

(9) ラダー型マクラギの開発と新軌道構造の展開

(財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○井上寛美
 同 上 奥田広之
 同 上 正会員 松本信之
 同 上 正会員 涌井 一

1. はじめに

従来のコンクリートマクラギ(横マクラギ)は木マクラギの代替品として生まれたものであり、木マクラギよりも重量および締結力が大きいという点で現代の高速鉄道では代替品を超えた役割を果たしているが、軌道保守省力化等の解決をせまられている課題に対処するには限界がある。

一方、レール方向の梁構造とした縦マクラギ方式は、スリーパーとしての機能(道床圧力低減効果等)が極めて優れており、それが実現できればバラスト道床軌道の保守周期を大幅に延伸できる見通しがあるがゆえに、長年にわたり線路技術者の関心を集めてきた。しかしながら、縦マクラギの設計法が未成熟であったこと、その結果として、軌道部材として受け入れられる程度の妥当な断面諸元のマクラギが提示できなかったこと、さらには左右の縦マクラギの連結方法において構造的欠陥を有するものもあったことから、力学的合理性を有するにもかかわらず、普及することなく今日に至っている状況である^{1)・2)}。

縦マクラギ方式に対する貴重な挑戦の歴史から、それを成立させるための構造設計上の前提条件は次の二つであると考えられる。

- ① 横マクラギに比べて、単位線路延長当たりの重量が大きくなり過ぎないこと。
- ② タイとしての機能(軌間保持機能)を十分に確保すること。

これらの前提条件を満たすものとして、図-1に示すラダー型マクラギを開発した。ラダー型マクラギは、PRC構造の縦梁と鋼管製継材から構成される剛結混合構造であり、コンクリート打設により「はしご」状のものに一体化したプレキャスト工場製品である。ラダー型マクラギの単位長さは、5mを最短として2.5mピッチで選択できる。最長は無理なく運べる長さとして12.5mとした。

ここでは、ラダー型マクラギの構造設計上の要点、縦梁曲げモーメントの評価とそれに対する限界状態の検討、バラスト道床圧力の解析、およびラダー型マクラギを用いた新軌道構造の展開について報告する。

2. ラダー型マクラギの構造設計上の要点

- ① スリーパーの機能を担う縦梁には、横マクラギの研究で得られたプレテンション式の優れたひび割れ制御性能に関する知見³⁾に基づき、それを更に積極的に活かした補強方式としてプレテンション式PRC構造を採用した。

