

軌道沈下量予測に関する研究の現状と 問題点について

相川 明¹・池永 貴史²

¹都市システム工学科助教授, ²機械・環境システム工学専攻 1 年

鉄道軌道に多く用いられている有道床軌道は、バラスト層の沈下によって、突固めなどの維持管理に大きな労力を必要とする。しかしながら、維持管理を行うための最適な指標は存在せず、既存の軌道沈下則に基づく管理を行っているのが現状である。適切な維持管理が実施されるためには、軌道破壊のメカニズムを解明し、軌道沈下を精度良く予測するモデルを確立することが必要である。本報告では軌道沈下に関する既存の文献をレビューし、従来行われてきた研究の成果をまとめるとともに、研究課題を把握し、これからの研究の方向について考察する。

キーワード: バラスト軌道, 軌道破壊, 軌道沈下, 粒状体, 動的応答モデル, レール継ぎ目

1. はじめに

鉄道は、エネルギー効率、環境保全性、経済性等、多くの面で優れた特性を有する公共交通機関である。しかしながら、将来、鉄道が交通システムの中核を担うためには、現在抱えている維持管理に関する課題を克服する必要があり、特に軌道沈下に関する評価指標の確立は緊急の課題である。

現在、我が国の鉄道の営業線の多くは、レール、まくらぎ、バラスト、土路盤で構成される、いわゆる「有道床軌道」である。「有道床軌道」は排水性、施工性、修繕のしやすさなど多くの長所をもつが、列車走行の繰り返し荷重によるバラストの緩みや、レール表面の凹凸を頻繁に解消しなければならない。そこで重要となるのは、どのくらいの頻度でいかなる保守管理を実施すればよいのかということであり、保守を行うための高精度な軌道沈下のメカニズムの解明が必要となる。

本研究では軌道の維持管理に関する課題をまとめ、それらをふまえて今後の軌道構造の研究のあり方・改善点を検討する。

2. 既往の研究に関する文献レビュー

(1). 粒状体を用いた道床模型実験および不連続体構成モデル

C.Cholelet らは、バラスト道床を多角形断面の粒状体の

集合と捉えて、中・長期的なバラスト層の劣化メカニズムについて模型実験と数値解析の両面から検討した¹⁾。模型実験では、バラスト実軌道の 1/3 縮小モデルを用い、バラストとまくらぎを入れた剛な容器を動的荷重で突固める実験を行った。実験結果より、バラストは低周波域では剛体としての挙動、高周波域では流体としての挙動、その中間の周波数域では粘性的な挙動を示し、突固めの周波数の範囲によって、バラストの挙動の性質が異なることを定性的に確認した。すなわち、最適な突き固めの品質が得られる周波数の範囲が存在することを示した。

また、この実験は、レール下面とバラストとの接触状態やまくらぎ下の試料の密度といった、突固めの品質を判断する指標を与えることができるとしている。しかし、論文中では各挙動を示す周波数の範囲については、定量的に明確に述べるには至っていない。また、この実験結果の妥当性を検証するために、分子動力学法を用いた再現を行っているが、これによると、バラスト層全体の挙動は定性的には実験結果に一致するものの、端部でバラスト粒子が跳ね上がるなど、解析の信頼性に疑問が残る。

さらに C.Cholelet らは、文献(2)(3)において、二次元個別要素法を用いた解析と五角形断面で構成される道床モデルを用いた実験の結果とを比較した。個別要素法を用いた解析は、従来の連続体解析に比べると、個々の粒子に着目した微視的な解析を行えるので、接触状態の変化を適切に再現できるという特徴を有する。解析結果より、動的荷重の作用下におけるバラストは個々の粒子が同じように応力を分担するわけではなく、要となる粒状体が

