

# バラスト軌道の動的挙動

石田 誠  
軌道技術研究部  
(部長)

相川 明  
鉄道力学研究部  
(軌道力学 主任研究員)



いしだ まこと あいかわ あきら

## はじめに

鉄道が誕生して以来、バラスト軌道は改良されつつも基本的な構造を変えず、列車荷重による軌道破壊に対し、良好な軌道状態を維持するために、常に保守作業を必要としてきました。一方、そのような保守作業を抜本的に軽減するスラブ軌道等の省力化軌道が開発され、その敷設延長も増加していますが、バラスト軌道は在来線軌道のおよそ90%を占めています。現在、バラスト軌道に関わる保守コストの削減は極めて重要な課題であり、少子高齢化の社会における熟練技術者の不足の面からも、それに応じた新たな保守システムの構築が急がれています。

そこで、バラスト軌道に関して将来的に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かを定量的に評価可能なモデルの開発が望まれています。本稿では、軌道保守の効率化を目指して、バラスト軌道の実態把握のために新たに開発した道床バラストの振動加速度の測定法と、保守低減対策の評価を目指した粒状体モデルによるバラスト動的挙動の解析法について紹介します。

## バラスト軌道の設計と道床沈下メカニズム

はじめに、バラスト軌道の設計について、これまでの経緯を簡単に紹介します。バラスト軌道の設計は、旧国鉄において、軌道構造別に求められた軌道変位（設計形状に対する不整）進みとその保守量に関する経験式が導かれ、それらの建設コストと保守コストを考慮して最適な軌道構造を定めようとするものが体系化された設計法としての先駆けと考えられます。そのような背景の下、軌道変位進みとして新たな実験結果と様々な動的な列車荷重を考慮できる動的応答モデルによるシミュレーション結果を用い、軌道変位進みに工学的な解釈を与えて、1997年に新たに「有道床軌道設計標準」が定められました。その後、鉄道に関する技術基準の性能規定化が進められ、2001年に施行された「鉄道に関する技術上の基準に関する省令」を受けて、有道床軌道に限らずスラブ軌道等のバラストレス軌道も含めた軌道構造の設計標準の検討が進められています。

つぎに、設計と保守の基本となる道床沈下メカニズムに関して比較的最近得られた知見を紹介し、大型三軸試験と実物大軌道模型による繰返し載荷試験により、道床沈下に及ぼす道床バラストの強度・変形特性について、初期剛性、内部摩擦角、見かけの粘着力が大きいバラストは復元ヤング率も大きくなり、道床沈下は相対的に小さくなる

ことなどが明らかにされました。また、移動荷重が可能な模型試験により、道床バラストの繰返し塑性変形に及ぼす移動荷重の影響について、移動荷重が定点載荷より道床沈下を促進することが明らかにされました。一方、このような道床バラストに関する基礎的な検討とともに、営業線における

