

*Rolling Stock & Technology*

# 鉄道車両と技術

特集：操舵台車

No.232

NEW SHUTTLE  
Saitama New Urban Transit Co., Ltd.

2020  
SERIES

22

21





# 軌道の剛性を最適化し、 軌道構造境界部の諸問題を解決

Martin Quirchmair\*・Harald Loy※, 訳：日本ゲッツナー(株)

軌道構造変化箇所の構造物境界部は、鉄道事業者にとって軌道保守上、困難な箇所である。路盤の剛性が急激に変化するため、軌道構造の磨耗速度が速く、メンテナンスサイクルは縮まり、コストが増加する。

軌道構造境界部に、適切な弾性材を選択して軌道に挿入すると、軌道の磨耗は激減する。Sylomer® あるいは Sylodyn® 材のポリウレタン製品は現場で十分に信頼を得ている防振材である。最新のシミュレーション計算モデルを用い、ゲッツナー社の技術者は、弾性の異なる小領域を組合せた、包括的な設計を開発した。軌道構造境界部を小領域に分け、剛性と軌道沈下という観点から最適化した結果、軌道の質は長期に亘り保持され、ネットワークの稼働率は向上する。

軌道の寿命を延伸するため、軌道構造境界部を多数の小領域に分割し、剛性の急激な変化による負荷を長い距離に分散させ、最少までに減衰させる。個々のケースの問題の程度に応じ、タイプの異なる弾性材を用いて各小領域の剛性を調整する。研究所で行った試験ならびに現場測定が、理論研究の正当性を実証して統括する。前述したプロジェクト例が示すように、この有限要素法による計算モデルにより、各々のケースに最適な軌道パッドあるいはタイププレートパッド、マクラギパッドを確実に選択して提案することが可能となった。軌道構造全体を新たに構築することなく、必要な弾性材を敷設することで、軌道構造境界部に現存する保守上の問題は解決される。

ゲッツナーには、国際的な実績と経験から得た知識が蓄積されており、軌道構造境界部の問題解決を望む鉄道事業者に、迅速で効果的な解決法を提案している。

## ■ 軌道の剛性を最適化し、 軌道構造境界部の諸問題を 解決する

スラブ軌道とバラスト軌道の接続箇所、踏切の前後、無道床橋梁の橋台付近、分岐等の軌道構造変化箇所あるい

は軌道構造境界部では、軌道保守にかかる費用も時間もその他の区間に比べて多く、弱点箇所となっている。軌道構造の急激な変化は動荷重に影響を及ぼし、バラスト沈下（軌道狂い）や振動等上部構造の磨耗を誘因する。乗客にとっては乗り心地が悪い区間であり、軌道の管理者にとって問題の多い

区間といえる。

ゲッツナー社ではこの軌道構造境界部の問題を解決するシステムの開発に取り組んで来た。最新のコンピュータ技術を用い、個々のケースに最適な高性能弾性材を選択し、これを適切に組み合わせることにより、軌道構造変化によって生じる境界部の路盤剛性の差

\* ) Martin Quirchmair : System Development Getzner Werkstoffe GmbH  
 ※ ) Harald Loy : Head of System Development Getzner Werkstoffe GmbH

異を均し、滑らかな走行を達成する。

本書では、軌道構造境界部に生じる問題解決の典型的な例をあげ、ゲッツナー社の弾性材であるSylomer®あるいはSyloodyn®を用いて軌道の剛性を最適化するシステムを実例を挙げて紹介する。加えて、有限要素法（FEM）シミュレーションによる設計の長所と利点を説明する。研究室で行った材料の試験値ならびに現場調査結果が、本書のデータベースとなっている。

「鎖の強さは一番弱いところで決まり、一個の輪が弱いとそこが切れる」ということわざを軌道にあてはめると、メンテナンス周期が早まるか、延伸できるかは、軌道の最も弱い区間である軌道構造境界部の問題を如何に処理し、解決するかで決定されると言えるであろう。軌道構造境界部では軌道構造および路盤の連続支承が中断され、軌道構造の剛性が急変する、問題の多い区間である（図-1）。