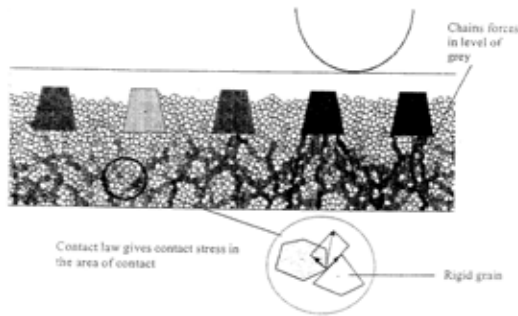


図1 接触に関するネットワークの形成²⁾³⁾

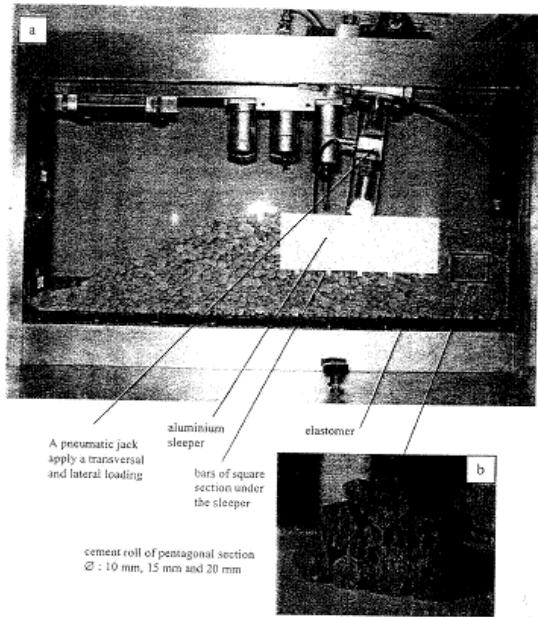


図2 ジャッキによる道床模型載荷実験の様子²⁾

大きな応力を受け持ち、図1に示すような接触力に関するネットワークを形成していると考察した。

この実験で用いられた装置を図2に示す。これはアルミニウム製のまくらぎ模型の下に五角形断面の角柱を敷き詰めたもので、空気圧ジャッキにより上方より載荷を行い、同時に変位も計測するものである。載荷方向は鉛直より $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の範囲で変化させる。また、いくつかの角柱の動きを画像で処理することにより追跡した。

実験の結果、試料の沈下特性は、載荷初期の締め固めの程度に大きく依存し、緩い詰め方では、試料の再配列が起こって、その都度塑性変形が生じることが示された。また、実験は1000個ほどの粒子に対して行われ、しかも高々1000回の繰り返し載荷を行った程度であるので、実際の軌道における長期的な沈下の傾向を十分に把握できたとはいきれない。また、対象とする粒子を剛体とみなしており、磨耗や局部的な欠損による影響が考慮されていない面についても今後の課題である。

その後、C.Choletらは文献(4)において、35000回を越

える多回数載荷でのバラストの挙動を検討した。解析では同じ粒度分布で、その配置が異なる試料に対して20Hzの正弦波載荷を35000回行い、繰り返し載荷におけるバラスト層の挙動を調べた。これによると、載荷回数13000回を超えた付近で大きな塑性変形が生じた後は、変形が落ち着き、それ以降は規則的な沈下が続くことが報告されている。しかし、同じ粒子数・粒度分布・密度の3つの試料に対しても最終的な沈下量は大きく異なる。

さらに、二次元での個別要素法を用いたシミュレーションを三次元に拡張した。図3のようにデジタル化したバラストは各面が三角形で構成された、凸な立体となる。三次元個別要素法を用いた解析では、二次元に比べて粒子間に多様な接触状態が生じるため、幾何学的取り扱いが難しく、接触の検出が容易ではない。この立体粒子をコンピュータ中で自由落下させて試料を作成し、バラスト道床の水平抵抗を調べた。解析に用いたバラスト粒子はおよそ26000個である。C.Choletらは当初、摩擦係数の違いが変形特性に大きな違いをもたらすと考えていたが、実際には摩擦係数はそれほど重要ではなく、摩擦係数の大小によらず、バラストが側方にずれる限界の水平力が存在することを報告している。軌道破壊のメカニズムを解明するためには、軌道システム全体に注目する連続体としての取り扱いよりも、個別要素法を用いた粒子スケールでの局所的なアプローチが必要であることを強調している。

(2) バラスト軌道の変形特性に関する研究

T.Ishikawa, E.Sekineはバラストの塑性沈下に与える移動荷重の影響に注目し、定点繰り返し載荷と移動繰り返し載荷の両方の実験結果を総合して、現在実験で用いられている定点載荷方式ではバラスト層の残留沈下量を適切に評価できないことを示した^{5),6)}。図4のように単純載荷試験では主応力の方向は変化しない。しかし、列車荷重のような移動荷重では路盤内の応力状態は単純載荷とは大きく異なると考えた。

そこで、T.Ishikawa, E.Sekineは図5,6に示すような2つの模型実験にて、載荷方法の違いがバラストの沈下特性に与える影響を検討した。実験模型は、日本の鉄道で

