

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

田中 博文* 古川 敦* 横山 秀史**
長谷川 雅彦*** 金尾 稔#

Measures and Evaluation by Track for Decreasing Environmental Vibration in Shinkansen

Hirofumi TANAKA Atsushi FURUKAWA Hidefumi YOKOYAMA
Masahiko HASEGAWA Minoru KANAWO

We were confronted with the ground vibration problem of the housing areas located over the Shinkansen tunnel which has thin overburden. At first, as measures in the track, the rail pad was exchanged for low elastic type to decrease the track stiffness. As a result, the vibration of 50Hz band has decreased. However, the vibration that originates in the rail has not decreased, since it had a remarkable ruggedness of wavelength 2.5m. Then, we executed rail grinding of the long wavelength as smoothing the rail ruggedness. Consequently, the vibration of 12.5Hz that originates in the rail ruggedness has decreased this time. Therefore, it has been revealed that these measures are effective to decrease the ground vibration.

キーワード：軌道振動，軸箱加速度，レール凹凸，低ばね軌道パッド，ブロック削正，地盤振動

1. はじめに

九州新幹線の土被りの小さいトンネル上部の住宅地において、環境庁勧告の指針値は満たしていたものの、列車走行時の地盤振動に意見が寄せられる事例があった。本報告は、この事例に対し、軌道側で実施した対策とその評価について報告するものである。

一般的に、このような地盤振動には、軌道支持ばねの低ばね化が有効であるとされている^{1), 2)}。そこで、まずトンネル内の有道床軌道区間において、軌道支持ばね定数を下げのために、軌道パッドを低ばねのものに交換した。また、その後の調査で、2.5m程度の波長に対応する周波数帯域の振動が卓越していることがわかった。さらに、復元高低変位についても波長2.5mの周期的な凹凸が卓越していた。そこで、軌道への加振力の低減策として、削正車による長波長レール削正（ブロック削正）を実施した。そして、それぞれの対策前後でトンネル内において振動測定および営業車による軸箱加速度測定を行い、それらの効果を評価した。合わせて、レール削正前後において現地で測定したレール凹凸を用いて列車の走行シミュレーションを実施し、レール凹凸が地盤振動に与える影響について評価した。

* 軌道技術研究部（軌道管理）
** 防災技術研究部（地質）
*** (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部
九州新幹線建設局
九州旅客鉄道株式会社 鉄道事業本部 新幹線部
新幹線環境対策室

2. 軌道パッド交換による効果の検証

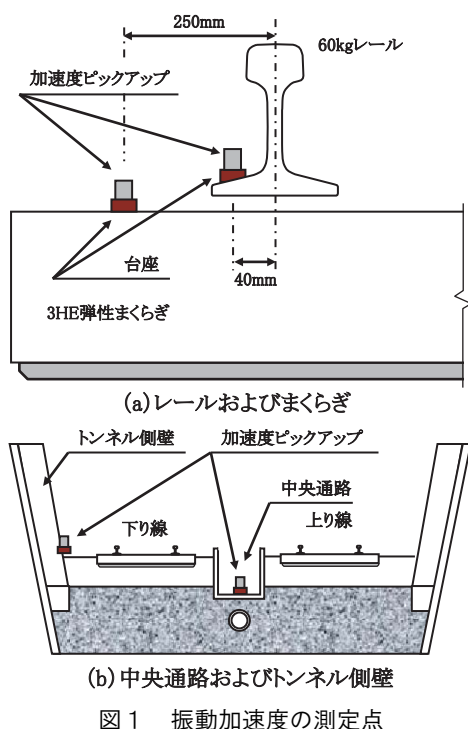
当該トンネルにおいては、軌道支持ばねの低ばね化の一環として、建設時に既に有道床弾性まくらぎが敷設されていた。しかし、トンネル上部の住宅地において地盤振動が問題となったため、さらなる軌道支持ばねの低ばね化を目的として、軌道パッドを公称ばね定数50MN/mタイプから20MN/mタイプのものに交換した。

