

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

軌道の性能向上を目指して —ラダーマクラギの開発—

ラダーマクラギとは、レールに沿ってプレストレストコンクリート製の長尺な梁^{はり}を配置し、それらを鋼製の継材でつないだ“はしご”状のまくらぎです。ラダーマクラギは、定期的な保守を要するバラスト軌道の保守省力化を第一の目的として、1999年に開発されました。現在では、鉄道事業者28社において敷設（敷設延長約50km）され、バラスト軌道の保守省力化だけではなく、直結系軌道の低振動・低騒音化などにも貢献しています。ここでは、ラダーマクラギの開発経緯を紹介するとともに、バラスト・ラダー軌道とフローティング・ラダー軌道の概要、ラダー軌道の今後の展望について紹介します。



渡辺 勉
Tsutomu Watanabe
鉄道力学研究部
構造力学研究室
副主任研究員
[専門分野]車両・軌道・
構造物の動的相互作用
解析、構造物振動、コ
ンクリートまくらぎ



後藤 恵一
Keiichi Goto
鉄道力学研究部
構造力学研究室
副主任研究員
[専門分野]車両・軌道・
構造物の動的相互作用
解析、衝突解析・実験



涌井 一
Hajime Wakui
研究開発推進部
主管研究員
[専門分野]線路構造シ
ステム、コンクリート
まくらぎ、車両・軌道・
構造物の動的相互作用
解析

軌道におけるまくらぎの役割

鉄道の軌道は、列車を直接支持し、列車を安全に誘導する機能を有する施設で、バラスト軌道と直結系軌道に大きく分類されます。

バラスト軌道は、レールを締結したまくらぎをバラスト（碎石）で支持する軌道です（図1）。このバラスト層は、列車が繰返し走行すると次第に形が変化して（崩れて）いくため、軌道変位（図参照）が生じます。列車が安全かつ快適な乗り心地で走行するためには、このバラスト層を修復する保守（軌道整備）作業が発生します。このように、バラスト軌道は定期的な保守を前提とした軌道です。

一方、直結系軌道は、レールを締結したまくらぎあるいは軌道スラブをコンクリート道床などで支持する軌道の総称です。スラブ軌道などがこれに該当します。バラスト層とは異なり、直

結系軌道の道床は十分に頑丈なため軌道変位はほとんど発生しません。このため、直結系軌道はバラスト軌道のような保守を前提とせず、省力化軌道とも呼ばれます。

実際にどの軌道を採用するのかについては、建設費などの初期投資と保守費用からなるライフサイクルコストの比較に加え、日常の保守のしやすさや、振動・騒音をはじめとする周辺環境への影響などを鉄道事業者が総合的に判断することになります。バラスト軌道の保守に関わる費用は鉄道運営コストの大きな部分を占めるため、近年建設される高架橋上やトンネル内の軌道では、初期投資がバラスト軌道に比べて高い傾向にある直結系軌道の採用が増えています。一方、在来の土路盤上の軌道の大半はバラスト軌道であるのが実状です。

まくらぎはこれらの軌道を構成する軌道部材の一つで、①レールを支持し、②軌間（左右レールの間隔）を保持するとともに、③レールから伝達される荷重をバラスト層やコンクリート道床に分散させる役割を担っています（図1）。なお、まくらぎの材質として

図1 軌道変位

軌道変位とは、レール長手方向に対するレールのゆがみです。軌道変位は、高低、通り、軌間、水準、平面性の5項目に分類され、それぞれmm単位の整備基準値が定められています。

はいくつかのものがあ
りますが、ここではコ
ンクリート製のまくら
ぎに限定するものとし
ます。

最も一般的なまくら
ぎの形式は、左右レ
ールと直交する「横ま
くらぎ」です。一方、こ
こで紹介するラダーマ
クラギはレール方向に
長い「縦まくらぎ」に
分類されます。このほ
か、直結系軌道の一部
で用いられる「短ま
くらぎ」や、鉄筋コンク

リートブロック同士を鋼材でつないだ
ツープロックまくらぎと呼ばれる形式
もあります。

ラダーマクラギ開発の背景

(1) 縦まくらぎへの挑戦(1960年以前)