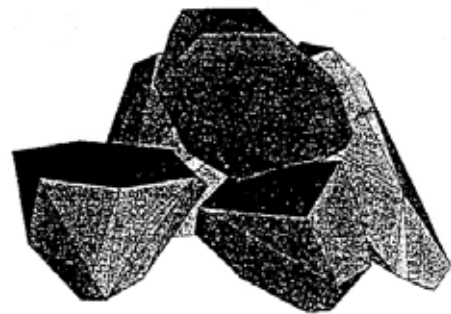


図3 デジタル化された砕石バラスト⁴⁾

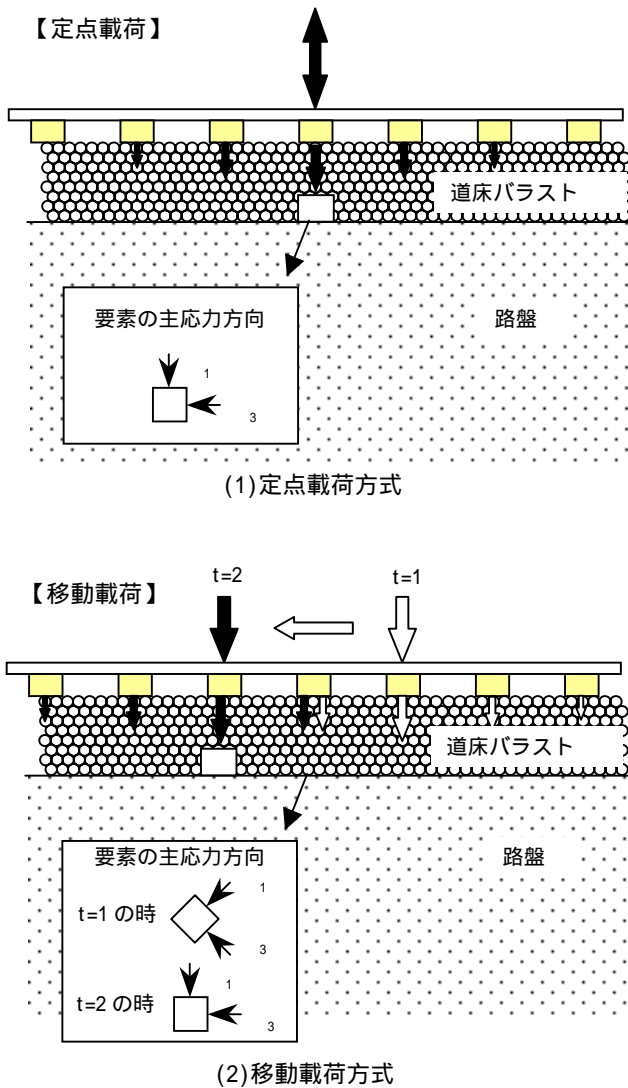


図4 路盤内の応力状態の概念図⁵⁾

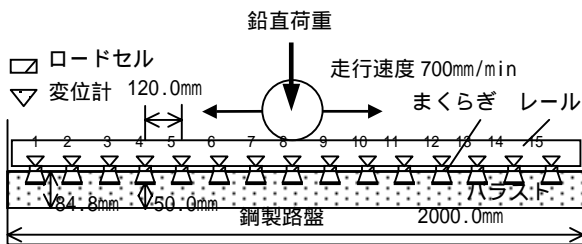


図5 移動載荷試験⁵⁾

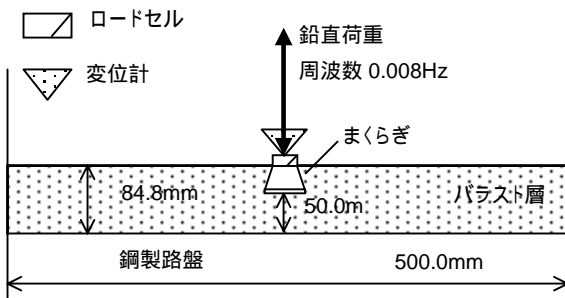


図6 定点載荷試験⁵⁾

使用されている標準の軌道の 1/5 縮小モデルである。実験装置は鋼製の路盤の上にバラストを 5cm の厚さに敷き詰め、12cm おき・計 15 本のアルミニウム製まくらぎを配置したものである。移動荷重は走行速度 700mm/min で 100 回、2 本のレール上を往復し、レール下面に作用する力はまくらぎの上に挿入したロードセルにて、まくらぎの鉛直変位は変位計にて測定される。移動荷重の走行速度は実軌道における列車走行速度よりはるかに小さい。

