

最近の軌道技術の動向

軌道技術研究部

部長 石田 誠

1 はじめに

鉄道が誕生して以来、有道床軌道は改良されつつも基本的な構造を変えることなく、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るが、全体としては有道床軌道がまだその多くを占めている。したがって、車輪とレールを基本とする鉄道システムにおいては、その軌道構造はそれほど大きく変化してきていないが、使用される材料と保守技術に関しては、着実に進歩してきている。ここでは、最近の軌道技術の動向に関して、車輪／レールのトライボロジー、車両／軌道のダイナミクス、軌道状態監視と保守計画技術、地震時脱線対策の面から紹介する。

2 車輪／レールのトライボロジー

車輪とレールのような二つの物体の接触に関わる科学や技術の分野を「トライボロジー」と呼ぶ。この車輪／レールのトライボロジーの分野は、鉄道固有のものの一つであり、他のトライボロジーに関する問題と異なる点が多いが、この10年間で大いに理解が進んだ分野の一つである。そもそも車輪がレールの上を滑らずに転がりながら、安全に停止するためにはある程度大きな摩擦力を必要とするものの、材料的には摩耗を極力減らすために摩擦力を可能な限り小さくすることが望ましい。また、摩耗が少ないことは望ましいが、材料特性に依存するため相対的ではあるが少な過ぎると疲労という問題が顕在化する。

レールの摩耗と転がり接触疲労に関しては、図1に示す曲線外側レール（以下、「外軌」と称し、また曲線内側レールを「内軌」と称する）のゲージコーナの側摩耗と図2に示すレールシェリング（以下、「シェリング」と略称する）、さらには図3に示す車両／軌道のダイナミクスとも大いに関係する急曲線内軌に発生する波状摩耗が問題となっている。外軌の側摩耗に関しては、室内試験という限られた条件においてではあるが、その試験結果から求められた側摩耗に対する影響因子の寄与度を図4に示す¹⁾。また、シェリングを予防するための研削方法に関しても、室内試験により研削周期を0.5億トンとした場合の1回の研削深さとシェリングが発生するまでの累積通過トン数の関係を図5に示す²⁾。さらに、そのような研削による予防という点に着目し、材料自らの摩耗により疲労を防ぐことを目的にレール鋼の組織を工夫したベイナイトレールが開発されている。



図1 外軌側摩耗



図2 レールシェリング破断面



図3 急曲線内軌波状摩耗

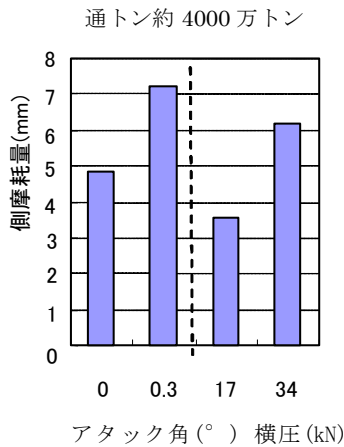


図4 外軌側摩耗の影響因子

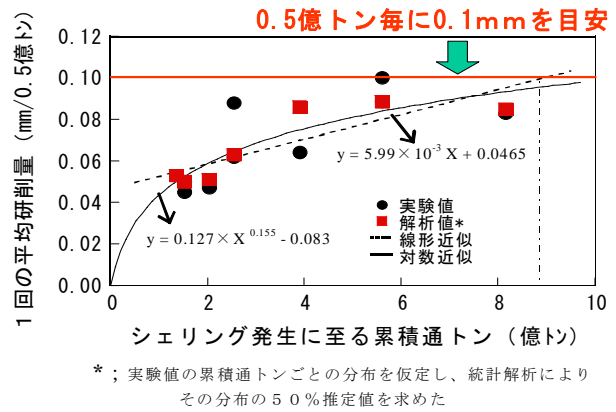


図5 予防研削のレールシェリング抑制効果

急曲線内軌の波状摩耗や図6に示す「まくらぎ直角変位」の発生メカニズムに関しては、図7に示すような曲線通過時に車輪／レール間に作用するクリープ力等を評価することが重要である³⁾。波状摩耗に関しては、台車前軸の内軌側の横クリープ力が主な原因であり、そのクリープ力を低減するために内軌頭頂面への潤滑が効果的であることから、図8に示す摩擦緩和システムが開発されている。また、まくらぎ直角変位に対しては、まくらぎを回転させる縦クリープ力によるモーメントに対して回転抵抗の大きなレール締結装置が考案されている。