典型的な軌道構造境界部として、スラブ軌道からバラスト軌道の接続箇所

あるいは建築物を走行線が横切る区間（例えば、橋梁、トンネルあるいは暗渠）が挙げられる。同じ軌道構造内で、変化点が生じる場合もある。住宅地域のように、振動対策が強く要求されるような区間には、防振効果のある柔らかいバラストマットを敷設するが、反対に、家一軒ない屋外の走行線には振動対策は必要とされない。軌道構造境界部は、このような屋外走行線で、バラストマットが敷設されている区間から敷設されていない区間へ移行する地点を指す。軌道構造境界部は保線上の諸問題が生じる個所であるため、特に配慮して設計する必要がある。

連続支承が途切れるケースがどのような構造であれ、現代では最新のコンピュータプログラムを用い、軌道構造境界部を総合的に設計することが可能である。1988年にツインマーマンが提案した梁による連続支承のような、従来どおりの計算法では限界があるケースも、最新のコンピュータプログラムを用いると、軌道のパラメータの突然

変化が軌道構造境界部に及ぼす影響を極めて正確に分析し、弾性材を用いた最適化を予測して計算することが可能となった。コンピュータによる計算モデルの精度は応用した軌道の測定によって実証可能となる。より正確な計算モデル開発のためのたゆまぬ努力が、軌道構造境界部の改善の主体といえるであろう。

## ■ 軌道構造境界部の難しさ

軌道構造を精査すると、軌道構造境界部では諸問題が生じやすいことがわかる。様々なレベルの剛性が存在し、各々レールたわみ量が異なり、軌道構造が急変すると、軌道を構成するパラメータも急変し、その結果、動的応力が増加する。車両が段差を通過する場合、段差の大きさによっては車輪とレールにかかる負荷が急激に増加する。動的応力がはっきりと感知されるまでに増加すると、軌道構造境界部の磨耗速度は加速し、長期的には道床の沈下や軌道構成部品の損傷を招く。

バラスト軌道からスラブ軌道へ変化する軌道構造境界部では、車両の通過による道床沈下と磨耗は不可避である。従って、定期的に道床をつき固め、マクラギ下に隙間や空洞ができるのを防止する。メンテナンス周期は列車の速度と作用する動的力の影響を受けて変化する<sup>(1)</sup>。

スラブ軌道は構造自体が硬いことから、道床沈下（軌道狂い）はほとんどないか極めて小さいため、バラスト軌道の表面はスラブ軌道よりも低くなり、段差が生じる。剛性が局部的に異なる軌道を接続した結果生じる高低差は、軌道構造にかかる動的応力を著しく増大させ、レール座面部に過大な荷重が発生する。

磨耗の兆候が頻繁に観察される箇所

図-1 軌道構造境界部のパラメータが変化すると、支承の連続性が途切れる

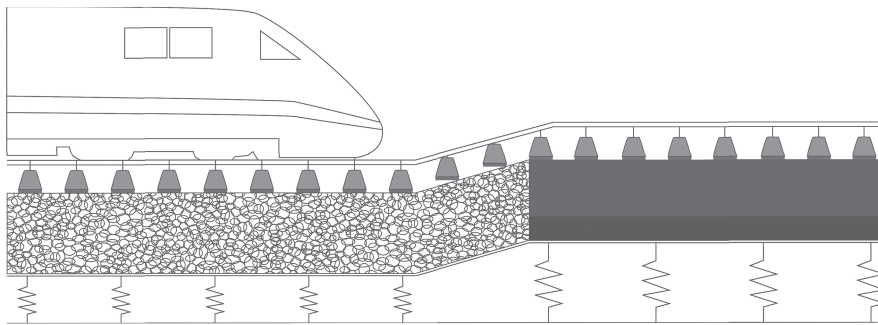


図-2  
バラスト軌道からスラブ軌道へ変化する軌道構造境界部で生じた軌道の損傷





では、時間の経過とともに保線保安上の諸問題は益々深刻となる。バラストの削摩による白石化（粉砕化）、ピンポイントに集中してかかる過度な荷重によるバラスト沈下（軌道狂い）、レール表面の短間隔の波状磨耗は、軌道構造境界部に繰り返し発生し、鉄道管理者にとっては頭の痛い問題である（図3参照）。

マクラギ下の空洞や隙間は生じるとそこに荷重が集中するため、レール締結装置の部品やマクラギの破断、更には破損という深刻な事態に招く危険性がある。

軌道構造境界部に生じる短間隔のレール波状磨耗は、固有振動数が大きく異なる軌道構造がつながる箇所が生じる現象である。高い動力が様々な励振メカニズムをもたらした結果と考えられている<sup>(2)</sup>。