2.1 トンネル内の振動特性の変化

低ばねタイプの軌道パッドの交換による振動低減効果を検証するために、交換前後で軌道を含むトンネル内各部の振動加速度を測定した。図1に、トンネル内における振動加速度の測定点を示す。測定点は、下り線のレール、まくらぎ、中央通路およびトンネル側壁である。

なお、当該トンネルはシラス地山に建設されており、地下水の排水を考慮して一部区間で水砕スラグを用いた透水性路盤が採用されている³⁾。振動測定を実施した区間のトンネル路盤も透水性路盤であった。

図2に、軌道パッドの交換前後での振動測定結果の一例として、トンネル側壁における1/3オクターブバンドスペクトルを示す。なお、振動加速度レベルは、パッド交換前のオールパス(AP)値を0dBとして表記している。同図より、スペクトルには50Hz付近にピークが見られ、その付近の周波数帯域において振動低減効果が見られた。それに伴い、振動加速度レベルのオールパス値でも



4dB程度の低下が見られた。なお、当該トンネルは駅近傍に位置しており、試験測線を通過する列車の走行速度は200km/h未満である。ここで、列車速度が115km/hの場合、軌道の締結装置間隔0.581m(43本/25m)によって励起される振動数は55Hz程度となる。また、一般的に、列車のばね下質量の固有振動数も50~60Hz程度と言われている⁴⁾。軌道パッドを低ばねタイプのものに交換したことにより、主要なピークである50Hz帯域の振動が低減したためオールパス値も低下したと考えられる。

なお、10~25Hz程度の帯域の振動加速度レベルに着目すると、12.5Hz付近に鋭敏なピークがみられるが、このピークは軌道パッドの交換前後で大きな変化は見られない。

2.2 軸箱加速度の変化

図3に、軌道パッドの交換前後において営業車で測定した軸箱加速度のパワースペクトルを示す。同図より、低ばねタイプの軌道パッドへの交換後に55Hz付近のピークが低下しており、この周波数帯域における軌道への加振力が低減されたことがわかる。これによって、図2に示したように、トンネル側壁の50Hz付近のピークも低下したといえる。しかしながら、12.5Hz付近のピークに大きな変化は見られない。

3. レール凹凸の実態

3.1 レール凹凸の把握方法

図2および図3に示したように、軌道支持ばねの低ばね化によって50Hz帯域の振動は低減されたものの、

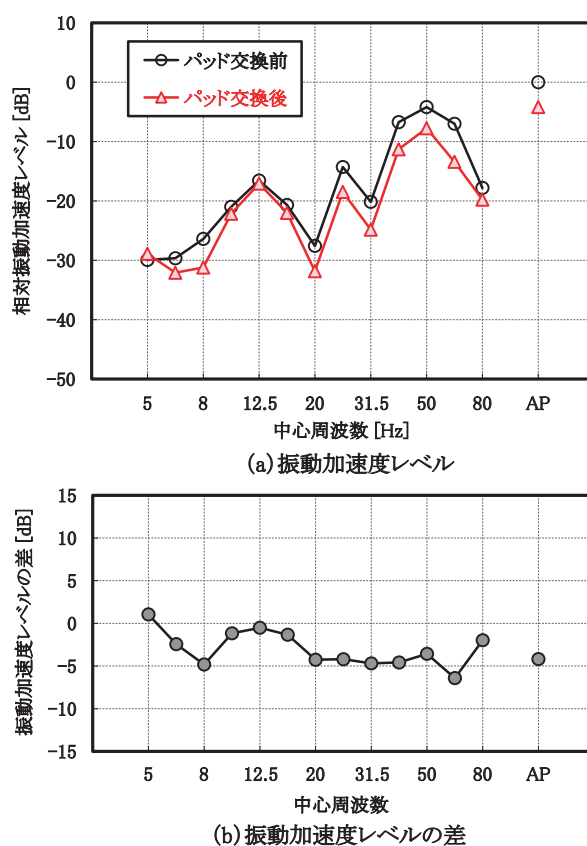


図2 軌道パッド交換前後の振動特性の変化の一例 (トンネル側壁, 上下振動, V=115km/h)