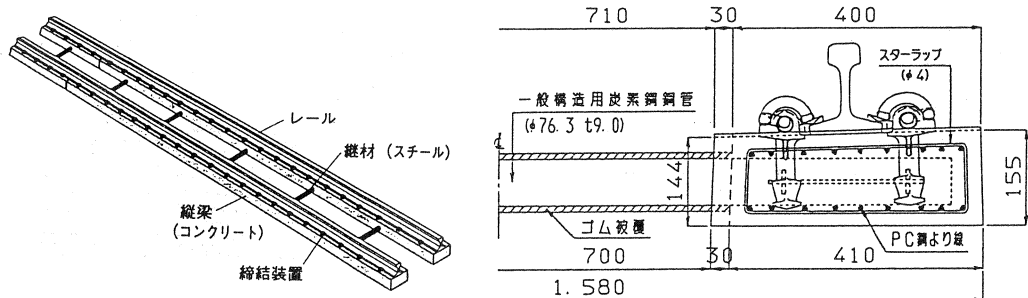


図-1 ラダー型マクラギの構造と断面諸元

- ② 具体的には、図-1に示したように、新開発の異形PC鋼より線（ $\phi 4.22\text{mm} \times 3$ 本より線、または外径9mm 5本より線）を縦梁の上・下縁部に適切な間隔で配置してひび割れ制御を行った。したがって、通常のPRC構造のように異形鉄筋を別に配置するのではなく、異形PC鋼より線をプレテンション式で用いることによって、鉄筋の機能を併せもたせた補強設計の考え方をしている。 $\phi 4.22\text{mm} \times 3$ 本より線の荷重-伸び曲線を図-2に示す。従来の $\phi 2.9\text{mm} \times 3$ 本より線と比較して、その約2倍の引張荷重を許容する。
- ③ 縦梁にPRC構造を採用し、かつ次章に記す限界状態設計法に基づく検討を行った結果、絶対最小断面（梁高：レール締結装置の埋込栓の長さとその被りから決定、梁幅：左右一对のレール締結装置の設置幅とその被りから決定）かつ、支持条件としては最も不利な状態を想定せねばならないバラスト道床上の条件のもとで、所要の耐荷性能を確保することができた。
- ④ 棒部材から構成される力学的に明快で一切のムダがない「はしご」状のマクラギとし、かつ重量のほとんどを占める縦梁を絶対最小断面のものとする事により、単位線路延長当たり重量を横マクラギと同等（在来線：約3kN/単線m）とすることができた。
- ⑤ タイの機能を担う継材には、軌間保持のために必要とされる適度な剛性を有する比較的小径の厚肉鋼管（ $\phi:76.3\text{mm}$, $t:9\text{mm}$, STK540）を2.5m間隔（レール締結間隔の4倍、新幹線車両の軸距に相当）で配置した。図-3に示すように、この鋼管製継材を縦梁の主補強鋼材である異形PC鋼より線の間に挿入し、コンクリート打設により縦梁と強固に一体化して、剛結混合構造からなる「はしご」状のマクラギとすることにより、タイの機能を十分に確保することができた。

このように、絶対最小断面の縦梁と鋼管製継材との剛結混合構造としたラダー型マクラギにより、縦マクラギ方式の特長であるスリーパー機能および横抵抗特性の大幅強化を図りつつ、かつ課題とされてきた軽量化およびタイ機能確保の条件も満足させることができた。

3. 縦梁曲げモーメントの評価とそれに対する限界状態の検討

図-4に示すCASE 1～5の解析条件について、縦梁曲げモーメントの評価とそれに対する限界状態の検討を行った。

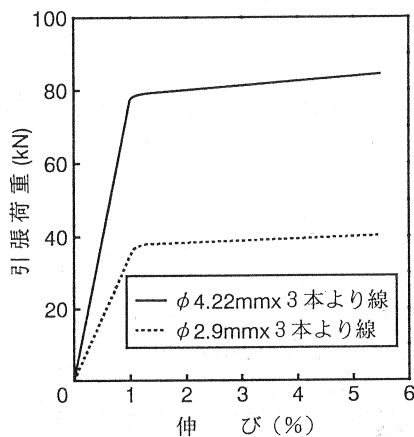


図-2 PC鋼より線の荷重-伸び曲線

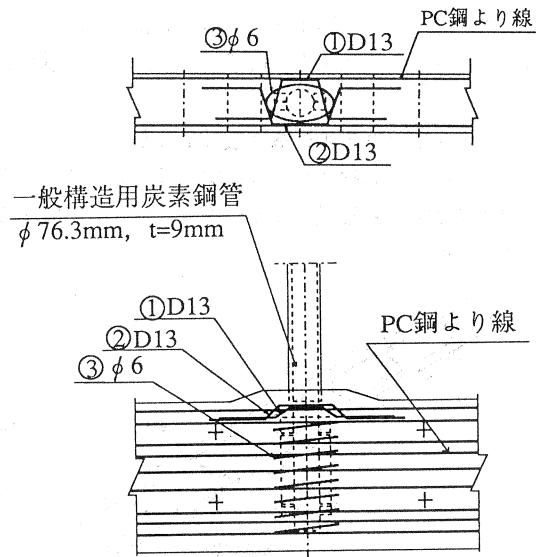


図-3 継材埋込み部の補強筋の配置

(1) 連続一様支持された場合の縦梁曲げモーメントの静的解析

ラダー型マクラギ(L12.5mタイプ, 平均梁幅: 40.5cm, 平均梁高: 15cm)とレール(60kg)とが締結装置部の軌道パッド(厚さ10mm)を介して結合した二重梁モデルを用いて, 縦梁がバラスト道床上に連続一様支持された場合の縦梁曲げモーメントについて解析した。軌道パッドのバネ係数は60MN/mとした。縦梁下面支持バネ係数は, 縦梁曲げモーメントを安全側に大きく評価するために, やや小さ目の想定値として3kN/cm/cm(道床バラストの変形係数 $E=100\text{MN/m}^2$, 路盤の単位面積当たり支持バネ係数 $k_0=30\text{MN/m}^2$ より推定)に設定した。車両は205系電車とし, 解析上の輪重は, 従来のコンクリートマクラギの設計輪重に合わせて160kN(静的輪重80kN×動的輪重係数2.0)に設定した。