上述した、軌道構造部品の損傷は、すなわち、軌道構造境界部のメンテナンス周期を早め、メンテナンスコストを増加させる。

## ■ 軌道保守量の増加

ネットワークの稼働率を最大にすることは、鉄道事業者にとって最大の関心事の一つであろう。「時は金なり」といわれるように、軌道保守作業を行うために線路を閉鎖する回数が増加することはそのまま利益の減少につながる

ため、線路封鎖を常に最少に抑えることが求められる。軌道構造境界部に生じる問題はメンテナンス周期の短縮を引き起こし、メンテナンスコストを増加させる<sup>(3)</sup>。

米国の鉄道事業者は毎年、軌道構造境界部の軌道保守に約2億ドル、ヨーロッパの鉄道会社は約8500万ユーロを支出している。例えば、オランダのデータをみると、軌道構造境界部は通常の軌道に比べると、2から4倍の軌道保守量を必要としている<sup>(3)</sup>。

軌道構造境界部の長さはネットワーク全体からみると極めて短いことをかんがみると、費用対効果が判りやすい区間ともいえる。すなわち、可能な限り最上の効果がある弾性材を軌道構造に用い、最適な技術で問題を解決すれば、投資は早期に回収され、ネットワークの良好な稼働率が維持される。

軌道構造境界部を設計する際には特別な配慮が必要とされる。考慮に入れないといけない最も重要なパラメータは軸重と速度であり、技術的にも営利的にもベストな方法を探ることを目的とする。

## ■ 軌道構造境界部の要件

効果的な問題解決方法を開発するには、何か必要とされているかを的確に知る必要がある。軌道構造境界部の要件は以下のとおり：

軌道の剛性に局所的な変化が生じる場合、動的な影響を受けにくくする

その軌道に既存する剛性の違いを調整する

無道床橋梁橋台等固定構造の接続部では特に道床沈下（軌道狂い）を抑止

コストと利益を考慮し、軌道構造境界部の長さを最適化する

一般的に、構造内に弾性材を用いない従来型バラスト軌道は、剛性の差異によって生じる衝撃を十分吸収できない。従って、軌道構造境界部の問題を解決するためには、レール座面に高弾性材を加えたスラブ軌道のような、柔軟な構造と接続する必要がある。

次の課題は、軌道構造境界部で問題とならないたわみ量または剛性の差異の許容値と、変化を滑らかに吸収できる距離のガイドラインとなる数値の設定である。これまで世界中で様々な数値ガイドラインがつくられてきた。例えば剛性の変化の許容値は、コンピューターモデルで区間のたわみ量を計算し解析した結果、0.2mm～0.5mmを超えないことが推奨される<sup>(4)</sup>。

軌道構造境界部の必要な長さを検討する場合は、大まかな工学規則を適用することができる。すなわち、包括的な目標は、保安上必要な長さの軌道構造境界部を確保しつつも（利益）、同時に長さを最小限に抑える（経費）ことにある。軌道構造変化点によって、0.5秒

図-3 軌道構造境界部に観察される磨耗の兆候：白石化（左）、バラスト沈下（中央）、短い間隔のレール波状磨耗（右）





図-4 軌道構造境界部に敷設されたガードレール（左）. 表面を接着してバラストを固定



ルール、0.7秒ルール、あるいは1秒ルールなどがよく用いられる。例えば、時速100kmで走行する車両が軌道構造変化点を通過する場合、0.5秒ルールでは約14 m、0.7秒ルールでは約19.4 m、1秒ルールでは約27.8 mの軌道構造境界部として剛性の最適化を図ることが推奨される。軌道構造境界部の問題を解決するのに必要な長さは、軌道構造変化点を通過する時間、換言すると、列車速度によって決定される。短い軌道構造境界部を高速で通過する箇所を改良するためには、必要な軌道構造境界部は長く、高額なシステムが必要となり、妥協点を見つけなければならなくなる。また、軌道構造境界部の長さは、必要最小限の長さ、すなわち、ボギー台車間の距離より小さくはならないことも考慮する必要がある<sup>(4)</sup>。

## ■ 軌道構造境界部の問題に対する一般的な研究

軌道構造境界部が、取扱いに特別な配慮が必要とする軌道区間の一つであるという認識は決して新しいものではない。この問題解決のための研究がこれまでも数多く行われてきた。これらの研究には長所もいくつかあるのだが、例えば、軌道保守の容易さまたはコストの観点から、短所もあった。