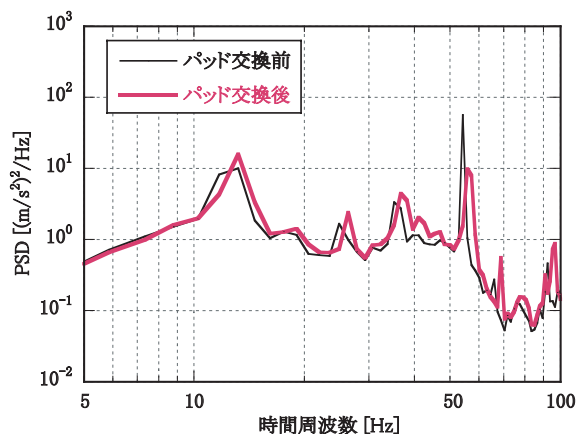


図3 軌道パッド交換前後の軸箱加速度のスペクトルの例 (V=120km/h)

12.5Hz付近の振動成分が依然として卓越していることがわかった。図4は、当該区間を異なる速度で走行した際の営業車の軸箱加速度のパワースペクトルである。同図において、120km/hでは13Hz程度、190km/hでは21Hz程度にピークが見られる。これらの周波数を波長に換算すると双方ともに約2.5mの振動成分に相当することから、何らかの加振源が軌道に存在することが予想された。なお、このピークは、190km/hの方が5倍程度大きくなっており、列車速度の増加とともに、軌道への加振

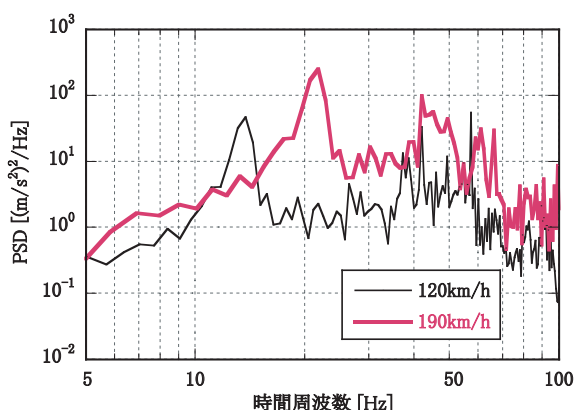


図4 走行速度の異なる軸箱加速度のスペクトルの例 (V=120km/h および V=190km/h, 軌道パッド交換後)

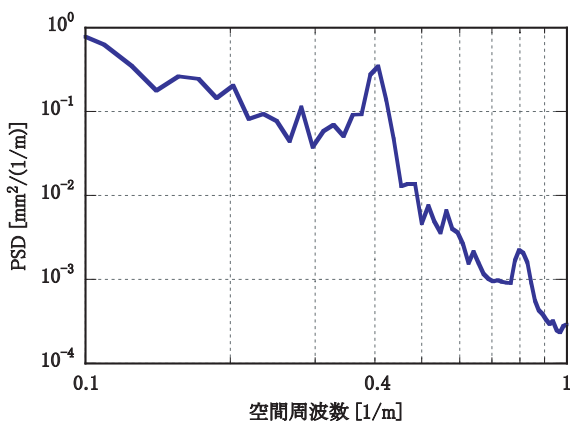


図5 復元高低変位のスペクトルの例

力が大きくなっていることもわかる。

そこで、まず2m弦正矢の簡易式軌道検測装置でトンネル内の高低変位を測定した。図5に、波長1～10mで復元処理した高低変位のパワースペクトルを示す。同図より、空間周波数0.4[1/m]、波長に換算して2.5mの成分が卓越していることがわかる。図6に、波長2.5mの成分を抽出するために、波長1～3mでバンドパスフィルタ処理した高低変位の波形を示す。同図より、レール出荷時の単位長さである25m周期で高低変位の振幅に顕著な差があることがわかる。よって、この波長2.5mの高低変位は、レールの凹凸に起因する可能性が高いことがわかった。