このラダー軌道に連結器を挟む2台車分が载荷した場合の, 縦梁曲げモーメントの線路方向分布を図-5に示す。正の最大曲げモーメントは車輪直下に作用する。2台車の中間位置(連結器位置)には, 正と同レベルの負の曲げモーメントが作用する。

(2) 間欠支持された場合の縦梁曲げモーメントの静的解析

バラスト道床上では, 縦梁が間欠支持状態となることが予想される。そこで, かなり極端な設定として, 図-4に示したように両縦梁に対称に180cm(締結間隔の3倍に相当)または360cm(締結間隔の6倍に相当)の完全な不支持区間を設けて, 間欠支持が縦梁曲げモーメントに及ぼす影響について検討した。

(1)の解析モデルを間欠支持状態に変えて, 205系電車の荷重列(輪重:160kN時)がラダー軌道上を移動する場合の解析を行い, 正・負曲げモーメントの各最大値の線路方向分布をプロットすると, 図-6に示すとおりである。連続一様支持の場合を基準にして縦梁曲げモーメントを評価すると, 不支持区間180cmの場合には正が約3倍, 負が約2.5倍, 不支持区間360cmの場合には正・負とも約5倍となることが明らかにされた。したがって, 縦梁曲げモーメントの設計値を支配する要因は, 不支持区間長であると言える。

(3) 縦梁曲げモーメントに対する限界状態の検討

図-4に示したCASE1~5の解析条件に対して, 縦梁曲げモーメントの評価を行った結果を図-7に一括して示す。保守時および運搬時の縦梁曲げモーメントは,

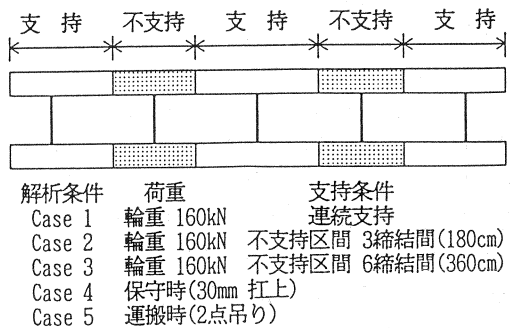


図-4 縦梁の解析条件

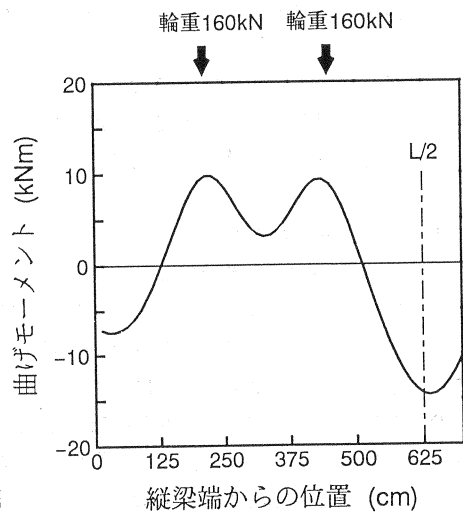


図-5 連続一様支持された場合縦梁曲げモーメント

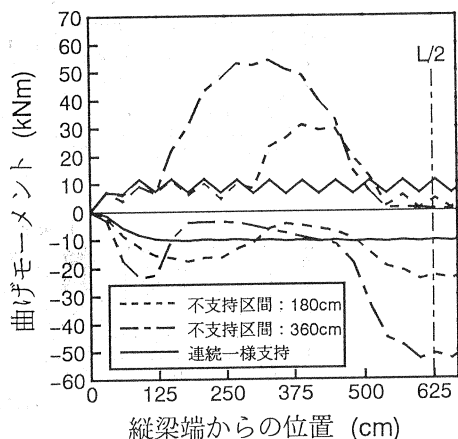


図-6 間欠支持された場合の縦梁曲げモーメント

不支持区間長 180cmのそれよりも小さい。

使用限界状態に関しては、CASE 2（輪重160kN、不支持区間長 180cm）の縦梁曲げモーメントの値を目標にして、ひび割れ発生の設計抵抗曲げモーメントを設定した。この程度に設定すれば、付着特性に優れた異形PC鋼より線を用いたプレテンション式PRC構造のひび割れ制御性能により、車輪フラット等によってさらに大きな負荷が作用することがあっても、十分な耐久性を確保できるものと判断した。

