

# PRC 技術による次世代線路システム

涌 井 一 \*

## 1. はじめに

標題の“線路システム”とは、軌道と、それを支える路盤・土木構造物の総称である。線路システムは左右一対のレールを主役として構成される。マクラギやスラブなどのレール支承体は、レールと路盤・土木構造物とを結びつけるインターフェースであり、線路システムの安全性、経済性、保守、環境などの課題に深く関与している。

本報告では、革新的インターフェースとして縦マクラギ方式のラダーマクラギ、ならびに、それをコア技術とするラダー軌道とラダー高架の両システムについて紹介する。これらの次世代線路システムは、いずれも PRC 技術が可能としたものである。

## 2. ラダーマクラギ

### (1) ラダーマクラギの形態と構造

ラダーマクラギ（図 - 1, 2）りは、プレテンション PRC 縦梁と鋼管製継材からなる“はしご”状のレール支承体である。縦梁と継材の剛結部（図 - 3）では、縦梁の上・下縁

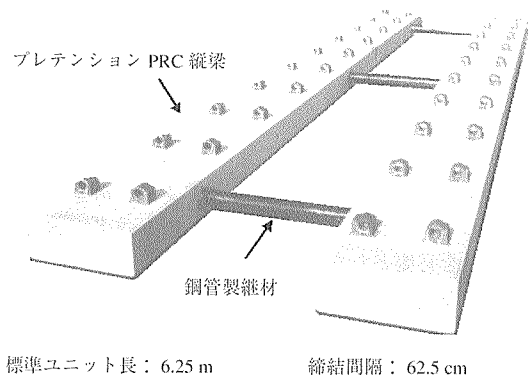


図 - 1 ラダーマクラギ

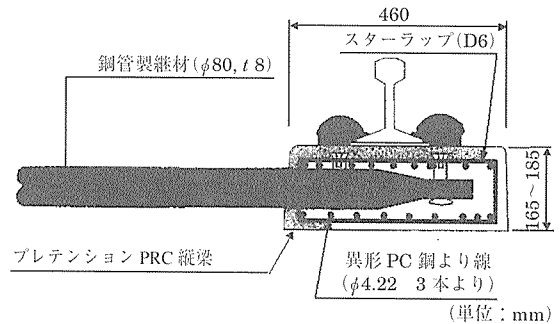


図 - 2 ラダーマクラギの断面諸元

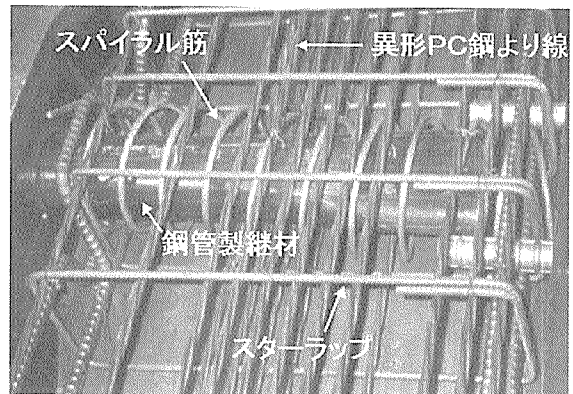


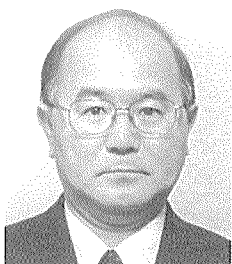
図 - 3 剛結部の補強方法

に配置されたインデント付 PC 鋼より線の間に厚肉鋼管（内部はモルタル充填，鋼管先端部は扁平加工）を挿入し，鋼管周囲に各種の補強筋を配置した上でコンクリートを打設して，強固に一体化を図っている。

このように棒部材から構成される力学的に明快な構造としたことにより，ラダーマクラギの線路長あたりの重量は，PC 横マクラギと同等の 4.5 kN/m にとどまっている。