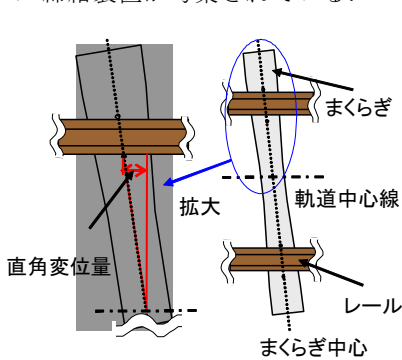


図6 まくらぎ直角変位

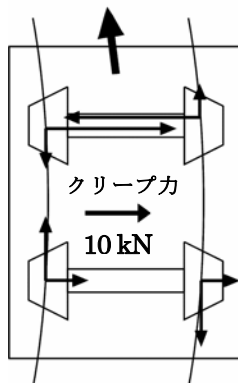


図7 急曲線通過時に車輪／レール間に作用するクリープ力等

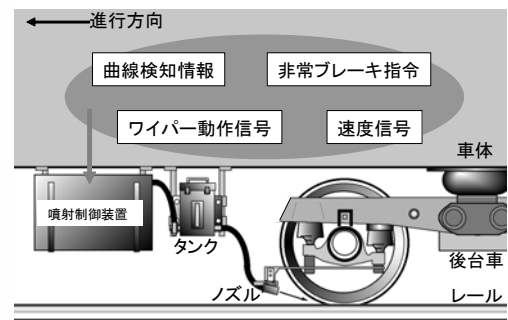


図8 摩擦緩和システム概要

3 車両／軌道のダイナミクス

有道床軌道は、列車荷重を繰り返して永久変形（塑性沈下）が徐々に進み、それがレール長手方向において不同に沈下する場合に高低変位、同様に左右方向における塑性変形により通り変位が生じる。このような軌道変位などの現象を理解するためには、車両と軌道の動的相互作用（ダイナミクス）を理解する必要がある。従来の軌道の設計は、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・保守コストを考慮して最適な軌道構造を定めることであった。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る。

一方、道床沈下に及ぼす道床バラストの強度・変形特性に関して、大型三軸試験と実物大軌道模型による繰返し載荷試験を行い、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なった。また、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は、模型試験により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た。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、実際の軌道における道床沈下測定試験が約7年間にわたって行われ、図9に示すように一部凍上現象も発生したが、概ね一定の沈下係数が得られ、車両と軌道の動的応答解析モデルと上述した有道床軌道設計標準で定められた道床沈下式を組合せて構築した道床沈下予測モデルで求めた沈下係数とほぼ一致した⁴⁾。このことから、条件が求められた道床沈下則と同様な場合に構築した道床沈下予測モデルが概ね妥当であることが確認された。ただし、有道床軌道設計標準で定められた道床沈下則は 定点載荷による実験から求めたものを実務経験により補正しているが、道床沈下メカニズムについてはまだ不明な部分が多い。そこで、道床沈下メカニズムをバラストの挙動に着目して理解するために、個別要素法 (DEM) や不連続変形法 (DDA) といったバラストを粒状体としてモデル化する手法で検討が進められている。

