

省保守・低騒音の実現に向けた新しい軌道構造

石田 誠
軌道技術研究部
(部長)

吉田 眞
同
(軌道構造 研究室長)



いしだ まこと



よしだ まこと

はじめに

今後の鉄道事業において、少子高齢化による労働力不足、振動・騒音の環境問題、運営コストの縮減に対し積極的に対応することは極めて重要です。現在の軌道構造は、新設線では省力化を指向した直結軌道が多く採用されているものの、環境対策およびバラスト軌道の保守コストの削減をさらに進めることが強く望まれています。一方、海外ではオランダをはじめ、ドイツや英国において保守コストの削減を指向した種々の直結系軌道が開発され、あるいは開発が進められています。このような状況を踏まえ、鉄道総研では、新設線を対象として保守管理作業を軽減し、環境問題に積極的に対応するために既存の軌道構造から脱却したレール埋込型の省保守・低騒音新型式軌道を開発しました。本稿では、この省保守・低騒音新型式軌道の開発について紹介します。

新型式軌道構造とその施工法

初めに、レール埋込型の新型式軌道の概要として、新断面形状レール、レール支持部周辺構造、新型式軌道の施工法と軌道構造境界部の構造などについて紹介します。

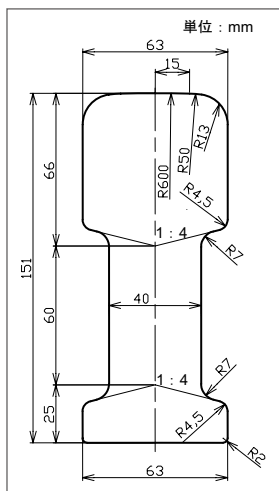


図1 新断面形状レール

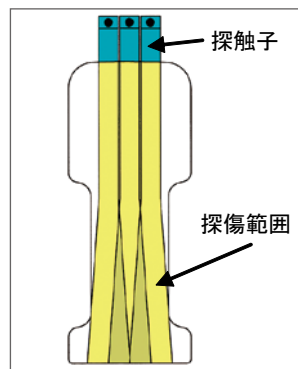


図2 新断面形状レールの探傷

新断面形状レール

レール埋込型の新型式軌道用に考案した新断面形状レールを図1に示します。新断面形状レールは頭部幅と底部幅を同じとし、腹部を厚くしています。これは、図2に示すように、頭頂面からほぼ全断面の超音波探傷が可能で、レール探傷車によるレール底部のき裂検知を容易とし、き裂が発生しても早期に確実に検知が可能であることを目的にしています。また、レール頭部高さを高くして鉛直方向の摩耗余裕を拡大するとともに、シェリングなどの転がり疲労損傷を積極的に予防削正し、レールの使用寿命の延伸を図っています。

頭部形状は、JIS60kgレールと同じにしているほか、断面積も温度応力等の理由からほぼ同等としています。また、縦断面二次モーメントはJIS60kgレールの約2/3、横断面二次モーメントは約3倍とし、レールふく進抵抗力（レールが何らかの理由で長手方向に移動する際の抵抗力）を現在の軌道と同等にすることで鉄道構造物等設計標準に定められているロングレール縦荷重を満足し、ロングレールの設定温度および新型式軌道とは別に敷設する伸縮継目の伸縮量の変更を伴わないことを考慮しています。さらに、新断面形状レールは80Sレール断面に内包される形状としているため、既設の軌道構造との接続に必要な中継レールは、80Sレールを基本に一方を切削加工して新断面形状に、他方を鍛造によりJIS60kgレールの断面形状に製作できることを考慮しています。

新型式軌道の構成

新型式軌道の断面模式図を図3に示します。図において、箱形ブロックおよびレール押えブロックは、短繊維補強コンクリート（鋼、ビニロン、ポリエチレンなどをコンクリートに配合し、破壊エネルギーの向上、せん断耐力の上昇を目的とするコンクリート）を用いたプレキャスト材であり、箱形ブロックの周りも短繊維補強コンクリートを用いた上部路盤を現場打設します。レール押えブロックは、レールの固定およびレールふく進抵抗力の調整機能を有します。また、箱形ブロックの軌間外側およびレール押えブロック

