

軌道振動特性に着目した波状摩耗抑制効果の検証

○ [土] 清水 惇 [土] 田中 博文 (鉄道総合技術研究所)

齊藤 勝治 (九州旅客鉄道)

Verification of Rail Corrugation Inhibitory Effect which observed Track Vibration Characteristic

○Atsushi Shimizu, Hirofumi Tanaka (Railway Technical Research Institute)

Syoji Saito (Kyushu Railway Company)

Rail corrugation causes large noise and vibration problem, and also by wheel load variations, causes higher degradation of a track component and has become a great burden in track maintenance. Then, we focused on the track vibration characteristic and the low spring constant type fastening system aiming at inhibiting the rail corrugation was installed on trial. We measured track vibration by impulse test in two sections where fastening systems is different. In addition, we carried out track vibration measurement when operating train is running. As a result, track vibration was reduced by the frequency band equivalent to the wavelength of rail corrugation by the low spring constant type fastening system.

キーワード：レール波状摩耗，締結装置，軌道振動特性，衝撃加振試験

Keywords：rail corrugation, fastening system, track vibration, impulse test

1. はじめに

急曲線部の内軌では，レール頭頂面に波長数～十数 cm 程度の波状摩耗が発生することがある．波状摩耗は騒音・振動問題の原因となるほか，輪重変動によって軌道部材の劣化を引き起こし，さらには軌道変位の進行を助長するなど，軌道保守量増大の要因となっている．

波状摩耗が発生するメカニズムは諸説あるが，その一因として，軌道構造の違いが影響していることがわかっている^{1), 2)}．これは軌道振動特性の違いにより，輪重・横圧変動が異なるためであると著者らは考えている．

そこで，本研究では，バラスト軌道において内軌波状摩耗が発生している区間を試験対象に選定し，検証を行った．まず，波状摩耗抑制を目的とした低ばね定数型の締結装置を試験敷設し，同一曲線内における試験敷設区間と既存の締結装置敷設区間，それぞれにおいて衝撃加振試験を実施した．また，営業列車走行時の軌道振動測定を合わせて実施し，締結装置の違いによる軌道の振動特性を把握し，波状摩耗の抑制効果を検証した．

2. 試験概要

(2-1) 試験区間の概要

図 1 に，試験区間および試験測線を示す．当該箇所は，単線，バラスト軌道で，半径 350m，カント 105mm の急曲

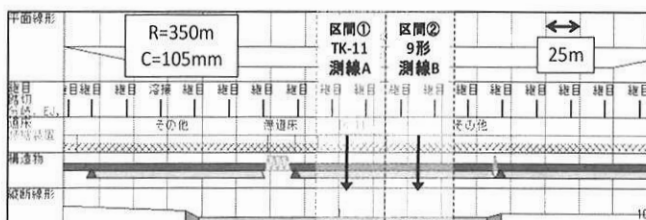


図 1 試験測線の位置関係

線区間となっている．図 2 に示すように，当該曲線においては，試験前にレール凹凸連続測定装置³⁾を用いた凹凸測定を行い，全体的に内軌波状摩耗が発生していることを確認した．波状摩耗の波長は約 17cm であり，列車が 70～90km/h (当該線区の半径 350m の走行速度) で走行した場合，約 120～150Hz の輪重・横圧変動が生じることになる．一方で，曲線中で波状摩耗の波高が変化していたが，その中で波高の大きい区間を試験対象とし，試験測線を決定した．ここで，本試験区間のうち，波状摩耗抑制型レール締結装置（以下，TK-11 とする）を試験敷設した区間を区間①，既設の 9 形締結装置（以下，9 形とする）が敷設されている区間を区間②とした．両区間とも軌道構造は，50N レール，盛土，6 号 PC まくらぎである．

図 3 に，TK-11 と 9 形の支持ばね構造の違いを示す．今回試験敷設した TK-11 は，急曲線用に開発された低ばね定数型複合弾性締結装置であり，タイプレートの上下に配置された 2 枚のパッドで列車荷重を受ける構造となっている．

このパッドのばね定数は 2 枚とも 70MN/m で、合成ばね定数は 35MN/m となり、通常の軌道パッド (110MN/m) よりも低いばね定数となっている。なお、既設の 6 号 PC まくらぎにそのまま使用することが可能であるが、タイプレートおよび軌道パッドによりレールが 20mm こう上される。

