

まくらぎ下面圧力とバラスト挙動に関する 現場測定法の開発

相川 明* 名村 明* 河野 昭子* 浦川 文寛*

Development of Measurement Techniques for Dynamic Pressure on a Sleeper Bottom and Dynamic Behavior of Ballast Stone Induced by Running Train

Akira AIKAWA Akira NAMURA Akiko KONO Fumihiro URAKAWA

This paper describes a newly developed technique to measure the dynamic pressure on a sleeper bottom induced by a running train with high frequency up to several thousand Hertz using a special sensing sleeper. Attached to the whole undersurface of the sleeper is a solid construction of 75 pieces of thin impact force sensor whose main body is made of piezoelectric film (PVDF), silicone rubber and solid cover plates. The solid cover plates transmit impact force to the sensor and prevent breakage of the sensor itself from impact loads of a running train. Next, the paper also describes newly developed measurement techniques of the three-dimensional (3D) behavior of a ballast stone using a special ballast sensing stone with piezoresistive triaxial acceleration sensors. We examined the performance of sleeper sensor and sensing stone through a full-scale field experiment performed on a railway line. The results verified that the newly developed techniques are effective for measuring the dynamic interaction within the boundary layer between a sleeper and an assemblage of ballast grains of a conventional ballasted track.

キーワード：バラスト軌道，まくらぎ下面圧力，衝撃荷重センサ，三軸加速度センサ，道床振動加速度

1. はじめに

我が国の鉄道軌道の大部分は、道床バラストと呼ばれる単粒度砕石を用いたバラスト軌道である。バラスト砕石は適度な剛性を有し、施工性・排水性に優れ、衝撃荷重や騒音を軽減する特徴も有する。これらの優れた特徴は、道床を構成するバラスト砕石集合体の、粗粒材としての力学特性、いわゆる粒状性によりもたらされる。しかし、バラスト砕石集合体の骨格構造は、列車走行による繰返し荷重を受けて、砕石が側方に移動したり、路盤に貫入したり、あるいは、砕石自体にも局所的な摩耗、破碎、細粒化などが生じ、時間経過に伴って道床構造に「軌道破壊」と呼ばれる不同沈下が発生する。

その結果として、軌道面に軌道不整が進行し、乗り心地や走行性に悪影響を与えかねないため、バラスト軌道には定期的な保守作業が不可避であり、この保守作業に多大なコストを要することが維持管理上の大きな技術課題となっている。したがって、効率的な維持管理を行うためには、現場の状況より軌道破壊の程度とその原因を的確に診断し、道床内部の不均一な沈下現象を適切に予測し、さらに、どのような対策工が沈下抑制に有効となりうるかを定量的に評価可能なモデルの開発が望まれる。

* 鉄道力学研究部（軌道力学）

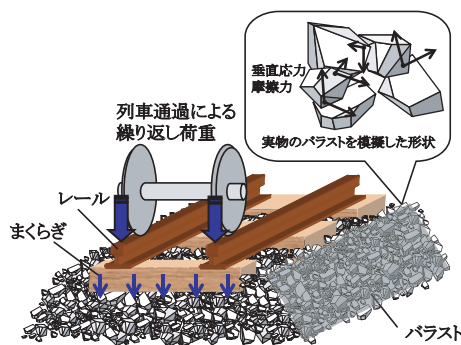


図1 バラスト軌道劣化モデルの模式図

図1に、著者らが開発中の不連続体解析手法を用いたバラスト軌道劣化モデルの考え方を示す。道床は互いに不連続な多面体粒子の集合体と仮定し、実際の砕石形状を計測して数値モデル化する。車両走行に伴う動的荷重は、レール、まくらぎを介して道床部に伝播される。このとき道床内部では、粒子間の接触状況に応じて垂直応力と摩擦力が作用し、砕石粒子の物性とその拘束条件に応じた内部応力が発生し、砕石粒子には水平方向・鉛直方向の並進運動、回転運動および粒子振動が発生する。解析は三次元個別要素法により、バラスト軌道の構造と形状とを忠実に再現する物理モデルを作成し、さらに動的荷重を作用させるものである。数値解析結果をもとに、バラストの運動性能、変形性能、エネルギー散逸特

