

実軌道測定に基づくバラストに加わる 衝撃荷重とその減衰特性

相川 明*

Attenuation Characteristics and Resistance Forces of the Ballast Layer
against Traffic Impact Loads Based on *In-situ* Measurements

Akira AIKAWA

The author performed a fundamental examination of the attenuation characteristics and resistance forces of the ballast layer against traffic impact loads based on field measurements. The results indicated that for the impact load components over 100 Hz, the ballast layer resists because of its high rigidity. However, the ballast layer is almost non-resistant against the low-frequency load components. The low-frequency load components are not reduced. Moreover, the results were roughly divisible into two features related to the stiffness characteristics of the ballast layer. While the ballast layer has high rigidity and resists loads sufficiently in the frequency region higher than about 100 Hz, the resistance force is extremely weak at lower frequencies.

キーワード：バラスト軌道，PC まくらぎ，振動加速度，実験モデル解析，構造減衰

1. はじめに

バラスト軌道で不可避とされる塑性変形現象は、列車の軸重通過により発生した動荷重が、まくらぎ下面を介してバラスト層に伝わることで促進される。さらに、これに重畳して、車輪レール間で発生する衝撃による動荷重も、まくらぎ下面を経由してバラスト層に伝わる。バラストに伝わったこれらの動荷重は、バラスト層内部に微小な振幅の振動加速度を生じさせ、砕石稜角の欠損、摩耗、砕石の回転、移動、滑りなどの微細な劣化現象を誘発する。この微細な劣化現象が時間的に累積し、軌道面に不整をもたらすものと考えられている¹⁾。軌道不整の発生は維持管理上の隘路であり、これら塑性変形の発生・進展のメカニズム解明が喫緊の課題となっている。

軸重通過による動荷重の周波数特性は、列車の走行速度と通過する軸間距離の関係で決まり、それらは数 Hz から高々 20 ～ 30 Hz の低い周波数域に限られる。一方、車輪レール間で発生する鋭利なパルスからなる衝撃による動荷重に関しては、これを周波数領域に変換すると、低周波域から数十 kHz の高周波域までの広帯域の周波数成分からなり、いわゆるホワイトノイズ的な周波数特性を有する。つまり、バラストの塑性変形現象の解明には、まずは、まくらぎ下面に作用するこれら動荷重の実態を把握することが肝要である。しかし、まくらぎとバラスト層が接する境界領域は、道床内部の見えない位置にあり、そこで作用する動荷重の実態については十分に把握できていない。とくに、バラストやまくらぎに関す

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

る振動特性、および、バラスト層内部における荷重伝播特性に関しては殆ど明らかにされていない。

そこで、本研究では、軌道破壊対策や効率的な保守につながる知見を得ることを目的に、最新のセンサ技術をバラスト軌道の現場測定および実物大加振実験に応用した。それらの測定結果をもとに、バラストに作用する動荷重のスペクトル特性、バラスト層内部における動荷重の減衰特性、および、バラストの抵抗力発現機構に関して基礎的な検討を行った。

2. センシングまくらぎとセンシングストーン

図1は、まくらぎ下面に作用する動荷重測定用に開発したセンシングまくらぎである²⁾。本まくらぎはPCまくらぎ(PC3号)の下面に、新開発の超薄型動荷重センサ75個を隙間なく貼り付け、さらにその表面に保護用のアルミ合金製の受圧板を貼付けたものである。これにより、まくらぎ下面に作用する数kHzまでの動荷重とその分布を測定できる。

ここで用いた動荷重センサは、圧電シートの両面に薄い電極を施した構造であり、動荷重の大きさに比例して、その両面に数十ボルトの電圧が発生する。大きさ8cm×8cmあたりで、最大10kNの荷重を、0.01Hzから数10kHzの範囲で測定できる。また、同センサは、電気的にはコンデンサと等価であり、従来品と違って内部抵抗がなく、軌道直近でも誘導電流によるノイズが生じない。測定ノイズは、最大測定荷重に対して0.003%以下であり、数kHzの高周波域の荷重特性まで議論できる十分な性能を有する。

