

(10) ラダー型マクラギの試作と耐荷性能試験

日本鋼弦コンクリート(株) 正会員 〇東山博明  
 助鉄道総合技術研究所 正会員 井上寛美  
 助鉄道総合技術研究所 大屋戸理明  
 日本鋼弦コンクリート(株) 正会員 中條友義

1. はじめに

ラダー型マクラギは、スリーパーの機能を担うP R C構造の縦梁と、タイの機能を担う太径厚肉鋼管との剛結混合構造である。限界状態設計法の観点から耐荷性能を明らかにするため、P R C構造の縦梁、そして縦梁と太径厚肉鋼管との埋込み部に着目して、種々の確認試験を行った。また、バラスト道床上でラダー型マクラギ軌道の、横抵抗特性および縦抵抗特性を明らかにした。更に、ラダー型マクラギを試験敷設して軌道を構成し、縦梁曲げモーメントに関する解析と、車両を走行させて作用断面力、変位・変形等を測定し、解析結果の比較を行ったので、これらの結果をあわせて報告するものである。

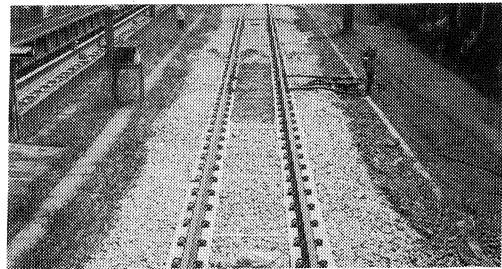


写真-1 ラダー型マクラギ

2. ラダー型マクラギの試作

ラダー型マクラギの構造を図-1に示す。ラダー型マクラギの試作には、縦梁にひび割れ抵抗性、靱性および終局耐力の全ての面で設計荷重を満たすよう、P C鋼材には新開発した異形P C鋼より線SWPD3(φ4.22mm, 3本より線)、およびSWPD5(5本より線)を上下2段に配置した。異形P C鋼より線を使用することにより、異形鉄筋を配置することなくP R C構造とし、スターラップを12.5cmピッチで配筋して、ねじり、およびせん断耐力を上げた。タイ機能を担う太径厚肉鋼管においては図-2に示す様に、鋼管径を76.3mmとし電車走行を想定した解析を行った。この結果、降伏耐力と曲げモーメントの関係から鋼管厚9mmを採用した。また走行試験において確認をした。太径厚肉鋼管は2.5mピッチで配置した。ラダー型マクラギの両端部には端部補強を施し連結用インサートを配置した。

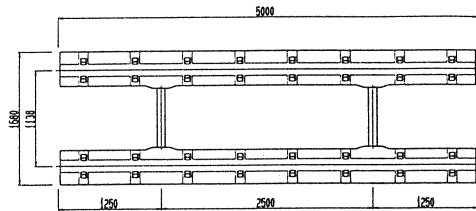


図-1 ラダー型マクラギ一般図

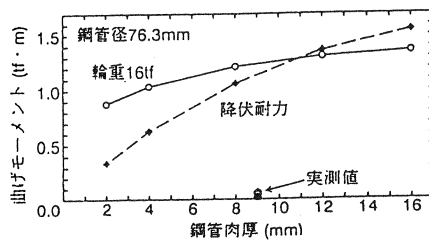


図-2 降伏耐力と鋼管肉厚の関係

試作用ラダー型マクラギの縦梁には、太径厚肉鋼管には、耐荷性能向上および内面からの腐食防護のために無収縮モルタルを充填し、更に外側には、防錆効果と保護の為にゴム被覆した。太径厚肉鋼管埋込部を写真-2に示す。太径厚肉鋼管を押し抜きせん断に抵抗するよう、上下から補強筋を配置した。また、回転止めと引き抜き防止用のリブを設け、プレストレスの乱れに対する補強としてスパイラルを設置した。コンクリートの件は表-1に示す。コンクリートの設計基準強度は500kgf/cm<sup>2</sup>、P C鋼より線の緊張管理は従来通りとし、その導入力は66.1kN/本である。型枠については、レール締結用添加物等による応力導入時のひび割れに対処すべく、部分的に型枠を2重構造とした。製作精度については軌道スラブと同精度とし、寸法、形状および平面性については正確を期した。

表-1 コンクリート配合表

骨材最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位セメント量 (kg)
20	8±2.5	1.5±1	35.2	43.0	470