当該線区を日常的に走行する列車は、特急形電車 (制御振子)・特急形電車 (非振子)・通勤形電車の 3 種類である。試験曲線の走行速度は各車両形式によって異なり、特急形電車 (制御振子) は 90km/h、特急形電車 (非振子) は 85km/h、通勤形電車は 80km/h で設定されている。また、上下線方向ともにほぼ等速区間となっている。年間通過トン数は約 600 万トンであり、その大部分を特急形電車が占めているため、本稿では特急形電車 (制御振子) に着目し、分析を行った。

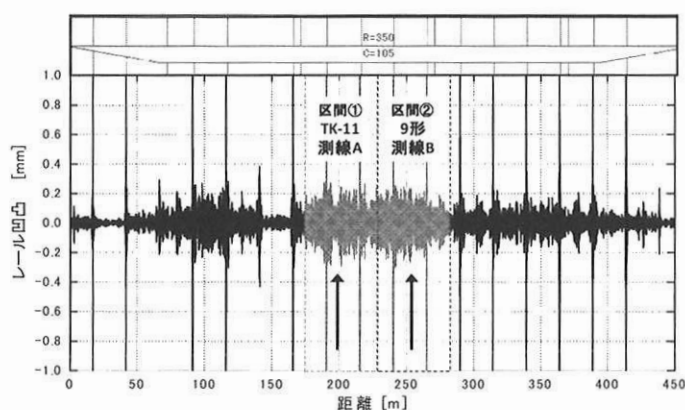


図 2 レール凹凸量 (試験前・内軌)

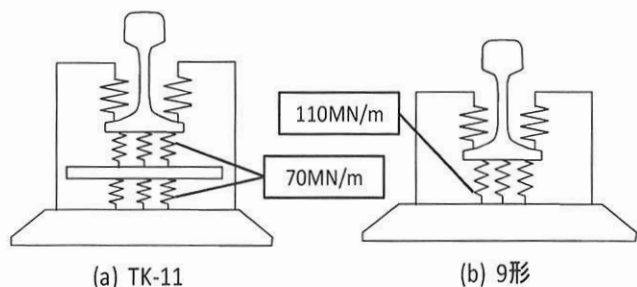


図 3 TK-11 と 9 形の支持ばね構造の違い

〈2・2〉試験方法

(1) 測定概要

インパルスハンマーによる衝撃加振試験および営業列車走行時の軌道振動測定を、図 1 の測線 A と測線 B の 2 測線で実施した。なお、両測線は、継目の影響をできる限り受けないように、それぞれ継目から離れたレール一般部とした。図 4 に、加速度ピックアップの取り付け位置を示す。両測線において、測定点の配置は同じである。加速度ピックアップは、左右レールの絶縁を確保するためにベークライトの台座を介して設置した。内外軌の外側底部で上下・左右方向のレール振動加速度を、PC まくらぎの端部上面で、上下・左右方向のまくらぎ振動加速度を測定した。

衝撃加振試験に用いたインパルスハンマーは、PCB 社製 086D50 型を用い、打撃チップはハードタイプとした。イン

パルスハンマーの加振点は、加速度ピックアップを取り付けた位置から、まくらぎ 1 本移動した締結装置直上とし、レール頭頂部 (レール上下)、およびレール頭側部 (レール左右) の加振を行った。

営業列車走行時の軌道振動測定は、衝撃加振試験と同じ位置に加速度ピックアップを設置し、測定を行った。なお、衝撃加振試験と軌道振動測定は、6 頭式削正車によってレール削正を行いレール凹凸を除去した後に行っている。

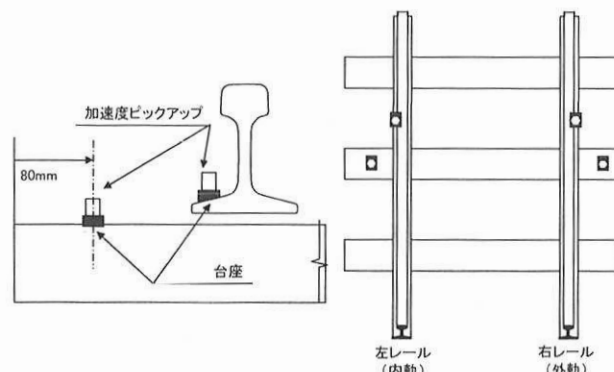


図 4 加速度ピックアップの取り付け位置 (測線 AB 共通)

(2) データ分析方法

測定データは、TEAC 社製の LX-110 を用い、サンプリング周波数 12kHz で収録した。このデータを、パソコン上の信号処理ソフトによって周波数分析した。

