

# 低ばね定数軌道パッドによる地盤振動低減効果

横山 秀史\* 岩田 直泰\*\* 芦谷 公稔\*\*

## Vibration Reduction Effect of Softer Rail Pads for High Speed Trains

Hidehumi YOKOYAMA Naoyasu IWATA Kimitoshi ASHIYA

To obtain basic characteristics of more resilient rail pads for slab tracks as a countermeasure for Shinkansen-induced ground vibration, we performed a motorcar test on a test line on the RTRI premises and field test measurements on a Shinkansen-line. According to the results of these tests in which the rail pads commonly used (nominal spring constant is 60 MN/m) were replaced by the softer rail pads (nominal spring constant is 30 MN/m), the track supporting spring constant was reduced to approximately 70 to 75 percent of the original track. The reduction of ground vibration as obtained by the on-site test was approximately 2 to 4 dB in the frequency range of 25 to 80-Hz of the spots adjacent to the Shinkansen viaduct.

キーワード：低ばね定数軌道パッド，地盤振動対策，軌道低ばね化，新幹線，現地試験

### 1. はじめに

列車走行時の地盤振動対策の一つとして、軌道支持ばね定数を低下させる方法<sup>1)</sup>があり、バラストマットや有道床弾性まくらぎが広く用いられている。しかし、既設線のスラブ軌道区間では、軌道支持ばね定数を低下させる手段は限定されている。大規模な工事をもたわずにスラブ軌道区間に適用可能な軌道低ばね化工法として、軌道パッドをばね定数の低いものに交換する方法が考えられ、在来線のトンネル区間などに適用されている。

しかし、この工法を新幹線に適用した場合の地盤振動や軌道支持ばね定数の低減効果は、現状では明らかになっていない。そこで、低ばね定数軌道パッド（以下、「低ばね軌道パッド」）の地盤振動低減特性を把握するため、日野土木実験所の試験高架橋におけるモーターカー走行試験および新幹線の現地試験<sup>2)</sup>により、地盤や構造物振動、レール支持ばね定数などの基礎データを収集した。

さらに、地盤振動の発生モデル<sup>3)</sup>にもとづくシミュレーションをおこない、モーターカー走行試験および現地試験結果との比較により、低ばね軌道パッドの地盤振動低減効果を評価した。なお、以下の検討では公称ばね定数60MN/mの通常の軌道パッドと、30MN/mの低ばね軌道パッドを対象とした。

▼：振動レベル計， ▼：広帯域加速度計， ▲：輪重  
●：レール変位， ◆：スラブ変位

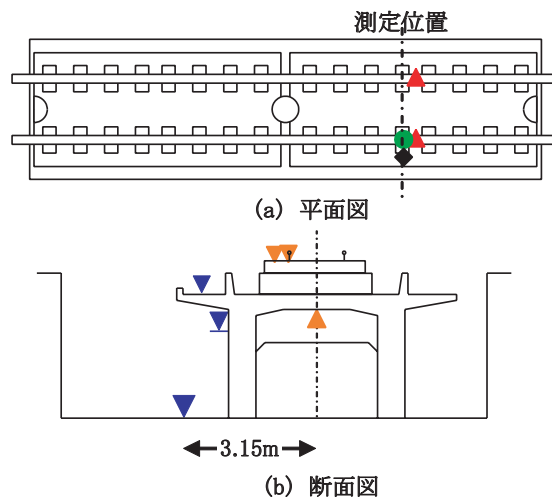


図1 モーターカー走行試験時の測定項目

### 2. モーターカー走行試験

#### 2.1 試験の概要

モーターカー走行試験は、鉄道総研日野土木実験所構内の試験高架橋でおこなった。測定項目は、高架橋および地盤の振動（振動レベル計を使用）、レール・軌道スラブ・高架スラブ下面の高周波振動（広帯域の加速度計を使用）、輪重、レールおよび軌道スラブの上下変位である。測定項目の概要を図1に示す。なお、レールおよび軌道スラブの上下変位は、高架スラブ端に設けた基準点からの相対変位である。