通常このような研究の普遍的な目的

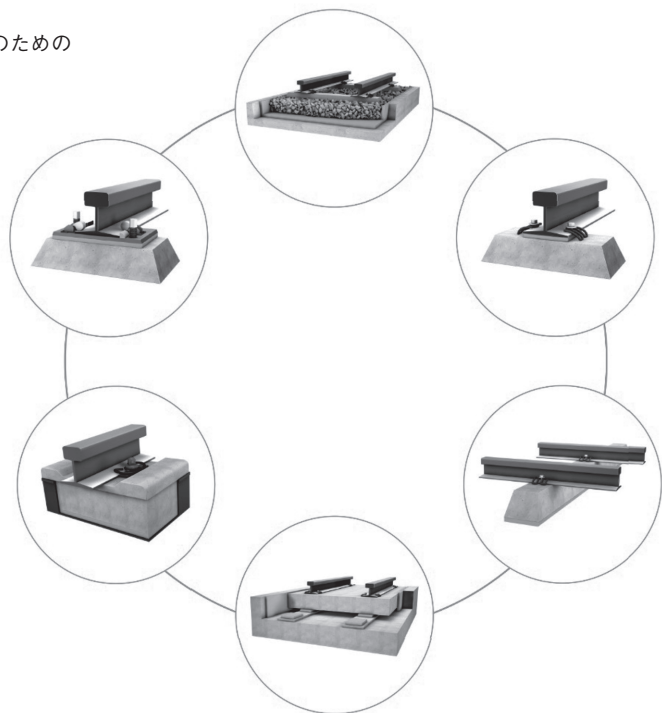
は、軌道構造のパラメータの局所的な不連続を広い面積に分散することにある。軌道構造への動的応力を最小に制御するためには、軌道の剛性変化が連続的あるいは細かい段階に分けて行われるよう調整しなければならない。それにより軌道構造境界部への動的応力が隣接する区間に分散され、個々の区間への衝撃は最小化される。

高速線では、軌道構造境界部を6区間以上に亘った設計も可能である。このような工法は上級レベルの代表格であり、あらゆる合理的な技術・営利的オプションが採用される。この解決法を構成する代表的要素としては、ガード

レールやバラストを表面接着して固定化させる工法（図4）、または粒度調整碎石によるアプローチブロック等がある。これらは長年の経験と実績から設計技術も改良を重ね、保線現場の要求に添えてきた。しかしながら、これらは非常に高価な工法であり、経済的観点から言えば、標準的な軌道に存在する軌道構造臨界部の大半に使用することはとても不可能である。従って、これよりも容易でコストのかからない対策法が使用されているのが実情である。上述の部分解決もその一つであるが、長所も短所もある。

高価な工法または部分的部分解決法

図-5 軌道構造最適化のための弾性システム





への追加対策として提案するのが、各軌道構造臨界部に最適なポリウレタン材弾性材を設計し軌道構造に組み込むことである。ゲッツナー防振材の特殊な特性は、軌道構造の剛性（弾性）を精確に定義できることであり、同時に、バラストとの補完関係に優れており、長期に亘りバラストを保護する（塑性特性）。

## ■ 必要な弾性を精確に選定し、軌道を最適化

構造が異なる軌道を接続しなければならない場合、各々の軌道のパラメータを知ることが重要である。高品質弾性材を用いることで、いかなる剛性も定義可能となり、求められた剛性を挿入して適正な防振効果が得られる。軌道構造臨界部の各構造のたわみ量は、要求された設定値に修正される。

軌道パッド、タイプレートパッド、マクラギパッド、バラストマット、マススプリングシステム、あるいはマクラギケース底部敷弾性パッド等を用いて、各軌道構造の特性に応じた剛性に調整できる（図-5）。

これこそ、高品質ポリウレタン製品 Sylomer® や Sylodyn® の特性が実際に遺憾なく発揮される場所である。軟化剤が時を経て次第に析出する経年劣化の問題があるゴムを原料とする製品と異なり、高品質ポリウレタン製品である Sylomer® や Sylodyn® の剛性はその耐用期間を通して剛性は変わること

