

バラスト層に伝わる衝撃荷重と振動低減効果に関する現場測定

鉄道総合技術研究所

正会員 ○相川 明

鉄道総合技術研究所

正会員 坂井 宏隆

1. はじめに

列車通過時にバラスト層に伝わる衝撃荷重の特徴、および、衝撃荷重に対するバラスト層の振動低減効果を定量的に把握するために、実軌道の現場測定結果をもとにスペクトル分析を行った。

2. バラストに伝わる衝撃荷重の周波数特性

図-1 は、在来線で特急列車通過時(走行速度 127km/h)のレール圧力と、まくらぎ下面荷重のリニアスペクトルである。図より、両者のスペクトルは形状・振幅ともに非常によく似ており、軌道パッドを介してまくらぎに伝達された衝撃荷重は、まくらぎ下面よりほぼそのままの形でバラストに伝わるのがわかる。

図-2 は、まくらぎとその直下(約 10cm の深さ)のバラスト層の振動加速度のリニアスペクトルである。図より、バラストに伝達される衝撃荷重は、低周波域から高周波域までの広帯域の成分からなり、とくに、高周波域にも大きな振幅を有することがわかる。また、まくらぎはいくつかの固有振動モードを有するが、図中のピーク値を与える周波数は、いずれもまくらぎの固有モードに一致する。すなわち、バラスト層に加わる衝撃荷重に関しては、まくらぎの固有モードの影響を大きく受けることがわかる。

図-3 は、まくらぎとバラストの振動加速度を2回積分し、これらの変位についてのリニアスペクトルである。図より、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は 1/1000 ミクロン程度しかない。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動きを介して荷重が伝わるものと考えられてきたが、これら変位振幅のオーダーから考えると、高い周波数成分については、砕石間の接点近傍の弾性変形のみで荷重が伝わるのではないかと予想される。

3. バラスト層内部における衝撃荷重の低減効果

図-4 は、まくらぎとバラストに関する変位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。図には変位応答倍率を示すが、加速度応答倍率も同じ曲線となる。図中の応答倍率 1 からの減少量は、厚さ 10cm あたりのバラスト層の振動低減効果を意味する。図より、およそ 200Hz 以上の周波数では、その振幅が 1/3~1/5 に低減しており、バラスト層は高周波領域に関して、非常に大きな振動低減効果を持つことが分かる。一

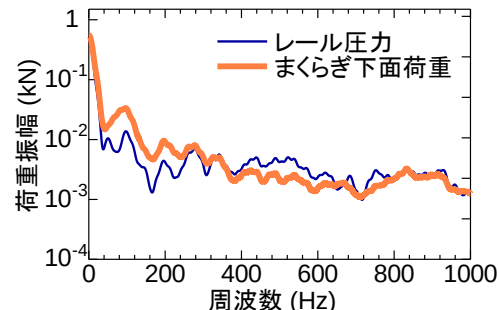


図-1 レール圧力とまくらぎ下面荷重

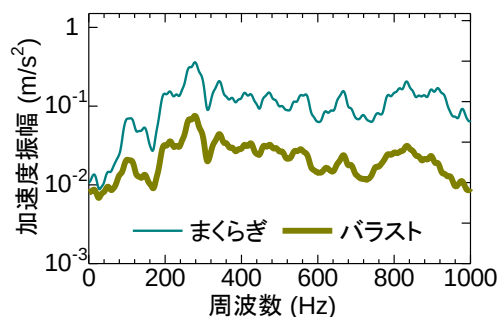


図-2 加速度スペクトル

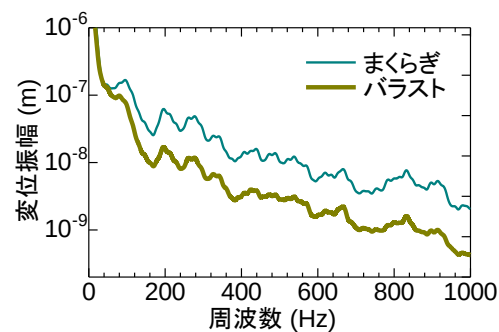


図-3 変位スペクトル

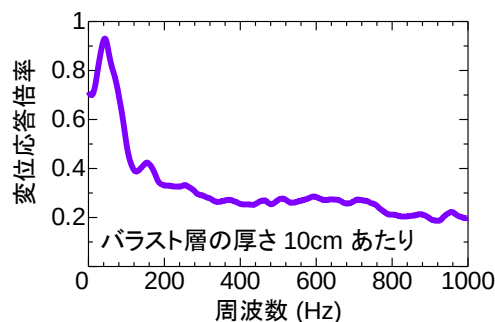


図-4 変位応答倍率

キーワード バラスト軌道、振動加速度測定、まくらぎ下面荷重測定、等価弾性係数、スペクトル分析

連絡先 185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所鉄道力学研究部(軌道力学) TEL 042-573-7291