### (2) ラダーマクラギの限界状態設計法

ラダーマクラギの設計には，性格が異なる 2 種類の輪重が用いられる。一つは軌道狂い等により発生する低周波の「動的輪重」であり，設計では通常，静的輪重（JR 線では約 80 kN）の 2 倍を最大値として用いる。他の一つは車輪／レール間に介在する異常欠陥（車輪フラットと呼ばれる車輪踏面の滑走痕など）により発生する高周波の「衝撃輪重」<sup>2)</sup>であり，最大で静的輪重の 5 倍以上にも達する。ラダーマクラギの設計では，これら 2 種類の輪重に対して発生頻度を想定し（図 - 4），動的負荷を評価した上で，PRC 構造に対する限界状態設計法の適用により，ひび割れ制御，疲労寿命，終局耐力の照査を行っている。



\* Hajime WAKUI

(財)鉄道総合技術研究所  
研究開発推進室 主管研究員

インデント付 PC 鋼より線の採用は、プレテンション方式定着長の短縮ならびに過大衝撃輪重に対するひび割れ制御において有利に働いている。

なお、断面が小さい割にプレストレス導入力が大きいため、定着部の線路直角方向引張応力が大きくなりがちである（図 - 5）。この対策としては、ボンドコントロールならびに、ひび割れ発生に備えた十分な補強を行っている。

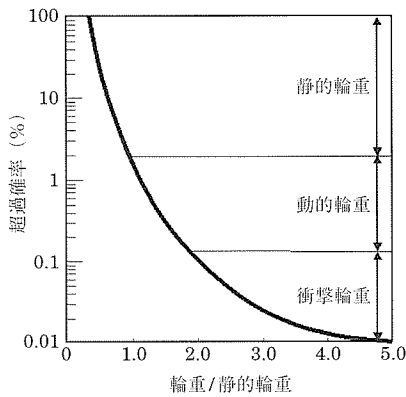


図 - 4 輪重累積頻度曲線

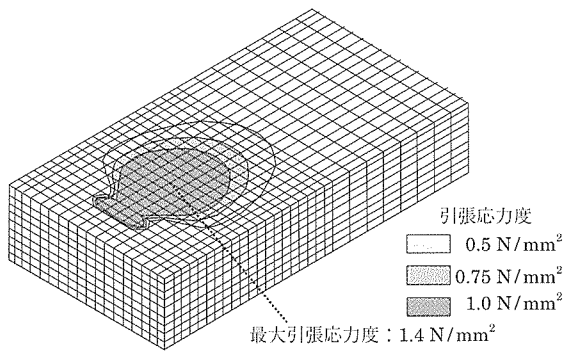


図 - 5 定着部の応力状態

### 3. ラダー軌道システム

ラダーマクラギは、マクラギ本来の機能である荷重分散性能を大幅に向上させ、かつレールが具備すべき性能（剛性、質量）の一部をマクラギにもたせた革新的デバイスである。

鋼製レールを現状よりも重量化すると、

- 1) 衝撃輪重が増大して設備負荷と騒音・振動面で不利
- 2) ロングレール軌道で横座屈のリスクが高まる

などの弊害が出る。

一方、ラダーマクラギを用いた軌道は、「鋼製レール + PRC 製レール」からなる「複合レール」（図 - 6）をコンセプトとしている。力学的には重ね梁とみなせるこの複合レールは、高剛性であること、適切な質量をもち衝撃輪重も制御可能であること、横座屈に対してもきわめて安全性が高いことなど、優れた特徴を有しており、以下のように2種類の次世代軌道が開発された。

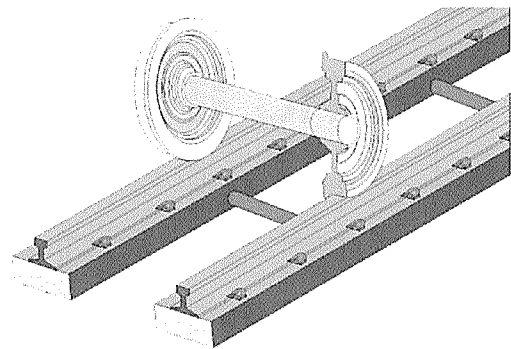


図 - 6 複合レール

#### (1) バラスト・ラダー軌道

バラスト軌道は、レール + マクラギ + 砕石層 + 路盤で構成される。砕石層には「路盤への圧力分散」と「路盤沈下に対する軌道整正」の2つの機能がある。バラスト軌道は、建設費が低廉でもあるため、土路盤上では今後とも不可欠の軌道といえる。PC 横マクラギを用いた従来のバラスト軌道では、軌道が狂いやすいために頻繁な保守を必要とすること、ロングレール軸圧縮力や地震動の作用により軌道が横座屈するおそれもあることなど、困難な課題を抱えている。縦マクラギを用いたバラスト・ラダー軌道（図 - 7）<sup>3)</sup>では、これらの課題に対して大きな改善を図ることができる。