次に、九州新幹線の営業車で測定している軸箱加速度を活用し、左右それぞれのレール凹凸の大きな区間の特定を試みた。具体的には、測定された加速度データを、演算が発散しないようにフィルタ処理しながら2回積分し、波長1～3mの帯域におけるレール凹凸の振幅を算定した。その結果、図7に示すように、図6と同様に、レール出荷時の単位長さである25m周期でレール凹凸の振幅に顕著な差が生じており、さらに、振幅の大きな区間は左右のレールで異なっていた。これより、左右レールそれぞれにおいて、凹凸の大きなレールを特定することができた。

なお、これらのことから、レール凹凸は、開業後の列

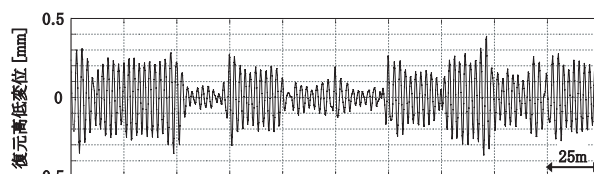


図6 高低変位の例 (波長1～3mで復元)

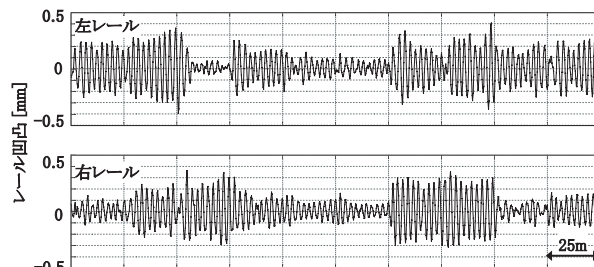


図7 軸箱加速度より求めた左右レールの凹凸の例

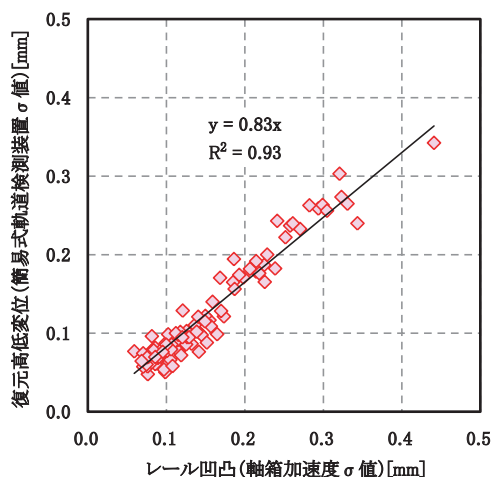


図8 復元高低変位とレール凹凸の関係

車走行に伴って生じたものではなく、レール製造時に生じた可能性が高いといえる。

図8に、同じ区間における簡易式軌道検測装置の復元高低変位と軸箱加速度から推定したレール凹凸の関係を示す。なお、両データともに、個々のレールの平均的な凹凸状態を評価するために、溶接部の影響を受ける端部2.5mのデータを除去したのちに、中央部20mのデータに対して標準偏差を求めた。同図より、両者の相関は非常に高く、軸箱加速度から、レール凹凸の大きな区間を高い精度で検出できることが確認できた。

3.2 レールの波状曲がり

このような波長数m程度のレール凹凸は、レール製造時のローラー矯正機に起因して生じるものとされており、「波状曲がり」と呼ばれている⁵⁾。なお、現時点では、波状曲がりに関する基準が設けられており、レール製造時において、長尺プロセス(長尺レールを矯正後に切断)の導入、ローラー矯正機の高剛性化等の設備改良などが行われ、顕著な波状曲がりは抑制されているようである

