

(1) 時刻歴応答の最大値

最終台車通過時の，加速度測定値の最大値（鉛直上向きと下向きの両振幅）と列車速度の関係を図 7 に示す．図 7(a)より，レール加速度の最大値と列車速度には明確な比例関係が得られており，1 章で述べた速度に比例する衝撃荷重 ΔP_{UNSP} により，レール加速度が速度とともに増加したものである．速度 91km/h における最大値は，USP なしで 1270m/s²，USP-1 で 890 m/s²，USP-2 で 1670m/s² であり，条件間の差はあるものの，USP の有無による差は見られない．図 7(b)より，まくらぎ加速度の速度 91km/h における最大値は，USP なしで 130m/s² であるのに対し，USP-1 では 670 m/s²，USP-2 では 730m/s² と，USP なしと比較して加速度が 5 倍以上大きくなった．道床加速度の最大値は，USP なしの方があり（USP-1，USP-2）よりも 2 倍程度大きく（図 7(c)参照），路盤振動加速度の最大値は，USP の有無で差はあまり見られない（図 7(d)参照）．

(2) 周波数応答

図 8 に，先頭台車通過時の振動加速度レベルの 1/3 オクターブバンド分析結果（7 編成の平均）を示す．また，同図には，3.2 節のインパルスハンマー試験にて抽出した固

表 2 固有振動数の抽出結果

条件	①バラスト 上下モード	②まくらぎ 上下モード	③まくらぎ 曲げモード	④レール 上下モード
USP なし	44 Hz	103 Hz	160 Hz	317 Hz
USP-1	65 Hz	100 Hz	144 Hz	305 Hz
USP-2	58 Hz	100 Hz	150 Hz	307 Hz

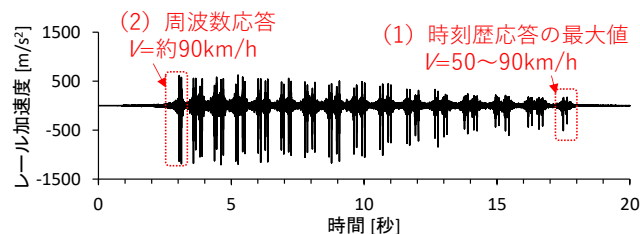


図 6 1 編成通過時のレール加速度の測定結果一例

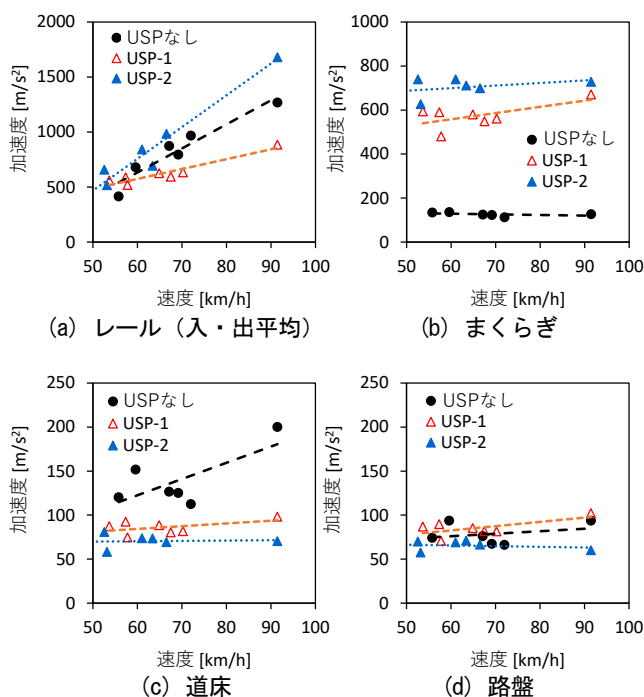


図 7 加速度の最大値と列車速度との関係

有振動数も示している．図 8 より，まくらぎ加速度は，②まくらぎ上下モード，③まくらぎ曲げモードを含む 100Hz～200Hz の周波数帯でピークとなり，そのピーク値は，USP なしでは 110dB 以下だが，USP-1 と USP-2 では 120dB 以上と，USP の設置により加速度が大きく増加した．図 5(b),(c)より，まくらぎ上下モードとまくらぎ曲げモードは，USP を設置しているまくらぎ底面と道床との相対変位が大きいモードであるため，これらのモードを含む周波数帯付近で，USP による応答の変化が顕著に現れたと考えられる．前項にてまくらぎ加速度の最大値が，USP-1 と USP-2 では USP なしより 5 倍以上大きいのは，この周波数帯の応答の差によるものである．レールについても，この周波数帯のピークが 6dB 程度増加するが，レールの振動加速度レベルが高いのは 400Hz 以上の周波数帯であるため，100Hz～200Hz の応答の変化は，前項の加速度の最大値にはあまり影響していない．道床と路盤の振動加速度レ