バラスト・ラダー軌道の性能（構造的耐久性、保守省力化効果）を把握するため、米国コロラド州・プエブロ実験線において試験用貨物列車による静的輪重 175 kN（JR 線の2倍強）のもとで4年間に及ぶ促進耐久性試験を行った。

ラダーマクラギ上にレール継目を設け、過酷な衝撃輪重によりマクラギに曲げ引張応力が繰り返し作用する状況下でも、目視できるひび割れには発展しなかった。それゆえ、ラダーマクラギに採用した PRC 構造とひび割れ制御設計は妥当と判断された。

保守省力化効果（図 - 8）については、PC 横マクラギ軌道は累積1億5千万トンの通過トン数までに計5回の軌道整正を行わざるを得なかったのに対して、ラダー軌道はまったく整正を必要としなかった。

このような実証試験を経て、バラスト・ラダー軌道は PC

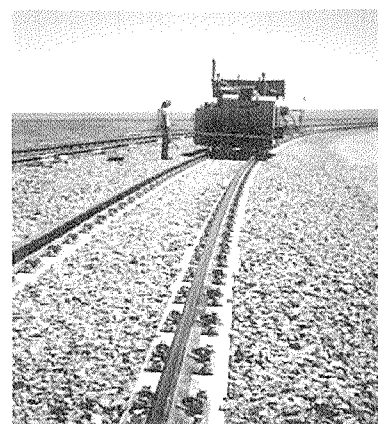


図 - 7 バラスト・ラダー軌道（米国プエブロ実験線）

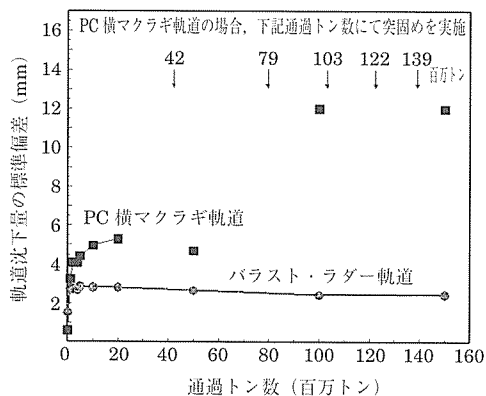


図 - 8 累積通過トン数に対する高低狂いの比較

横マクラギ軌道の保守困難箇所（橋梁と盛土との境界部，急曲線部，踏切，トンネル部など）から営業線に導入が図られつつある。

(2) フローティング・ラダー軌道

高架橋上やトンネル内などのコンクリート路盤上では、「路盤への圧力分散」と「路盤沈下に対する軌道修正」への要求が大幅に軽減されるため，バラスト軌道はもはや必要とされない。それに代わり，保守がきわめて少なく済むバラストレス直結軌道が主流となってきている。しかし，従来の直結軌道には，振動・騒音が大きいこと，建設費が高いこと，などの課題があった。

フローティング・ラダー軌道（図 - 9, 10）<sup>5, 6)</sup> は，複合レールを低剛性バネで等間隔支持してコンクリート路盤から浮かせた構造であり，軽量級マス・スプリング・システムをコンセプトとしている。車両と軌道を一体の機械系と見た場合，バネ下部分（輪軸など）を支えるもう一段のサスペンションが導入されたシステムと捉えることもできる。このようなメカニズムにより衝撃輪重と路盤負荷の双方を軽減し，メンテレス・サイレント・システムを実現することがフローティング・ラダー軌道の狙いである。

フローティング・ラダー軌道とPC横マクラギ直結軌道（図 - 9 敷設事例）について，列車走行時の高架橋コンクリート路盤の鉛直方向加速度を比較した（図 - 11）。フローティング・ラダー軌道にすることにより約 20 dB もの低減効果が得られるため，鉄道高架橋・橋梁の悩みの種である