特集：軌道技術

また、道床振動加速度の測定に関しては、センサ内部に高感度の計装アンプを内蔵した小型の三軸加速度センサ（センシングストーン）を用いた。なお、従来は加速度センサを実際の砕石内部に埋め込んだものを使用していた。しかし、実砕石を用いると、その砕石の形状・大きさ、および、局所的な接触条件によりその応答値が大きくばらつく傾向がある。そのため、現在では、密度が砕石に近いアルミニウム合金を用いて、砕石より若干大きめの10cm四方の筐体を作り、その内部に加速度センサを封入し、局所的な接触条件の影響を受けないようにしている。

3. まくらぎの固有振動モードとバラストの減衰特性に関する実物大加振実験

3.1 実験概要

バラストに伝わる動荷重は、まくらぎの固有振動モードの影響を大きく受ける。そこで、実物大のバラスト層上に敷設したPCまくらぎに関してインパルス加振実験を実施し、PCまくらぎの固有振動モードを含むバラストの動特性を調べた。図2は加振実験の状況である。まくらぎ上の22カ所に加速度測定点を設け、そのまくらぎの周囲をバラストで充填した。実験では、インパルスハンマでまくらぎ端部を三方向より加振し、まくらぎ上の測定点における加速度応答値を収録する。それらを同時に周波数応答解析を行うことで、まくらぎの固有振動特性、および、バラスト層の物性を調べるものである。

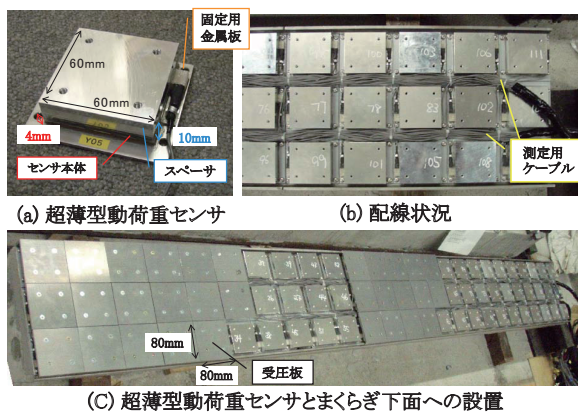


図1 センシングまくらぎ

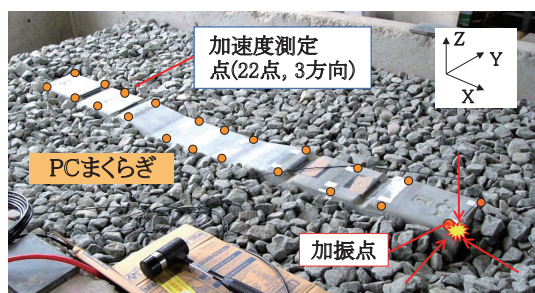
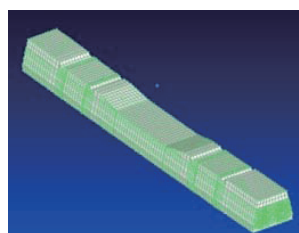


図2 まくらぎ加振実験の概要

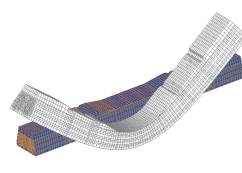
3.2 PCまくらぎの振動特性

図3は、PCまくらぎに関する1kHzまでの固有振動モードを示したものである。図には、バラスト条件での固有振動数とともに、自由支持条件でのまくらぎ単体の固有振動数についても示す。図中、括弧内の数値は、まくらぎの有無による固有振動数の変動の割合である。なお、自由支持条件では、硬質のウレタンマットを用いた。

