

まくらぎ直角変位の発生メカニズムと抑制策

片岡 宏夫* 岩佐 裕一* 大塚 孝**
渡部 弘信** 佐古 武彦***

Mechanism and Preventing Method of Sleeper Skewing

Hiroo KATAOKA Yuichi IWASA Takashi OHTSUKA
Hironobu WATABE Takehiko SAKO

Rail creep sometimes takes place in reverse direction for low and high rails in curves whose radius are from 600 m to 1000 m. This causes sleeper skewing and needs re-setup work of continuous welded rail. We performed a field survey of sleeper skewing and measured rail creeping force in a service line to clarify the mechanism of sleeper skewing. Rail creeping force is generated in reverse direction for low and high rails of mild curve. In this study, rail fastening was improved to prevent sleeper skewing and the effect was confirmed by several tests and an analysis.

キーワード：まくらぎ直角変位，レールふく進力，回転抵抗力，ロングレール

1. はじめに

複線の曲線区間のロングレールにおいてレールが一定方向にふく進し、これに伴い図1に示すようなまくらぎの直角変位（直角狂い）が発生している現象がよく見られる。まくらぎ直角変位の発生は、軌間の縮小およびロングレールの安全度を低下させ、ロングレールの設定替えに繋がる可能性がある。また、レール締結装置やまくらぎなどの軌道部材に損傷を与える可能性がある。しかし、このようなレールのふく進現象に対する研究はこれまであまりなされていない。

そこで、曲線区間におけるまくらぎ直角変位の発生メカニズムを推定し、まくらぎ直角変位を抑制するレール締結装置を検討した。

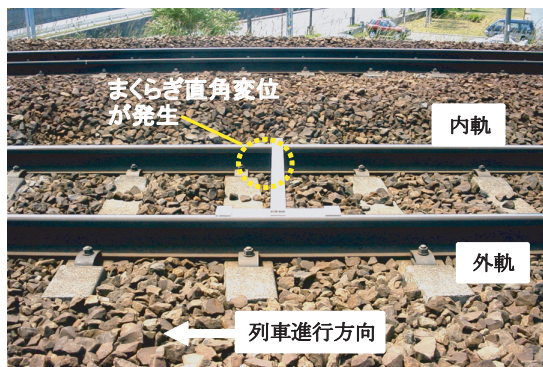


図1 まくらぎ直角変位の発生状況

2. まくらぎ直角変位の実態調査

図2に示すように、軌間内レール底部側面の位置における軌道中心線からの直交点とまくらぎ中心線までの距離をまくらぎ直角変位量と呼ぶこととする。

図3に、JR北海道より提供されたデータを基にふく進測定位置毎の1年間当たりの平均ふく進量を算出した結果と、線形を示す。図より、全体的に平均ふく進量の左右レールの差が大きい箇所でもまくらぎ直角変位が発生している様子がわかる。20KM付近の半径800mの曲線において平均ふく進量の差が他の箇所には比べ大きくかつ、最大まくらぎ直角変位量も大きくなっているが、これは右カーブが直線区間を挟んで連続しており、見かけ上の緩和曲線長+円曲線長の増加に伴いふく進量、まくらぎ直角変位量が大きくなっていると推定される。過去の調