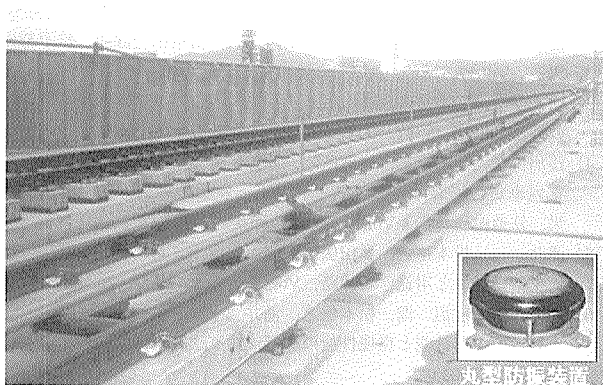


図 - 9 フローティング・ラダー軌道（防振装置式）

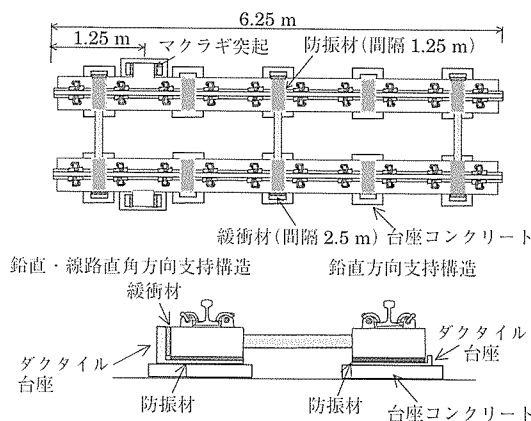


図 - 10 フローティング・ラダー軌道（防振材式）

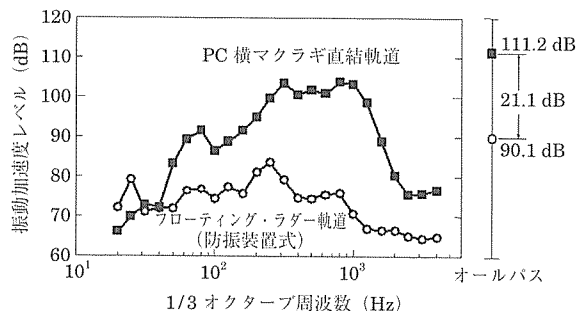


図 - 11 高架橋路盤加速度の比較

構造物音を解消できる。実際に，測定に供したビーム・スラブ式ラーメン高架橋下では構造物音を感知できなかった。また，すでに鋼橋上にも導入され，構造物騒音がまったく感じられないサイレント鋼橋を実現している。

4. ラダー高架システム

連続立体交差化と踏切除去は都市再生の要であり，建設費削減と工期短縮が図れ，環境性能と景観に優れた新形式高架橋を実現することには，大きな社会的ニーズがある。フローティング・ラダー軌道の軽量性と防振性を活かすことにより，以下のように新時代に相応しいラダー高架システムを実現できる。

ここで，ラダー高架システムとは，以下の3点を共通のコンセプトとしている。

- 1) フローティング・ラダー軌道の採用により列車騒音・

振動問題を大幅に軽減できることを前提にして、構造合理性を追及する。

- 2) 構造合理性の追及としては、従来の重量級ビーム・スラブ形式に代え、軽量・高剛性の軌道支持梁を採用して、長スパン化を図る。
- 3) 残留沈下がきわめて少ない信頼性の高い杭の採用、ならびに長スパン化に伴うフレキシブル構造の採用により、地中梁を必要としない構造とする。

なお、建設費縮減は10～20%、工期短縮は20～30%を目標としている。

#### (1) RC 軌道支持梁ラーメン高架

RC 軌道支持梁ラーメン高架(図-12)は、単線並列 RC ホロー梁とコンクリート充填鋼管(以下、CFT)柱からなる上路式ラーメン高架で、橋脚間隔は10～20m、1ブロック長は約80mである。基礎構造は1柱1杭形式であり、杭には無廃土施工および低騒音・低振動施工ができ環境に優しい回転貫入鋼管杭を採用している。CFT柱が収納できる上部拡径杭を用いれば、地面で上部工を構築してリフトアップにより完成させることもでき、活線近接施工に有利な工法となる。