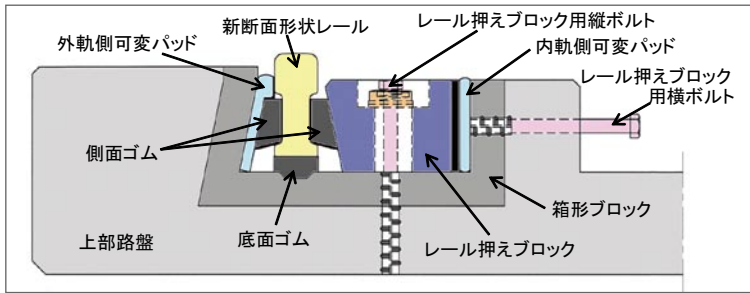


図3 新型式軌道の断面模式図

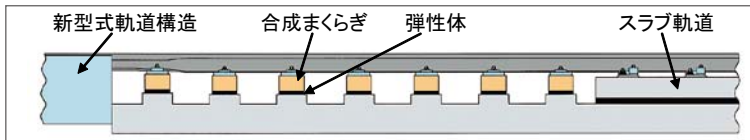


図4 新型式軌道とスラブ軌道との緩衝区間構造例

の軌間内側には、鉛直方向のレール座屈を抑えるために1/5の勾配を設けています。底面ゴムには防振効果が期待できる低ばね定数の軟質弾性材を使用し、側面ゴムには軌間拡大を抑制するために、硬質弾性材（ゴムの硬さを表すデュロメータタイプAで90程度）を使用しています。さらに、底面ゴムおよび側面ゴムの新断面形状レールとの接触面には厚さ2mmの鋼板を貼り付けており、弾性材の耐久性の向上とともに新断面形状レールとのレールふく進抵抗力の安定を図っています。外軌側および内軌側の可変パッドは、レール周辺の各部材の寸法誤差を吸収するとともに、軌間方向へのレール押えブロックの移動に合わせて新断面形状レールを所定の位置に据え付けるために用いられています。また、外軌側可変パッドのレール頭部との接触面には、摩耗防止のため厚さ2mmの鋼板を貼り付けています。

新型式軌道の弾性材

新型式軌道で使用する弾性材は、レール底面に敷設してレールを鉛直方向に弾性支持するものと、レール腹部側面に設置してレールの回転や左右・前後方向の運動を抑制することを目的としています。既存の軌道用弾性材料を中心にゴムまたは樹脂系材料の適用を検討し、レール底面用弾性材には天然ゴム／スチレンブタジエンゴムのブレンド材（NR/SBR）およびウレタン（発泡）ゴム、レール側面用弾性材には硬質ウレタンおよびナイロンを選定しました。

一般に、防振性能を高めるためには弾性材のばね定数を低くする必要がありますが、新型式軌道ではレールを連続支持するためレール底面用弾性材の受圧面積が増大し、締結装置ごとの離散支持より系としてのばね定数が増加します。選定した材料のうちNR/SBR材について、当面の目標を既存の軌道構造の中で優れた防振性能を有するD型弾直軌道（以下、「D型弾直軌道」と同等の静的ばね定数30MN/mと等価になる連続支持体の静的ばね定数は6.4MN/m/mになる結果が得られました。そこで、耐久

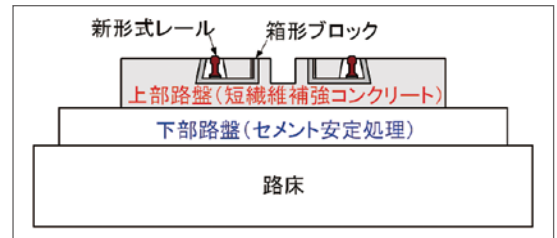


図5 新型式軌道の路盤構造

性を考慮して試作物の静的ばね定数を約7.8MN/mと設定しました。一方、レール底面用ウレタン弾性材に関しては実用化されているD型弾直軌道の中で最も低ばね定数である5MN/mタイプの材質を選定しました。