特集：軌道技術

性、周波数依存性を定量評価し、それらの成果をバラスト軌道の動的応答特性の評価に反映させるものである。

本論文では、バラスト軌道劣化モデルの構築および検証のために新たに開発したバラスト軌道の動的応答特性に関する現場測定法について述べる。道床内部における軌道破壊のメカニズムを解明するには、まずは、道床に加わる外力の条件、すなわち、レール、軌道パッド、まくらぎを介して伝達された列車走行による繰返し荷重が、まくらぎ下面とバラスト碎石層との接触部分において、どのようにして伝達されるかを実際に測定することが重要である。さらに、それらの伝達された荷重により、実際のバラストがいかなる挙動をするのかを詳細に測定する技術についても必要となる。そこで、まくらぎ下面とバラスト碎石層との接触点における動的荷重伝達特性を測定することを目的に、超薄型の衝撃荷重センサをまくらぎ下面に多数敷き詰めた構造の「センシングまくらぎ」を開発した。また、三軸方向の加速度を同時に測定可能な「ピエゾ抵抗型三軸加速度センサ」を用いて、バラスト碎石の三軸方向の並進挙動と回転挙動を同時に測定する「センシングストーン」も開発した。以下に、これらの新しく開発した測定装置の原理と応用例を記す。

2. センシングまくらぎの構造と性能

2.1 衝撃荷重測定用動荷重センサ

荷重センサには従来より各種のものがあるが、①面的な応力を測定可能なこと、②8 cm × 8 cmのサイズで最大荷重 10 kN まで測定できること、③低周波～数 kHz までの動的荷重を測定可能なこと、④まくらぎ下面に貼り付けるので、ジグを含めた厚さが 2 cm 以下であること等の諸条件を考慮して、図2に示す「圧電フィルムを用いた剛性板状のシート型変動荷重計測センサ」¹⁾を採用した。センサ本体は大きさ 6 cm × 6 cm の正方形で、その厚さはわずか 4 mm と薄い。碎石に接する面は、表面保護のために 8 cm × 8 cm × 5 mm のアルミ合金製の受圧板を設け、背面には固定用に 6 cm × 6 cm × 1 cm の大きさで、四隅にネジ穴を設けた金属ブロックを取り付けた。受圧板をセンサ本体より広くすることにより、受圧板背面に幅 2 cm の空間を設け、これを配線用のスペースとした。なお、個々のセンサについて、インパルスハ

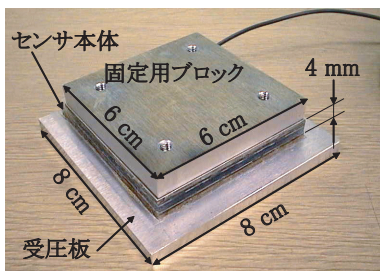


図2 超薄型動荷重センサ

ンマを用いた荷重試験（最大荷重 5kN）を実施し、センサごとの較正值を求めた。さらに、まくらぎ下面にセンサを固定し実物大試験軌道に設置し、落錘荷重試験（重錘質量 1000 kg, 最大落下高さ 30 mm, 最大載荷レール圧力 83 kN）を実施して、本センサをまくらぎ下面に装着して測定可能なことを確認した。