図-12の例では、保守点検通路は上下線間に設けられている。これにより、高架全幅が縮小でき狭隘区間の施工に有利、車両近接防音壁となるため騒音低減に有利、などの利点が生まれる。



図-12 RC 軌道支持梁ラーメン高架

#### (2) PC 軌道支持梁ラーメン高架

PC 軌道支持梁ラーメン高架(図-13)は、複線下路 PC 3主梁と RC 壁式橋脚からなる下路式ラーメン高架で、橋脚間隔は20～30m、1ブロック長は約100mである。基礎構造はフーチング+複数杭であり、線路方向の地震力等は中央橋脚に集中して負担させる。

図-13の例では、保守点検通路は両外側主梁の上フランジ部に設けられている。両外側主梁および中央主梁が車両近接防音壁として機能するため、騒音低減に有利となる。

PC 軌道支持梁ラーメン高架は、下路式ゆえに高架の高さを低くできること、横剛性がきわめて大きい RC 壁式橋脚

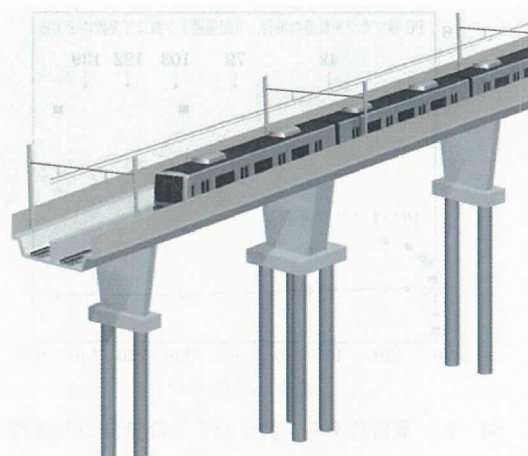


図-13 PC 軌道支持梁ラーメン高架

により地震時の線路直角方向変位を抑制できること、また大規模地震等による万一の脱線に対しても列車防護が期待できることなど、耐震性がとくに優れている。騒音低減に有利な構造でもあることから、在来線用高架のみならず、新幹線の次世代標準高架としても推奨できる。

## 5. まとめ

次世代線路システムとして、ラダーマクラギをコア技術とするラダー軌道とラダー高架の両システムを紹介した。ラダー軌道では横マクラギから縦マクラギへ、またラダー高架ではビーム・スラブ形式から軌道支持梁へのシステムチェンジが図られており、いずれにおいても PRC 構造が基幹技術として用いられている。

構造物騒音を解消できるフローティング・ラダー軌道の採用を前提とすれば、複合・混合構造の上部工や外ケーブル技術の導入などにより、さらなる長スパン化に向けてラダー高架システムの発展が期待され、読者諸賢より具体的なご提案を賜れば幸いです。

## 謝 辞

「ラダー高架システム研究会」(株)大林組、(株)鴻池組、住友金属工業(株)、JFE スチール(株)(敬称略)により2004年2月発足)より資料をご提供いただいたことに、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 涌井 一, 松本信之, 奥田広之, 浅沼 潔: ラダーマクラギの構造と設計, 新線路, Vol.56, No.3, pp.26-28, 2002.3
- 2) 涌井 一: 衝撃輪重に起因する車両/軌道構造系の課題, 鉄道総研報告, Vol.17, No.9, pp.1-8, 2003.9
- 3) 涌井 一, 松本信之, 奥田広之, 浅沼 潔: バラスト・ラダー軌道の性能と用途, 新線路, Vol.56, No.4, pp.32-34, 2002.4
- 4) 浅沼 潔, 松本信之, 奥田広之, 涌井 一: プエプ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, 2002.2
- 5) 涌井 一, 松本信之, 奥田広之, 浅沼 潔: フローティング・ラダー軌道の性能と用途, 新線路, Vol.56, No.5, pp.24-26, 2002.5
- 6) 奥田広之, 浅沼 潔, 松本信之, 涌井 一: フローティング・ラダー軌道の耐荷性能と環境性能の評価, 鉄道総研報告, Vol.17, No.9, pp.9-14, 2003.9

【2004年1月9日受付】