上記の検討結果より試作したレール底面弾性材について、単軸の疲労試験機を用いた疲労試験の結果、NR/SBR材、ウレタン材ともに外観に傷や凹みなどの異常はなく、へたり量もNR/SBR材で4.9%、ウレタン材で6.9%と、ともに10%以下であったことから、選定した/SBR材およびウレタン材はともに既存の軌道弾性材と同等の寿命が期待できます。

新型式軌道の施工方法

新型式軌道の施工法として、土構造物上に下部路盤施工後、予め製作した箱形ブロックを建設する軌道に合わせて精度よく設置した後に上部路盤を打設し、最後に箱形ブロック内に新断面形状レール、レール押えブロックおよび弾性材などを設置することにより、効率よく施工できることを確認しました。

軌道構造境界部の構造

隣接する軌道構造の違いにより軌道の支持ばね係数が急変すると、輪重変動や車体動揺などが発生します。このため、新型式軌道とバラスト軌道およびスラブ軌道等の軌道構造境界部においても軌道支持ばね係数の緩衝区間が必要です。従来の軌道構造における軌道支持ばね係数の緩衝区間については、支持弾性比2.5を目安にして2～3m程度の延長が設けられていますが、保守管理の面から5mの延長が提案されています。また、スラブ軌道とバラスト軌道の境界部の不同沈下抑制対策として、新幹線では弾性まくらぎが、在来線では特殊区間用まくらぎを使用することが有効であると提案されています。これらまでの経緯を踏まえて検討した新型式軌道構造とスラブ軌道との緩衝区間構造の例を図4に示します。

新型式軌道用路盤構造とその施工法

従来のスラブ軌道などの離散支持と異なり、レールを連続支持させた新型式軌道を適切に支持し、保守コストを大幅に削減するために開発した路盤構造を図5に示します。短繊維補強コンクリートからなる上部路盤とセメント安定処理材からなる下部路盤で構成されています。

レール支持条件の評価

レールの離散支持および連続支持が軌道の変形特性に与える影響を確認するため、1/5縮尺の移動荷重載荷模型試験と有限要素解析を行いました。これらの結果から、レールを連続支持することで、有効に荷重が分散され、新型式軌道用路盤の応力、路床に作用する応力および繰返し載荷による路盤の沈下量が想定どおりであり、設計した構造において、離散支持より低減できることを確認しました。

新型式軌道用路盤の設計法

土構造物上における新型式軌道用路盤の構造は、厚さ300mmの下部路盤と厚さ300mmの上部路盤とし、有限要素解析で応力を算定し、上部路盤の強度照査に用いる曲げモーメントなどを求めました。一般に、鉄筋コンクリート構造である軌道スラブなどの強度照査では、鉄筋の方向に合わせて、線路長手方向および線路直角方向に分けて行いますが、短繊維補強コンクリートを用いる場合は、鉄筋の影響がないこと、コンクリート自身が引張応力を負担する強度部材であることを考慮して、最大主応力から単位幅あたりの曲げモーメントを算出しました。また、短繊維補強コンクリートは、コンクリート自身が引張応力を受け持つ材料であり、短繊維補強コンクリートの疲労破壊は、繰返し作用によってひび割れが進展することで生じるため、破壊に対する安全性の照査を繰返し載荷の影響を受けた状態(引張軟化曲線が低下した状態)で行い、列車荷重による曲げモーメントに対して安全であること(疲労破壊に対しても安全である)を確認しました。

新型式軌道の管理・整正法の開発

レール連続支持・埋込型の新型式軌道では、軌道変位、レール摩耗等の検査は従来技術で対応できますが、レールを直接支持する弾性材については、劣化の可能性があるものの、その程度を直接把握する方法がありません。これに対し、軸箱上下振動加速度(以下、「軸箱加速度」)を用いてレール支持剛性を推定し、弾性材の劣化状態を評価する手法を開発するとともに、埋め込まれた弾性材の交換方法を検討しました。