はなく、本来の使用目的である機能を保持する。

ポリウレタン材の応用範囲は広く、用途によって多様である。Sylomer® や Sylodyn® は要求された条件に合わせて設計製造された製品であり、動的特性は極めて優れている。さらに必要に応じた弾性を与えることができる。例えば、軌道パッドやタイプレートパッドに应用する場合、最も重要とされるのは動剛性と静剛性との関係である。軌道パッドやタイプレートパッド等へ应用する場合、成形性は全く問題とされない。一方で、バラスト保護の目的でマクラギパッドを用いる場合は、バラストとマクラギとの接触面積を著しく増やして接触応力を減らす働きがあるため、可塑的変形は望ましい特性といえる。マクラギパッドに包まれた碎石の流動は抑止されるため、軌道沈下ならびに道床の変動は減少し、結果として軌道構造全体の安定化に貢献する。

ポリウレタンは優れた適応性はそのまま製品範囲の広さとなり、剛性の程度および材料の特性は細かく分類されており、要求された条件にあった適切な製品を提供できる。換言すれば、軌道構造境界部の各々の区間にあるパラメータの多様性は、それぞれに適応したポリウレタン弾性材の挿入により、適切に調整・修正される。こうして調整された軌道の弾性は、更には軌道沈下の防止にも働く。バラスト上層部はパッドに食い込み安定し、加えて、振動が減少するため、道床全体の動きを

減らす。道床内の碎石が摩損する速度を速める危険な振動数可能となる。

領域は約 30Hz の励振から始まるが、これは高速鉄道線では特に顕著である。バラスト軌道はこの振動数領域を超えるとより敏感に反応し、この振動数が連続すると碎石の流動が始まる。この振動振幅を減らすことが可能であれば、バラスト軌道の耐用年数を延伸させることが以下、成功したプロジェクトを分析し、軌道に弾性材を敷設したことによって生じた積極的な効果を述べる。

## ■ 実施例

大抵の軌道構造境界部は標準的な軌道にある。移行区間を置かず、様々な軌道構造が直接連結されることもめずらしくはない。軌道構造境界部を幾つかの区間に区切り、荷重を分散することにより、軌道構造境界部に発生する問題は著しく緩和される。問題発生後の措置でも効果はある。マクラギパッドや軌道パッド、タイプレートパッドのような弾性部品を軌道構造に加えることにより、軌道構造全体を構築し直すことなく軌道構造境界部を改良できる。実施例としては、メキシコの鉄道橋梁改良工事がある。

このケースはバラスト軌道が旧来の方法でスラブ軌道に直接連結されていた。問題の多い軌道構造境界部には長い間特別な注意が払われることはなか

図-6 スラブ軌道の損傷 - レール締結装置のボルトの緩み（左）対策として、可塑性補正プレートと弾性軌道パッドを敷設（中、右）





ったので、砕石が削摩によりバラストが白く見える典型的な白石化が速く進行した。更には、大きい動的力がかかるとレール締結装置のボルトが緩み、スラブ軌道の表面が損傷した(図-6)。

破損に至るまでの過程を詳細に分析し、適正な解決法を見出した。最も適した製品を選択するために計算モデルで計算し、相互関係の調整を入念に行った。

損傷したスラブ軌道のむらを補正するために、特殊可塑性Sylomer®材の調整プレートをレール座面とコンクリートスラブとの間に挿入した。レール底部の下に直接敷設した軌道パッドは柔らかい弾性材、Sylodyn®を用いた。この措置により、荷重は理想的に分散され、良好な動的特性に改善された。軌道構造境界部でマクラギ25丁に弾性可塑物(エラストプラスチック)であるSylomer®材のマクラギパッドを敷設したことにより、軌道沈下が著しく減少し、軌道構造境界部の走行が滑らか

になった。総体的に、軌道構造境界部の摩損が激減した。

軌道を最初に敷設する場合は、計画段階で防護策を組み込むことが望ましい、ドイツの重荷重鉄道営業線のケースでは、軌道構造境界部に移行スラブを設置して改善を図った。バラストと移行スラブとの接触面積を増やすために、新たに開発した可塑性弾性バラストマットを初めて敷設した。ゲッツナーの社内研究所で行った調査では接触面積は約34%、この良好な数値により、バラストと移行スラブとの間の応力を6~8ポイント減らした。この措置により、軌道構造境界部のバラストは安定し保護された。

2014年秋、軌道構造境界部に関する計算の検証を目的とする現場測定を行い、2015年夏、再度測定した。測定から得た経験は計算モデル開発にフィードバックされ、計算モデルの予測精度はこれまでよりも更に向上した。