2.2 薄型 PC3 号まくらぎの設計・製作

まくらぎ本体に関しては、その下面に厚さ 2 cm のセンサを固定するので、従来品のまくらぎより 2 cm 薄く、しかしながら、従来品とほぼ同程度の強度を有するまくらぎを新たに設計・製作した（図3）。本まくらぎは、PC3 号まくらぎの下面に、8 cm 間隔で荷重センサを縦 25 個 × 横 3 列に貼り付けたものである。荷重センサの取付けにあたっては、碎石層に接する面に金属の受圧板を貼り付けて表面を保護し、まくらぎサイズと同じ金属製ユニット板にて 75 個のセンサを一体構造とし、まくらぎ下面に固定した。また、実軌道への設置にあたり、絶縁抵抗試験（乾燥・降雨状態ともに軌道 1km あたり 2.0 Ω 以上）、また、所定の強度試験（JIS E 1202 準拠）²⁾、および、試験軌道での敷設試験と走行試験を実施し、製作したまくらぎを実軌道に敷設しても安全であることを確認した。

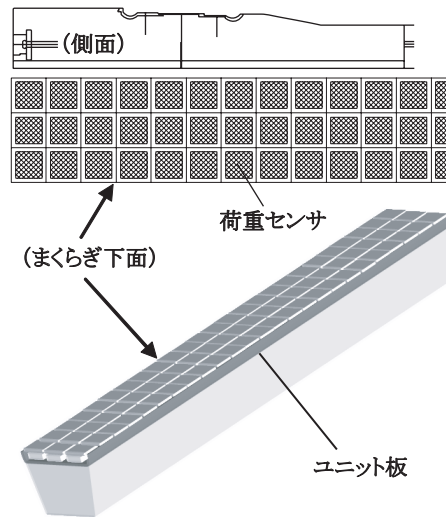


図3 まくらぎの製作とセンサ取付

3. センシングまくらぎによる動荷重測定試験

3.1 測定概要

図4に示すように、開発したセンシングまくらぎを実軌道の溶接継目箇所を設置し、車両走行時に作用するまくらぎの動荷重分布を測定した。本まくらぎは寸法・強度ともに従来品とほぼ同等であり、既設まくらぎと入れ替えて、通常の締結装置にて軌道に固定するのみで設置が完了する。



図4 実軌道での設置状況

3.2 車軸通過による荷重分布の変化

測定結果の一例を図5に示す。図は、特急車両（走行速度 90 km/h）の先頭車前車第1軸が、まくらぎの手前側の端部に達し、徐々にまくらぎ上を移動し、反対側の端部へ抜ける際の、車輪位置とまくらぎ下面の荷重分布を示したものである。図より、動的な走行荷重は、まくらぎ下面の全面で均等に受け持つのではなく、場所的にばらつきが大きく、局所的に大きな荷重が集中する傾向があることがわかる。

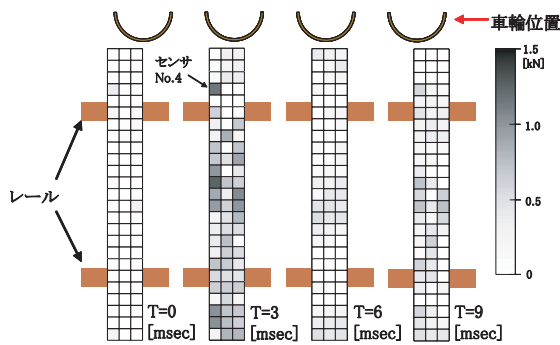


図5 まくらぎ下面荷重分布の測定例

3.3 車軸通過による荷重分布の時刻歴応答

図6に、荷重ピーク値が最も大きい図5に示すセンサ No.4 の荷重を示す。図中の破線は、台車の前軸、後軸がまくらぎ中央直上を通過する時刻 ($t=1.0297$ s, $t=1.1131$ s) を表している。図より、車軸がまくらぎ中心を通過する時刻の前後約 5 ms の時刻に 1.0 ~ 1.5 kN の大きさの荷重のピークが現れていることがわかる。当該列車の走行速度では 5 ms で 12.5 cm 進む。一方、まくらぎ中心から前後の端部までの長さは約 12 cm である。したがって、荷重がピークになるのは、車軸がまくらぎの手前側の端部にさしかかったとき、その後車軸がまくらぎ上面を通過し、再度、まくらぎの反対側の端部上を通過する時ということになる。