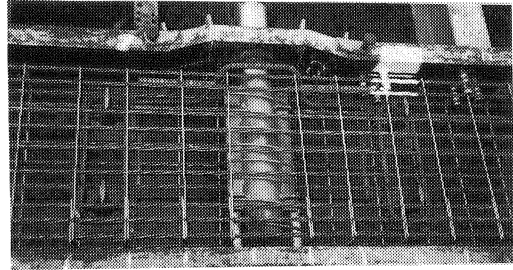


写真-2 太径厚肉鋼管埋込部

3. 全体曲げ試験による曲げ耐力特性の確認

長さ 5m のラダー型マクラギを用い、左右の縦梁に同一の荷重を載荷して全体曲げ試験を行った。試験方法は図-3 に示すように、太径厚肉鋼管、締結用添加物およびケーブル防護用孔等、付属品や断面欠損部が曲げモーメントの等しい区間 (3.365m) に入るよう載荷位置を設定し、構造体としての曲げに対する耐力特性を確認した。縦梁の曲げひび割れ発生モーメントは、設計値  $2.6 \text{ tf}\cdot\text{m}$  ( $26.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) および縦梁単体試験値  $2.8 \text{ tf}\cdot\text{m}$  ( $28.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) に対して、全体曲げ試験値は  $3.0 \text{ tf}\cdot\text{m}$  ( $30.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) であった。最大曲げモーメントは、設計終局曲げ耐力および縦梁単体試験値の  $7.2 \text{ tf}\cdot\text{m}$  ( $73.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) を上回る  $7.9 \text{ tf}\cdot\text{m}$  ( $80.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) まで行った。最大曲げモーメント  $7.9 \text{ tf}\cdot\text{m}$  ( $80.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) の時点では、縦梁中央部のたわみが 76mm にも達する大きな変形が生じた。(写真-3) しかし載荷装置の都合上、試験体の破壊までは到らなかった。最大曲げモーメント時のひび割れは、曲げモーメントの等しい区間に約 10cm の等間隔で良く分散して生じており、そのひび割れ幅は 0.1mm 程度に留まった。また、これらの曲げひび割れは、ラダー型マクラギ断面高さの半分より上には進展しなかった。更に太径厚肉鋼管、締結用添加物およびケーブル防護用孔等付近にひび割れが集中することなく、これらの付属品や断面欠損部が曲げの耐力特性に及ぼす影響は小さいことがわかった。荷重変位曲線を図-4 に、またひび割れの状況を図-5 に示す。なお、このように破壊の直前まで載荷しても、除荷後ひび割れは閉じた状態まで戻り、また縦梁中央部のたわみも残留が 6.1mm 程度まで回復した。このことより、新開発の P C 鋼より線を用いて P R C 構造とした縦梁は、付属品や断面欠損部を含む部材の状態においても、ひび割れ抵抗性、ひび割れ分散性、靱性 (変形能力) および終局耐力の全ての面で、設計条件を満たす耐力特性を有することがわかった。