バラスト軌道の保守に関わる労力を
削減することは、世界中の軌道技術者
に課せられた課題でした。バラスト層
に対して連続した面で接触する縦ま
くらぎは、間欠した面で接触する横ま
くらぎに比べて荷重分散性に優れていま
す(図2)。このため、バラスト軌道の
保守省力化を実現できる理想的な構造
と期待され、1920年代にオーストリア
で、1940年代から1960年代にかけ
てフランス、旧ソ連、日本などで開発
が試みられました(図3)。しかしなが
ら、まくらぎの重要な役割である軌間
保持の機能が不十分であったり、縦ま
くらぎの重量が過大で施工性や保守性
が悪かったことなどから、いずれの縦
まくらぎも実用には至りませんでした。
日本国鉄は縦まくらぎの開発を断念し、
1964年開業の東海道新幹線では横ま
くらぎによるバラスト軌道が採用されま
した。さらに、1960年代後半には直結

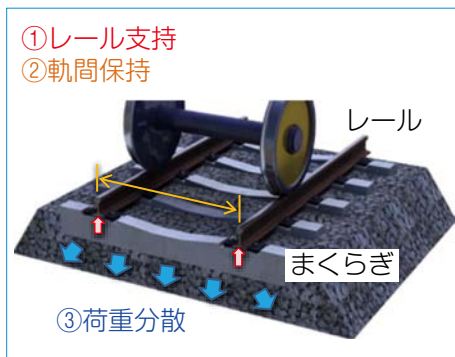


図1 バラスト軌道とまくらぎの役割

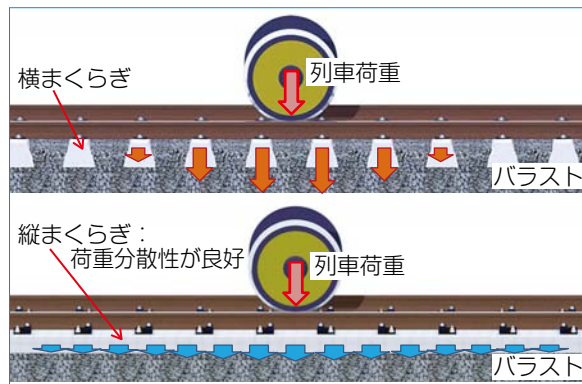


図2 横まくらぎと縦まくらぎの荷重分散性の比較

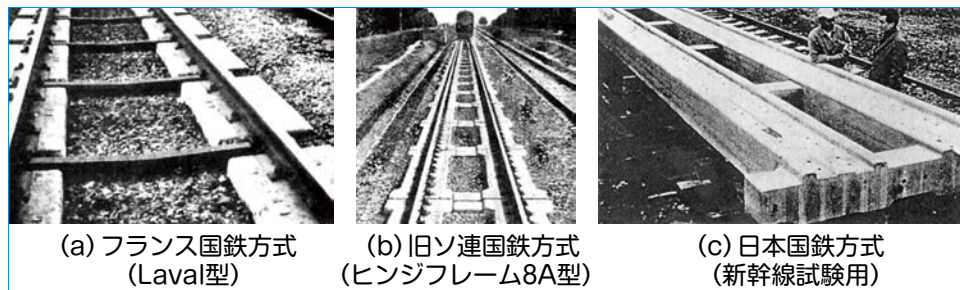


図3 1960年以前に開発された縦まくらぎ

系軌道の開発にシフトしていきました。
そして、1975年開業の山陽新幹線(岡
山~博多)では、セメントアスファ
ルト(CA)モルタル道床を有するスラ
ブ軌道が本格的に採用されました。

(2) まくらぎの限界状態設計法の構築

日本においてコンクリート製の横ま
くらぎが実用化されたのは1951年
です。このとき、横まくらぎの設計は、
列車走行によりまくらぎに発生する応
力度が許容応力度を超えないことを確
認する許容応力度法により行われてい
ました。設計荷重には、列車停止時の
静荷重を単純に約2倍したものが用い
られます。この手法はシンプルで明快
ですが、車輪やレールに凹凸があった
場合に発生する衝撃的な荷重を直接的
には考慮していません。そのため、許
容応力度法では、コンクリートにひ
び割れが発生(使用限界状態)したり、
補強鋼材が疲労で破断(疲労限界状態)
したり、まくらぎが一度の著大な衝撃
荷重で折損(終局限界状態)したりす
るような各限界状態を考慮することは
不可能でした。