定点載荷試験で用いられた装置は図 6 のようなもので、同じく 1/5 縮小モデルで平面ひずみ状態にあると考えられる。バラストの上に一つのまくらぎを配置し、このまくらぎ直上に 0.008Hz で正弦波載荷する。移動載荷方式と定点載荷方式とでは貧粒度のバラストで残留沈下量がより大きくなるという傾向が一致した。および、その大きさについては定点載荷方式で得られる沈下量は移動載荷方式で得られる沈下量よりもはるかに小さいことが実験的に求められた。

また、図 7 に示すような高精度の三軸圧縮試験装置を用いて、バラストの粒度分布の違いや載荷方法の違いが変形特性に与える影響を検討した。三軸圧縮試験装置は砕石を詰めたセルに流体圧を加える代わりに、内部に負圧を加え側圧を与え、外部変位計とギャップセンサにて変形量を測定するものである。三軸圧縮試験では、単調載荷と繰返し載荷の両方を行う。単調載荷では減圧による拘束圧を一定とし、ひずみ速度 0.02%/min で軸差応力を加える。一方、繰返し載荷では等方圧密した試料に拘束圧 29.4kPa を一定、軸差応力を 10kPa ~ 110kPa の間で変化させて正弦波載荷する。載荷回数は 10000 回、周波数は 0.25Hz で、両振りの軸差応力 100kPa は列車走行時の応力レベルに相当する。

三軸圧縮試験の結果から、貧粒度のバラストでは、そのピーク強度、接線ヤング率が小さく、また、移動載荷試験で得られた荷重-変位関係から計算した累積ひずみに比較して、三軸試験の繰返し載荷で得られた残留ひずみが小さいことが明らかとなった。以上の結果から、バラストの物性値を求めるにあたっては、従来行われてきた要素試験の方法を改良し、拘束圧を調整、塑性変形量を精度よく検出できる大型の三軸圧縮試験の適用をすすめている。

(3). レール溶接部、継ぎ目部での輪重変動に関する研究
ISHIDA, SUZUKI らは、図 8 のようなレール溶接部での挙動をレールの種類、走行速度、車軸間の距離等を変化させてシミュレーションを行った⁷⁾。軌道沈下を予測するためのモデルは図 9 に示すようなもので、レールをティモシェンコ梁、まくらぎを集中質量とし、まくらぎはレールを不連続支持する。また、バラスト層は振動レベルの違いを考慮するために 3 層に分けられる。このモデルでは、まくらぎとバラストが接触していない、いわゆる浮きまくらぎについても検討可能である。軌道の不整はレール表面およびバラスト形状による不整を想定しており、軌道狂いは数 m の周期をもつと仮定された。