試験ケースは、軌道パッドとして公称ばね定数60MN/m

\* 防災技術研究部（地質）

\*\* 防災技術研究部（地震防災）

特集：環境技術

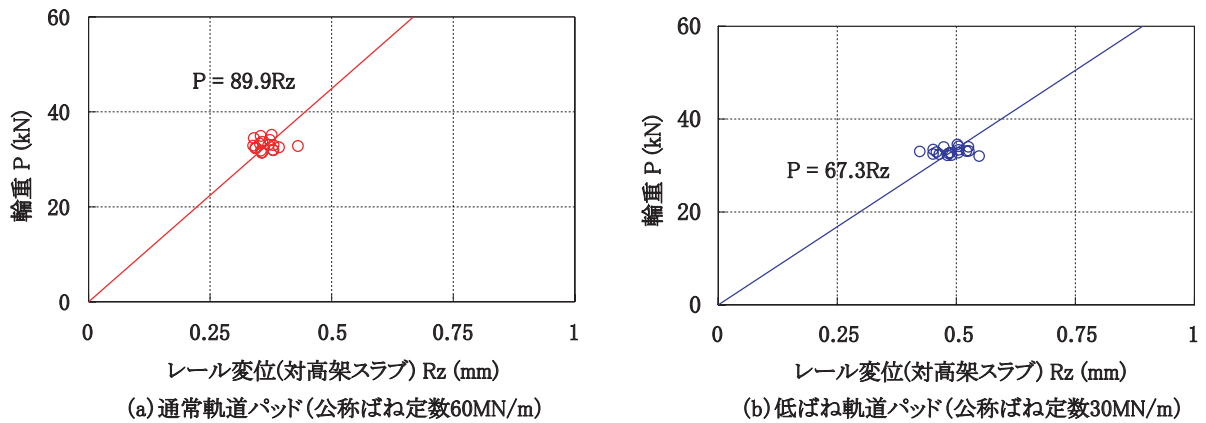


図2 輪重とレール上下変位(対高架スラブ)の関係

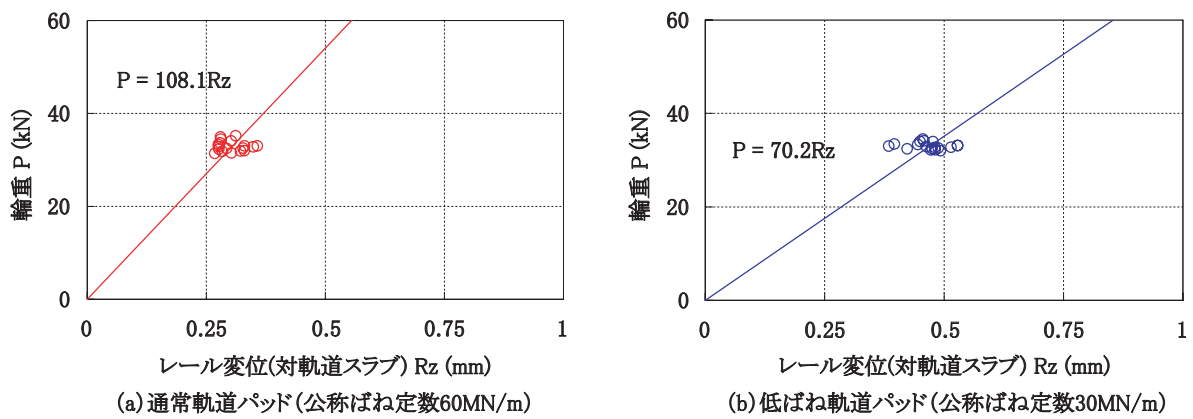


図3 輪重とレール上下変位(対軌道スラブ)の関係

の通常軌道パッドを使用した場合と、公称ばね定数30MN/mの低ばね軌道パッドを使用した場合の2ケースで、各ケースごとに20km/h、30km/h、40km/hの3段階の走行速度で測定をおこない、測定結果を整理した。走行は各速度ごとに3回ずつで、試験区間通過時は惰行とした。