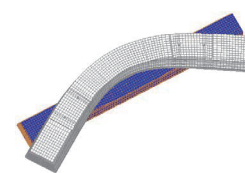
図より、まくらぎの質量とバラスト層のばね特性で決まる剛体振動モードは、およそ87Hzという低い周波数領域に生じていることがわかる。一方、まくらぎの曲げ振動モードに関しては、1kHz以下の周波数域では(b)～(g)の6モードが確認できた。これら6モードに関して、バラストの有無による周波数の変化に着目すると、200Hz以下の周波数域にある(b)の上下1次曲げ振動モードについてはその固有振動数が10%も変化しているのに比べ、200Hz以上の周波数領域にある(c)～(g)の5つの固有振動モードに関しては、バラストの有無による影響はごく僅かである。すなわち、まくらぎの固有振動数に対するバラストの寄与に関しては、およそ200Hzあたりに挙動の特性を分ける閾値があるものと考



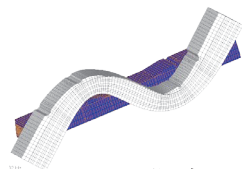
(a) 上下剛体振動モード
3.0Hz(まくらぎのみ)→86.8Hz(バラスト有り)



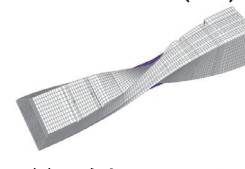
(b) 上下1次曲げモード
148Hz→163Hz(+10%)



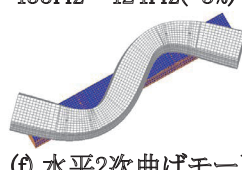
(c) 水平1次曲げモード
241Hz→243Hz(+1%)



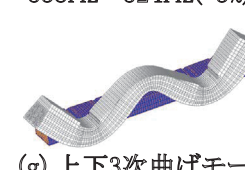
(d) 上下2次曲げモード
435Hz→424Hz(-3%)



(e) 1次ねじりモード
538Hz→524Hz(-3%)



(f) 水平2次曲げモード
630Hz→628Hz(0%)



(g) 上下3次曲げモード
825Hz→805Hz(-2%)

図3 バラスト有無による固有振動数の変化

えられ、この周波数以下の低い周波数領域では、バラストの接触の有無の影響が大きいことがわかる。

3.3 バラスト層の構造減衰特性

図4は、PCまくらぎ単体の詳細構造を模擬した有限要素モデルをベースに、バラスト層を3軸方向のばね要素と減衰要素で表現した有限要素法モデルである。本モデルを用いて、固有モードとアクセラランス（加速度／加振力）の再現性に注目して、PCまくらぎとバラスト間に作用する動的なばね特性と減衰特性を定量的に求めた³⁾。なお、実験結果より、バラスト層は高周波領域ほど極端に減衰が大きくなるという周波数依存性が確認された。そこで、200Hzを境界にして、低周波域、高周波域にわけて減衰特性を同定した³⁾。