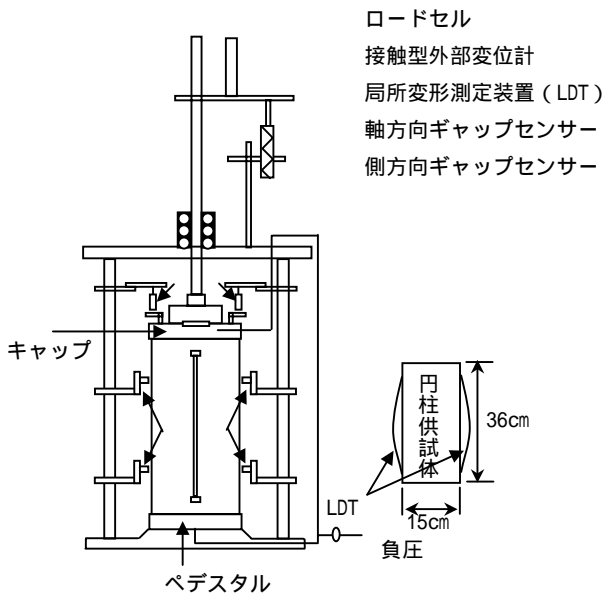


図7 三軸圧縮試験装置の概略図⁶⁾

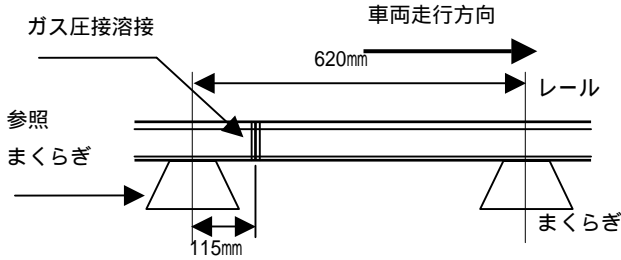


図8 レール溶接箇所⁷⁾

解析条件は、営業線で5年間測定された結果をもとに与え、車両の静的輪重が53.9kN、ばね下質量が784.5kg、車両速度が130km/hである。軌道については、レールにJIS50kgNレールを使用し、バラスト層の厚さは250mm、軌道パッド・バラスト・路盤の剛性はそれぞれ 1.10×10^5 、 0.24×10^6 、 5.0×10^4 kN/mとし、減衰に関してはそれぞれ、30.0、75.4、98.0 kN・s/mとした。ただし、解析条件には時間間隔および、解析時間は示されていない。

溶接部を列車荷重が通過する際の、レール下面に作用する力とまくらぎの鉛直変位を時系列的に求めたところ、輪重変動の大きさは軸間距離、車両速度、ばね下質量、レールの種類、軌道剛性などによって影響を受けることがわかった。また、車両速度が130km/hの場合には軸間距離が4.2mを越えると、相互作用は失われるという結果を得た。

台車の前・後輪がレール溶接部を通過する際のレール下面に作用する力を計算すると、溶接部近傍で大きな衝撃力が発生し、前・後輪の間に谷間ができる。車輪での最大応答値を「Trailing axle response range」、谷間にあたる部分の応答を「Interaction response range」と呼んで両者の比によって、解析値と測定値の比較を行

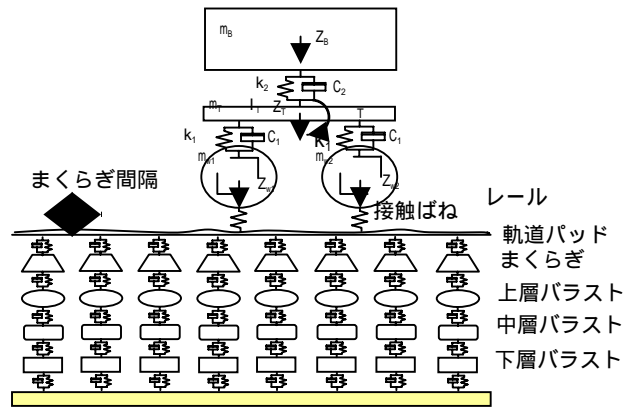


図9 Ishidaらが用いた車両/軌道の動的モデル⁷⁾

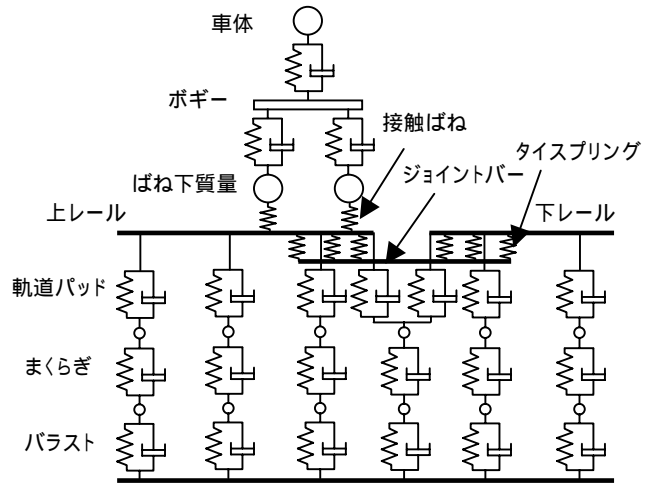


図10 継ぎ目を考慮した軌道モデル⁸⁾

っているが、この値がどのような物理的意味をもつのかについては明確には述べられていない。

さらに、Suzuki, Ishidaはレール継ぎ目での動的応答を調べ、衝撃による輪重変動について考察した⁸⁾。既存のバラスト沈下則に基づいて解析を行った結果、レール継ぎ目部の前後で大きな衝撃荷重が作用することを確認している。なお、レール継ぎ目を考慮した軌道の動的モデルは図10に示すようなもので、バラスト、まくらぎはそれぞれ一層の集中質量で表現され、レールとまくらぎの間には質量を持たない軌道パッドが挿入される。さらに、ばね下質量とレールは接触ばねで結ばれており、レールには継ぎ目を表現するために段落とし部が設けられた。レール継目では、レールへの熱処理による盛り上がりとし継目落ちが考慮される。