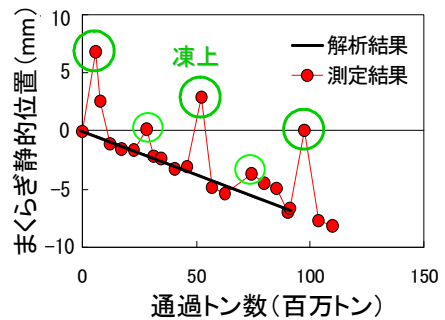


図9 道床沈下の実測値と解析値

このような背景の下に、「軌道変位進み予測モデル」に関して、図10に示すようなレール継目の衝撃に着目して新たな試みが行われている。また、「構造物境界部における動的応答に起因する軌道沈下」に関して、図11に示すモデルを用いて、路盤を強化することで他の方法と同程度の効果が得られコスト的にも有利な方法が検討されている。

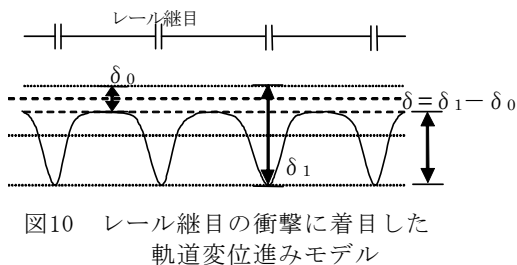


図10 レール継目の衝撃に着目した軌道変位進みモデル

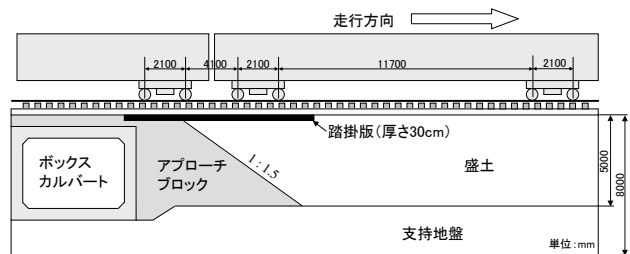


図11 構造物境界部の軌道沈下対策モデル

4 軌道状態監視と保守計画技術

軌道は列車荷重を支え、路盤等の下部構造への負荷を軽減するとともに、列車が安全に走行する滑らかな走行路として大きな役割を担っている。したがって、走行路面の滑らかさとしては、安全性を確保した上で、乗心地等のサービスレベルに応じた保守レベルを維持することが要求される。その保守レベルを維持するためには、実際の状態を監視評価することが基本となる。現在、高低と通りは軌道の長さ方向に連続的に測定する必要から、10mの弦をレールに張ってその中央のレールとの離れを測定する「10m弦正矢法」が広く用いられている。この10m弦正矢法による軌道検測を行うために、3台車から2台車の4軸のうち3軸それぞれの弦長(間隔)が異なる矢(偏心矢)による検測波形を10m弦正矢に変換する技術が開発され、さらに、従来から開発を進めてきた加速度を2回積分して変位を求める慣性測定法について、低速度域での精度を向上し、さらに測定波形を処理する際に10m弦正矢法の特長を取り入れた慣性正矢法が開発された⁵⁾。図12に台車に装荷された慣性正矢法装置を示す。

一方、軌道の保守コスト低減の面から、効率的な保守作業計画の策定は重要な課題である。特に、道床つき固めに用いるマルタイによる軌道保守計画の策定は、制約条件が多いことから熟練した技術者の経験に頼るところ

が多かった。そこで、計画対象とする区間の軌道状態の他、

計画作成上の制約条件を考慮して、マルタイの各保守基地への配備時期と配備時に保守する区間を軌道変位保守計画として出力するシステムが開発された。このシステムを応用して「軌道モーターカー運用計画作成支援システム」などが開発されている。

また、状態監視の対象として重要である溶接部に関して、「エンクローズアーク溶接の欠陥の発生傾向と対策」が検討された。溶接条件と欠陥発生傾向に関する調査の結果、開先間隔および頭頂部の積層方法によって溶接欠陥の発生傾向に差が生じ、溶接欠陥を抑制するためには開先間隔を広めに設定するとともに、頭頂部において多層溶接が可能となる十分な施工時間の確保が必要ことが確認された。

