

ラダーマクラギの開発と新軌道構造の展開

涌井 一*1・松本 信之*2・井上 寛美*3・中條 友義*4

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る。重量および締結力が大きい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要す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ために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

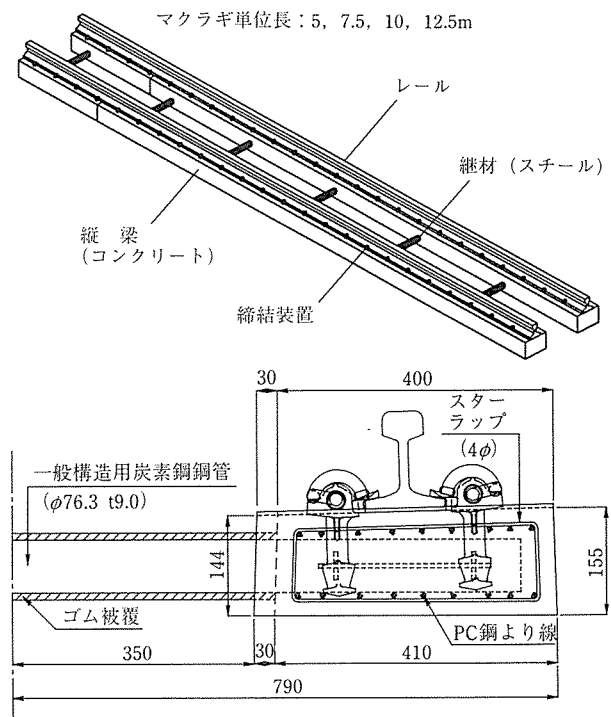


図-1 ラダーマクラギの構造と断面諸元

ラダーマクラギを開発した。ラダーマクラギは、PRC構造の縦梁と鋼管製継材から構成される混合剛結構造であり、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。ラダーマクラギ



*1 Hajime WAKUI
(財)鉄道総合技術研究所
構造システム
主幹技師



*2 Nobuyuki MATSUMOTO
(財)鉄道総合技術研究所
構造システム
主任技師



*3 Hiromi INOUE
(財)鉄道総合技術研究所
構造システム
主任技師



*4 Tomoyoshi NAKAJO
日本鋼弦コンクリート
常務取締役 技術部長

の単位長さは、5 m を最短として 2.5 m ピッチで選択でき、最長は無理なく運べる長さとして 12.5 m とした。

ここでは、ラダー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. ラダーマクラギの構造設計上の要点

- ① スリーパー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、それをさら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。
- 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 9 mm 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、鉄筋の機能を併せもたせた補強設計法としている。 $\phi 4.22 \text{ mm} \times 3$ 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、3. に記す限界状態設計法に基づく検討を行った結果、締結装置の設置に必要な最小断面を用い、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 3 kN/単線 m) とすることができた。
- ⑤ タイ機能を担う継材には、軌間保持のために必要

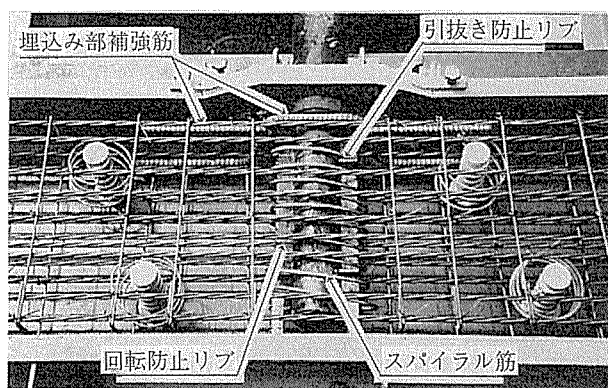


写真-1 継材埋込み部の補強筋の配置

な剛性を有する小径厚肉鋼管 ($\phi: 76.3 \text{ mm}$, $t: 9 \text{ mm}$, STK 540) を 2.5 m 間隔 (レール締結間隔の 4 倍) で配置した。写真-1 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、混合剛構造の「はしご」状のマクラギとすることにより、タイ機能を十分に確保することができた。

このように、最小断面の縦梁と鋼管製継材との混合剛構造としたラダーマクラギにより、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限界状態の検討

図-3 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。

3.1 連続一様支持時の縦梁曲げモーメントの静的解析

ラダーマクラギ (L 12.5 m タイプ) とレール (60 kg) とが締結装置部の軌道パッド (厚さ 10 mm) を介して結合した二重梁モデルを用い、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 60 MN/m と