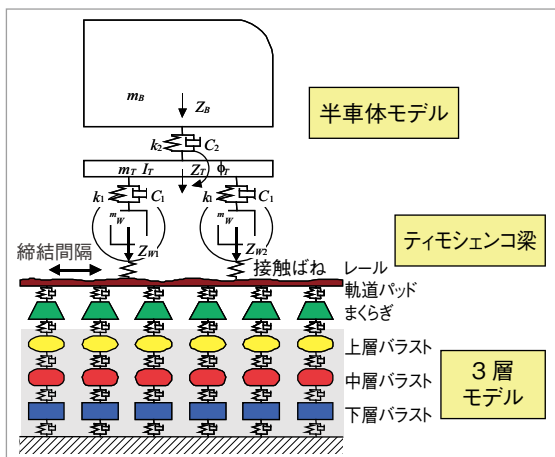


図1 車両／軌道動的応答解析モデル

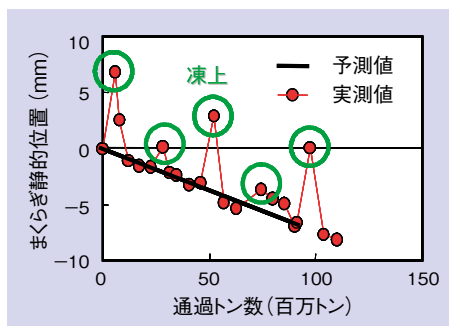


図2 営業線における道床沈下の実測値と予測値

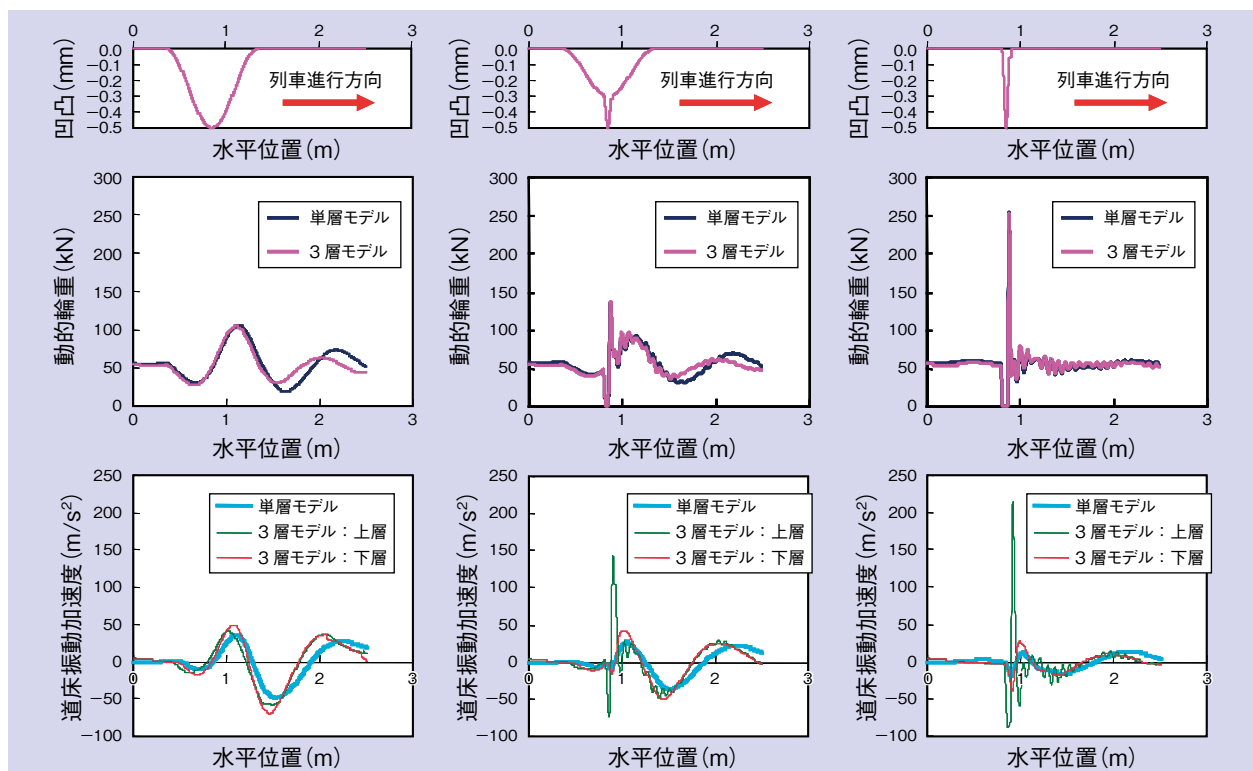


図3 凹凸形状と動的輪重および道床振動加速度

約7年間に亘る道床沈下測定試験により、一部凍上（地盤面が凍結して隆起する現象）の影響がありましたが、概ね一定の沈下係数が得られ、さらに車両と軌道の動的応答解析モデル（図1）と上述した「有道床軌道設計標準」で定められた道床沈下則を組み合わせて、条件は限定されるものの道床沈下をある程度の精度で予測可能であることが示されました（図2）。ただし、有道床軌道設計標準で定められた道床沈下則は定点载荷による実験から求めた実験式を実務経験に基づき補正しており、道床沈下メカニズムについては未解明な点がまだ多く残されています。特に、道床バラストの動的な変形特性に着目した沈下メカニズムの解明が重要です。