解析条件は、車体質量6698.6kg、ボギー1015kg、ばね下質量842.5kg、慣性モーメント 1.04×10^3 kg・m²、静的輪重46.1kNである。サスペンションは1次ばねと2次ばねとからなり、剛性はそれぞれ0.337、0.5394MN/m、ダンピングはそれぞれ14、40kN・s/mである。軌道にはJIS50kgNレールを使用し、軌道パッド、まくらぎ、下部構造の剛性はそれぞれ110、100、30MN/m、減衰係数は98、98、245kN・s/mとした。時間間隔は1/20000秒である。

解析の結果、車両速度が大きくなるにつれて、継ぎ目

前方での応答の最大値は大きくなるが、車両が継ぎ目中央を通過した後の応答はむしろ小さくなるのがわかった。継目近傍では、車両のばね下質量と軌道の剛性とが共振して振動が励起され、その周波数は 40km/h で概ね 50Hz、70km/h で 100Hz 程度である。さらに曲線半径 500m、カント 105mm、支え継ぎ構造の現場において測定された車輪/レール間の接触力と解析で得られた結果とがよく一致することも確認された。現地での車両の静的輪重は解析条件と同じく 46.1kN であった。しかし、その他の物性値やパラメータの出典や根拠については、本文中では明確に示されていない。

さらに、Suzuki, Ishida は、既存の軌道沈下則似に基づいてレール継ぎ目近傍でのバラストの沈下についても検討を行った。軌道沈下則は初期の大きな塑性沈下とそれに続く緩やかな沈下からなる。ここでは、特にまくらぎの種類や大きさ、軌道パッドの有無による影響を検討した。これによると、継ぎ目近傍に大きなまくらぎを用いるよりも、軌道パッドを挿入するほうがまくらぎの緩みの程度が小さく、軌道沈下に対しては、軌道パッドが大きな役割を果たすことがわかった。

3. 考察

(1). 粒状体を用いた道床模型実験および不連続体構成モデル

上述の文献レビューから、バラスト道床の沈下量の評価に関する研究は、バラストを粒状体として解く場合、個々のバラスト粒子の動きや接触力の把握に重点が置かれていることがわかる。しかしながら、粒状体の集合からなるバラスト道床では、局所的な粒子の回転運動や応力の集中がバラスト層の塑性沈下につながると予想される。したがって、バラスト同士の接触力・輪重変動に注目するだけでは不十分であり、エネルギー消費の特性を明らかにする必要があると考える。

文献(7)でみられるように、車両の静的輪重は 46.1kN 程度である。この輪重がレールを介してバラストに分散して伝わることを考えると、バラスト粒子 1 個 1 個は決して破壊するような応力レベルにあるわけではない。しかし、現実にはバラストの緩みが発生し、塑性変形が避けられない。さらに、バラストの破碎や磨耗をも考慮すると現象は非常に複雑である。今後、バラストの累積的な損傷をも考慮した解析モデルの開発が望まれる。

(2). バラスト軌道の変形特性に関する研究

文献(4)、(5)は道床内のバラストの回転運動を引き起こす、移動荷重による主応力方向の変化に着目した非常に有用な文献である。定点載荷、移動載荷といった載荷方法の違いが、バラスト変形特性に与える影響について考察している点については大いに評価できる。しかしながら、試験においては、中央まくらぎに作用する最大の

荷重レベルが等価となるように実験条件の調整を行っており、装置全体に加えたエネルギーの総量という観点からすれば、実験結果を単純に比較することはできないと考える。

また、バラストの沈下量を評価するためには、多くの物性値が必要であるが、それぞれの研究において用いられる物性値については統一されておらず、その根拠・詳細は十分に示されていない。バラストの変形特性を求めするための三軸圧縮試験などの要素試験は、現実の道床と試料とのスケールの違いによる相似則の影響がどの程度かを定量的に考慮しておらず、しかも、道床での拘束状態を忠実に再現できるものではない。模型実験は軌道沈下のメカニズムの解明に有用な示唆を与えるが、模型実験と実際の道床内部での挙動の違いを定量的に明らかにする必要がある。