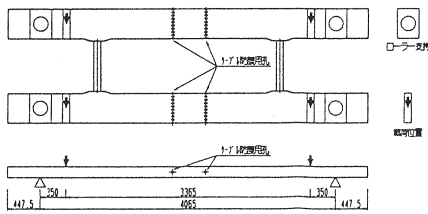


図-3 全体曲げ試験

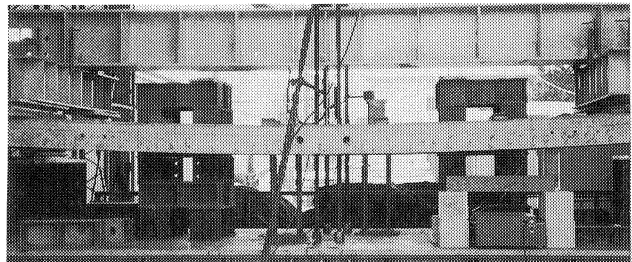


写真-3 全体曲げ試験状況

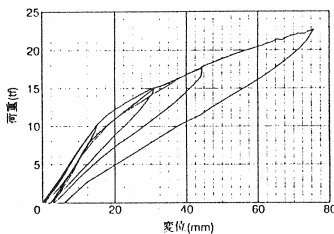


図-4 荷重-変位曲線

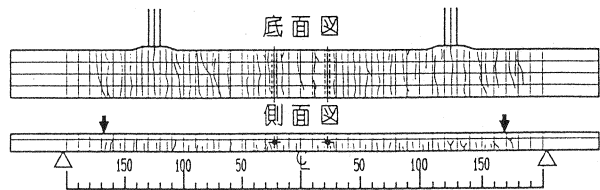


図-5 ひび割れ状況図

#### 4. 左右縦梁たわみ差試験による太径厚肉鋼管埋込部等の耐荷力特性の確認

長さ 7.5m のラダー型マクラギを用い、太径厚肉鋼管埋込部のコンクリートのひび割れ、鋼管埋込部の押し抜きせん断、および太径厚肉鋼管の曲げによって作用するねじりモーメントに対する縦梁の耐荷性能に着目して、左右縦梁たわみ差試験を行った。図-6 に示す荷重方法により、左右の縦梁にたわみ差を生じさせ、試験体中央の太径厚肉鋼管には、逆対称曲げモーメントの状態に近い負荷が加わるようにした。最初のひび割れは、たわみ差 8.7mm において、太径厚肉鋼管埋込部の縦梁断面高さ中央に水平に発生した。ひび割れ幅は 0.04mm 程度の微小なものであった。たわみ差 8.7mm は、軌道の構造解析の結果から類推すると相当大きな値であり、軌道の整備状況が極端に悪くない限り、このひび割れは発生することはないと推定される。また、もしひび割れが発生してもこの程度のひび割れ幅であれば耐久性上は全く問題がないと判断される。たわみ差 20mm において太径厚肉鋼管埋込部の鋼管天端の鋼材ひずみが約  $1900\mu$  となり、降伏点に達したものと考えられる。その後たわみ差 65mm、鋼管天端の鋼材ひずみが約  $3200\mu$  まで荷重したが、太径厚肉鋼管埋込部には新たなひび割れの発生はなく、押し抜きせん断破壊にも至らなかった。一方縦梁には、最大の加力状態では  $4.9\text{tf}\cdot\text{m}$  ( $50.0\text{kN}\cdot\text{m}$ ) の荷重が作用し、かつ太径厚肉鋼管の曲げによってねじりモーメントも作用したが、破壊には至らなかった。縦梁には曲げひび割れを出発点として、斜め方向に進展するねじりひび割れが発生したが、約 12.5cm 間隔で配置したスターラップの効果により曲げねじり破壊を防いだものと考えられる。

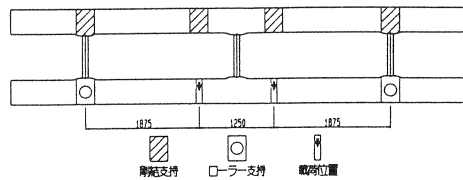


図-6 左右縦梁たわみ差試験

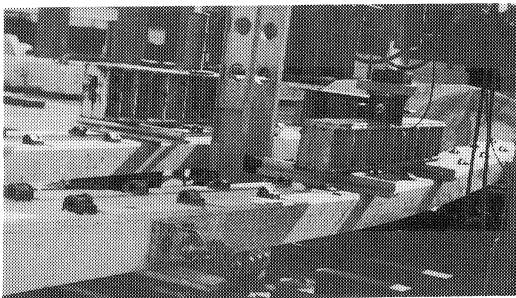


写真-4 左右たわみ差試験状況

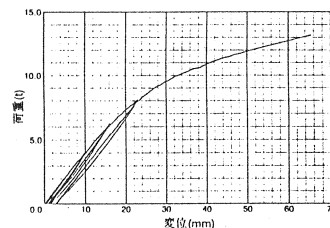


図-7 荷重-変位曲線

#### 5. 横抵抗力特性および縦抵抗力特性の確認

長さ 5m のラダー型マクラギをバラスト道床上に敷設してレールを締結し、横抵抗試験および縦抵抗試験を行った。横抵抗試験は、左右のレールにレール直角方向の水平力を載荷して、道床横抵抗力を測定した。図-8 に荷重-変位曲線を示す。10mm 変位時の横抵抗力は  $5.8\text{tf}$  ( $1160\text{kgf}/\text{m}$ ) であった。横マクラギの横抵抗力は約  $350\text{kgf}/\text{本}$  ( $580\text{kgf}/\text{m}$ ) である。縦抵抗試験は、左右のレールにレール長手方向の水平力を載荷して道床縦抵抗力を測定した。試験の種類としては縦抵抗力特性向上のため設置する、縦移動防止板の有無の確認のため、ラダー型マクラギ単体 (縦移動防止板無し) の場合と、縦移動防止板 3 枚配置した場合の 2 ケースについて行った。図-9 に荷重-変位曲線を示す。ラダー型マクラギ単体 (縦移動防止板無し) の場合の 10mm 変位時の縦抵抗力は  $3.0\text{tf}$  ( $600\text{kgf}/\text{m}$ ) で、縦移動防止板を 3 枚配置した場合の 10mm 変位時の縦抵抗力は  $6.0\text{tf}$  ( $1200\text{kgf}/\text{m}$ ) であった。横マクラギの縦抵抗力は約  $1.34\text{kgf}/\text{本}$  ( $1150\text{kgf}/\text{m}$ ) である。図-9 に荷重-変位曲線を示す。この結果、ラダー型マクラギの横抵抗特性は横マクラギの 2 倍優れており、縦抵抗特性においても横マクラギと少なくとも同等以上優れていると言える。尚、試験における道床バラストの突き固め状態は必ずしも十分ではなかったことから、実際の安定した軌道では、更に大きい抵抗力が期待できると考えられる。