### 道床沈下現象

道床バラストは、所定の粒度を有する硬い岩石からできた砕石です。硬い砕石は角張っており、簡単な工事で締め固めることにより、安価にしっかりした構造を作ることができます。しかも、できあがった道床構造は適度な強度と剛性も有していますので、道床バラストは、高速走行する列車から受ける荷重を分散して路盤に伝えるとともに、車輪とレール間に生じる衝撃荷重を柔らかく受け止めて、まくらぎやレールに破損が生じないように衝撃を軽減するという重要な役割を担っています。しかも、排水性にも優れており、列車の振動や騒音も軽減する効果があります。これらの優れた性能は、実は道床を構成する道床バラストが

持つ、任意形状を有する砕石粒子の集合体としての力学特性、いわゆる粒状性によりもたらされるものです。

しかし、道床バラスト集合体の骨格構造は、粒子同士に互いに引き合う力が無く、砕石表面の凹凸による摩擦力と、砕石稜角のひっかかりという、いわゆる「安息角」のみでその安定性を保っているという非常に特殊な構造物です。そのため、多いところでは年間数百万回にも達する車軸通過による繰返し荷重を受けることによって、道床バラスト自体にも徐々に摩耗、破碎による細粒化現象が発生し、さらには、道床バラストが側方に移動し、列車荷重の変動と構造の不均一さから軌道面の長手方向に不同沈下（一般に「軌道変位」と呼ぶ）が発生します。その結果、車体動揺が増加して乗り心地を悪化させ、走行安全性を低下させる場合も考えられます。

### 道床バラストの振動加速度

以上のような道床沈下現象のメカニズムを検討する上で、まくらぎと道床バラスト間の作用力あるいはまくらぎ下面の圧力とともに道床振動加速度の特性を明らかにすることが重要です。そこで、レール面の凹凸形状と走行速度に依存する動的輪重と道床バラストのまくらぎからの距離による振動加速度の違いについて、図1の解析モデルを用いた新幹線高速走行時のシミュレーション結果の例を図3に示します。図から分かる通り、継目落ち（継目部の欠線部あるいは溶接部の凹凸により励起される大きな列車荷重

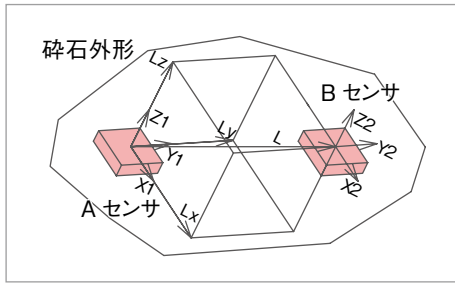


図4 三次元センシングストーンの動作原理

により他の部分と比較して道床が沈下する現象)を想定した波長1mの凹凸形状とそれに溶接部の波長の比較的短い凹凸が重なったもの、さらに溶接部の凹凸形状のみの三つの凹凸形状における動的輪重に関しては、道床のモデル(単層と3層)の違いはほとんどないと言えます。一方、道床振動加速度について、比較的波長の長い継目落ちを想定した凹凸形状においては、道床モデルの違いはほとんどありませんが、溶接部のような波長の比較的短い凹凸形状に対しては、道床の上層と下層で道床振動加速度の大きさが異なります。道床沈下に対する道床振動加速度の影響が大きいと考えられますので、このような上層と下層の振動加速度の違いは沈下メカニズムを明らかにする上で重要な知見であると考えられます。なお、このような道床の上層と下層の振動加速度の違いについては、在来線における走行試験で同様の傾向が得られているものの、これまでの道床振動加速度の測定では、一軸型の加速度センサを埋め込んだ碎石を道床内に設置していたためセンサの軸の方向が明らかではなく、シミュレーションの傾向を十分な精度で検証するまでには至っていません。

### 新たな道床バラスト振動加速度の測定法

従来の一軸型加速度センサでは、設置後に列車荷重や保守作業等によりセンサ自体が移動・回転してしまうと、当初設定した軸方向が変化する可能性があり、また、一軸センサでは三次元的な運動については把握できません。

そこで、バラスト軌道の動的応答特性を把握するために、三軸加速度センサを2個内蔵し、バラスト碎石がどのような方向を向いても、バラスト碎石の三次元的な並進挙動と、回転挙動を同時に測定できる「センシングストーン」を開発しました。図4は、碎石内部に三軸加速度センサ2個を配置した概略図です。この碎石に並進運動と回転運動が同時に作用すると、両センサ出力の平均値は碎石の並進成分、他方、両センサ出力値の偏差量は、碎石の回転成分を表すこととなります。