(3). レール溶接部、継ぎ目部での輪重変動に関する研究

レール溶接部や継ぎ目部での動的応答に焦点を当てた研究において、高速で通過する列車荷重による応答を再現するためには、時間ステップを非常に小さく取らなければならない。文献(6)においては解析時間の間隔については解析条件に盛り込まれていない。また、文献(7)によると、遊間は 3~11mm、端部熱処理によるレールの凸部や継目落ちを考慮した長さはおおよそ 1m である。車両のモデルはこの間を 10~150km/h で通過することになっている。すなわち、継ぎ目の通過に必要な時間は相当に短い。遊間や車両速度が大きく異なる解析条件の下でも、時間ステップ 1/20000 秒で輪重やレール圧力の衝撃的な変動が十分に再現可能であるという保証は与えられていない。

解析で用いられたモデルでは道床を連続体とみなしており、本来道床がもつ不連続性は解析には反映されていない。また、軸間距離、車両速度、ばね下の質量などのファクターが前輪、後輪による相互作用に与える影響については検討しているが、溶接部・継ぎ目部での応答の周波数依存性や時刻暦応答計算を行った結果についてはほとんど言及していない。

4. まとめ

本研究では、軌道の維持管理に関連する最新の文献をいくつかレビューし、従来行われてきた研究の成果をまとめるとともに、軌道の維持管理上の課題を把握し、それらをふまえて今後の軌道構造の研究のあり方・改善点を考察した。その結果、次のような課題点を把握した。

(1)道床を不連続体とみなして解く場合、既往の研究ではバラストやまくらぎの動き、応力の分布を求めることに重点が置かれる。このことは、粒子個々の運動状態を決定する上で重要であるが、列車荷重によるエネルギーの散逸機構を明らかにするものではない。今後、道床内のバラストに入力されたエネルギーが、並進および回転に

よる運動エネルギーに消費されていく過程を明らかにする必要がある。

(2)バラストの物性値を決定するにあたっては、従来の要素試験の方法を改良することが非常に重要である。参考文献によって、実験における載荷方法の違いが物性値の決定に大きな影響を与えることが示された。今後は、実軌道でのバラストの拘束状態、荷重状態をも加味した現実的な試験方法の導入が必要である。

(3)軌道沈下量を精度良く予測するためには、継目部での輪重・レール圧力の変動の把握が重要な意味をもつ。溶接部・継目部では衝撃的な輪重の変動が観察され、これによる高周波の応答を解析する必要がある。したがって、時間増分に注意することは勿論のこと、軌道破壊の周波数依存特性についても解明していく必要がある。

参考文献

- 1) C.Cholet, X.Oviedo, G.Combe, P.E.Gautier, K.Sab, J.J.Moreau, G.Foret, F.Josse, L.M.Cleon: Study of the mechanical behavior of the ballast using discrete approach, WCRR 2001 Proceedings, 2001.
- 2) C.Cholet, G.Combe, G.Saussie, K.Sab, C.Bohatier, P.E.Gautier: Study of the behavior of the ballasted track using discrete element methods, Railway engineering, 2002.
- 3) C.Cholet, G.Saussie, G.Combe, F.Dubois, K.Sab, P.E.Gautier: Mechanical behaviour of the ballast using discrete element methods, WCRR 2003 Proceedings, 2003.
- 4) G.Saussie, C.Cholet & P.E.Gautier, F.Dubois, C.Bohatier & J.J.Moreau: Modelling ballast under cyclic loading using discrete element method, Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena, 2004.
- 5) T.Ishikawa, E.Sekine, A.Khono, S.Miura: An estimation method of residual settlement in ballasted track under repeated moving loads, Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena, Triantafyllidis(ed), pp.633-640, 2004.
- 6) 関根悦夫, 石川達也, 木幡行宏: 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, 鉄道総研報告, Vol.18, No.3, pp.17-22, 2004.3.
- 7) M. Ishida, T. Suzuki: Effect on Track settlement of interaction excited by leading and trailing axleles, Quarterly Report of RTRI, Vol.46, No.1, pp.1-6.
- 8) T.Suzuki, M.Ishida, K.Abe, K.Koro: Measurement on dynamic behavior of track near rail joints and prediction of track settlement, QR of RTRI, Vol.46, No.2, pp.124-128.

(2005.9. 30 受付)