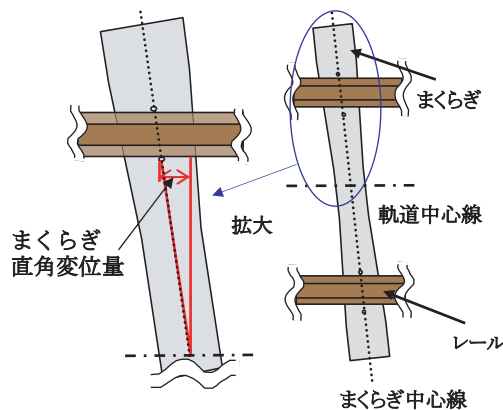


図2 まくらぎ直角変位量

* 軌道技術研究部（軌道構造）
** JR北海道，*** JR九州（前鉄道総研軌道構造）

特集：軌道技術

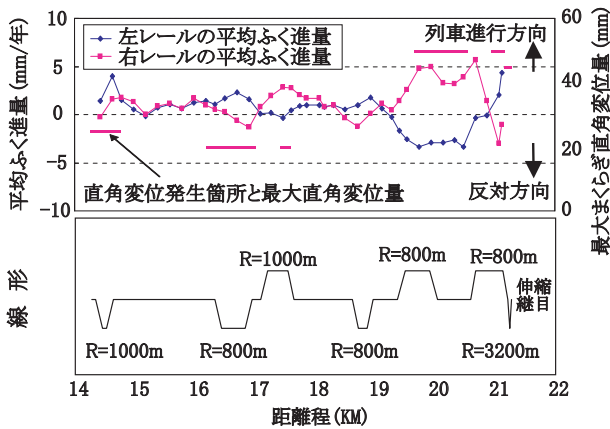


図3 レールふく進測定位置毎の平均ふく進量

査で、まくらぎ直角変位の発生は曲線半径600～1000mのカント不足量が大きい緩曲線区間で多く発生する傾向が確認された¹⁾。

3. レールふく進力の現地測定試験

曲線においては輪径差の過不足により車輪からレールに長さ方向の接線力が作用し、これがまくらぎ直角変位を引き起こす要因となることが考えられる。そこで、営業線におけるレールふく進力の測定を実施した。

3.1 レールふく進力の予備解析

車輪とレールの接触面に作用するレール長さ方向の接線力によってレールとまくらぎ間に発生するレールふく進力を把握するため、有限要素法により解析を実施した。

(1) 解析モデル

解析モデルは、片側レールについて、レール長さ方向の接線力のまくらぎへの分散を考慮して、まくらぎ360本分の長さの軌きょうとした。レールとまくらぎのモデル化にはそれぞれ1次元梁要素と質量要素を用い、レールとまくらぎ間およびまくらぎ支持ばねをレール長さ方

表1 解析条件

項目	値
レール種別	50kgN レール
まくらぎ間隔	661 mm
レール/まくらぎ間のレール長さ方向ばね定数	11.0 kN/mm
まくらぎ支持ばねのレール長さ方向ばね定数 (まくらぎ 1/2 本あたり)	1.8 kN/mm, 18.0 kN/mm
レール長さ方向の接線力 (1 車両分)	10kN/ 車輪
軸 距	2.1m
台車中心距離	13.8m

向の線形ばねで接続する。解析条件を表1に示す。解析は道床縦抵抗力に相当する、レール長さ方向のまくらぎ支持ばねのばね定数を変えて行った。

荷重条件は、50kN程度の輪重とレール・車輪間の摩擦係数を考慮して片側レールへ接線力を1車両分の4箇所に10kNずつ载荷した。

(2) 解析結果

解析結果を図4に示す。レールふく進力の最大値は、最終道床縦抵抗力 6.0kN/m/レールを換算した道床縦抵抗力のばね定数が 1.8kN/mm の場合に 430N、その10倍と仮定した 18.0kN/mm の場合に 727N となり、ある程度の大きさが期待されることから、列車通過時のレールふく進力を測定できる可能性が認められた。