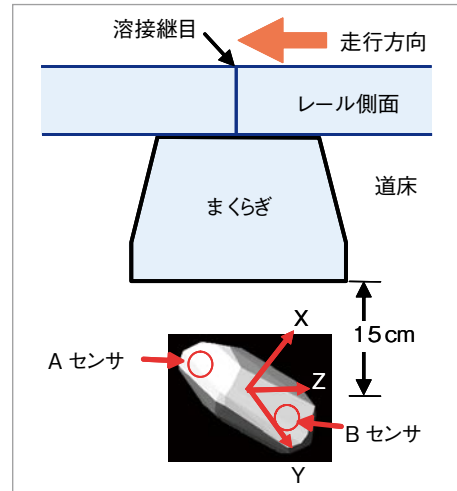


図5 センシングストーンの設定位置と向き

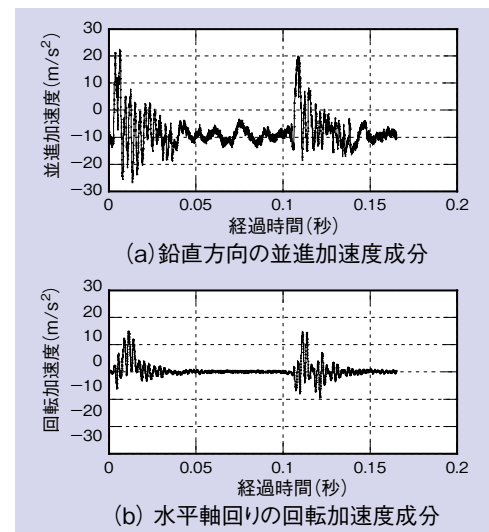


図6 鉛直方向加速度に関する並進成分と回転成分

### 実軌道碎石の動的挙動測定試験

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ました。センシングストーンを、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15cmの位置に設置しました。また図5は、静止状態(1G作用時)におけるセンシングストーンの三軸方向の重力加速度出力値と内蔵したデジタル方位センサの出力値より推定した碎石の設置状況を示したものです。

図6は測定結果の一例です。これは、特急列車の先頭車両の前台車の2つの車軸が通過する時の鉛直方向の加速度の測定結果を示します。比較のため、回転成分についても、並進成分と同じ加速度単位で表示しています。