また、終局限界状態としては、CASE 3（輪重 160kN、不支持区間長 360cm）の縦梁曲げモーメントの値以上を満足するように設定した。実際の軌道において不支持区間長が 360cmにも達することは考えにくく、また仮にあったとしても縦梁のたわみにより支持状態は回復される。したがって、路盤陥没でもない限り縦梁が終局限界状態に至ることはない判断している。

以上の検討を踏まえて断面設計を行った結果として、図-1に示した異形PC鋼より線の配置を決定した。設計上のひび割れ発生モーメントは±26kNm、終局曲げ耐力は±72kNmであり、上記の設計目標をほぼ満足することができた。なお、耐荷性能試験の結果については、紙面の都合上、別途に報告する。

4. バラスト道床圧力の解析

道床バラストを平面応力要素でモデル化し、ラダー型マクラギ（L12.5mタイプ、平均梁幅:40.5 cm、平均梁高:15cm）と横マクラギ（3号PC）について、205系電車の輪重80kN時のバラスト道床圧力分布を比較した。道床圧力を大きく評価する安全側の設定として、道床バラストの変形係数Eは300MN/m²、路盤の単位面積当たり支持バネ係数k。は70MN/m²とした。道床支持状態は、ラダー型マクラギに対しては一様支持状態、横マクラギに対しては中すかし状態とした。

図-8に示した解析結果より、ラダー型マクラギの最大バラスト道床圧力は横マクラギの約1/2に低減されること、および圧力勾配が極めて緩やかになることから、バラストの磨滅や線路方向側方流動に伴う軌道保守を大幅に減らすことができる見通しが得られた。この省力化効果を保守周期等の指標により定量的に明らかにすることが、バラスト道床上のラダー軌道の普及にとって今後の最大の課題である。