2.2 試験結果

2.2.1 軌道ばね定数

モーターカー走行試験時の輪重とレール上下変位(高架スラブ、軌道スラブに対するレールの相対変位)の関係を、図2、3に示す。図2より、軌道パッドを通常のものから低ばね軌道パッドに交換することで、交換前に比べ約75%の軌道支持ばね定数となっていることがわかる。また、レールと軌道スラブの相対変位にもとづいてレール支持ばね定数を求めると(図3)、軌道パッド交換後のレール支持ばね定数は交換前の約65%で、軌道支持ばね定数よりも低下の度合いが大きい。これは、レール直下のばねである軌道パッドのみを低ばね化したことにより、レール変位は増大し軌道スラブの変位は減少したためである。

2.2.2 振動特性の変化

低ばね軌道パッド敷設前後の高架橋周辺地盤等における振動変化を図4に、31.5Hz～4kHzの周波数帯域での軌道および構造物の振動変化を図5に示す。ここで振動

変化は、30MN/mパッド敷設時の振動加速度レベルと60MN/mパッド敷設時の振動加速度レベルの差として示した。すなわち、値が負の場合は振動が低減、正の場合には振動が増加したことを意味している。

図4より、いずれの箇所においても、モーターカー走行試験時には主として63Hzより高い周波数帯域で振動が低減していることがわかる。

次に、軌道や構造物での振動の変化をみると(図5)、軌道パッドの低ばね化によりレール振動は広い範囲で増大し、軌道や高架スラブの振動は全体に低減しているなど、軌道低ばね化に関する既往の知見と整合する結果であることがわかる。高架スラブの振動が低減していることから、特に構造物音に関しては、ある程度の低減効果が期待できると考えられる。

3. 新幹線での現地試験<sup>2)</sup>

3.1 試験の概要

低ばね軌道パッドを新幹線に適用した場合の効果を確認するため、山陽新幹線のラーメン高架橋区間の2箇所にて現地試験を実施した。現地試験にあたっては、軌道パッド施工および軌道内測定をJR西日本、地盤振動測定および測定結果の分析・評価を鉄道総研が各々担当し

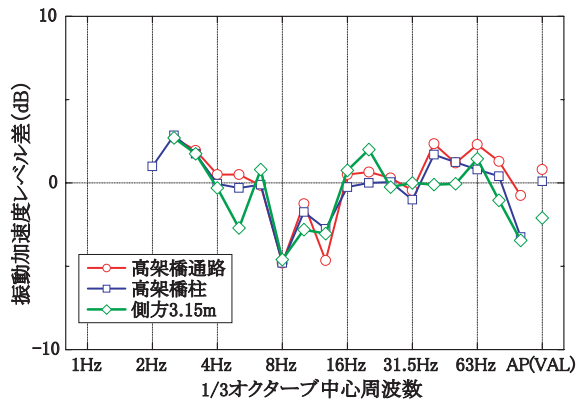


図4 高架橋周辺地盤等における振動特性変化

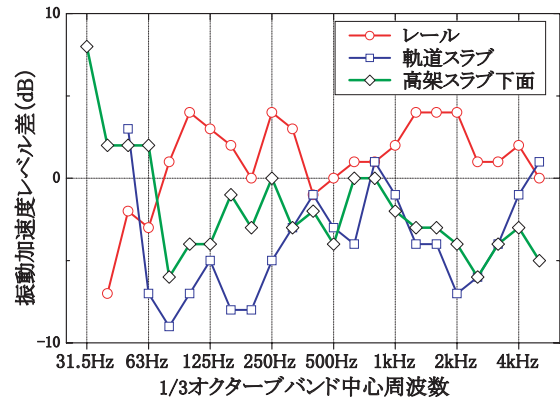
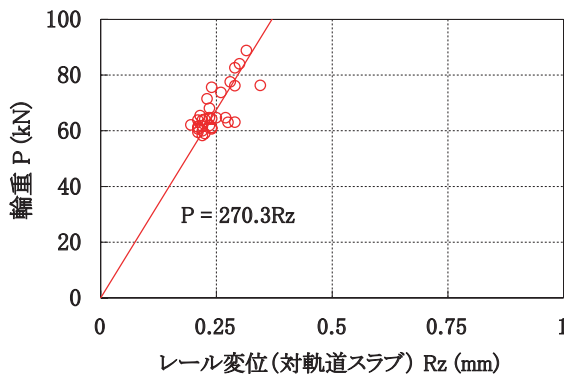
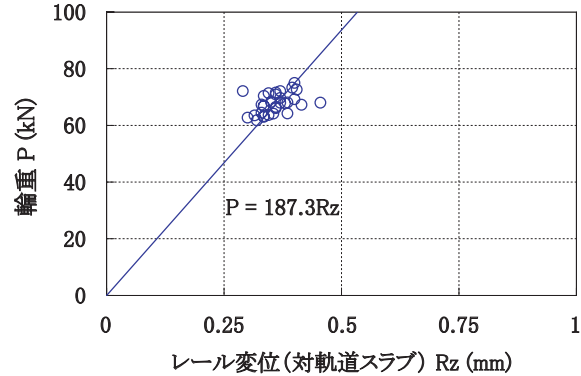