同定したパラメータの一例を図5に示す。図は鉛直方向に関するバラスト層の損失係数を示したものである。図より、バラスト層の構造減衰に関しては周波数依存性

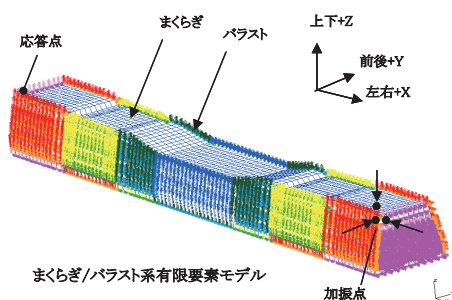


図4 まくらぎ-バラスト有限要素モデル

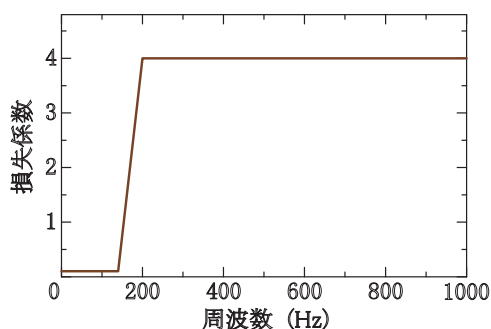


図5 損失係数の周波数依存性

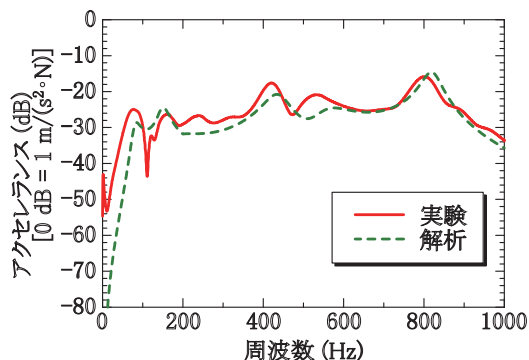


図6 鉛直方向アクセラランスの比較

があり、200Hzあたりを閾値にして挙動が大きく変わる。すなわち、その閾値より高い周波数領域では非常に大きな減衰性能を有している。損失係数で見ると、一般に制振目的で使用される減衰材に比べて1桁大きい値である。一方、低い周波数領域ではバラスト層は動的荷重に対する減衰性能が殆どないことがわかる。

これらのパラメータを用いて、バラスト層上のPCまくらぎの固有振動モードと応答の大きさを再現したところ、いずれの固有モードに関しても周波数の再現誤差±5%以内となる解析結果が得られた。本パラメータによる、FEM解析結果の例として、鉛直加振時の鉛直方向アクセラランスを図6に示す。図より、全周波数領域で振動特性を良好に再現できており、これにより図5のパラメータの妥当性がわかる。

4. 実軌道測定データを用いたバラスト挙動の分析

4.1 分析に用いた実測データ

実軌道でのセンシングまくらぎとセンシングストーンを用いた測定データをもとに、列車走行時に発生する動荷重特性、および、動荷重に対するバラスト応答の特徴を抽出する。分析に用いたデータは、在来線を走行する特急列車の測定結果である。また、センシングまくらぎ下面の動荷重測定値に加えて、軌道パッドでのレール圧力、まくらぎの振動加速度、および、まくらぎ下10cmの位置におけるバラスト振動加速度のそれぞれの測定値も用いた。

4.2 動荷重のリニアスペクトル

バラスト層に加わる動荷重の特徴を分析する。図7は、レール圧力とまくらぎ下面荷重に関するリニアスペクトルである。図より、バラスト層に加わる動荷重は、広帯域の周波数成分からなることがわかる。また、レール圧力とまくらぎ下面荷重のスペクトルの形状を比べると、両者はよく似た周波数特性を有しており、したがって、レール下面からまくらぎに伝わった動荷重が、ほぼそのままの形でバラストにも載荷されていることがわかる。

同図において、まくらぎ下面荷重に着目すると、いくつかのピーク値を与える周波数がみられる。例えば、図中の100Hz近傍および200Hz近傍に応答のピークがあるが、これらは図3のまくらぎの固有振動モードの周波数に一致しており、しかも、レール圧力の振幅よりはまくらぎ下面の振幅の方が大きくなっていることがわかる。すなわち、バラスト層に加わる荷重に関しては、レール下面での動荷重がほぼそのままのかたちでバラスト層に伝達されるが、さらに、荷重の伝達経路にあるまくらぎの固有振動特性の影響を受けたものとなることがわかる。

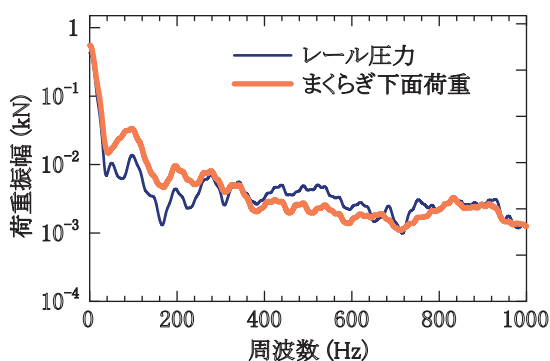


図7 バラスト層に加わる動荷重

4.3 加速度のリニアスペクトル

つぎに、まくらぎとバラストの加速度応答について考える。図8は、まくらぎ上面のレール脇の位置と、その直下で10cmの深さにあるバラスト振動加速度のリニアスペクトルである。測定条件は図7と同じである。図より、バラストに伝達される動荷重に関しては、低い周波数成分ばかりでなく、100Hzを超える高い周波数域についても大きな応答成分を有することがわかる。なお、これらの高い周波数域の荷重成分は、車輪・レール間で瞬間的に発生する衝撃荷重の鋭い尖りに起因する。