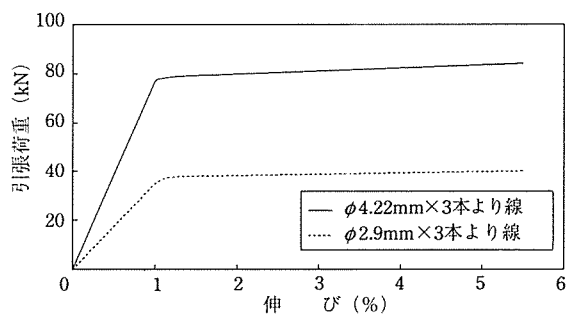


図-2 PC 鋼より線の荷重-伸び曲線

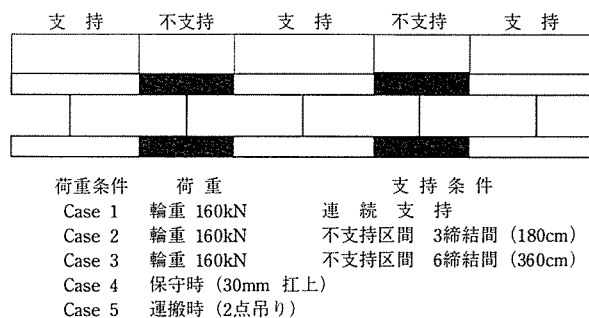


図-3 縦梁の解析条件

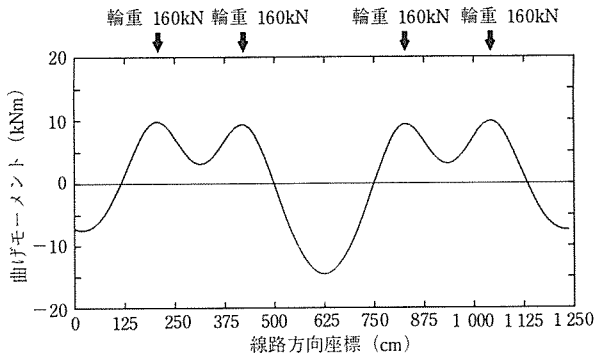


図-4 連続一様支持時の縦梁曲げモーメント

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ように、やや小さ目の想定値として 3 kN/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 $k_0=30 \text{ MN/m}^3$ より推定) に設定した⁴⁾。車両は、205系電車とし、解析上の輪重は、従来の横マクラギの設計輪重に合わせて 160 kN (静的輪重 $80 \text{ kN} \times$ 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台車分が載荷した場合の、縦梁曲げモーメントの線路方向分布を図-4に示す。正の最大曲げモーメントは車輪直下に作用し、同レベルの負の曲げモーメントは2台車の中間位置(連結器位置)に作用する。

3.2 間欠支持時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、かなり極端な設定として、図-3に示したように両縦梁に対称に 180 cm (締結間隔の3倍相当) または 360 cm (締結間隔の6倍相当) 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を検討した。

3.1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: 160 kN 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-5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 180 cm の場合に

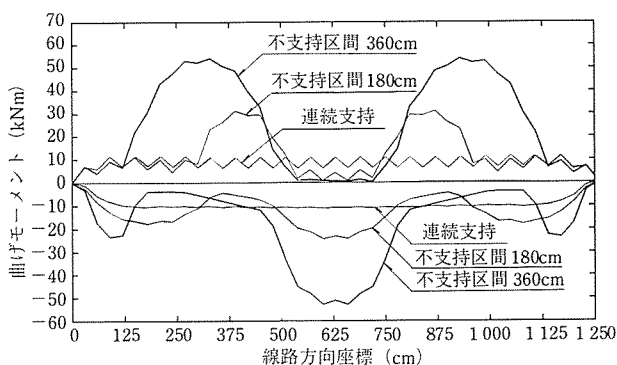


図-5 間欠支持時の縦梁曲げモーメント

は正が約3倍、負が約2.5倍、不支持区間 360 cm 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。

3.3 機関車走行時の縦梁曲げモーメントの測定結果

鉄道総研構内のラダーマクラギ試験敷設区間でED77型機関車(最大静的輪重 84 kN)を 30 km で走行させた。縦梁曲げモーメントの測定結果を図-6に示す。図-6の結果は連続一様支持時の解析値に近い値を示しており、試験敷設時のバラスト道床の支持状態は人力で締め固めたにもかかわらず、連続一様支持に近かったものと判断できる。