図5 軌道および構造物での振動変化



(a) 通常軌道パッド(公称ばね定数60MN/m)



(b) 低ばね軌道パッド(公称ばね定数30MN/m)

図6 実測箇所2における輪重とレール上下変位(対軌道スラブ)の関係

た。地盤振動については、橋脚近傍地盤(左右の各橋脚近傍および中央の3点の平均)および沿線地盤(実測箇所1:施工側軌道中心から12.5m, 実測箇所2:施工側軌道中心から16m)の測定結果を対象に検討した。試験条件の詳細は文献2)を参照して頂きたい。

現地試験の試験ケースは、(1)現状(通常軌道パッド)、(2)低ばね軌道パッド敷設後、(3)通常軌道パッドへの復元後の3ケースである。通常軌道パッドの公称ばね定数は60MN/mである。また、(2)の低ばね軌道パッド敷設は、実測箇所1では公称30MN/mおよび20MN/mの2ケース、実測箇所2では公称30MN/mの1ケースについて実施した。なお、(3)の通常軌道パッドへの復元に際しては、当初敷設されていたものは使用せず、新しいパッドに交換した。

本報告では、軌道パッド以外の要因(可変パッド交換等)をそろえるため、新品の軌道パッドを敷設した状態同士を比較することとし、30MN/mの軌道パッド敷設時と通常軌道パッドへの復元後の振動変化について検討した。

### 3.2 試験結果

#### 3.2.1 レール支持ばね定数

実測箇所2における新幹線走行時の輪重とレール上下変位(対軌道スラブ)の関係を図6に示す。

分析対象とした車種の違いのため、文献2)とはやや

値が異なるが、軌道パッドを低ばね軌道パッドに交換することで、実際の新幹線走行時のレール支持ばね定数は約66~69%に低減したことがわかる。これは、前述の試験高架橋でのレール支持ばね定数変化とほぼ同程度であり、低ばね軌道パッド敷設にともなう支持ばね定数の変化については、試験高架橋でのモーターカー走行試験により実際の新幹線での現象をある程度再現していることが確認できた。

#### 3.2.2 振動特性の変化

低ばね軌道パッド敷設時と通常軌道パッドへの復旧後の、高架橋橋脚近傍地盤および沿線地盤での振動の変化を図7に示す。振動変化は、30MN/mパッド敷設時の補正加速度レベルと60MN/mパッド敷設時の補正加速度レベルの差として示した。すなわち、値が負の場合は振動が低減、正の場合には振動が増加したことを意味している。

図7より、橋脚近傍では低ばね軌道パッド敷設により20Hz付近よりも高い周波数帯域である程度の振動低減がみられる。低減効果は20~31.5Hz付近で3dB程度、40~63Hz付近で2dB程度、80Hzで4~5dB程度であった。また、10~12.5Hz付近では振動が3dB程度増大した。一方、沿線の測定点では周波数による変動が大きく増減の傾向は明確でないが、20~40Hz付近で3dB程度の振動低減がみられるほか、50~63Hz付近で一旦効果