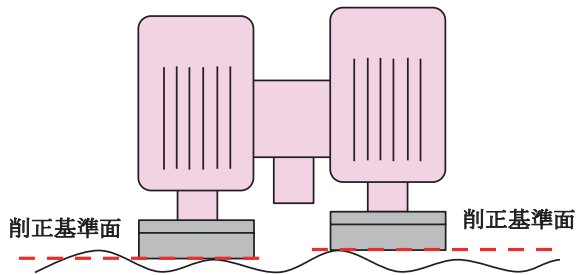


図9 通常のレール削正（短波長レール削正）の概念

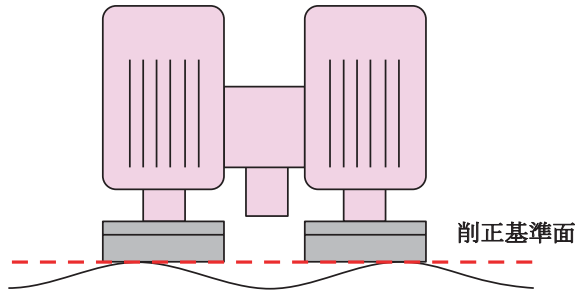


図10 ブロック削正（長波長レール削正）の概念

6)。しかし、この基準が設けられる以前に製造されたレールには、波状曲がりが生じているものもあると考えられる。当該トンネル内に敷設されていたレールも基準設定以前に製造されたものであった。

4. 長波長レール削正

4.1 長波長レール削正の概要

波長2m程度の長いレール凹凸の除去には、レール交換⁷⁾が望ましいが、営業線における作業間合い等を考慮し、レール削正による除去を試みた。

通常のレール削正では、一般的に、砥石の直径程度までの波長のレール凹凸に対し、除去効率が高いとされている⁸⁾。これは、図9に示すように、レール削正車に搭載されている複数の砥石を独立して制御しているため、個々の砥石面が削正の基準面となるためである。これに対し、ブロック削正と呼ばれる、通常のレール削正よりも波長の長い凹凸を除去する手法がある⁹⁾。これは、図10に示すように、レール長手方向に隣接する複数の砥石を機械的に制御し、砥石面（削正基準面）を揃えて削正を行うものである。しかしながら、ブロック削正については、2.5mもの長い波長のレール凹凸に対しての実施例は少ない。また、軌道の動的な変形や削正車の機械的精度によって、長波長のレール凹凸を完全に除去することは困難であるとされている。