従来のバラストに関連する研究では、バラスト自体が土質材料の範疇にあり、しかも、軸重の通過の頻度が数Hz～20Hz程度の低い周波数領域にあることから、主に数Hz～20Hz程度の低い周波数域について着目してきた。しかしながら、実際の測定結果をみると、バラスト層に載荷される動荷重は、低周波域から高周波領域までの広帯域にわたる周波数成分を含んでおり、しかも、数100Hzという高い周波数成分についても確実にバラスト層に伝達されていることがわかる。したがって、バラストに加わる動荷重の影響を低減させるには、低い周波数のみに着目するだけではなく、これら高い周波数域の動荷重成分を減らすことが不可欠であるといえる。

また、まくらぎはその構造上、上述のようにいくつかの固有振動モードを有しており、図8でもそれらの固有振動数近傍に応答のピークが顕著にみられる。これらのピークを与える周波数に関して、同図のバラストの測定

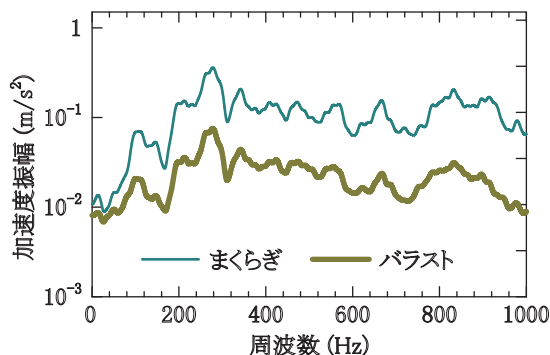


図8 まくらぎとバラストの加速度応答

結果と比べると、その波形の特徴は似ており、したがって、まくらぎの固有振動モードを介して動荷重がバラストまで伝達されていることがわかる。

4.4 変位のリニアスペクトル

図9は、まくらぎとバラストの変位についてのリニアスペクトルである。前節の図8では、数100Hzという高い周波数成分についても、動荷重が確実にバラスト層に伝達されていた。しかしながら、図9より、高周波域の変位振幅は非常に小さく、例えば800Hzでのバラストの変位振幅の大きさは1/1000 μm 程度しかない。従来、バラストに伝わる衝撃荷重に関しては、バラスト砕石自体の並進運動や回転運動などの剛体運動を介して荷重が伝わるものと考えられてきた。しかし、測定結果による変位振幅の大きさから考えると、高い周波数成分については、砕石自体の剛体運動では無く、むしろ砕石間の接触点近傍の稜角部分のみによる弾性変形と滑りで荷重が伝わるものと推察される。一方、数Hz～20Hzの低い周波数の変位振幅に関しては、これら高周波域の振幅値より3桁ほど大きい。したがって、低い周波数域の動荷重成分に関しては、バラスト砕石自体の変位を介して荷重が伝達されるものと考えられる。