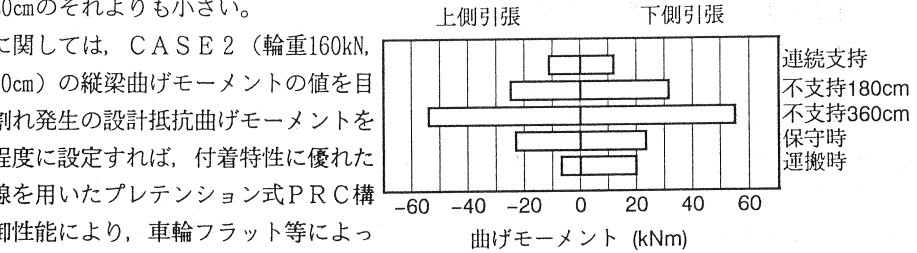


図-7 縦梁の作用曲げモーメント

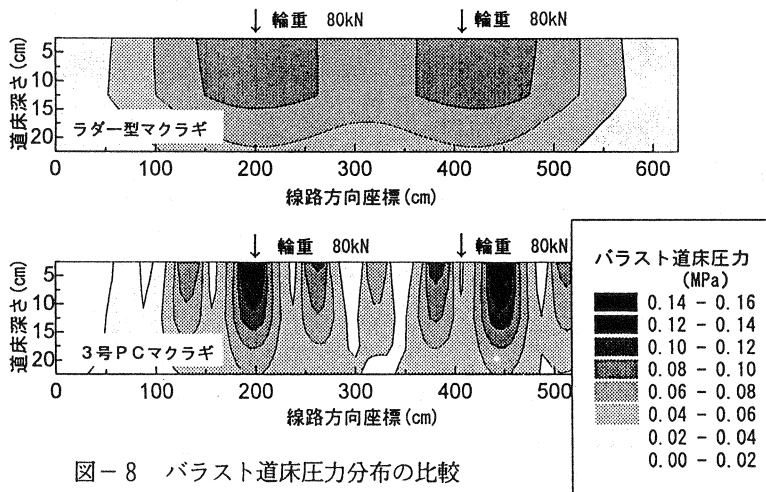


図-8 バラスト道床圧力分布の比較

5. ラダー型マクラギを用いた新軌道構造の展開

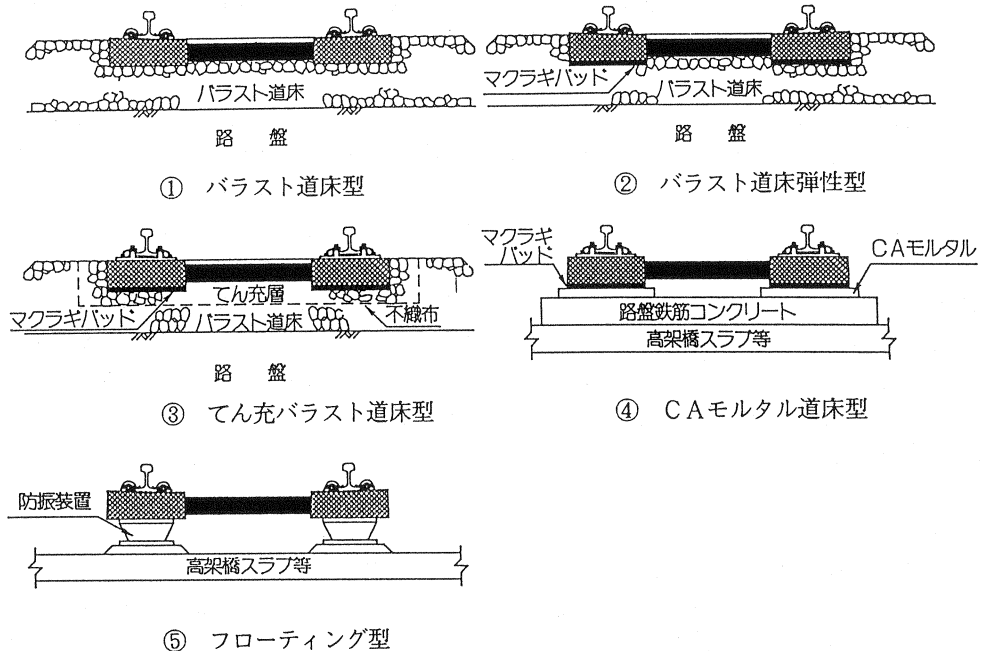
ラダー型マクラギは、横マクラギ(モノブロック型PC, ツーブロック型RC)と対比すると、スリーパーの機能を大幅に強化するために線路方向にモノブロック化を図り、ツーブロック型におけるスチール製継材の合理的発想を採り入れてタイの機能を確保したものである。一方、スラブ版(A型, 枠型)と対比すると、A型で出発したスラブ版が経済化等のニーズから枠型に進みつつある流れを、究極まで押し進めたものである。ただし、枠型スラブ版はあくまで面部材であり、棒部材で構成したラダー型マクラギとは部材構造が基本的に異なる。ラダー型を「マクラギ」と称したのは、このためである。

このように、ラダー型マクラギは横マクラギおよびスラブ版の代替として汎用的に用いられる次世代レール支承体であり、その用法として考えられる5タイプの軌道を表-1および図-9に示す。

① バラスト道床型 ラダー型マクラギは、最も厳しい道床支持条件であるバラスト道床上に敷設して、「従来の横マクラギとの交換により、メンテナンスフリーに近いバラスト道床軌道に更新する」ことを最大の目標として開発したものであり、バラスト道床型がその用法として基本的な軌道構造となる。マルチプルタイタンパーによるインテリジェントな保守方式が成立するならば、既設線・新設線を問わず、バラスト道床型は最適な軌道構造の一つとなりうる。