特集：環境技術

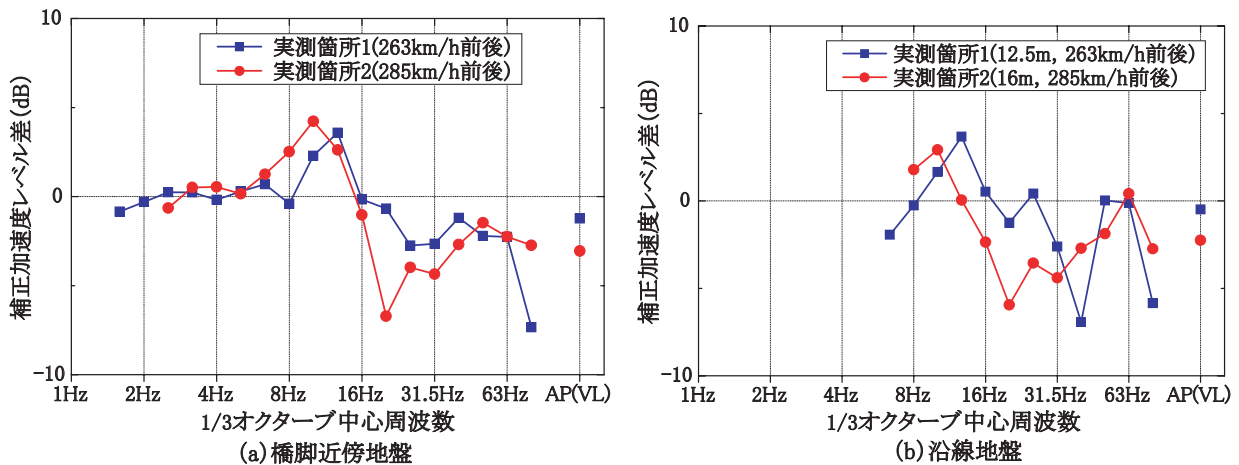


図7 新幹線の実測箇所における地盤振動変化

がなくなり、80Hzで4～5dB程度の低減効果がみられるという結果であった。また、橋脚近傍と同様、10～12.5Hz付近では3dB程度振動の増大がみられた。

振動レベル(図7のAP(VL))の変化についてみると、実測箇所1の場合、高架橋近傍では約1dB程度の振動低減がみられたが、12.5m点ではほとんど変化がみられなかった。また、実測箇所2では高架橋近傍で約3dB、16m点で約2dB振動が低減した。通常軌道パッドの状態での実測箇所1の沿線地盤振動(図8)は、16～20Hzが卓越しており、この帯域で振動レベルが決まっている。このため、これらの帯域での振動低減効果(0～1dB程度)がそのまま振動レベル低減効果として表れている。それに対し、実測箇所2では31.5Hzを中心としたやや周波数の高い振動が卓越しているため、低ばね軌道パッドによる振動低減効果が実測箇所1よりも大きく表れている。

このように、通常軌道パッド敷設時の地盤振動の周波数特性により、振動低減効果が大きく左右されると考えられる。トンネル区間においては、一般に周波数の高い振動が卓越する<sup>3)</sup>ことから、明かり区間の場合よりも大きな効果が期待できると考えられる。

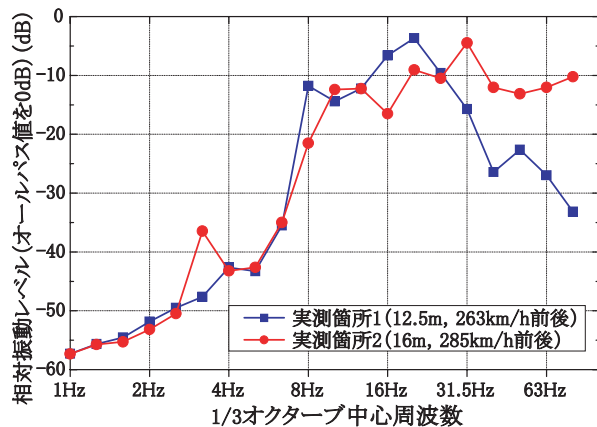


図8 通常軌道パッドへの復旧後の沿線地盤振動スペクトル(オールパス値=0dB)