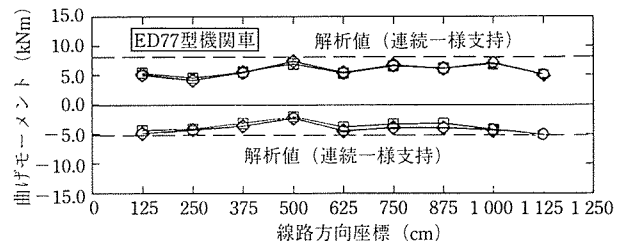


図-6 走行試験時の縦梁曲げモーメント分布

3.4 衝撃輪重に対する縦梁曲げモーメントの動的解析

マクラギには、車輪フラット等により単発的な衝撃輪重が作用する。衝撃点直下の縦梁に作用する曲げモーメントと衝撃輪重の作用時間との関係の解析結果を図-7に示す。図-7より、ラダーマクラギは横マクラギと比較して、静的負荷時に対する衝撃負荷時の曲げモーメント増加率は小さいことと、作用時間の短い衝撃輪重に対して鈍感な反応を示すことが明らかにされた⁵⁾。

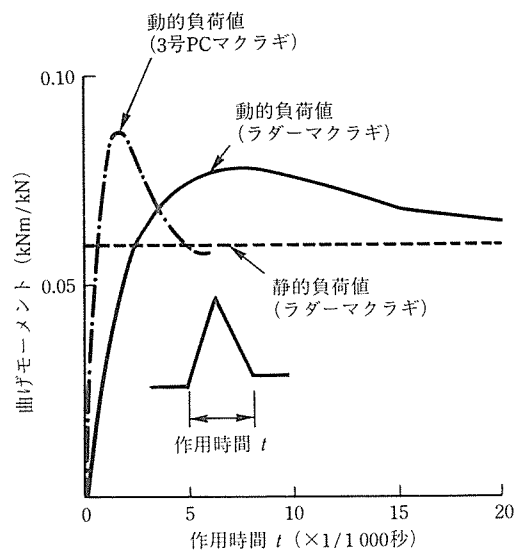


図-7 縦梁曲げモーメントと作用時間との関係

3.5 縦梁曲げモーメントに対する限界状態の検討

図-3 に示した Case 1~5 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-8 に一括して示す。

使用限界状態に関しては、Case 2 (輪重 160 kN, 不支持区間長 180 cm) の縦梁曲げモーメントの値を目標にして、ひび割れ発生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しても、十分な耐久性を確保できるものと判断した。また、終局限界状態は、Case 3 (輪重 160 kN, 不支持区間長 360 cm) 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。実軌道において不支持区間長が 360 cm にも達することは考えにくく、ま

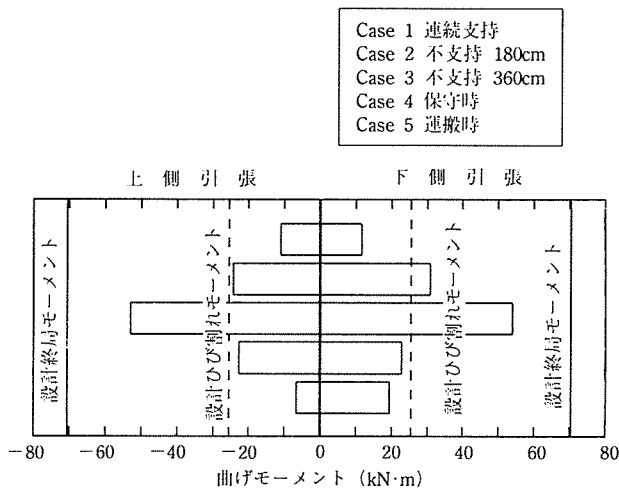


図-8 縦梁の作用曲げモーメント

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 に示す異形 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 ± 26 kNm, 終局曲げ耐力は ± 70 kNm であり、上記の設計目標をほぼ満足させることができた。

なお、衝撃輪重に対する耐荷性能については、紙面の都合上割愛する。

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て解析し、ラダーマクラギ (L 12.5 m タイプ) と横マクラギ (3号 PC) について、205 系電車の輪重 80 kN 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 300 MN/m², 路盤の単位面積当たり支持バネ係数 k_0 は 70 MN/m³ とした。道床支持状態は、ラダー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-9 に示した解析結果⁵⁾より、ラダー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、バラストの摩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確にすることが、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。