新型式軌道の保守管理方法

新型式軌道と従来型の軌道構造(以下、「従来軌道」)の違いを考慮し、新型式軌道の保守管理は以下のように行うことを想定しています。

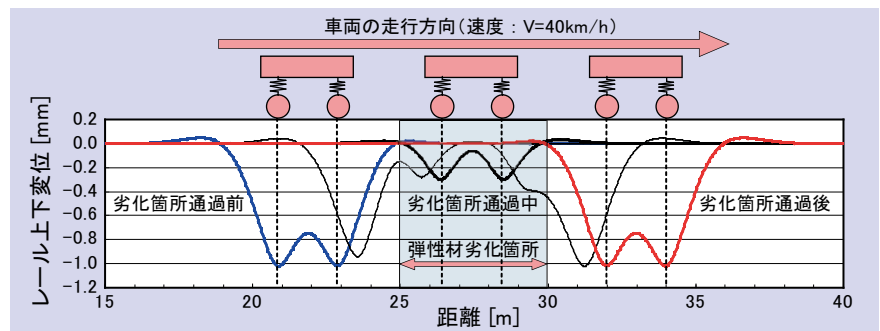


図6 弾性材剛性変化箇所付近の車両通過によるレール変形形状の推移(シミュレーション結果)

(1) 軌道変位

従来軌道と同等の検査が可能です。

(2) レール探傷検査

新型式軌道用のレールはほぼ全断面の探傷が可能であり、従来軌道よりも確実なき裂検知が可能です。また、レール摩耗などは従来軌道と同等の検査が可能です。

(3) 弾性材(側面ゴムおよび可変パッド)の劣化

新型式軌道ではレールの周囲を側面ゴムおよび可変パッドで保持し、軌道に所定の弾性を付与しています。これが劣化すると地盤振動や騒音が大きくなり、レール押さえ力の低下に応じたレールのふく進、側面ゴムの脱落あるいはレールの小返り(レールの長手方向を軸とするねじれ)が大きくなるといった問題が生じます。したがって弾性材の劣化を検知し、上述の問題が生じる前に弾性材を交換することが、新型式軌道における重要な保守作業となります。

(4) 巡視など

従来軌道のように徒歩巡視、列車巡視が可能です。また、レールとその周囲との段差が小さいため、巡視に自転車等を利用するのも可能です。箱形ブロックや路盤コンクリートの検査は、これらの巡視と合わせて可能です。

(5) 保守作業など

新型式軌道では、レールの摩耗交換を除けば、上述のように弾性材の交換が保守作業の多くを占めると考えられるため、その手順を確立するとともに、その手順に関わる問題点の把握は新型式軌道の今後の展開において重要です。

以上のことから、車両と軌道の連成振動解析モデルを用いたシミュレーションとモーターカーによる走行試験を行い、軸箱振動加速度による弾性材劣化の検出方法に一定の見通しが得られました。図6にシミュレーションにおいて、弾性材の剛性変化箇所付近の車両通過によるレール変形形状の推移の様子を示します。

新型式軌道の環境特性の評価

鉄道総研の日野土木試験所において、新型式軌道とスラブ軌道を敷設し、その施工性を確認するとともに、環境特



図7 新形式軌道の外観



図8 吸音材設置後の新形式軌道の外観

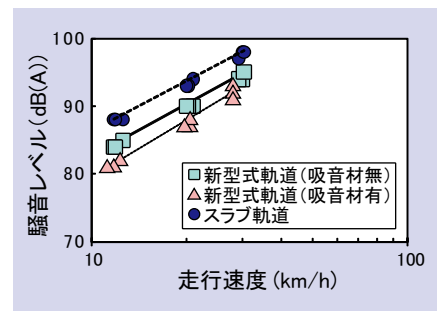


図9 高架橋上での走行速度とレール近傍騒音レベルの関係

性を評価するためにモーターカー走行試験を行いました。なお、溶接は実際の施工を考慮して新形式軌道の線路脇において、10.8mの新断面形状レール2本に対し、本課題の中で得られたガス圧接条件によってTGP-T1型ガス圧接機を用いて接合しました。JIS60kgレールとほぼ同等の時間で接合でき、仕上がり精度を得るためのグラインダー研削作業なども特に問題なく施工できることを確認しました。図7に施工した新形式軌道の外観を示します。また、さらなる騒音低減を目的として吸音材を開発し、その吸音材を設置した新形式軌道を図8に示します。