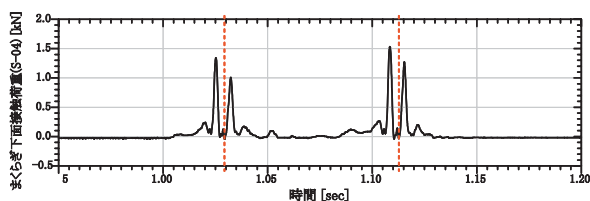


図6 先頭台車通過時のまくらぎ下面荷重（センサ1個）

3.4 車軸通過時のピーク値分布

図7は、車輪がまくらぎ上を通過する非常に短い時間幅における、個々のセンサに作用する時刻歴上の荷重の最大値を示したものである。まくらぎに作用する動的な荷重は、まくらぎ下面全面で均等に支持するのではなく、場所的にばらつきが大きく、また、一部の接触点に大きな荷重が集中する傾向がみられた。

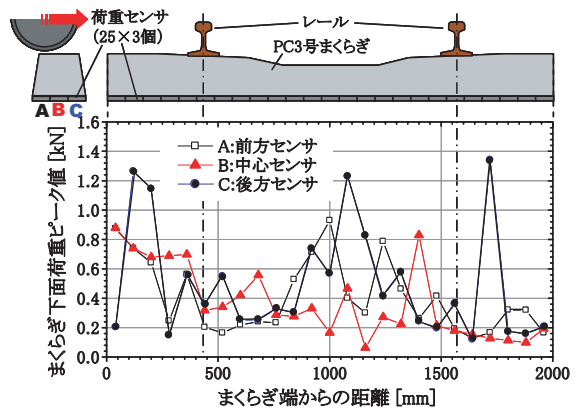


図7 まくらぎ下面の荷重分布（最大値分布）

3.5 砕石層とまくらぎ面との接触応力

鉄道総研内の試験線で実施したモーターカー走行試験において、センシングまくらぎによる車両走行時の荷重の測定と同時に、まくらぎ下面に感圧式圧力シートを挿入し、実際の接触点分布およびその面積を測定した。測定結果によると、センサ1枚あたり、砕石とまくらぎの実際の接触点の面積はわずか数 mm² ~ 数十 mm² であった。これを1個あたりのセンサの面積 (6 400 mm²) と比べると、接触点では、センサ1個あたりの見かけ上の応力に比べて数 100 倍の応力集中が発生することになる。

上述のセンシングまくらぎの測定結果では、センサ1枚あたりの見かけ上の最大応力はわずか 0.2 MPa であった。しかし、このような小さな応力の場合であっても、例えば 300 ~ 400 倍の応力集中があると、接触点での真の接触応力は、砕石の一軸圧縮強度 (60 ~ 80 MPa) レベルに達することになる。この場合、接触点近傍の砕石稜角部には、破損や摩耗などのいわゆる破壊現象が発生する可能性がある。

本モーターカーの輪重は、特急車両の輪重のおよそ半分であり、両者を直接的に比較できるものではないが、砕石層での真の接触面積を考慮すると、通常の走行条件・軌道条件下であっても、場合によっては砕石に局所的な破壊・摩耗等の劣化現象が発生することがありうる。今回の測定結果より明らかになった。

4. センシングストーンの測定原理と構造

4.1 センシングストーンの開発の背景

列車走行時の荷重環境下での砕石挙動を把握するため

特集：軌道技術

に、従来、一軸型の加速度センサを道床に直接埋め込んだり、あるいは、内部に加速度センサを取り付けた碎石を埋設し、道床の振動加速度測定が行われてきた^{3)~5)}。しかし、従来の一軸型加速度センサでは、得られる情報はある一方向の加速度測定値のみであり、測定軸がどの方向を向いているのか特定できず、さらに、碎石の三次元的な運動については把握できなかった。しかも、一軸センサでは、道床の維持管理作業によりセンサ自体が移動・回転し、当初予定していた設置角度からずれてしまうという問題点もあった。