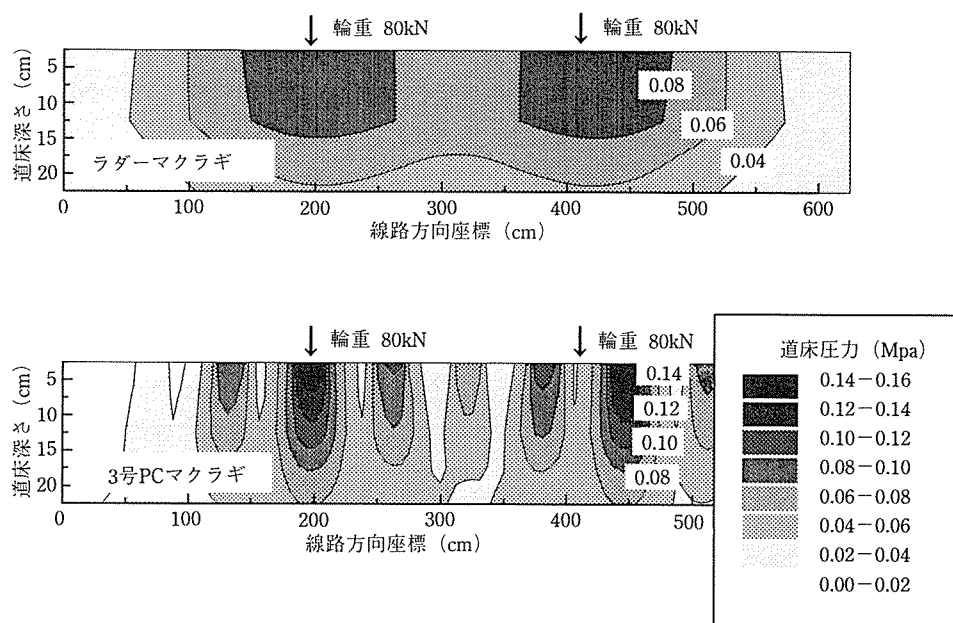


図-9 バラスト道床圧力分布の比較

5. ラダーマクラギを用いた新軌道構造の展開

ラダーマクラギは、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機能を確保したものとすることができる。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とも言える⁶⁾。ただし、枠型スラブ版はあくまで面部材であり、枠部材で構成し、かつ混合構造としたラダーマクラギとは部材の構造・構成が基本的に異なる。ラダー型を「マクラギ」と称したのは、枠部材である縦マクラギをメインに考えたからである。

ラダーマクラギは横マクラギやスラブ版の代替として汎用的に用いられうる次世代レール支承体であり、その用法として5タイプの軌道を表-1 および図-10 に示す。

① バラスト道床型

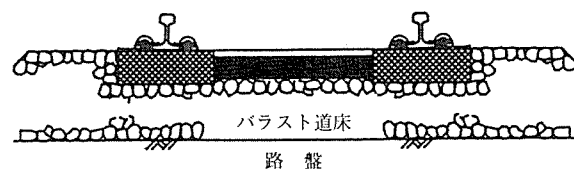
ラダーマクラギは、最も厳しい道床支持条件であるバラスト道床上に敷設して、「従来の横マクラギとの交換により、メンテナンス・ミニマムのバラスト道床軌道に更新する」ことを最大の目標として開発したものであり、バラスト道床型がその用法として基本的な軌道構造となる。マルチプルタイタンパー等によるインテリジェントな保守方式が成立するならば、既設線・新設線を問わず、バラスト道床型は最適な軌道構造の一つとなりうる。

② バラスト道床弾性型

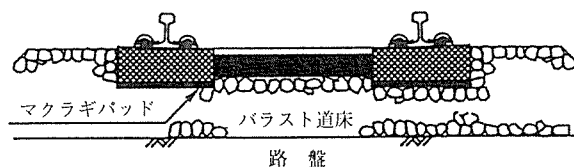
バラスト道床弾性型は、縦梁下面にゴム製マクラギパッドを貼付したタイプである。マクラギを中間質量として振動させることにより、バラストの振動の抑制を図ったものであり、バラスト道床型よりもさらに省力化効果を向上できるものと期待される。