その吸音材の効果も含めた新形式軌道の騒音低減効果をスラブ軌道と比較するために行った走行試験の結果を図9に示します。図より、高架橋を模擬した構造上に敷設された新形式軌道のレール近傍騒音レベルは同様な構造上に敷設されたスラブ軌道より3～5dB小さくなる結果が得られました。また、土路盤上でも同様な結果になることを確認しました。この理由は、新形式軌道のレールがコンクリート部材に埋め込まれていることの遮音効果が大きいと考えられます。一方、高架橋を模擬した構造の裏における振動速度レベルについても、新形式軌道がスラブ軌道より約5～15dB程度小さい結果が得られました。この主な理由としては、新形式軌道のレール周辺部が弾性体で、連続支持されているため高架橋などの構造物への局所的な荷重が従来のスラブ軌道などに比較して小さくなることが考えられます。また、図より、新形式軌道において吸音材の効果として、レール近傍騒音レベルが2dB程度小さくなる結果が得られました。

さらに、営業線における新形式軌道の敷設を想定した場合の環境特性を評価するために、地盤と構造物の動的相互作用解析プログラムSuperFLUSH/3Dを用いて、新形式軌道とバラスト軌道について地盤振動解析を行いました。新形式軌道のモデルはレールの連続支持を模擬して、完全に連続ではないもののバラスト軌道の締結(軌道パッド)間隔62.5cmに対して12.5cm間隔に鉛直ばね要素を配置しました。図10に軌道中心から2.5m地点における1/3

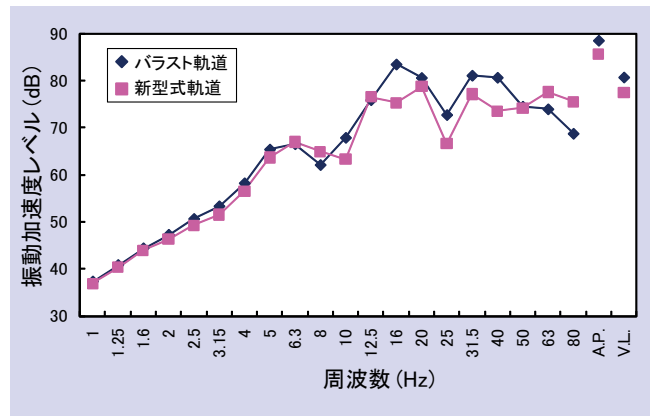


図10 軌道中心から2.5m地点の振動加速度レベル (シミュレーション結果)

オクターブバンドごとの振動加速度レベルを示します。新形式軌道の方がバラスト軌道と比較してオールパス値で数dB程度低い結果が得られましたが、解析が限られた条件で行われたことを考慮すると、新形式軌道の振動加速度については、バラスト軌道とほぼ同等であると考えられます。

まとめ

新設線を対象として今後の労働力不足、振動・騒音の環境問題などへの対応、さらに建設コストおよび保守コストの節減を目的とする、既存の軌道構造から脱却したレール埋込型の省保守・低騒音新形式軌道について、その機能と開発経緯を紹介しました。建設コストの検討などまだ不十分な点がありますが、保守コストや環境特性などにおいて、ほぼ期待通りの成果が得られました。しかしながら、実用化にあたっては、実際の車両走行試験により、期待している機能の維持・低下の経緯や繰返し走行荷重による使用材料の挙動を確認する必要があります。一方、短繊維コンクリートのスラブ軌道用路盤への適用や軸箱加速度を用いた軌道弾性材劣化箇所の特定技術など、既存の軌道構造への活用が大いに期待できる成果も得られました。今後は、新形式軌道の実現と要素技術の応用を図っていく予定です。RRR