また、碎石集合体を粒状体としてとらえると、個々の粒子の回転挙動が塑性変形の大きな要因となることから、回転運動を含めた、碎石の三次元的な運動に関する測定技術の構築が必要となる。そこで、三軸の加速度を測定可能な「 piezo抵抗型三軸加速度センサ⁶⁾」を複数個用いることにより、道床碎石の水平方向、鉛直方向、奥行き方向の三軸の並進挙動とともに、碎石の回転挙動を同時に測定するセンシングストーンを開発した。

4.2 piezo抵抗型三軸加速度センサの構造

piezo抵抗型三軸加速度センサは、加速度の検出に半導体piezo抵抗効果を利用する加速度センサである。piezo抵抗効果とは、半導体結晶に機械的外力を加えると結晶格子に歪みを生じ、その抵抗値が変化する現象である。

図8にpiezo抵抗型三軸加速度センサを示す。本研究で使用するセンサは、MEMS技術を応用して、支持部、錘、梁からなる微小な構造体をシリコン基盤内部に構築したものである。この構造体の錘の部分が加速度に応じて変位することで梁が変形し、piezo抵抗素子に応力が発生する構造である。piezo抵抗素子は、梁上の最も応力集中する位置に一軸あたり4素子でブリッジ回路をなし、三軸で計12素子がそれぞれ配置され、素子に生じるひずみを抵抗値の変化で検出するしくみになっている。

使用したセンサは、日立金属製piezo抵抗型三軸加速度センサ(H48D, 最大加速度±10G, 計装アンプ内蔵, 温度補正機能つき, サイズ4.8 mm × 4.8 mm × 1.5 mm, 基準感度90 mV/G)である。可動部分がないことから過大な入力加速度に耐え、消費電力も小さいので、外力・環境ともに過酷な条件下にある道床碎石の内部に密閉・封入しても、外力や発熱により損傷することはない。

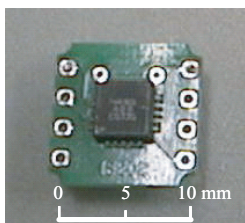


図8 piezo抵抗型加速度センサ

4.3 三次元センシングストーンの動作原理

図9は、碎石内部に三軸加速度センサ2個を配置した場合のセンシングストーンの動作原理を示す。この碎石に並進運動と回転運動が同時に作用すると、両センサからは並進運動と回転運動の大きさに応じた加速度値が出力される。このとき、両センサ出力の平均値は碎石の並進運動の加速度成分、他方、両センサ出力値の偏差量は、碎石の回転運動の加速度成分を表す。

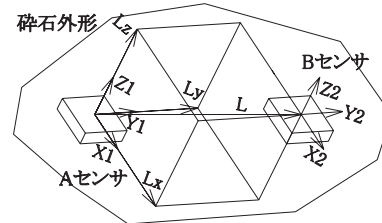


図9 三次元センシングストーンの動作原理

4.4 加速度センサの感度較正

本加速度センサは、電源電圧が3Vのとき、1Gあたり90 mVの電圧を出力する。しかしながら、感度と無載荷時(ゼロG)電圧については、個体間、軸間で若干のばらつきがある。センサ使用にあたり、事前に感度とゼロG電圧を測定し較正值を求め、感度が最も近いセンサ2個を選んで、センシングストーンに使用することにした。そのため、往復スライダクランク機構上にセンサを固定し、センサの出力とモータの回転速度から求めた加速度実測値とを比較するとともに、動電型振動試験装置を用いてセンサに正弦波載荷試験を行い、測定結果より概ね1kHzまでの線形性を確認した。