#### 4. 新幹線鉄道振動の発生モデル<sup>3), 4)</sup>による低ばね軌道パッドの振動低減効果の検討

##### 4.1 モデルの概要

軌道低ばね化の振動低減効果を評価する方法の一つとして、車両と軌道を簡単なモデルで表現し、軌道支持ばね定数等をパラメーターとして列車走行時の地盤振動を計算する方法が吉岡らにより提案されている<sup>3), 4)</sup>。本報告ではこのモデルにもとづき、低ばね軌道パッドの振動低減効果を検討した。

検討に用いたモデルの概要を以下に示す。詳細については、文献<sup>3), 4)</sup>を参照していただきたい。

モデルは、ラーメン高架橋区間を対象としたもので、車両・軌道系のモデルと、軌道・構造物系のモデルを組み合わせた構成である(図9)。車両・軌道系モデルは、1軸分の車両(1/4車両)をばね上、ばね間、ばね下の3質点系、軌道を1質点系(換算レール)とし、全体では4質点のばね・マス系モデルである。また、軌道・構造物系モデルは弾性床土の二重梁モデルである。

列車全体がレールに与える起振力スペクトルは、1軸だけが与える起振力スペクトルと、車軸配置及び列車速度から理論的に求められる、車軸の繰返し通過効果スペクトルの積としてモデル化される。このうち、1軸の起振力は静軸重と軸重の動的成分にわけられる。静軸重は、1車両の重力を4軸に均等配分する。また、動的軸重は、軌道の上下狂いを強制変位として車両・軌道系モデルに入力したときに、ばね下質量が換算レールに加える力として求める。

このようにして求めた起振力を、軌道・構造物系モデルに入力したときの、構造物モデル(BSL点)の振動レベルが最終的な出力となる。

なお、このモデルでは、軌道部分が車両・軌道系と軌道・構造物系の双方で、異なる方法でモデル化されている。すなわち、車両・軌道系ではある軸の直下の部分の

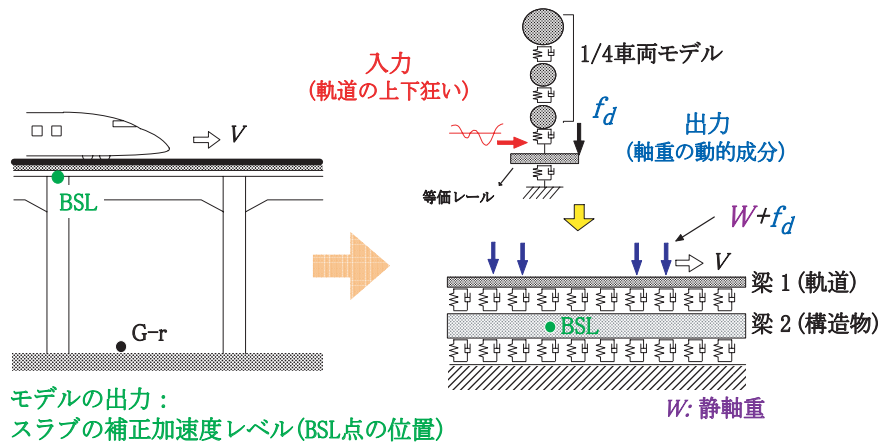


図9 新幹線鉄道振動の発生モデル

みを切り出した形でモデル化されているのに対し、軌道・構造物系では弾性床上の梁としてモデル化されている。車両・軌道・構造物の連成振動を厳密に表現する場合、本来は両モデル間で軌道の応答が整合しなければならないが、ここでは近似的な取り扱いとして両者の整合を無視し、非連成系としてモデル化している。

文献3), 4)によると、モデル中の定数については、車両・軌道系と軌道・構造物系で異なる取り扱いがなされている。軌道・構造物系については、実際の車両諸元を基本として設定されている。一方、軌道・構造物系では、構造物の剛性や質量等の諸元を、等価な弾性床上の二重梁に置き換える必要がある。そのため、軌道・構造物系では、軌道の剛性・質量・減衰以外のパラメーターは、計算結果が東海道・山陽新幹線の標準ラーメン高架橋・有道床軌道区間の地盤振動測定データに適合するように、逆解析により設定されている。