表-1 新軌道構造の構成

| タイプ | 締結装置 | マクラギパッド | 道床 | 調整部位 | レール連続支持 |
|------------|-----------|---------|---------|------|---------|
| バラスト道床型 | バンドル方式等 | 無 | バラスト | バラスト | 可 |
| バラスト道床弾性型 | バンドル方式等 | 有 | バラスト | バラスト | 可 |
| てん充バラスト道床型 | タイプレート方式等 | 有 | てん充バラスト | 締結装置 | 困難 |
| CAモルタル道床型 | タイプレート方式等 | 有 | CAモルタル | 締結装置 | 困難 |
| フローティング型 | バンドル方式等 | 無 | 無 | 防振装置 | 可 |



- ② バラスト道床弾性型 バラスト道床弾性型は、縦梁下面にゴム製マクラギパッドを貼付したタイプである。マクラギを中間質量として振動させることにより、バラストの振動の抑制を図ったものであり、バラスト道床型よりもさらに省力化効果を向上できるものと期待される。
- ③ てん充バラスト道床型 てん充バラスト道床型は、バラスト道床弾性型をベースとし、バラスト部にCAモルタル(セメントアスファルトモルタル)等を注入して、バラストを強化するとともに路盤への雨水の浸透を防いだタイプである。
- ④ CAモルタル道床型 CAモルタル道床型は、スラブ軌道の代替として、新設線で用いられうるタイプである。従来のスラブ軌道よりも、経済性および対環境性(騒音・振動)において有利となる。
- ⑤ フローティング型 フローティング型はメカニカルな防振装置によりラダー型マクラギの縦梁を間欠的に支持するタイプである。これこそが本当の無道床・直結型の次世代軌道であり、完全に機械的なシステムとなるがゆえに、経済性および対環境性(騒音・振動)を合理的に追求することができる。また、路盤コンクリートと道床を撤廃でき、かつ軌框自身も横マクラギ軌框と同等の超軽量であるため、高架橋の経済化と耐震性の向上も併せて図ることができる。

なお本報告では、最も厳しい道床支持条件であるバラスト道床型について構造設計の経過を記したが、ラダー軌道のタイプにより縦梁および継材の設計は異なってくる。しかし、設計法およびそのコンセプトは既に確立されており、タイプに応じた展開は容易であると言える。

6. まとめ

- ① 縦マクラギ方式・超軽量のラダー型マクラギを開発した。構造的ポイントとしては、主補強鋼材として異形PC鋼線のみを用いたプレテンション式PRC構造かつ絶対最小断面の縦梁、鋼管製継材と縦梁との剛結混合構造などであり、本報告ではバラスト道床型とした場合の、縦梁の限界状態設計法およびバラスト道床圧力の低減効果を明らかにした。
- ② ラダー型マクラギは、従来の横マクラギおよびスラブ版の歴史的経緯を踏まえ、かつそれらの機能・性能を包含した次世代レール支承体であり、各種道床から無道床までの5タイプの用途を示した。

ラダー軌道は、鋼製レールとコンクリート製レールが重ね梁となった防振複合レールと見なすことができる。この防振複合レールと弾性車輪(鋼製車輪踏面の内側にゴムを挿入した鉄車輪)との組合せなどの方策により、ゴムタイヤ系により近いマイルドな荷重環境を実現することが鉄車輪/レール系システムの大きな課題である。このような保守・環境の両面からの鉄車輪～軌道構造系の最適化に向けて、ラダー型マクラギがその重要な一翼を担う可能性が見いだされたことは、プレストレストコンクリート技術にとっても極めて意義深いことであり、近い将来の実用化に備えて関係各位のさらなるご指導を切にお願いする次第である。

なお、ラダー型マクラギの開発全般に関しては日本鋼弦コンクリート(株)に、異形PC鋼線に関しては鈴木金属工業(株)および東京製網(株)に、継材用鋼管に関しては住友金属工業(株)に、防振材料に関しては横浜ゴム(株)に、バラストてん充材に関しては東亜道路(株)に、ご指導・ご協力を賜りました。末筆ではありますが、各社の関係者に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤 裕：新軌道構造開発の展望，鉄道線路，第15巻，第5号，1967年5月。
- 2) 渡辺偕年：縦型，枠型まぐら木軌道の試験敷設，鉄道線路，第7巻，第8号，1959年8月。
- 3) 奥田広之，涌井 一：衝撃輪重に対するコンクリートマクラギの耐荷性能，土木学会第50回年次学術講演会概要集IV部門，1995年9月。