4.5 三次元センシングストーンを試作品製作

試作品の製作過程について述べる。上述の三次元センシングストーンの動作原理の説明では、直方体の頂点に加速度センサを2個配置した構造を考えた。しかしながら、実際の三次元センシングストーン製作にあたっては、2個のセンサを結ぶ部分のみを、碎石内に再現すれば十分である。

そこで、正確に位置決めされた2個の加速度センサに、電力供給、センサ制御、データ入出力のための配線を行い、それに安定化電源とノイズフィルタを含めたものをあらかじめモールドに封入されたコア部とし、あとからこれを碎石内部もしくは人工碎石に埋め込むことにした。また、設置方向を特定するために、コア中央に、デジタル式方位センサを内蔵し、加速度センサに比べると精度面では劣るものの時間間隔0.1s毎に、1°単位の方位を出力できるようにした。

これらを、棒状のアルミ矩形容器内部の所定位置に固定し、その後、内部の間隙を樹脂で完全封入し水密性を有するコア部分を製作した。次に、実際のバラスト碎石

形状の型枠をシリコン樹脂で製作し、その型枠内の所定の位置にこのコア部分を固定し、コア部分と型枠との間隙をコンクリート接着用樹脂で充填し、実碎石の形状を有するセンシングストーンを製作した。

また、碎石とケーブルの接合部分は防水加工を行い、細い繊維質のノイズ遮断材によりケーブル全長を覆いノイズ対策を行った。さらに、タイタンパつき固め時に破損しないように、線材の外側に弾性材のゴムチューブを被せた。また、ケーブルが碎石の挙動を阻害しないように、ケーブル、ゴムチューブともに変形可能な構造とし、特に碎石とケーブルの接合部は弾性接着剤を用い、微小な並進・回転挙動を阻害しないようにした。

5. センシングストーンによる実軌道碎石の動的挙動測定試験

5.1 測定概要

実軌道にてセンシングストーンによる測定試験を実施した。事前に25 m区間の道床交換作業を実施し、その後4ヶ月間放置し、センシングストーンを、当該区間内の60 kgレール溶接継目位置で、PC3号まくらぎの締結位置の直下となる深さ15 cmの位置に設置した。また図10は、無載荷時(1G重力作用時)のセンサの三軸加速度出力値と内蔵した方位センサの出力値より推定した碎石の設置状況である。図は、まくらぎ側方からみた軌道の縦断面であり、列車はこの図の右側から左方向に走行する。

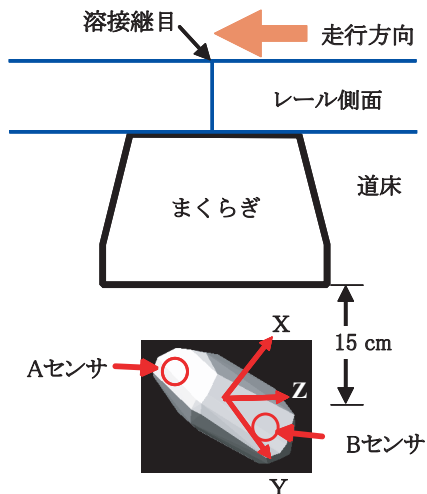


図10 センシングストーンの設置位置と向き

5.2 重力方向加速度の合成

特急列車(走行速度 $V=78$ km/h)の先頭車両の前車第1軸および第2軸通過時の測定結果を図11に示す。図は、センサの三軸の加速度測定値をもとに、センサ各軸が重力軸となす方向余弦をもとに、AセンサとBセンサの鉛直方向の加速度を合成し、さらに、並進挙動成分(平均成分)と回転挙動成分(偏差成分)に分離したもので