方, 低い周波数領域では1に近い応答倍率のところもあり, バラスト層は低周波の振動成分を低減する能力が殆どないといえる。

4. バラスト層の弾性係数の周波数依存性

図-5 は, バラストの荷重スペクトルと変位スペクトルをもとに, バラスト層の厚さ 30cm あたりの応力とひずみの関係を求めたものである。図の勾配が弾性係数を意味する。図より, ひずみがおおよそ 20μ より小さい範囲では, 応力とひずみの間に明瞭な線形性があり, バラスト層は一体的な弾性体構造として衝撃に抵抗することがわかる。しかし, ひずみがおおよそ 40μ を超えると, その勾配はほぼフラットになり, したがってバラスト層は抵抗力を急激に消失することがわかる。

図-6 は, 層厚 30cm あたりの等価弾性係数を求めたものである。図より, 荷重の周波数が高くなるにつれて, バラスト層の弾性係数も大きくなる。また, バラスト層はおおよそ 100Hz 以上の周波数では 200MPa~2GPa の弾性係数を有しており, これは路盤材料として十分な強度といえる。一方, 100Hz より低い周波数帯では, その弾性係数は急激に小さくなる。

5. バラスト挙動の周波数依存性に関するメカニズム

バラスト変位 u (m), 加速度 $a = \partial^2 u / \partial t^2$ (m/s^2), 質量 m (kg), ばね係数 k (N/m), 荷重 f (N) とし, 減衰特性を構造減衰として剛性項の複素軸にとりこむと, バラストの運動方程式は $ma + ku = f$ となる。左辺がそれぞれ慣性項, 剛性項である。バラスト層の実測データをもとに, 加速度に比例する等価質量, および, 変位に比例する等価ばね係数の大きさを比較する。図-7 は, 実測データのスペクトル特性から求めた, バラスト層の等価質量と等価ばね係数である。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になるようにした。図中の等価質量が1に近い場合は, バラストの挙動は慣性項の影響で決まることを意味し, また, 等価ばねが1に近い場合は, バラストの挙動が剛性項の影響で決まることを意味する。

図より, 等価質量に関しては, おおよそ 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を示す。このことより概ね 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, バラスト層は衝撃荷重に対してその質量でもって抵抗力を発現することがわかる。すなわち, 低い周波数帯の衝撃荷重成分に関しては, バラスト層全体あるいは個々のバラストがゆっくり上下に動き, その質量の大きさが挙動を決めることになる。一方, 100Hz を超える高い周波数帯ではバラストのばねの特性のみでバラストの挙動が決定されることがわかる。おそらく, バラスト稜角の接触点近傍が弾性ばねとして機能することで, 衝撃に抵抗するものと考えられる。また, 10Hz~100Hz の範囲では, バラストのばね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。

6. まとめ

現場測定結果より, 列車走行時に衝撃荷重を受けるバラストの動的挙動特性に関して, 次のようなシナリオが想定される。(1)概ね 100Hz 以上の衝撃荷重成分に対して, バラスト層は剛性で抵抗し, 非常に大きな振動低減効果を有する。(2) おおよそ 10Hz 以下の周波数領域ではバラスト層はその質量でもって抵抗力を発現するが, 振動の低減効果は殆ど無い。(3) 両者の中間領域では, バラストのばねと質量の影響とが同時に作用し, 複雑な挙動を呈する。これらに関して, 今後, 実験および解析を通して詳細を検証する必要があると考える。

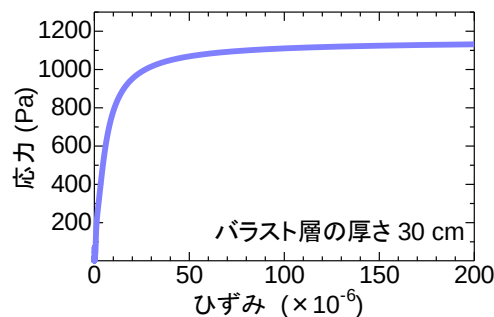


図-5 応力とひずみの関係

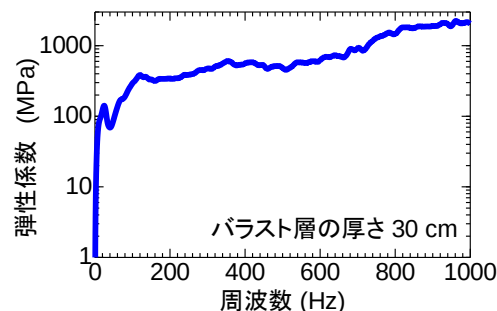


図-6 バラスト層の等価弾性係数

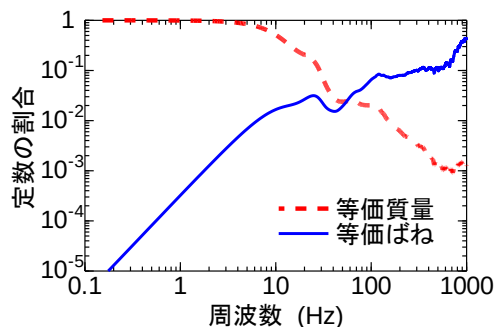


図-7 バラスト層の等価質量と等価ばね