## ■ 計算モデルを用い、個々のケースに最適な問題解決法を提案

多くのコンピュータプログラムは、曲げ線と結果生じるレールたわみ量を古典的なツィンマーマン法で計算する。そこでは、軌道は無限に連続して敷設された長い桁と想定される。ツィンマーマン法による解析モデルは何度も検証され、軌道パラメータが一定であるような、均質なシステムにおいては、計算値の精度は極めて優秀である。しかしながら、軌道構造が変化する臨界点、すなわち、剛性が急激に増加する場合を計算しようとする、プログラムは限界に達する。

FEM(有限要素法)とは、軌道構造境界部を統括して計算する方法の一つである。領域を有限な小領域(要素)に分解し、各小領域における偏微分方程式の近似解を数値的に得る数値解析

図-7 重軸重条件下での軌道構造境界部のレールたわみ量の測定(上)と研究所で行った接触面積の調査(下)

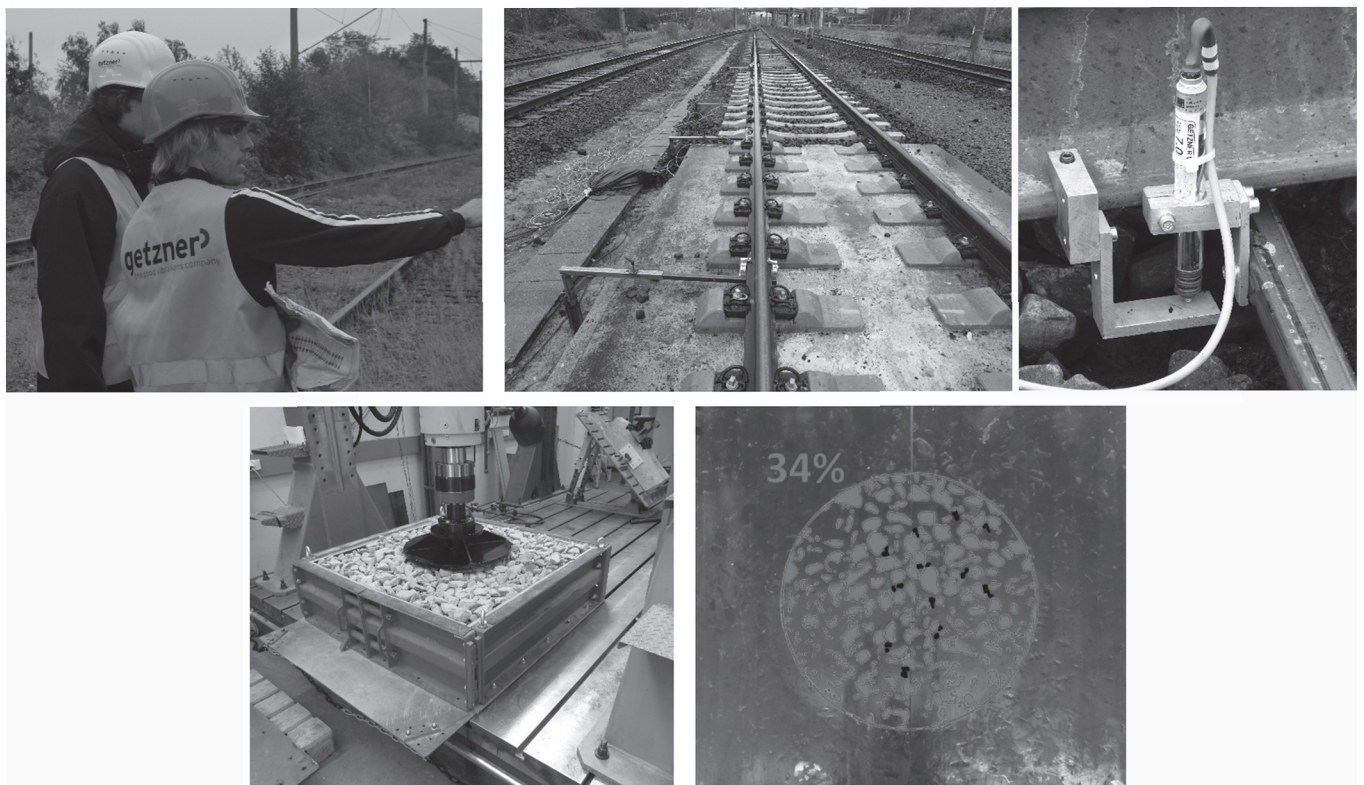
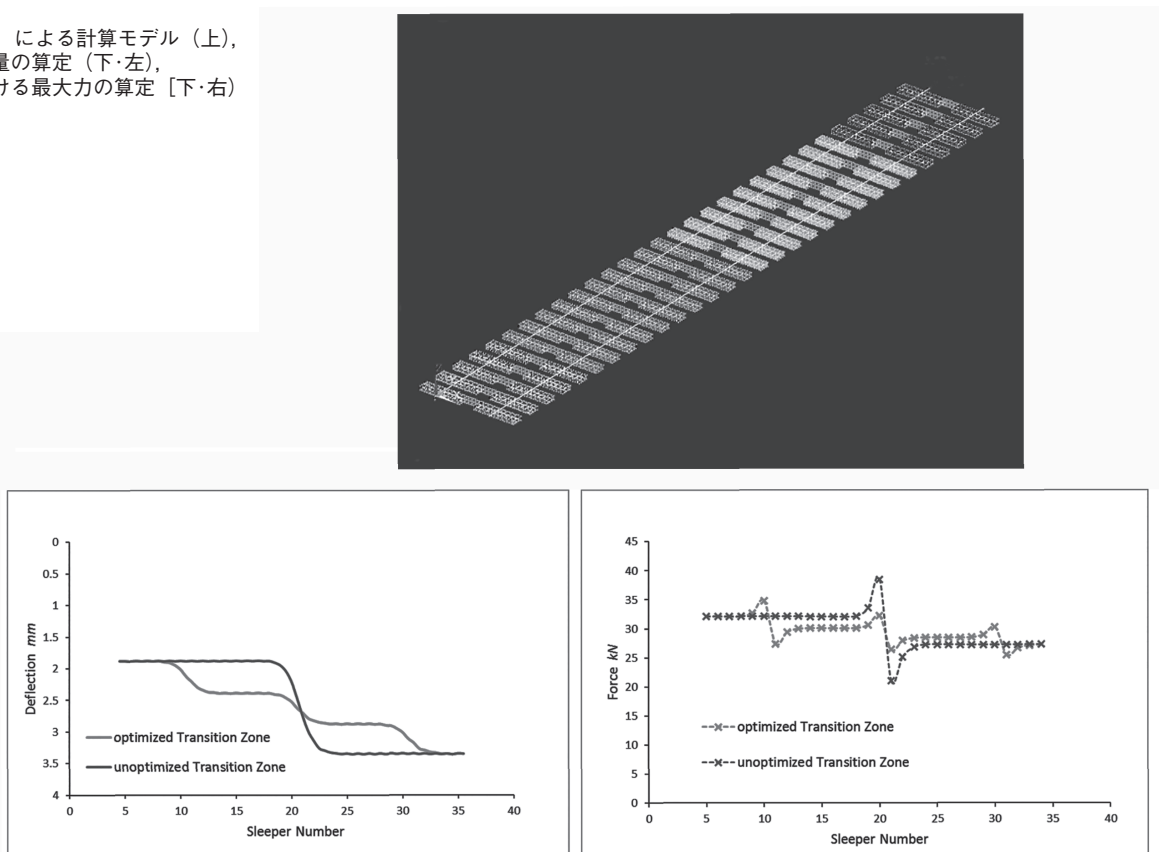