衝撃加振試験では、周波数分析時の FFT 次数を 4096 次、ウィンドウ関数は BOX、データ抽出時間は 0.4 秒とした。まず、各々の加振点に対して 10 回程度行った打撃のうち、加振力のパワースペクトルが安定している 3 試番程度を選び、加振力のパワースペクトル、アクセラランスの平均を求めた。

営業列車における軌道振動測定では、周波数分析時の FFT 次数を 4096 次、ウィンドウ関数は BOX、データ抽出時間は 8 秒とし、各測点でのパワースペクトルを求めた。

3. 衝撃加振試験結果

〈3・1〉レール上下加振時のアクセラランス

図 5 に、内軌頭頂部を上下加振した際の内軌側のレールおよびまくらぎのアクセラランスを示す。

まず、図 5(a) に示すように、レールのアクセラランスは、TK-11 では 60Hz 付近、9 形では 100Hz 付近にゆるやかなピークが見られる。また、TK-11 では 100Hz~150Hz にかけてアクセラランスの低下が見られる。一方、TK-11 では 300Hz にあるピークが、9 形ではそれよりも高い 350~400Hz 付近に見られる。

前述したように、レール削正前に見られた波状摩耗の波長に起因する輪重・横圧変動は約 120~150Hz であることから、100Hz~150Hz にかけてのアクセラランスの低い TK-11 を設置することにより、輪重・横圧変動が減少し、波状摩

耗の抑制効果が期待できる。

次に、図 5(b)に示すように、まくらぎのアクセラランスは、200Hz 以下の帯域での締結装置の違いによる明確な差異は見られないが、レールでのアクセラランスと同様に、TK-11 で 300Hz にあるピークが、9 形ではそれよりも高い 350~400Hz 付近に見られる。また、それよりも高い周波数帯域では、TK-11 の方がアクセラランスが小さいことがわかる。これは波状摩耗の抑制に直接影響があるとは言えないが、低いばね定数の TK-11 にすることにより、高周波の振動が低減されていると考えられる。

〈3・2〉 レール左右加振時のアクセラランス

図 6 に、内軌頭頂部を左右加振した際の内軌側のレールおよびまくらぎのアクセラランスを示す。いずれのアクセラランスも締結装置の違いによる明確な差異は見られない。無載荷状態において、インパルスハンマーで瞬間的な衝撃を与える衝撃加振の左右方向の振動に対しては、締結装置の違いは小さいと考えられる。

4. 列車走行時の軌道振動測定結果

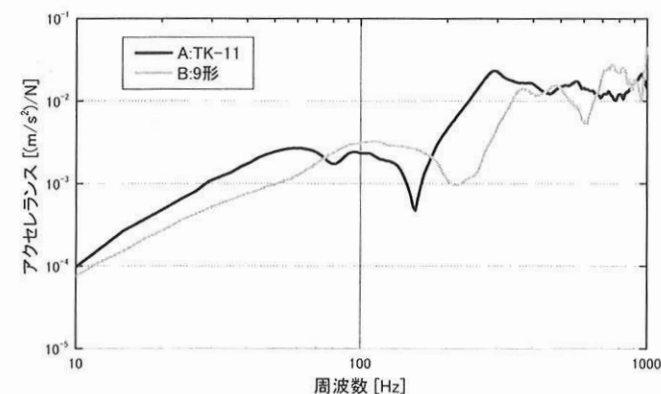
〈4・1〉 上下振動加速度のパワースペクトル

図 7 に、レール削正 7 日後に測定した列車走行時の内軌

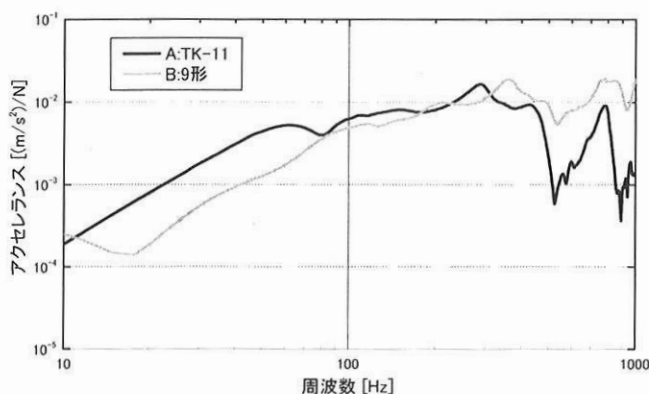
側のレールおよびまくらぎにおける上下振動のパワースペクトル密度を示す。通過車両は特急形電車（制御振子）で、走行速度は 89km/h である。レール上下振動については、パワーの差はあるが、ピーク周波数はほぼ同じであり、締結装置の違いによる差異は見られない。まくらぎ上下振動では、400Hz よりも高い周波数帯域では同じく変化は見られないが、400Hz 以下の帯域で、TK-11 の方がパワーが低下していることが確認できる。これは、TK-11 がレール-まくらぎ間において 400Hz 以下の帯域の振動を低減していると考えられ、内軌波状摩耗の波長に相当する 150Hz 付近の帯域がここに含まれることから、波状摩耗の抑制効果が期待できる。