③ てん充バラスト道床型

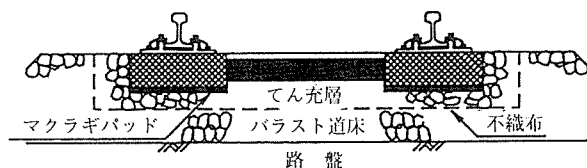
てん充バラスト道床型は、バラスト道床弾性型をベースとし、バラスト部に CA モルタル(セメントアスファルトモルタル)等を注入して、バラストを強化する



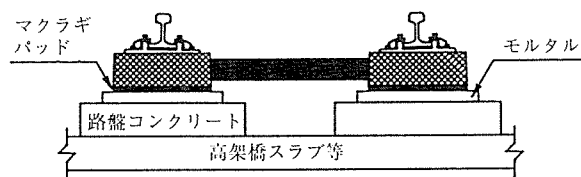
① バラスト道床型



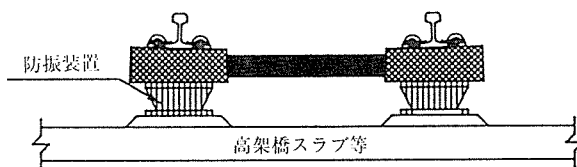
② バラスト道床弾性型



③ てん充バラスト道床型



④ モルタル道床型



⑤ フローティング型

図-10 新軌道構造の構造断面

とともに路盤への雨水の浸透を防いだタイプである。

④ モルタル道床型

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

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	レールの連続支持
バラスト道床型	バンドロール方式等	無	バラスト	バラスト	可
バラスト道床弾性型	バンドロール方式等	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
モルタル道床型	タイプレート方式等	有	CAモルタル等	締結装置	困難
フローティング型	バンドロール方式等	無	無	防振装置	可

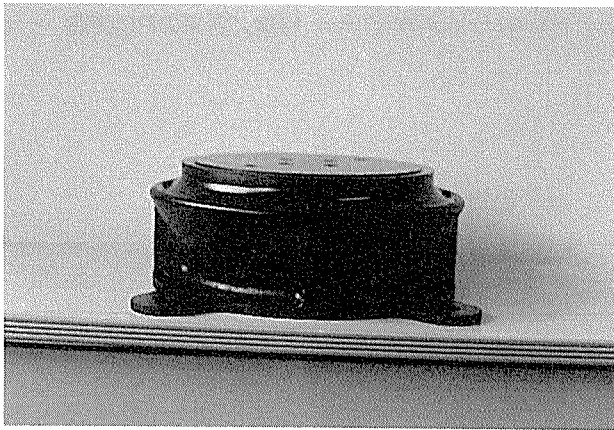


写真-2 フローティング型

となる。

⑤ フローティング型

フローティング型は、写真-2に示すようなメカニカルな防振装置によりラダー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）を合理的に追求可能である。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の構造設計の経過を記したが、設計法およびそのコンセプトは既に確立されており、軌道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・超軽量のラダーマクラギを開発した。構造的ポイントは、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構造かつ最小断面の縦梁、鋼管製継材と縦梁との混合剛結構造などであり、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⁷⁾。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。

参 考 文 献

- 1) 佐藤 裕：新軌道構造開発の展望，鉄道線路，Vol. 15，No. 5，1967. 5
- 2) 渡辺啓年：縦型，枠型まくら木軌道の試験敷設，鉄道線路，Vol. 7，No. 8，1959. 8
- 3) 涌井 一，奥田広之，井上寛美：衝撃輪重に対するPCマクラギの限界状態設計法，鉄道総研報告，Vol. 10，No. 9，1996. 9
- 4) 奥田広之，森山智明，涌井 一：衝撃輪重に対するラダーマクラギの動的負荷特性と耐荷性能評価，鉄道総研報告，Vol. 10，No. 9，1996. 9
- 5) 大屋戸理明，井上寛美，曾我部正道，松本信之，小山弘男，高木言芳：バラスト道床型ラダー軌道の沈下特性と道床圧力解析，鉄道総研報告，Vol. 10，No. 9，1996. 9
- 6) 涌井 一，鳥取誠一，松本信之，井上寛美，奥田広之，曾我部正道，大屋戸理明，森山智明：コンクリートマクラギ新時代—横マクラギ，そしてラダー型へ—，RRR，1995. 12
- 7) 涌井 一：ラダーマクラギによる線路構造システムの革新と課題，鉄道総研報告，Vol. 10，No. 9，1996. 9

【1996年10月7日受付】