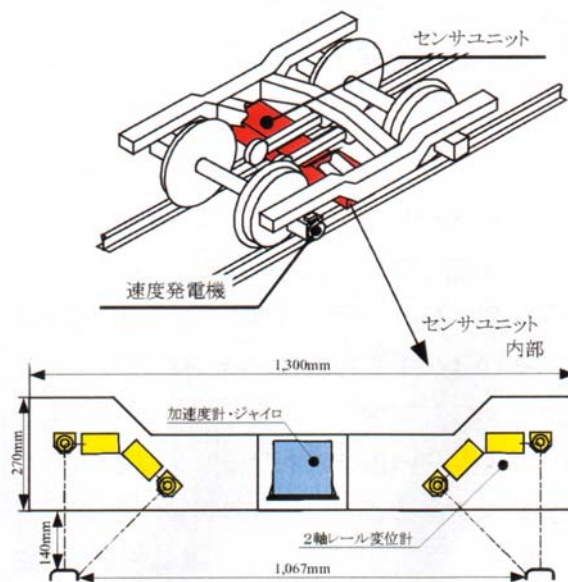


図12 台車に装荷された慣性正矢法の装置

5 地震時脱線対策

新潟中越地震における新幹線の脱線事故を踏まえ、今後発生が予想される地震に対して新幹線に生じる被害の軽減を図るために、車両ガイドが有効に機能するためのレール転倒防止装置、地震対策用接着絶縁レール、改良型伸縮継目、脱線を防止する脱線防止ガードおよび地上側の逸脱防止ガードについて、JR会社、鉄道建設・運輸機構と共同で開発を進めている。図13に逸脱防止対策としての平板軌道スラブ用逸脱防止ガードの概略を示す。

この逸脱防止ガードについては、水平力200kNの静的載荷試験を行い、十分な強度を有していることを確認した。また、静的載荷時の逸脱防止ガードの左右変位量は小さく、逸脱防止の機能が損なわれない見通しを得た。また、逸脱防止ガードの高さは、脱線した車輪を誘導するとともに台車下部の高剛性部材に支障しないことや、実物台車を用いた振動台試験で得られた最大車輪上昇量などの条件を基に80mmとした。

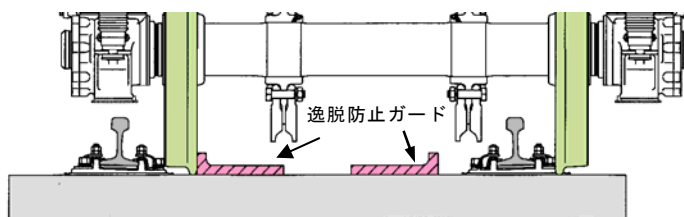


図13 平板軌道スラブ用逸脱防止ガード

6 おわりに

以上、最近の軌道技術の動向に関して、車両／軌道のダイナミクス、車輪／レールのトライボロジー、メンテナンス技術および地震時脱線対策の面から紹介したが、現時点までに得られた知見では、まだまだ解決困難な問題が多く残されており、更なる研究の推進に向けて関係する多くの方々にご協力をお願いする次第である。

参考文献

- 1) 石田誠，金鷹：レールと車輪の摩耗の主な因子と車輪断面形状の影響，新線路，60-11，pp.30-33，2006
- 2) 石田誠：軌道と車両の相互作用(9)，日本鉄道施設協会誌，38-12，pp.35-38，2000
- 3) 石田誠，他：車輪／レール潤滑の車両・軌道動的挙動への影響，鉄道総研報告，20-4，pp.59-64，2006
- 4) 石田誠，鈴木貴洋：軌道動的応答モデルによる道床沈下予測，日本鉄道施設協会誌，41-8，pp.22-25，2003
- 5) 矢澤英治，岡井忠生：慣性正矢軌道検測装置実用化に向けた性能向上，鉄道総研報告，18-3，pp.35-40，2004