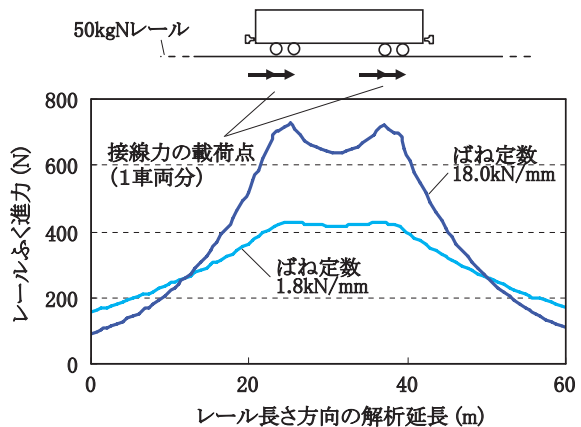


図4 レールふく進力の解析結果

3.2 測定方法

前節の検討を踏まえ、レールとまくらぎ間に発生するレールふく進力を把握するため、レールふく進力測定装置を開発し、まくらぎ直角変位が発生している曲線半径1000mの営業線で現地測定を行った。開発した測定装置は、図5に示すように合成まくらぎのレール直下部分に切り欠き加工を施し、レール長さ方向に作用するレールふく進力を測定できるロードセルを設置する構造とした。これは一般にロングレール区間に用いられるPCまくら

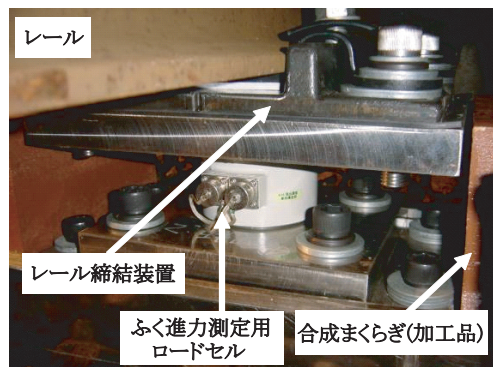


図5 レールふく進力測定装置

らぎとは違うが、図4に示すようにふく進力が広範囲に分散されると考えられることから、測定用まくらぎの挿入による測定値への影響は小さいと考えられる。

3.3 測定結果

図6にレールふく進力と輪重の測定波形例を示す。測定波形から、列車通過時にレールふく進力が発生していることが確認された。レールふく進力は車輪通過前後に変動し、内軌と外軌ともに台車前軸が通過する前に列車進行方向(+)へ、後軸が通過した後でその反対方向(-)へ推移している。