4.2 モデル計算結果

このモデルにもとづいて、60MN/mの通常軌道パッドを30MN/mの低ばね軌道パッドに交換した際の振動低減効果を計算した結果と、モーターカー走行試験および新幹線の現地試験時の振動低減効果をあわせて図10に示す。計算は、文献3), 4)に示す標準パラメーターをもとに、軌道支持ばね定数や車両モデル、列車速度等を変更して実施した(表1)。

上述のとおり、このモデルでは一部のパラメーターを逆解析により決定している<sup>3), 4)</sup>ことから、軌道支持ばね定数等のパラメーターは実測値を直接用いることができない。本検討では、通常軌道パッドおよび低ばね軌道パッド適用時の軌道支持ばね定数を、モデルに設定された標準の軌道支持ばね(有道床軌道モデル)のそれぞれ約1.7倍および約1.2倍となるように設定した。これらの倍率は、日野土木実験所におけるモーターカー走行試験結果および新幹線の現地試験結果、文献5)などにもと

づいて設定した。

図10より、モーターカー走行試験については概ね実測結果を再現できており、新幹線の現地試験結果についても、40Hz付近よりも高周波側では実測結果をほぼ再現できていることがわかる。

また、モーターカー走行試験時には、実測および解析のいずれについても63Hz以上の高周波帯域で振動低減がみられるほか、8~10Hz程度の低周波帯域でもある程度の低減効果がみられることがわかる。

一方、新幹線の現地試験については、モデル計算で低減効果のみられる帯域が実測よりもやや狭いほか、逆効果となる帯域が実測より高周波側に表れているなど、31.5Hz以下の帯域では実測値の変化よりも計算結果の変化の方が小さい。このように、新幹線の現地試験で実測された地盤振動変化量は、軌道支持ばね定数の低減のみで説明可能な量よりも全体に大きいという結果であった。軌道パッド交換にともない、軌道狂いなど、軌道支持ばね定数以外の軌道状態もある程度変化すると考えられる。特に、軌道の高低狂いの状態などは地盤振動に対する影響が比較的大きい可能性があることから、今後、これらの要因の影響も含めた検討が必要と考えられる。

表1 モデル計算に用いたパラメーター

ケース	モーターカーモデル		実測モデル	
	60MN/m パッド	30MN/m パッド	60MN/m パッド	30MN/m パッド
ばね上質量	3.8t		7.7t	
ばね間質量	0.2t		1.3t	
ばね下質量	1.9t		2.0t	
軌道支持ばね 定数倍率*	1.72	1.29	1.72	1.21
速度	40km/h		260km/h, 280km/h	

\*標準値は、 $2.55 \times 10^5 \text{kN/m}$  (車両・軌道系モデルの軌道支持ばね定数) および  $4.06 \times 10^5 \text{kN/m}^2$  (軌道・構造物系モデルの単位長さあたりの軌道支持ばね定数)。