4.2 長波長レール凹凸除去効果の検証

今回は、軸箱加速度を用いて特定されたレール凹凸の大きな区間に対し、16頭式レール削正車を用いたブロック削正を、延長約100mにわたって試験的に実施した。図

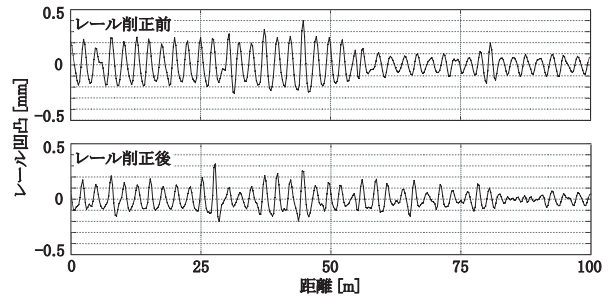


図11 ブロック削正前後のレール凹凸（レール削正車で測定）

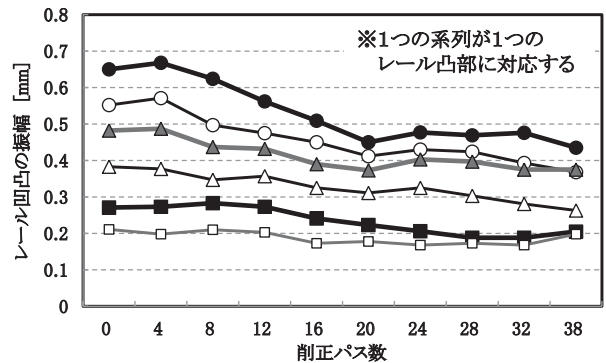


図12 削正パス数とレール凹凸の全振幅の関係

11に、レール削正前後のレール凹凸の波形を示す。これは、削正車に搭載されているレール凹凸測定装置を用いて測定した長波長凹凸データ（波長1～3mで復元処理されたレール凹凸）である。同図より、ブロック削正によって長波長のレール凹凸が低減していることがわかる。しかし、当該区間の総施工削正パス数は40パスとなっており、作業時間が通常のレール削正よりも大幅にかかることもわかった。

次に、ブロック削正の効果を詳細に検証するために、削正車の車上でレール削正中における施工パスごとのレール凹凸の振幅を測定した。図12に、削正パス数とレール凹凸の全振幅の関係を示す。ここでは、初期凹凸の大小に着目し、6つのレール凸部について示している。同図より、初期凹凸が大きな場合はパス数の増加とともに振幅が大幅に低下しているが、ある程度振幅が小さくなると振幅の低減率が減少していることがわかる。また、初期凹凸が小さな場合にも振幅には、低減率は小さく、ある程度振幅が小さくなるとほぼ横ばいの傾向となっている。このことから、ブロック削正によって長波長のレール凹凸を低減できることはわかったが、一方で、その低減効果には限度があることもわかった。

5. 長波長レール削正による効果の検証

ブロック削正によって、波長2.5mのレール凹凸が低減された効果を検証するために、レール削正前後で軌道を

含むトンネル内各部の振動加速度を測定した。測定項目は、図1に示したものと同一としたが、削正延長が短かったため、測定断面は低ばね軌道パッドの効果の評価を行った断面とは異なっている。ただし、軌道パッドは低ばね軌道パッドに交換されている。その他の軌道および構造物条件も同じである。

5.1 トンネル内の振動特性の変化

図13に、レール削正前後での振動測定結果の一例として、トンネル側壁における1/3オクターブバンドスペクトルを示す。なお、振動加速度レベルは、レール削正前のオールパス値を0dBとして表記している。同図より、波長2.5mのレール凹凸に起因する12.5Hz付近の振動加速度レベルが約6dB低減していることがわかる。また、50Hz付近の振動も若干ではあるが低減している。それに伴い、振動加速度レベルのオールパス値でも3dB程度の低下が見られた。

5.2 軸箱加速度の変化

図14に、レール削正前後に営業車で測定した軸箱加速度のワースペクトルを示す。同図より、レール削正後に12.5Hz付近のピークが低下しており、波長2.5mのレール凹凸に起因する軌道への加振力が低減されたことがわかる。これによって、図13に示したように、トンネル側壁の12.5Hz付近のピークも低下したと考えられる。

6. シミュレーションによる地盤振動の検証

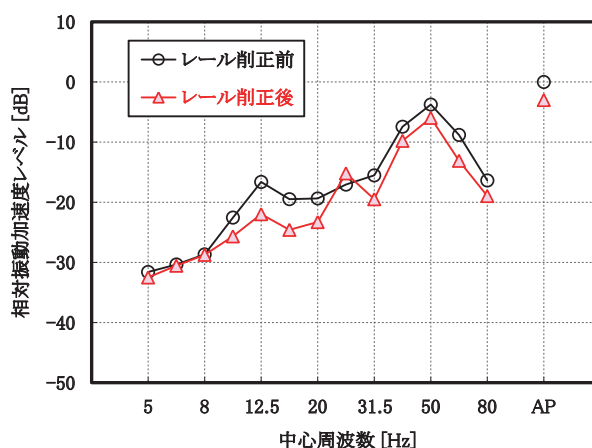
6.1 シミュレーションの概要

レール削正によって、波長2.5mのレール凹凸を除去した効果を検証するために、レール削正前後に実測したレール凹凸(図11)を用いて、車両・軌道・構造物系の動的相互作用を考慮した列車走行シミュレーション¹⁰⁾を実施した。シミュレーションには、汎用の交通荷重解析プログラムDALIA¹¹⁾を使用した。このモデルでは、レール、バラストおよび透水性路盤を梁とし、まくらぎは質点要素とした。さらに、シラス地山までをモデル化した。