図7に列車毎の先頭から3車両分のレールふく進力の

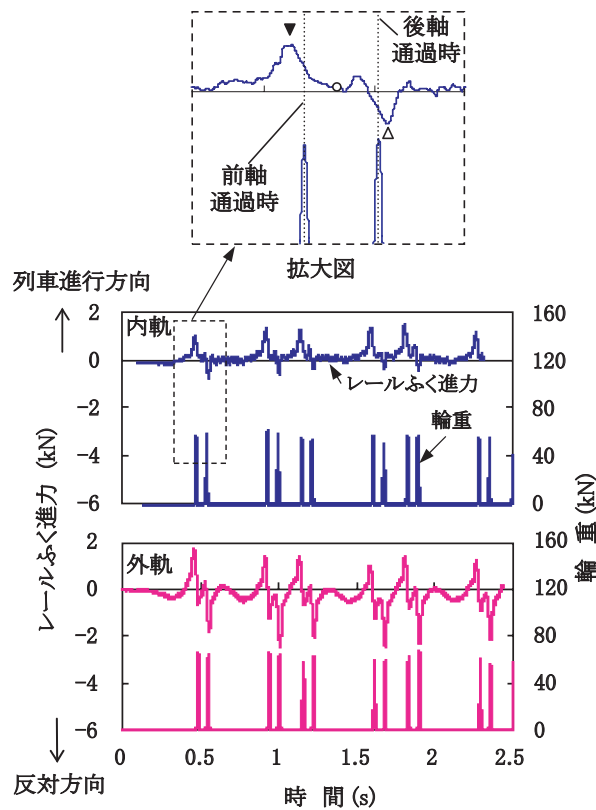


図6 レールふく進力と輪重の測定波形例

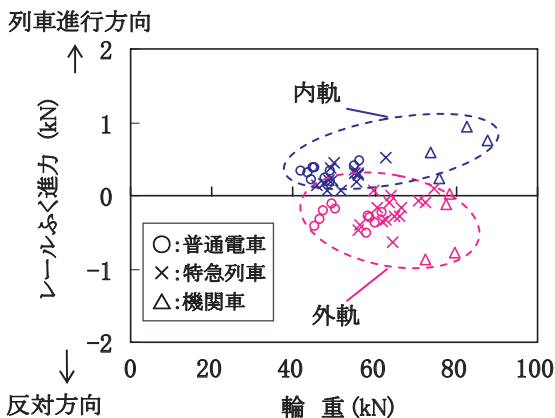


図7 車種別のレールふく進力の時間平均

時間平均と輪重の関係を車種別に示す。図より、レールふく進力が内軌では列車進行方向へ、外軌ではその反対方向へ作用していることがわかる。図6の波形においても、全体として内軌では+方向に、外軌は-方向にシフトしている様子が見られる。これらより、レールふく進力が全体としては内外軌で逆方向に作用し、その上に台車通過前後の変動波形が重なるという現象が起きていることがわかった。また、機関車は輪重が大きく、レールふく進力も大きくなる傾向が認められた。

4. まくらぎ直角変位の発生メカニズム

レールふく進の要因として、①車両からレールに作用する接線力、②車輪がレール上を移動する際に生じるレールの波状運動、などが挙げられる。上記の半径1000mの曲線における現地測定から、平均的には内外軌に逆向きのレールふく進力が発生していることが確認された。また、もしレールの波状運動が主要因であれば、半径600m未満の急曲線においてもまくらぎ直角変位が発生していてもよいが、2章で述べたように急曲線における発生は比較的少ない。これらより、接線力がまくらぎ直角変位の主要因であると考えられる。

また、緩曲線の内外軌で逆向きの接線力が作用する理由としては次のことが考えられる。

図8に車両の曲線通過時に前後軸の車輪が受ける作用力の概念図を示す。曲線通過時には左右レール上で車輪の走行距離に差があるが、後軸の左右の輪径差が適切に取られていればスムーズに曲線を旋回し、後軸のレール長さ方向の接線力は生じない。しかし、その位置より後軸が外軌側に寄ると必要以上の輪径差が生じ、(a)に示すように内軌側の車輪がレールを列車進行方向へ、外軌側の車輪がレールを後方へ押すようなレール長さ方向の

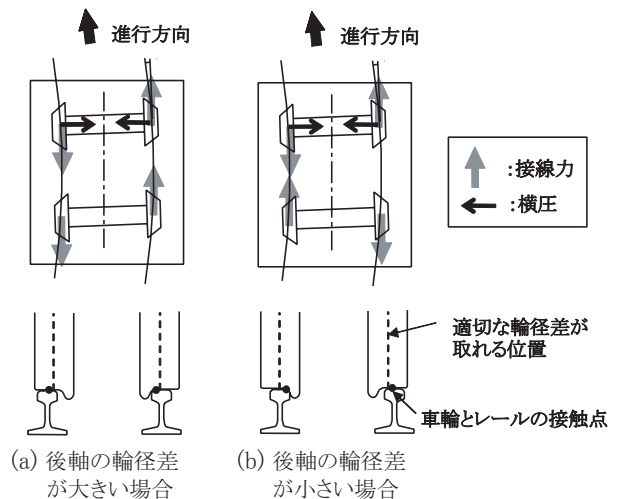


図8 車両の曲線通過時に前後軸の車輪が受ける作用力と後軸の車輪とレールの接触点

特集：軌道技術

接線力が発生する。このとき前軸の車輪からも同方向の接線力が発生しており、これが緩曲線においてまくらぎ直角変位が発生する原因であると推定される。

逆に、後軸が内軌側に寄ると輪径差が小さくなり、(b)に示すように内軌側の車輪がレールを後方へ、外軌側の車輪はレールを進行方向へ押すようなレール長さ方向の接線力が発生し、前軸の車輪からレールに作用する接線力を相殺する。急曲線では、後軸が外軌側に寄っていても輪径差が不足するため、(b)のように接線力が作用し、まくらぎ直角変位が発生しにくいと推察される。