特集：環境技術

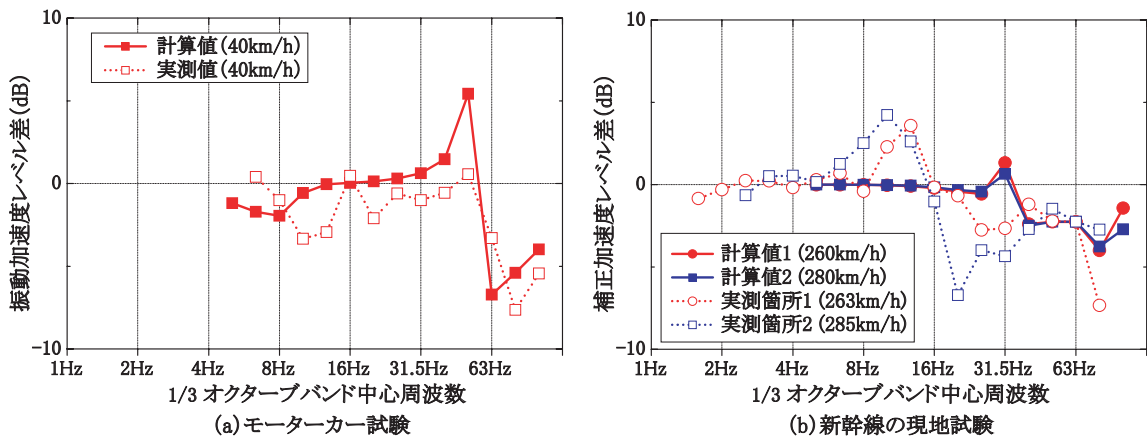


図10 低ばね軌道パッドの振動低減効果に関するモデル計算と実測の比較

5. まとめ

低ばね定数軌道パッド（低ばね軌道パッド）は、特にスラブ軌道区間においては、大規模な工事等をともなわずに実施可能な軌道低ばね化工法として有用であると考えられる。

このような観点から、まず低ばね軌道パッドの地盤振動低減特性を把握するため、日野土木実験所の試験高架橋を使用したモーターカー走行試験と新幹線の現地試験により、地盤振動等のデータを収集した上で、その効果の検討結果を整理した。また、低ばね軌道パッドの防振メカニズムを検討するため、地盤振動の発生モデルにもとづくシミュレーションの計算結果とモーターカー走行試験および現地試験結果との比較により、モデルの確認等を実施した。

結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 新幹線沿線の2箇所で行われた現地試験結果によると、低ばね軌道パッド敷設により20Hz付近よりも高い周波数帯域である程度の振動低減がみられ、橋脚近傍地盤での低減効果は20～31.5Hz付近で3dB程度、40～63Hz付近で2dB程度、80Hzで4～5dB程度であった。また、沿線地盤では周波数による効果の変動が大きい、20～40Hz付近で3dB程度振動の低減がみられるほか、50～63Hz付近で一旦効果がなくなり、80Hzで4～5dB程度の低減効果がみられた。なお、いずれの箇所においても、10～12.5Hz付近では3dB程度振動が増大した。
- (2) 現地試験およびモーターカー走行試験によると、低ばね軌道パッド（公称30MN/m）敷設により、軌道支持ばね定数は通常軌道パッド（公称60MN/m）時の70～75%程度に低減された。
- (3) 地盤振動の発生モデルにより、低ばね軌道パッド敷設前後の振動変化について数値シミュレーションを

行い、現地試験結果およびモーターカー走行試験結果をある程度再現できることを確認した。

- (4) 以上の結果より、低ばね軌道パッドは概ね40Hz以上の高周波帯域で効果があり、トンネル上地盤振動など高周波帯域が卓越している場合には、振動対策としてある程度（2～3dB程度）の効果が期待できると考えられる。

地盤振動対策等のため通常の軌道パッドを低ばね軌道パッドへ交換する場合、軌道支持ばね定数以外の軌道状態についてもある程度変化すると考えられる。特に、軌道の高低狂いの状態などは地盤振動に対する影響が比較的大きい可能性があることから、これらの要因の影響も含めた検討を現在実施しており、今後報告していきたいと考えている。

謝辞

新幹線の現地測定は西日本旅客鉄道(株)と協同で実施した。関係各位に深く謝意を表します。

文献

- 1) 吉岡修, 芦谷公稔: 軌道の支持ばね係数低下が地盤振動に与える効果, 鉄道総研報告, Vol.5, No.9, 1991
- 2) 守田武史, 横山秀史ほか: 低ばね定数軌道パッド敷設による地盤振動に対する影響, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集4-111, 2005
- 3) 吉岡修: 新幹線鉄道振動の発生・伝播モデルとその防振対策法への応用, 鉄道総研報告, 特別第30, 1999
- 4) 吉岡修, 芦谷公稔: 新幹線鉄道振動の発生・伝播モデル, 物理探査, Vol.48, No.5, 1995
- 5) 安藤勝敏, 熊崎弘, 堀池高広: 新しい防振軌道構造の性能試験, 鉄道総研報告, Vol.8, No.6, 1994