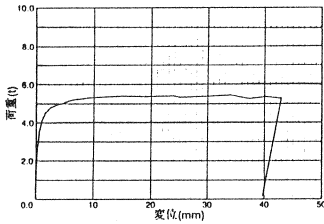


図-8 横抵抗試験 荷重-変位曲線

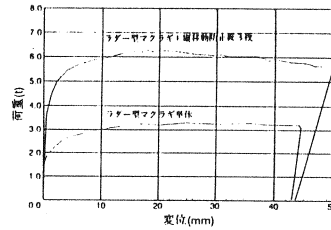


図-9 縦抵抗試験 荷重-変位曲線

6. 縦梁曲げモーメントに関する解析および車両走行試験結果との比較

縦梁曲げモーメントについての解析には、レールと縦梁が締結装置部の軌道パッドを介して重ね梁となるモデルを用いた。車両は 205系電車とし、その輪重は従来の設計輪重と合わせて 16tf(静的輪重 8tf×2)とした。連続均等支持された 12.5mのラダー型マクラギに連結器をはさむ2台車を載荷した場合の縦梁曲げモーメントの分布を図-10に示す。この場合、2台車の中間位置には、正と同レベルの負の曲げモーメントが作用する。荷重分散の良い60kgレール+10mmパッドの場合を基準として荷重分散の劣る 50kgレール+6mmパッドの場合の曲げモーメント値を見ると、正の曲げモーメントは約 1.5倍となるのに対して、負の曲げモーメントは逆にわずかではあるが小さくなる。縦梁下面支持バネ係数の影響について解析した結果では、バネ係数が小さくなるほど縦梁曲げモーメントは大きくなる傾向を示すものの、通常とり得るバネ係数の範囲では影響は少ない。また、梁高の影響について解析した結果では、梁高が増すほど縦梁曲げモーメントは大きくなる。図-10の結果(梁高=15cm)を基準にして梁高 25cmの曲げモーメント値を見ると、正、負とも約2倍になった。以上は縦梁が連続均等支持された場合の結果であるが、実際の線路では間欠支持状態になることが予想される。そこで 180cm(3締結間隔に相当)および 360cm(6締結間隔に相当)の不支持区間を設定して縦梁曲げモーメントを求めたところ、図-10の結果を基準にすると、前者の場合には正、負とも約3倍、後者の場合には正、負とも約5倍になることが把握された。ED77型機関車が走行した際の縦梁曲げモーメントの実測値の分布を、解析値(連続均等支持の場合)と比較して図-11に示す。バラスト道床の突き固め状態は必ずしも十分な状態でないにもかかわらず、曲げモーメントの分布はほぼ一様であり、解析値とも概ね一致した。したがって、不支持区間が発生したとしても、現実には縦梁の変形によって支持状態が回復されるので、路盤陥没でもない限り上記のような不支持状態の負荷が作用することはないと判断される。

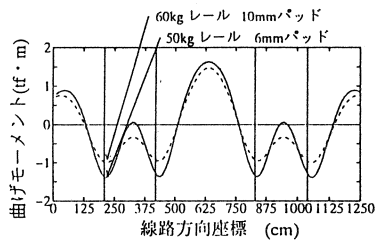


図-10 縦梁の曲げモーメント分布

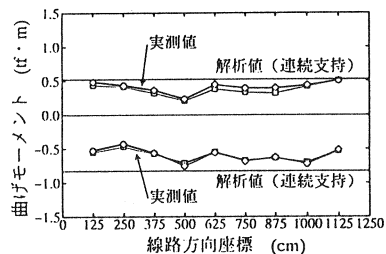


図-11 走行試験時の曲げモーメント分布

7. むすび

ラダー型マクラギの縦梁は従来のバラスト道床上のミニマムな断面寸法とマキシマムな耐荷性能の両立を追求したものであり、軽く適度な剛性を持ち、極めて靱性が大きく、全体がバネのような構造体である。本試験により、ラダー型マクラギのバラスト道床上の静力学特性が、概ね明らかになった。今後は、この軌道構造の実用に向けて種々のタイプの展開に合わせる為の設計、解析および列車との動的相互作用解析が必要であると考えている。最後に今回の発表に到るまで多くの方々のご指導および助言を頂いた。誌面をおかりしてお礼申し上げます。