5. まくらぎ直角変位の抑制策の検討

5.1 概略設計および試作

以上の研究結果を踏まえ、まくらぎ直角変位を抑制させる対策としてレール締結装置の回転抵抗を向上させる方法を検討した。まくらぎ直角変位を抑制するための軌道保守側の対策として、(1) 主要因となるレール長さ方向の接線力を減少させる、(2) まくらぎ直角変位に対する抵抗を増加させる、という2つの方法が考えられる。前者については、例えばカント不足を解消することが挙げられるが、これは現実的に困難である。後者については、レール長さ方向のまくらぎ移動防止板をまくらぎに取り付けて縦抵抗を増加させること、レール締結装置の回転抵抗を強化しレール/まくらぎの回転を阻止すること、などが挙げられる。まくらぎ移動防止板を取り付けることは施工面・コスト面の負荷が大きいため、本研究では、レール締結装置の横圧受け部の幅を広げる、または部材を強化することにより、回転抵抗を増加させる構造を検討した。図9に今回試作した3種類のレール締結装置を示す。試作したレール締結装置は、5形レール締結装置の場合は板ばねおよびゲージブロックの幅を広げ、ナブラ形レール締結装置の場合は絶縁ブロックの幅を120mmから200mmに広げた。板ばね、ゲージブロックおよび絶縁ブロック以外は従来の部品を用いた。また、横圧受け部を強化した座金形のレール締結装置も試

作した。

5.2 回転抵抗力試験

試作したレール締結装置のまくらぎ直角変位に対する抑制効果を確認するために、回転抵抗力試験を実施した。

(1) 試験方法

図10に示すように、PCまくらぎ、短尺レールとレール締結装置で構成された供試体に対し、締結中心から300mm離れたレール底部側面に油圧ジャッキを用いて載荷することにより試験を行った。

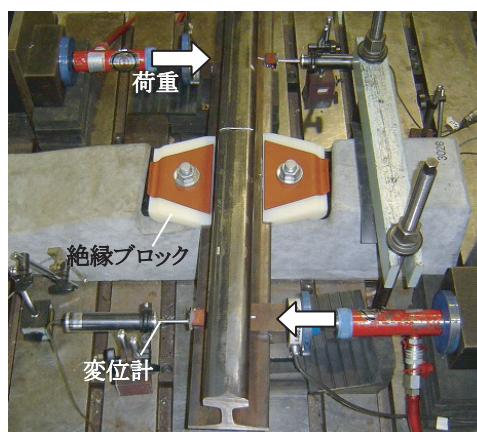


図10 回転抵抗力試験の状況

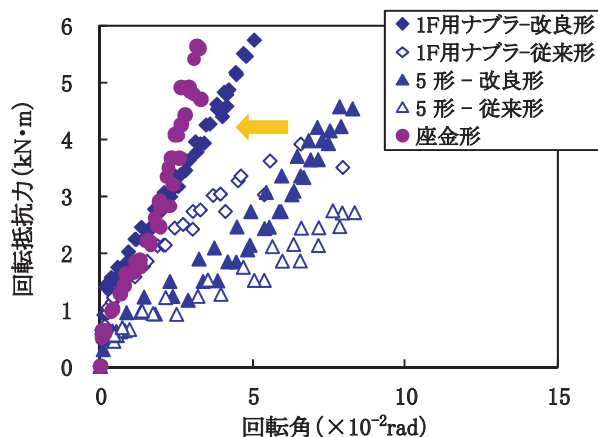
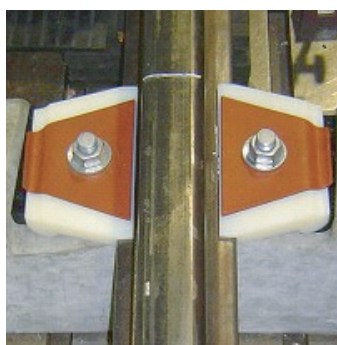