以上のような問題点を踏まえて、鉄
道総研では旧国鉄鉄道技術研究所時代

の1980年代後半より、横まくらぎを
対象として、営業線の実車両を用いた
衝撃荷重の実態調査や分析、重錘落下
試験などを実施し、衝撃荷重に対する
まくらぎの挙動を解明しました。さら
に1992年に「鉄道構造物等設計標準・
同解説[コンクリート構造物]」に採用
された限界状態設計法の考え方を横ま
くらぎの設計に拡張し、横まくらぎに
おいても使用・疲労・終局の各限界状
態に対して適切な荷重を考慮した設計
法を開発しました¹⁾。ここで得られた
知見や設計法はラダーマクラギの設計
にも適用されています。

(3) 数値シミュレーション手法の構築

図2に示したように横まくらぎは
レール長手方向に間欠的に配置される
ため、1本の横まくらぎを対象として
設計を行えば十分でした。しかしなが
ら、縦まくらぎはレール長手方向に長
尺な梁として配置されるため、左右2
本のレール下の支持条件が異なる場合
などを想定すると、三次元的に現象を
とらえる必要が生じます。まくらぎの
設計において前述の通り限界状態設計
法が構築されたことにより、さまざま
な限界状態を想定した設計が可能とな

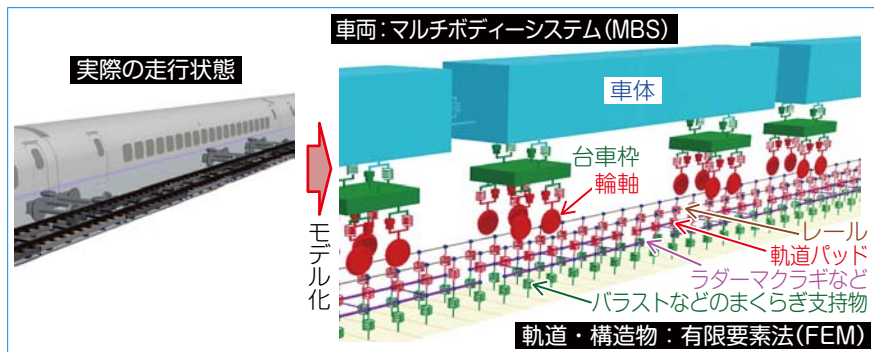


図4 車両と軌道・構造物の連成シミュレーション手法(DIASTARS)の概要



図6 ラダーマクラギの概観

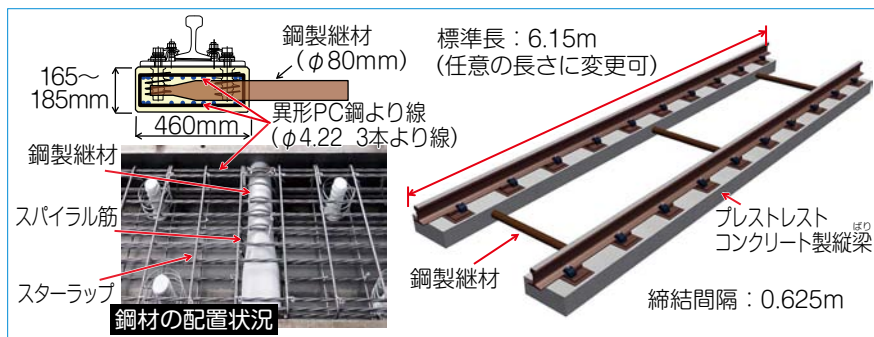


図5 ラダーマクラギの概要



図7 バラスト・ラダー軌道の敷設例

りましたが、そのすべての事象を実験などで検証することは非効率であるばかりでなく、場合によっては検証自体が不可能なケースもあります。そこで数多くのパラメーターの影響度を効率的に評価することのできる数値シミュレーションを活用することにしました。