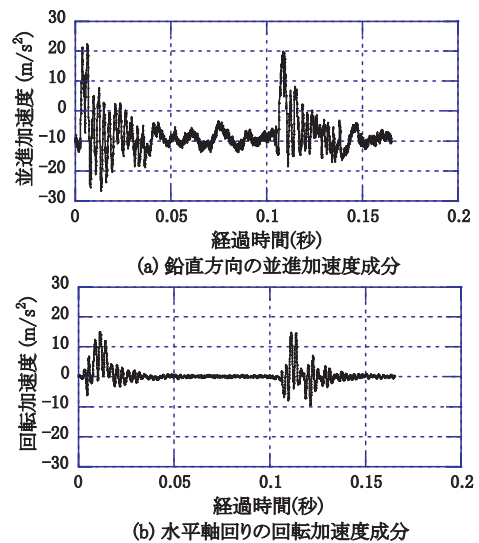


図11 鉛直方向加速度に関する並進成分と回転成分

ある。なお、回転成分については、センサ間距離で除して、角加速度単位 (rad/s^2) でも表示可能であるが、並進運動との比較のため、加速度単位 (m/s^2) で表示する。

図11 (a)の並進成分の図では、マイナス向きが重力向きである。図より、走行荷重を受けたバラスト碎石は、載荷直後に一旦沈下してから跳ね上がるような運動の後、数百Hzの高周波の激しい振動を伴って急激に減衰したことがわかる。この減衰は、載荷後0.04秒後にはほぼ終了し、その後は50~100Hz前後の緩やかな振動が生じた。

また、図11 (b)の回転成分の図より、載荷直後の高周波応答は、回転成分においても見られるが、高周波振動の終了後では、回転運動は殆ど生じていない。すなわち、載荷直後の高周波減衰振動は、回転運動を伴った碎石の局所的な運動であり、それに続く50~100Hz前後の波形は並進運動が主体であり、しかも、この波形には回転運動を伴っていないことから、隣接する碎石もほぼ一体的に運動をしていると推定される。

5.3 道床碎石の挙動の周波数特性

図12は、鉛直方向の加速度のパワースペクトル密度関数(PSD)である。図12 (a)は、載荷直後の減衰振動をしている0.0512秒間(20kHzサンプリング、窓関数Welch関数、データ数1024個)、および、図12 (b)は、減衰振動終了後の経過時間0.04~0.10秒の波形(同、データ数1200個)についての図である。並進成分と回転成分の大きさが異なることから、図には、並進成分を左軸に、回転成分を右軸に示す。図より、減衰振動時には、低周波の応答とともに、340Hzおよび460Hz近傍の高周波領域にピークが見られ、その周波数は、並進加速度、回転加速度のいずれにも共通している。すなわち、密に締め固められた状況の碎石は、低い周波数で一体的に運動するとともに、局所的に隣接する碎石同士が互いに擦れ

特集：軌道技術

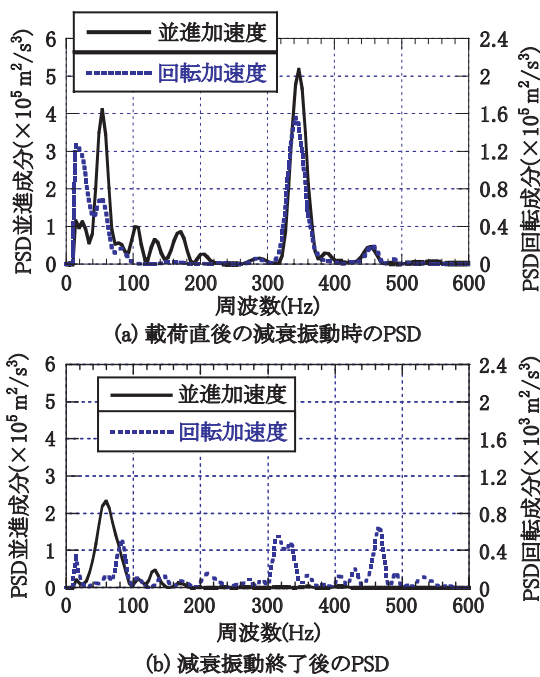


図12 鉛直方向加速度（並進加速度・回転加速度）に関するパワースペクトル密度関数

合うような、高周波の並進運動と回転運動（回転振動）を発生していることがわかった。また、減衰振動終了後は、200Hz以下の低周波の並進成分の振動のみであり、回転成分のPSDは2桁以上小さい。このことから、減衰振動終了後は、碎石が回転せず、道床全体がほぼ同位相の運動をしていると推定される。