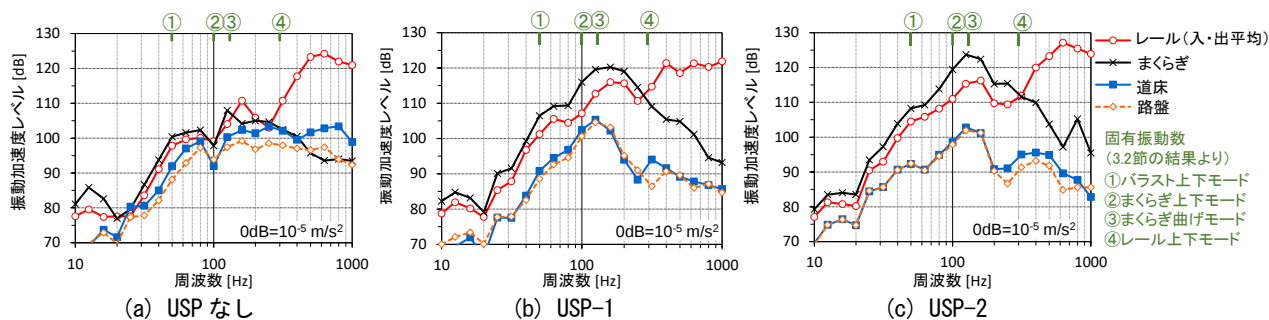


図8 先頭台車通過時の振動加速度レベルの1/3オクターブバンド分析結果

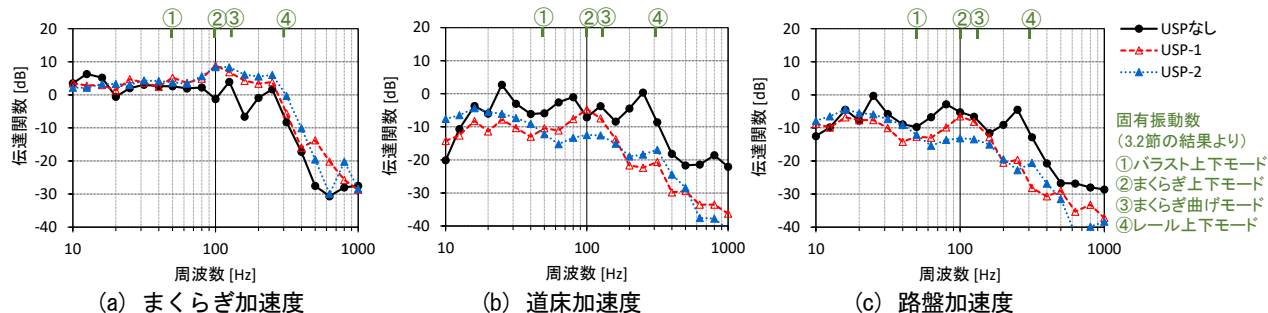


図9 列車走行時の伝達関数（出力：各部の加速度／入力：レール加速度）の1/3オクターブバンド分析結果

ベルは周波数とともに上昇し、USP なしでは 100Hz 以上の周波数帯にて 100dB 前後で概ね横ばいとなり、USP-1 と USP-2 では 125Hz 付近でピークとなった後、急激に減衰した。

図 9(a),(b),(c)に、レール加速度（入・出平均）を入力とした、まくらぎ、道床、路盤の伝達関数を示す。図 9(b),(c)より、USP なしの道床と路盤の伝達関数は、1/3 オクターブバンド中心周波数 25Hz、80Hz、250Hz でピークとなり、このピークを含む 25Hz 以上の周波数帯で、USP-1 と USP-2 の伝達関数が USP なしと比較して低下した。ここで、伝達関数のピークが、インパルスハンマー試験で抽出した固有振動数よりも若干低い周波数帯に現れるのは、前述のとおり、列車通過時の固有振動数が輪軸質量によってインパルスハンマー試験時よりも低下したためと考えられる。

以上、レール継目部近傍のまくらぎに USP を設置することで、継目部で発生した衝撃荷重の道床と路盤への伝達が 25Hz 以上の周波数帯で低減することを、営業線での測定により確認することができた。なお、図 9(a)より、25Hz 以上の周波数帯で、USP によりまくらぎ加速度の伝達関数が増加するが、これは USP によりまくらぎから道床への振動伝達が低下したことで、まくらぎに残留する振動エネルギーが増加したためと考えられる。

4. まとめ

本稿では、レール継目部に USP を適用した際の道床と路盤への衝撃荷重伝達の低減効果を検証するため、レール継目部とその近傍のまくらぎに 2 種の USP (USP-1, USP-2) を設置し、列車通過時の軌道各部の加速度を測定し、インパルスハンマー試験と FEM 解析結果より抽出した固有振動数と比較した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 当該試験箇所では、50Hz 付近にバラスト上下モード、100Hz 付近にまくらぎ上下モード、150Hz 付近にまくらぎ曲げモード、300Hz 付近にレール上下モードの固有振動数が存在する。
- ・ レール継目部近傍のレールでは、列車通過時の衝撃荷重により、列車速度に比例する加速度が生じた。
- ・ レール加速度を入力とした、道床と路盤の加速度の伝達関数は、上述の固有振動数付近でピークとなり、このピークを含む 25Hz 以上の周波数帯で、USP-1 と USP-2 の伝達関数が USP なしと比較して低下した。

5. 今後の展望

本稿では、レール継目部の高低変位の原因となる、衝撃荷重の道床と路盤への伝達が、USP により低下することを確認した。今後は、試験箇所における高低変位のモニタリングを継続し、USP による高低変位の抑制効果の検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 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，付属資料 17，pp. 303-304，2012。
- 2) 浦川文寛，河野昭子，鈴木実，間々田祥吾，佐藤大悟：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），74 巻，2 号，pp. 727-737，2018。
- 3) 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，第 23 回鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2016），S2-4-1，2016。