鉄道総研では、1990年代に車両と軌道や土木構造物の連成応答を解析できる数値シミュレーション手法²⁾(DIASTARS)を構築しました(図4)。本手法は車両の車体、台車枠、輪軸を剛体と仮定し、これらをばねとダンパーで結合したマルチボディーシステム(MBS)でモデル化するとともに、軌道や土木構造物は有限要素法(FEM)により任意形状にモデル化します。本手法は、縦まくらぎの断面高さの検討、後述するバラスト・ラダー軌道の不支持区間やフローティング・ラダー軌道の防振材・防振装置の配置の検討など、三次元的なモデル化が必要不可欠な事象の解明に大きく貢献しました。

ラダーマクラギの誕生

1960年頃を境に研究開発がストップした縦まくらぎでしたが、1993年4月に鉄道総研の構造システム研究室が中心となり、再びそのプロジェクトが動きはじめました。これは鉄道事業者から鉄道総研に対して、バラスト軌道の保守省力化に関する斬新な技術開発への期待が高まったことによります。

縦まくらぎ開発の過去の貴重な経験により、①横まくらぎに比べて、単位線路長さ当たりの重量が大きくなり過ぎないこと、②軌間保持機能に十分な耐久性を持たせること、を両立させることが開発のポイントであることがわかりました。これらを踏まえ、縦まくらぎの断面は必要な機能(レール締結装置の設置など)を満足する範囲で最小の断面とするとともに、軌間保持機能を左右レール下の2本のプレストレストコンクリート製縦梁^{はり}に埋め込んだ鋼製の継材に受け持たせることとしました(図5)。これらの基本コンセプト

に対して、限界状態設計法、数値シミュレーションによる検証、高強度PC鋼より線の開発、実物大模型による実証実験、営業線への試験敷設などを実施し、1999年に新形式の縦まくらぎが完成しました(図6)。この縦まくらぎは、レール方向に長尺のプレストレストコンクリート製の梁^{はり}を配置し、それらを鋼製の継材でつないだ“はしご”状の縦まくらぎであるため、『ラダーマクラギ』と命名しました。

ラダー軌道の実用化

(1) バラスト・ラダー軌道

ラダーマクラギをバラスト軌道に用いた軌道をバラスト・ラダー軌道と呼んでいます(図7)。バラスト・ラダー軌道の第一の特徴は、保守省力化効果です。1996年より3年間にわたり、日本の標準的な車両の3倍もの重量の車両を用いた走行試験を米国試験線(TTCI)において実施し、ラダーマクラギの保守省力化効果を実証しました

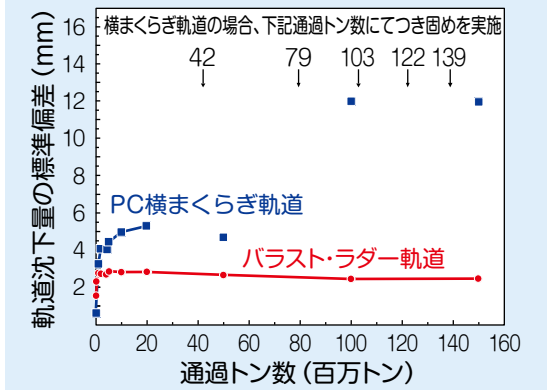
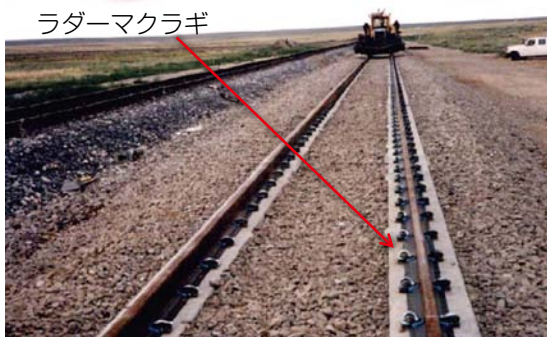