〈4・2〉 左右振動加速度のパワースペクトル

図 8 に、同じくレール削正後に測定した列車走行時の内軌側のレールおよびまくらぎにおける左右振動のパワースペクトル密度を示す。レール左右振動については、ピーク周波数が TK-11 では約 700Hz、9 形では約 400Hz と違いが見られ、締結装置のばね定数の違いによる結果であると考えられる。まくらぎ左右振動では、上下振動と同様に、400Hz よりも高い周波数帯域では明確な差異は見られないが、400Hz 以下の帯域で、TK-11 の方がパワーが低下しているこ

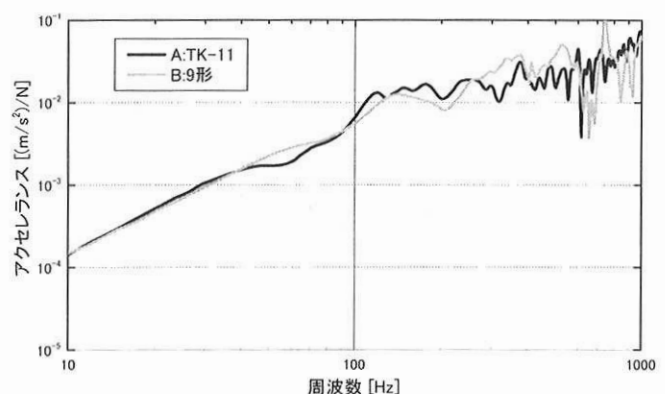


(a) レール

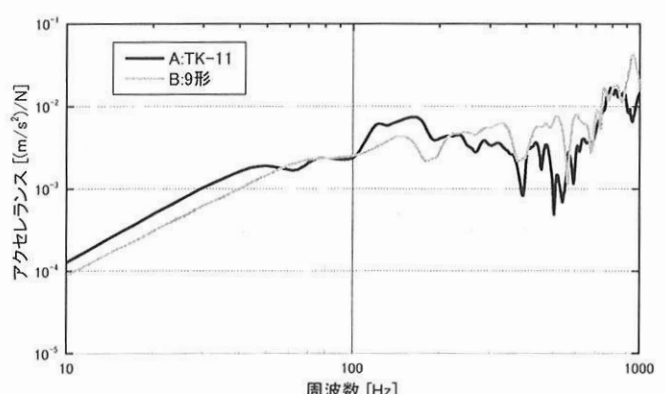


(b) まくらぎ

図 5 内軌上下加振時のアクセラランス（内軌側）



(a) レール



(b) まくらぎ

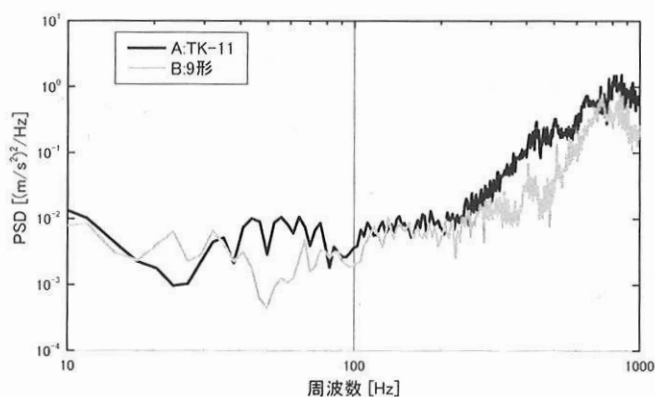
図 6 内軌左右加振時のアクセラランス（内軌側）

とが確認でき、左右振動においても締結装置により振動が軽減されていることがわかった。

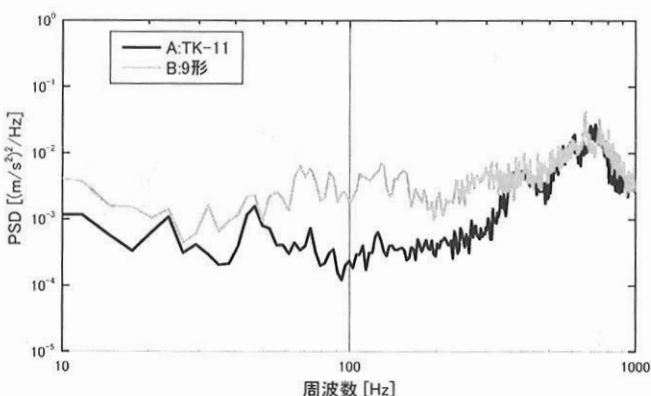
5. おわりに

本稿では、バラスト軌道の内軌波状摩耗が発生している急曲線区間の軌道振動特性に着目し、その特性の検証を行った。低ばね定数型の締結装置を試験敷設し、衝撃加振試験、営業列車走行時の軌道振動測定を実施した結果、以下のことがわかった。

- (1) 上下方向の軌道振動特性では、当該曲線で発生していた内軌波状摩耗の波長に相当する周波数帯域で、既設の締結装置よりもアクセラランスが小さくなっていることが確認できた。同様に、列車走行時の軌道振動測定でも、レール-まくらぎ間での振動軽減の効果が確認できた。