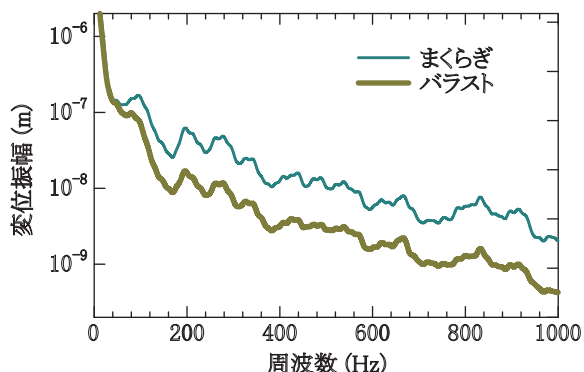


図9 まくらぎとバラストの変位応答

4.5 バラストによる衝撃荷重の低減効果

まくらぎとバラスト間における動荷重の伝達特性について調べる。図10は、まくらぎ変位に関するリニアスペクトルと、バラスト変位に関するリニアスペクトルをもとに、まくらぎ-バラスト間の応答倍率を求めたものである。図の縦軸は、まくらぎに振幅1の正弦波変位を加えたとき、まくらぎ下10cmの位置のバラスト砕石にどれだけの大きさの変位が伝わるかということを示している。図において、振幅1からの低減量は、バラスト10cmの厚さにおける、載荷エネルギーの低減効果の大きさを意味する。なお、図には変位応答倍率を示すが、加速度応答倍率でも同じ図となる。

図より、およそ100～200Hzより高い周波数域の動荷重成分については、それらがまくらぎからバラストに

伝わる間に、周波数に殆ど関係なく、およそ 1/3 ~ 1/5 の大きさまで低減している。すなわちバラストはわずかに 10cm の厚さでありながら、高周波成分の動荷重に対して、非常に大きな荷重低減効果を有することが分かる。

しかしながら、低い周波数領域では、1 に近い応答倍率のところもあり、バラスト層は低い周波数域の荷重成分を低減する能力が殆どないといえる。とくに 1 に近い応答倍率の周波数は、軌道構造と其上載質量が、バラストばねにより剛体振動する固有振動モードであり、バラスト層の変位挙動の大きな要因が、このモードの共振現象に起因するものと考えられる。

このように、100 ~ 200Hz より高い周波数領域と、それより低い領域でバラストの挙動のメカニズムが全く異なることが、この図から示唆される。また、バラストに加わる動荷重に関しては、高い周波数成分についてはバラスト層でその層厚を確保することにより十分に低減させることができる。しかしながら、低周波成分に関してはバラストのみでは吸収できず、したがって、レール下やまくらぎ下に非常に柔らかい緩衝材をはさむことなどの方法により、バラストに加わる以前の段階で十分に吸収・低減させる必要があるといえる。

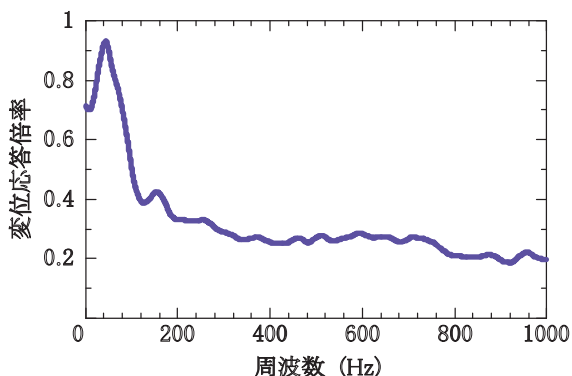


図 10 まくらぎ-バラスト間の応答倍率

4.6 バラスト内部の荷重と変位の関係

バラスト層に加わる動荷重とバラストの変位の関係について調べる。図 11 は、バラストに加わる荷重スペクトル（載荷面の大きさ 24cm × 40cm）と、その直下 10cm の深さにあるバラストの変位スペクトルとの関係をプロットしたものである。図中に追記した周波数は、その点を与える応答スペクトルにおける周波数である。なお、図には約 17Hz までしか値を示していないが、それらの周波数よりも高い周波数成分に関しては、図中では概ね原点近傍の直線上に集中してプロットされている。また、同図の曲線の勾配がバラスト層の動的なばね係数を意味する。

図より、動荷重が加わったときのバラスト挙動に関しては、原点近傍で変位が小さい領域（すなわち数十 Hz 以上の高周波領域）では、荷重と変位の間に線形性がみられる。また、その接線の勾配も大きい。このことより、

振幅が小さい高い周波数領域では、バラスト層は概ね弾性体として挙動し、バラスト層は衝撃荷重に対して十分な抵抗力を発現しうることがわかる。しかし、変位がある程度大きくなると（すなわちおよそ 10Hz 以下の低い周波数領域）、バラストは抵抗力を発現することが出来ず、大きく変形してしまうことが分かる。すなわち、バラスト層は、高い周波数成分に関しては概ね弾性体として挙動し、その内部にて大きな荷重低減効果を発揮する。一方、低い周波数成分に関してはバラストが大きく変形してしまい抵抗力を殆ど発現できないものといえる。