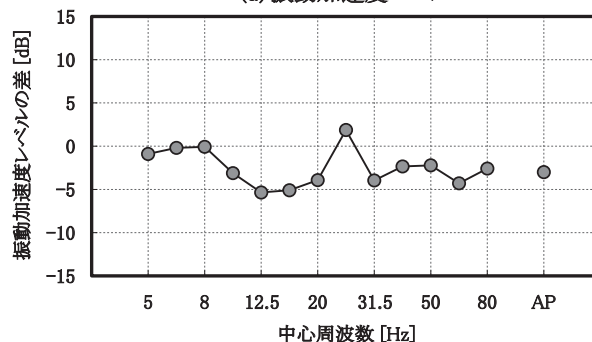
解析物性値のうち、地盤ばねは設計標準に示された直接基礎の鉛直反力ばねの考え方により設定した。その際、透水性路盤およびシラス地山の物性値は、松本ら³⁾による平板載荷試験結果を用いた。その他の車両や軌道のパラメータは、実際に即した値を用いた。

6.2 シミュレーションによる検証結果

図15に、走行速度120km/hでのシミュレーションにより得られたトンネル内の路盤面における振動加速度レベルのうち、波長2.5mのレール凹凸に対応する12.5～



(a) 振動加速度レベル



(b) 振動加速度レベルの差

図13 長波長レール削正前後の振動特性の変化の一例 (トンネル側壁, 上下振動, V=120km/h)

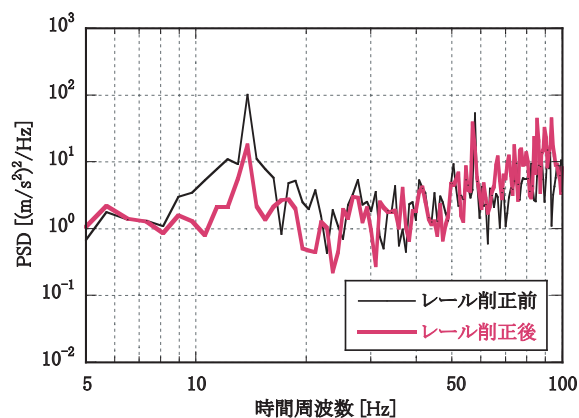


図14 レール削正前後の軸箱加速度のスペクトルの例 (V=120km/h)

16Hzの帯域の振動加速度レベルを示す。各プロットは、解析区間を線路方向に10mずつに分割したときの各ブロック内における計算結果の平均を示している。また、解析結果の両端は、境界条件の影響を大きく受けると考えられるので、両端の2ブロックずつを除き、中央の6ブロックの結果について示している。なお、振動加速度レベルは、レール削正前の最大値を0dBとして表記している。図11および図15より、初期のレール凹凸が大きな区間においてレール削正前の振動加速度レベルが大きくなっていることや、レール削正前後のレール凹

凸の変化量が大きかった25～65m付近において大きな振動低減効果が得られていることがわかる。なお、振動加速度レベルの低下量は、最大で約8dBであった。一方、レール凹凸が削正前から比較的小さく、削正後もあまり変化しなかった区間の65mおよび75mの2ブロックにおいては、削正前の振動も小さく、また振動低減効果もほとんど見られなかった。これらのことから、レール凹凸を平滑化し、輪重変動を低減することはトンネル内の振動低減に効果的であることが、列車走行シミュレーションの観点からも確認された。