図8 米国試験線における保守省力化効果

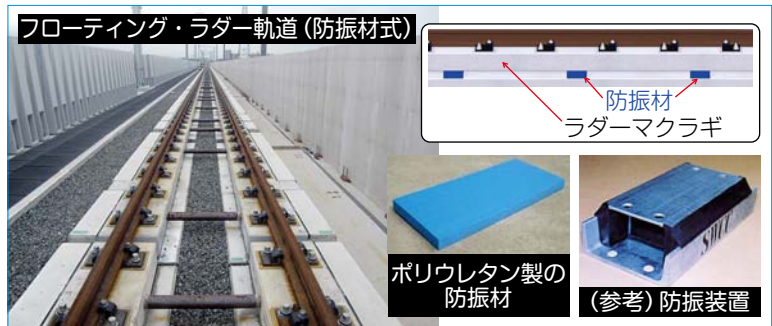


図9 フローティング・ラダー軌道の敷設例

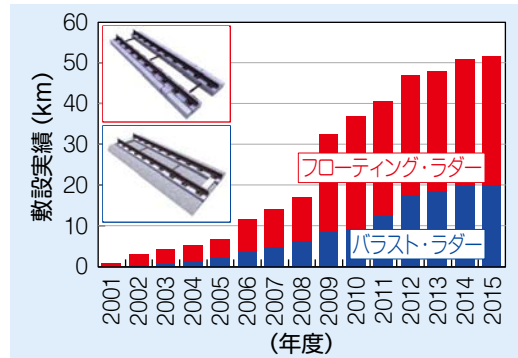


図10 ラダーマクラギの敷設実績

(図8)⁴⁾。第二の特徴は、ラダーマクラギにより軌道の剛性が高まることから、夏季のレール温度上昇や地震などに対するレールの座屈安全性が向上します。これにより、従来は困難であった急曲線区間のロングレール化が可能となります。

バラスト・ラダー軌道は、夜間騒音規制のために大型機械による保守作業ができない区間や、急曲線、トンネル、路盤不良部、橋台裏、踏切、伸縮継目、レール継目など保守が困難あるいは多頻度な保守が必要とされる箇所など、既設の横まくらぎバラスト軌道の弱点箇所への敷設事例が増えています。

(2) フローティング・ラダー軌道

フローティング・ラダー軌道は、ラダーマクラギを支持剛性が軟らかい防振装置や防振材と呼ばれる材料で支持した直結系軌道です(図9)。もともと荷重分散性に優れたラダーマクラギと、振動遮断あるいは振動低減性能に優れた防振装置や防振材を組み合わせることにより、低振動・低騒音な直結系軌道を実現しました。その低減効果はコ

ンクリート高架橋だけではなく、鋼橋においても実証されています⁵⁾。近年では、大都市圏の大規模連続立体交差事業、既設軌道のリニューアル高性能化工事、既設高架橋の耐震性能向上を目的とした改修工事などへの採用事例が増えています。

ラダーマクラギの今後の展望

ラダーマクラギは半世紀前に開発が中断された縦まくらぎの課題を克服し、従来の横まくらぎと同等の重量(単位線路長さ当たり)を実現した極めて実用性の高い縦まくらぎです。2016年3月末時点でのラダーマクラギの敷設実績は、バラスト・ラダー軌道が20.2km、フローティング・ラダー軌道が31.5km、合計51.7kmです(図10)。既設軌道の更新が中心であるため、普及の歩みは決して早くはありませんが、ラダー軌道は保守省力化や振動騒音など環境負荷低減以外にも、多面的に優れた性能を有するため、その活躍の場を着実に広げるものと期待されています。

今後は、大都市圏における敷設に留まらず、地域鉄道のリニューアル、LRTプロジェクトなどへの展開も予測されます。鉄道総研では、敷設環境に応じたより低コストなラダーマクラギの開発やラダー軌道敷設後の事後評価の定量化を引き続き進める予定です。

RRR

文献

- 1) 涌井一, 奥田広之: PCマクラギの限界状態設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.557/V-34, pp.34-54, 1997
- 2) 涌井ほか: 鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.129-138, 1995
- 3) 後藤ほか: 走行車両と軌道・構造物の連成シミュレーション, RRR, Vol.72, No.12, pp.14-17, 2015
- 4) 浅沼ほか: プエブロ実験線の重軸重列車走行におけるバラスト・ラダー軌道の耐久性・保守省力効果, 鉄道総研報告, Vol.16, No.2, pp.45-50, 2002
- 5) 渡辺ほか: ダブルフローティング型鋼鉄道橋を用いた構造物騒音低減効果の推定, 鉄道力学論文集, No.12, pp.19-24, 2008