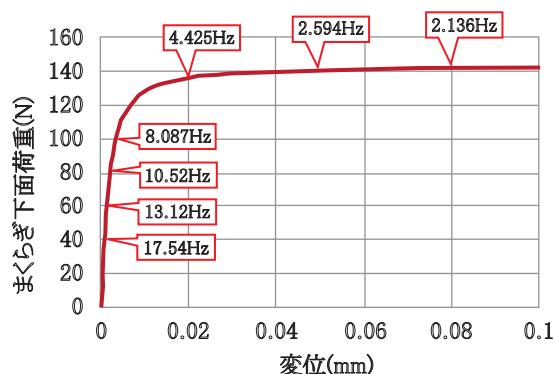


図 11 バラスト層の変位と荷重の関係

4.7 バラスト層の動弾性係数

図 12 は、バラストに加わる荷重スペクトルとバラストの変位スペクトルをもとに、バラスト層 30cm の厚さあたりの動剛性（動弾性係数）を求めたものである。図よりバラスト層は、どの周波数帯に関しても一定の硬さを有するような構造ではなく、その硬さは周波数が高くなるにつれて、徐々に大きくなる傾向がわかる。同図より、100Hz 以上の周波数域の荷重成分に関してはおよそ 200MPa ~ 2GPa 程度の剛性を有している。測定条件が異なるので直接的には比較できないが、一般にバラスト用の岩石は、マッシュな状態ではおよそ 40 ~ 60GPa の弾性係数を有する。本図によると、砕石層ではそれに比べて 1 ~ 2 桁ほど弾性係数値が低いものの、それでも土質材料としては十分な硬さを有している。すなわち、およそ 100Hz 以上の衝撃荷重に対して、バラスト層は概

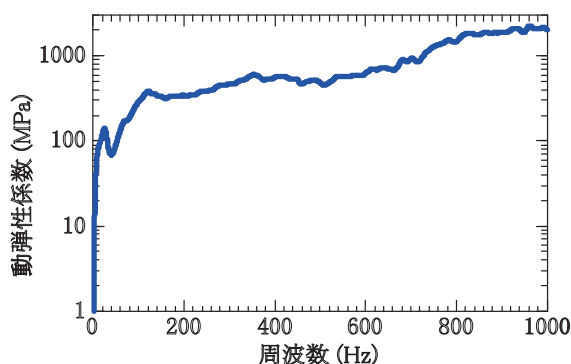


図 12 バラスト層の動弾性係数

特集：軌道技術

ね一体的な弾性体として挙動し、しかも十分な抵抗力を発生しようと判断できる。

しかし、同図において 100Hz より低い周波数帯の荷重成分に着目すると、周波数が低くなるに従い、その動弾性係数は急激に小さくなるのがわかる。これはバラスト層は極端に柔らかくなったことと同等であり、バラスト層は低い周波数域の荷重成分に対して殆ど抵抗力を發揮できないものと考えられる。

5. 衝撃に対する抵抗力発現のメカニズム

これまで、バラスト層の実測データをもとに、バラスト層が発現する抵抗力に関して、主にバラスト層の剛性(弾性係数)をもとに議論した。その結果、動荷重の高い周波数成分に関しては、バラスト層は高い剛性により抵抗力を発生することがわかった。しかしながら、低い周波数成分については、剛性のみでは十分な説明ができない。そこで、本節では、さらに質量に関する評価軸を導入し、とくに低い周波数成分について考える。

すなわち、バラスト層の実測データをもとに、加速度に比例する動質量(荷重/加速度)、および、変位に比例する動剛性(荷重/変位)を求めて、運動方程式における慣性項と剛性項の寄与の大きさを比較する。ここに、動剛性および動質量は、いずれも荷重÷応答値であり、これらの指標が大きいことは、バラスト層が荷重に対して抵抗力があり、動きにくいあるいは変形しにくいことを意味する。