図-8  
有限要素法 (FEM) による計算モデル (上),  
最大レールたわみ量の算定 (下・左),  
レール支承点における最大力の算定 [下・右)



法の一つであり、剛性の連続性が途切れる軌道構造境界部の問題解決方法に応用する。

FEM計算モデルは多数の弾性要素から構成され、何に応用するかによって異なるが、各要素（小領域）におけるマクラギより下の層の弾性を様々に変えることができる。こうして、道床と軌道双方の路盤および、バラストマットやマクラギパッドのような弾性要素も同時に考慮して検討することが可能となった。現実では、レールは座面下でマクラギに固定されている。従って、現実の条件に近似させるため、マクラギ中心部は故意に弾性要素から外した（図-8）。

さらに、タイプレートパッドあるいは軌道パッドのような弾性要素も単独で計算モデルに加えることができるため、各々のレール座面を構成する弾性要素のシミュレーションが可能となった。

研究所での実験から得た材料の経験的データは、計算モデルで用いる弾性要

素のために保存され、非線形材料特性を説明する最良な方法であることが証明された。ガードレールや移行スラブのような特殊軌道構造もこれに含まれる。

計算モデルによって得る静・動的な算定数値は、レールたわみ量に加え、例えば、レール底部の張力、マクラギの曲げあるいは支承力等を計算するための、貴重なデータとなる。

図-8に示す算定結果は、軌道の各小領域（要素）の各々異なるレールたわみ量が均一に調整され、軌道の剛性が最適化されるかを示す。支承力内で、荷重が減衰されたことが明白である。力のピークが各小領域の末端に追加されて発生しているが、最適化後は予測どおり、遥かに減衰されている。

軌道構造境界部において、軌道にかかる荷重と設計の質との間には直接の関関係が存在する。特定の弾性材製品に関する非線形原料の情報を計算モデルのデータベースとすることを目的としていたが、これにより、様々な弾性

路盤を相互に比較検討し、最良の問題解決を選び提案することが可能となり、軌道構造境界部に存在する応力の最小化に成功した。

#### <参考資料>

- (1) Freudenstein S, Geisler K, Mólter T, Mißler M and Stolz Ch, Feste Fahrbahnen in Betonbauweise [Concrete slab tracks], Betonkalender, Sonderdruck, Ernst&Sohn, 2015.
- (2) Grassie S L, Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments, Review Paper, Germany 2009.
- (3) Zuada Coelho B E, Dynamics of railway transition zones in soft soils, Dissertation, Delft University of Technology, 2011.
- (4) Schneider P, Einsatz von Schwellenbesohlungen in Übergangsbereichen, Präsentation 2 [Use of under-sleeper pads in transition zones, Presentation 2]. Schwarzenberger Bahn-Gespräche, 2011.



# 日鉄住金レールウェイテクノスの鉄道用摩擦調整材



## ■摩擦調整材の特徴

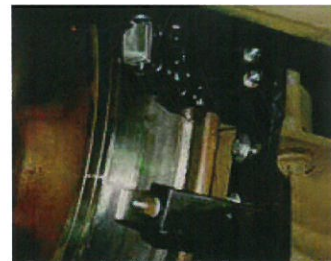
- 本格的な摩擦調整材として、米州、EU及び日本などの特許を取得済み
- 水ベースの液体製品とレジンベースの固体製品群であらゆる使用方法に対応可能
- 潤滑から増粘着までの摩擦調整商品群ラインアップ
- 無公害で環境に優しい
- 軌道と車両の清潔さを保つ
- コンサルティングを含め、お客様のニーズに合った商品サービスを提供致します



液体地上塗布例（塗布バーと装置本体）



液体車上噴射例

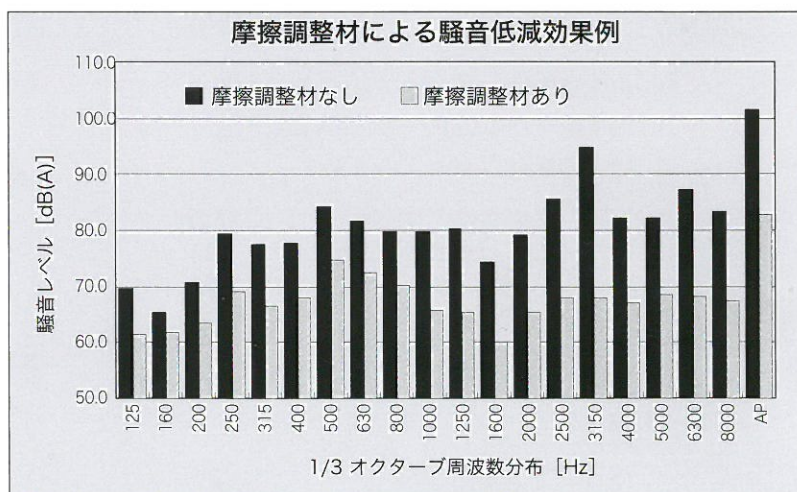


固体車上塗布例

## ■摩擦調整材の主な用途

車輪、レール接触騒音低減

- 軌道振動低減
- 横圧低減に伴う走行安全性向上
- 力行、制動性能改善
- レール波状摩耗低減
- 車輪フランジ、レール側面摩耗防止
- 走行抵抗軽減による省エネ
- 塗油削減による環境汚染防止



日鉄住金レールウェイテクノス株式会社



大阪 〒554-0024 大阪市此花区島屋5丁目1番109号  
東京 〒105-0012 東京都港区芝大門1丁目12番16号

tel:06-6466-6176 fax:06-6466-6278  
tel:03-6895-9390 fax:03-6895-9394