- (2) 左右方向の軌道振動特性については、衝撃加振試験では明確な差が見られなかったが、列車走行時の軌道振動測定においては上下振動と同様に振動軽減の効果が確認できた。



(a) レール



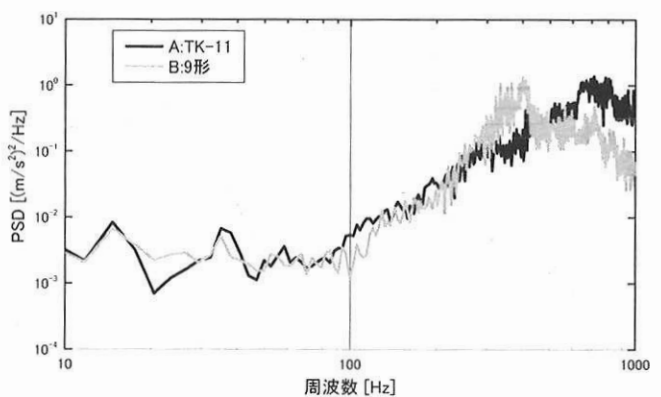
(b) まくらぎ

図 7 列車走行時の上下振動のパワースペクトル
(内軌側)

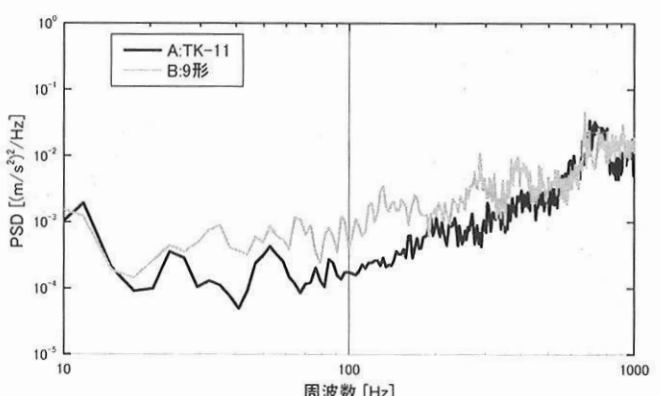
以上より、低ばね定数型の締結装置により、内軌波状摩耗の波長に相当する周波数帯域で振動が軽減されていることが確認できた。今後は、列車走行時のレール変位から更なる軌道振動特性の違いを明確にすることや、レール凹凸連続測定装置を用いて定期的にレール凹凸を測定することで波状摩耗進みの状況を把握し、今回試験敷設した低ばね定数型の締結装置の波状摩耗抑制効果を別途報告する予定である。

文 献

- (1) 地子給和行, 菊池圭介, 田中博文: りんかい線における波状摩耗の実態, 日本鉄道施設協会誌, vol.15, 50, 2011.6
- (2) 田中博文, 清水淳, 古川敦, 菊池圭介, 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, 22, 2011.7
- (3) 田中博文, 清水淳: 波状摩耗測定用の可搬型レール凹凸連続測定装置の開発, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, 2011



(a) レール



(b) まくらぎ

図 8 列車走行時の左右振動のパワースペクトル
(内軌側)