測定結果より、走行荷重を受けたバラスト碎石には、数百Hzの高周波の激しい上下振動を伴った運動が発生し、

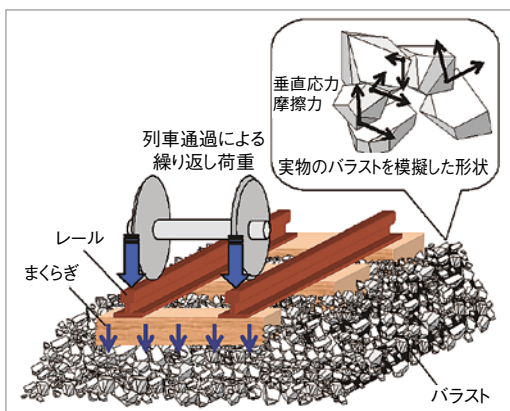


図7 バラスト軌道劣化モデルの模式図

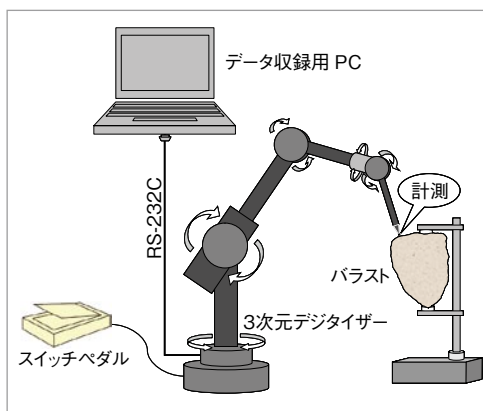


図8 計測装置の構成

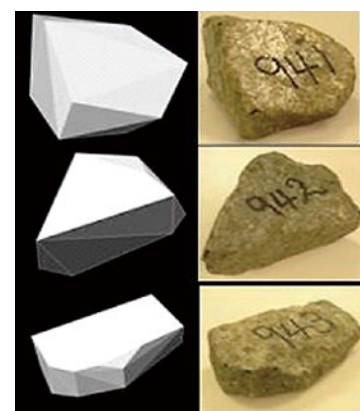


図9 多面体モデルの作成例

その運動は急激に減衰したことがわかりました。また、その際、バラスト碎石には、回転方向にも激しい振動を生じたことも明らかになりました。これは一例ですが、同様の測定をいろいろな条件で実施することにより、道床バラスト運動が軌道破壊にどれだけ影響するかを求めることが出来ます。

### 粒状体モデルによるバラスト動的挙動の評価

道床は任意形状を有する碎石粒子の集合体です。従来の連続体解析法では粒の動きを扱えませんでした。不連続体解析手法を用いると、粒子回転や摩擦すべりなどの粒状体特有の複雑挙動とともに、実験や観測では測定不可能な、粒子間の接触力、粒子の内部応力、運動履歴も把握でき、バラストの動的挙動特性の評価に関して多くの情報を得ることが出来ます(図7)。

図8に示すような、接触式三次元デジタイザを用いたバラスト形状の計測装置を製作し、バラストの三次元形状を測定し、測定データをもとに碎石形状を三次元多面体モデルで表現しました。作成例を図9に示します。

さらに、碎石形状の三次元測定結果をもとに多面体近似した粒度調整後の2万個以上の碎石単体モデルを締め固め、まくらぎなどの軌道構造部材もモデル化して、実際のバラスト軌道構造を詳細に再現した三次元個別要素法モデルを構築しました。本モデルに列車走行時の実測荷重を入力し、軌道の動的挙動を再現し、現場での測定結果と比較しました。解析の概要を図10に示します。本モデル上面のレール位置より、特急車両の実測荷重を入力し、まくらぎ、および、バラスト碎石集合体の動的挙動を再現しました。計算結果の図より、解析結果は前後の軸通過で二つのピークが発生する傾向を概ね再現できていることがわかります。今後、センシングストーンの実測結果に一致するよ

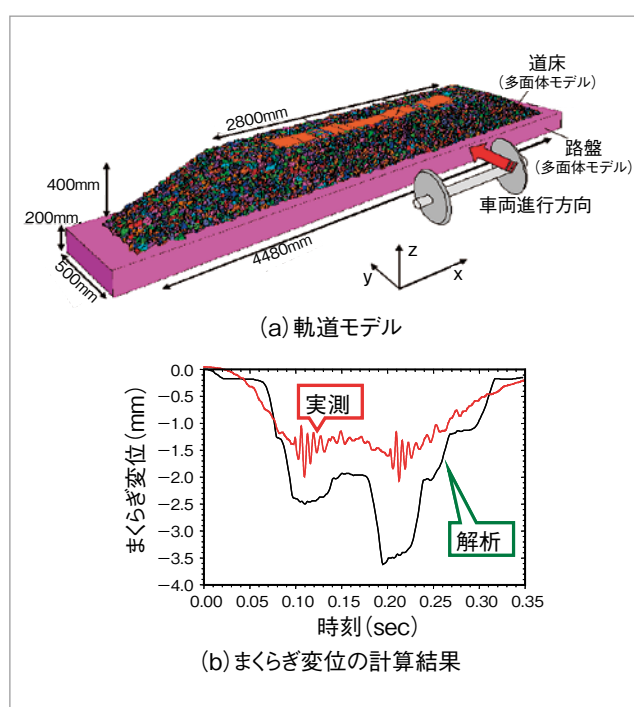


図10 三次元個別要素法モデルを用いたバラスト軌道動的挙動解析

うに、減衰モデルと物性値を改善し、さらに実現象に近づけていく計画です。

### おわりに

本稿では、軌道保守の上で問題となっているバラスト軌道の沈下現象について、現象解明のために新たに開発したセンシングストーンの原理と応用例、および、対策工選定のための粒状体の挙動に着目したモデルの概要について紹介しました。今後は、測定結果をもとに、バラスト軌道の動的な劣化現象の本質を探るとともに、バラスト軌道劣化モデルの高精度化を目指す予定です。RRR