なお、この計算はトンネル内の路盤面での振動を対象としたものであるが、過去の知見⁷⁾から、土被りが小さいトンネルにおいては、地上においても振動低減効果が得られるものと考えられる。

7. まとめ

九州新幹線の土被りの小さいトンネル上部の住宅地において、列車走行時の地盤振動が発生している事例に対する方策の一つとして、軌道側対策を実施した結果、以下の効果が得られた。

- (1) 軌道支持ばねの低ばね化を目的に、低ばねタイプの軌道パッドへの交換を実施した。その結果、トンネル内部において、ばね下質量の固有振動数に起因する50Hz付近の振動加速度レベルが低下した。
- (2) 軌道への加振力の低減策として、波長2.5mのレール凹凸をブロック削正によって平滑化した。その結果、トンネル内部において、レール凹凸に起因する12.5～16Hz帯域の振動加速度レベルが低下した。
- (3) レール凹凸の実測値を用いて列車走行シミュレーションを行った結果、軸箱加速度の変化や現地測定結果と概ね整合しており、レール凹凸の平滑化は当該地質条件における地盤振動の低減に効果的であることがわかった。

文 献

- 1) 吉岡修, 芦谷公稔: 軌道の支持ばね係数が地盤振動低減に与える効果, 鉄道総研報告, Vol.5, No.9, pp.31-37, 1991

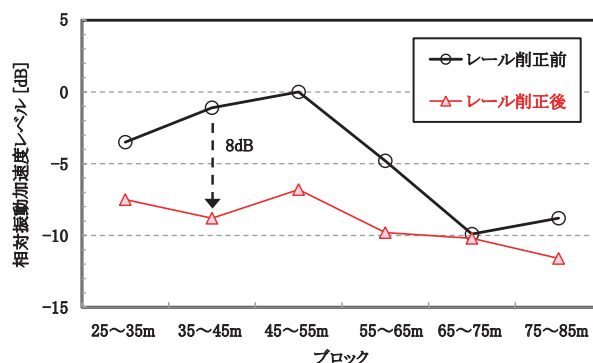


図15 レール凹凸に起因する振動加速度の試算結果 (トンネル内路盤面, 上下振動, V=120km/h)

- 2) 横山秀史, 岩田直泰, 芦谷公稔: 低ばね定数軌道パッドによる地盤振動低減効果, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.29-34, 2008
- 3) 松本雄二, 須長誠, 大島洋志, 八百山孝: 鉄道トンネル用透水性スラグ路盤の実物大模型試験, 土木学会論文集, No.681 / IV-52, pp.67-75, 2001
- 4) 佐藤吉彦: 東海道新幹線において951形式試験電車に発生した著大輪重の原因とその対策, 鉄道技術研究報告, No.824, 1972
- 5) 宇塚範吉, 杉山亮: レールに生ずる波状曲がりについて, 鉄道技術研究所速報, No.72-160, 1971
- 6) 岩野克也, 山本剛士: 最近のレール品質の向上, JREA, Vol.53, No.10, pp.40-43, 2010
- 7) 岩田直泰, 横山秀史, 芦谷公稔, 斎藤聡: 波状摩耗レールの更换による地盤振動特性の変化, 鉄道力学論文集, No.10, pp.37-42, 2006
- 8) 田中博文, 福山幹康, 三和雅史: レール凹凸評価指標と削正車最適運用計画策定システム, 鉄道総研報告, Vol.23, No.10, pp.5-10, 2010
- 9) 日本スベノ株式会社: スベノ社のレール削正技術, 鉄道車両と技術, No.85, pp.14-20, 2003
- 10) 横山秀史, 岩田直泰, 高田幸裕, 矢部明人, 芦谷公稔: 動的連成解析にもとづく軌道狂いと地盤振動の関係の検討, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 2008
- 11) 矢部明人: サブストラクチャー法を用いた移動体と構造物の動的相互作用解析手法の開発, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006