本測定結果により、列車走行時のバラストの挙動に関し、概ね200Hz以下の低周波の挙動とともに、300～500Hzの高周波の並進挙動および回転挙動が生じており、車輪・レール間の高周波振動成分がまくらぎ下部まで伝わっていることがわかった。なお、低周波から高周波成分までの、どの周波数帯の成分が、いかなるメカニズムでどのように軌道劣化に影響するかについては、今後、詳細な解析と検証が必要と考える。

6. まとめ

本論文では、新しいバラスト軌道劣化モデルの構築および検証のために新たに開発したバラスト軌道の動的応答特性に関する現場測定法について述べた。実軌道での測定試験により以下のことが明らかとなった。

- (1) 超薄型動荷重センサを用いた「センシングまくらぎ」を開発し、その有効性を確認した。
- (2) 列車走行による動的な荷重は、まくらぎ下面の全面で均等に受け持つのではなく、場所的にばらつきが大きく、一部の接触点に荷重が集中する傾向があることがわかった。

- (3) 別途実施したまくらぎ下面とバラスト碎石層との接触点分布の測定結果と併せて、まくらぎ下面応力を考察した。その結果より、営業線軌道のごく一般的な軌道条件、走行条件であっても、まくらぎ下面における碎石層との接触面積を考慮した真の接触応力は、岩石の破壊レベルまで達する可能性があることが確認できた。
- (4) 道床内部碎石の三次元的な動的挙動（並進運動・回転運動）を測定するために、三軸加速度センサを複数用いたセンシングストーンを開発し、実軌道に埋設して碎石の動的挙動を測定し、その性能を確認した。
- (5) 現場の測定結果より、バラスト碎石の挙動に関して、動的荷重を受けて並進運動するのみでなく、高周波の回転振動を伴った急減な減衰運動をしていることが確認できた。しかしながら、この高周波振動が道床の安定性や劣化にどのように影響するのか明らかにする必要があり、これは今後の課題である。

今後は、本測定装置をバラスト軌道の動的挙動の実態把握と「粒状性に着目したバラスト軌道劣化モデル」の高精度化およびモデル検証のために役立て、それらの成果を対策工の評価モデルの構築に繋げたいと考える。

謝辞

現場測定実施にご協力いただいた九州旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝の意を表す。

文献

- 1) 藤本由紀夫, T. A. Setyanto : 圧電フィルムを用いたシート型衝撃力測定センサ, 日本機械学会論文集 C-73, 725, pp.184-191, 2007
- 2) 日本規格協会編 : JISハンドブック No.69「鉄道」, E 1202 ポストテンション式まくらぎ, pp.301-320, 日本規格協会, 2002
- 3) W. M. Zhai, K. Y. Wang and J. H. Lin : Modelling and experiment of railway ballast vibrations, J. Sound & Vibration, Vol.270, pp. 673-683, 2004
- 4) W.Stahl: Untersuchung eines für HGV optimierten Schotteroberbaus, Querverschiebewiderstandsmessungen und Schwingungsverhalten, EI-Eisenbahningenieur, Vol.54, No.5, pp.8-16, 2003
- 5) (財)鉄道総合技術研究所編 : 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 軌道各部の振動特性, pp.216-220, (財)鉄道総合技術研究所, 研友社, 1993
- 6) 日立金属(株)編 : ピエゾ抵抗型三軸加速度センサ, 日立金属(株)のホームページより, <http://www.hitachi-metals.co.jp/>