図 13 は、実測データのスペクトル特性から求めたバラスト層の動質量と動剛性である。両者の単位が異なることから、それぞれの最大値で除して、最大値が 1 になるように基準化した。図中の動質量が 1 に近い場合は、バラストの抵抗力が慣性項に起因することを意味し、また、動剛性が 1 に近い場合は、バラストの抵抗力が剛性項に起因することを意味する。

図より、動質量に関しては、およそ 10Hz 以下の周波数領域ではほぼ 1 に近い値であり、その値はほぼ一定値である。すなわち、概ね 10Hz 以下の周波数の衝撃荷重成分に関しては、ほぼ慣性項のみで挙動が決まり、したがって、動荷重に対してはバラスト層の質量でもって抵抗力を発生することがわかる。

また前節までで議論したように、図より、動剛性に関しては、とくに 10Hz 以下の低い周波数領域では殆どバラストの挙動に関与せず、一方、100Hz を超える高い周波数域ではバラストの剛性のみでバラストの挙動が決定されることがわかる。両者の中間領域である周波数が 10Hz ~ 100Hz の範囲では、バラストの剛性の影響と質量の影響とが、相乗的あるいは拮抗的に関与することになり、複雑な挙動を呈することが予想できる。しかもその周波数領域には、まくらぎの剛体振動モードや一次曲

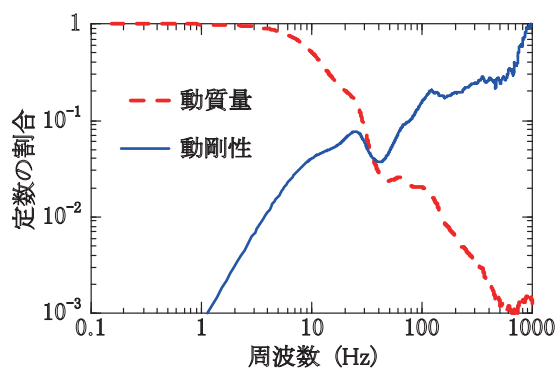


図 13 バラスト層の動剛性と動質量

げモードなどまくらぎの固有振動モードが存在する。したがって、軌道構造の動的応答特性の評価や、あるいは、対策工の提案のためには、これらバラストの抵抗力発現のメカニズムの特徴を考慮する必要があるといえる。

6. まとめ

センシングストーンとセンシングまくらぎを用いた実物大加振実験と現場測定結果より、バラストに作用する衝撃荷重の特徴、および、バラスト層内部における動荷重の低減メカニズムについて、周波数領域における定量的な分析を行った。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) バラスト層に伝わる動荷重に関しては、低周波成分のみで無く、高周波成分も伝わっており、それらはまくらぎの固有振動モードの影響を受ける。
- (2) 動荷重に対するバラスト層の低減効果を定量化した。概ね 100Hz 以上の荷重成分については荷重が大幅に低減するが、それより低い周波数成分についてはほとんど減衰しないことが明らかになった。
- (3) バラスト層のばね特性に関しては大きく二つの領域に分けられ、数十 Hz より高い周波数領域では、バラスト層は高い剛性を有し、バラスト層が全体として荷重に抵抗するが、それより低い周波数領域では抵抗力をほとんど発生できないことがわかった。

文献

- 1) M. Lu and G. R. McDowell, "Discrete Element Modelling of Railway Ballast under Triaxial Conditions", *Geomechanics and Geoengineering*, 3(4), 257-270, 2008.
- 2) A. Aikawa, F. Urakawa, K. Abe, A. Namura, "Dynamic Characteristics of Railway Concrete Sleepers using Impact Excitation Techniques and Model Analysis", *WCRR*, 2011.
- 3) H. Sakai and A. Aikawa, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Sleeper Vibration with the Influence of Ballast", *Proceedings of the First International Conference on Railway Technology Research, Development and Maintenance*, 2012.