図11 回転抵抗力試験結果



(a) 5形の改良形



(b) ナブラ形の改良形



(c) 座金形

図9 試作したレール締結装置

(2) 試験結果

図11に結果を示す。5形レール締結装置, ナブラ形レール締結装置ともに, 改良形は従来形に比べ, 回転角が増大するほどに回転抵抗が増大していることが分かる(図中矢印)。座金形の回転抵抗は, 回転角が $2 \times 10^{-2} \text{rad}$ 程度までの範囲ではナブラ形レール締結装置の改良形と同等であったが, それ以上の回転角では上回っていた。

5.3 軌きょうを用いたまくらぎ直角変位抵抗試験

試作したレール締結装置を用いて軌きょうを組み立てたときのまくらぎ直角変位の抑制効果を確認するために, 軌きょうを用いたまくらぎ直角変位抵抗試験を実施した。

(1) 試験方法

図12に示すように, PCまくらぎ5本分の軌きょうを組み立て, 2本のレールに長さ方向逆向きに载荷し, そのときの荷重とレール中心線上のレール長さ方向のまくらぎ変位を測定した。試験回数は各供試体ごとに3回ずつとした。载荷時に, 軌きょう全体が回転しないように, 軌きょう回転防止治具を設置した。また, まくらぎ下面と鋼板間および軌きょう回転防止治具とPCまくらぎ間の摩擦力を低減するために, 低ローラーを取り付けた。

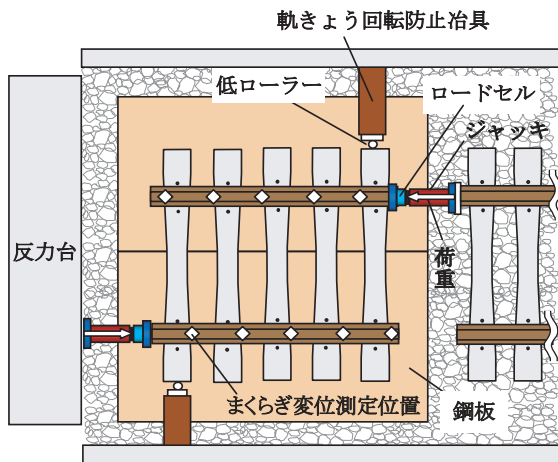


図12 軌きょうを用いたまくらぎ直角変位抵抗試験

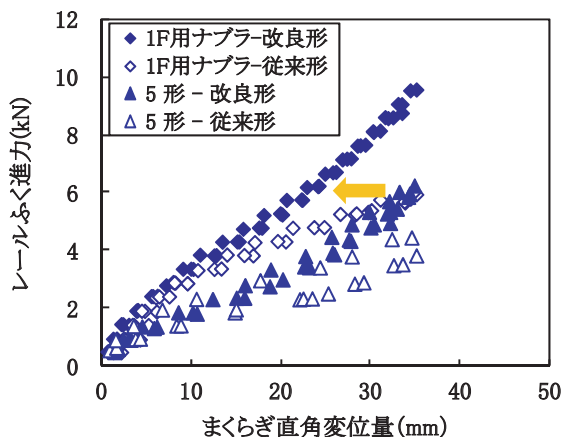


図13 まくらぎ直角変位抵抗試験結果

(2) 試験結果

レールふく進力とまくらぎ直角変位量の関係を図13に示す。5形レール締結装置, ナブラ形レール締結装置ともに, まくらぎ直角変位量が数mm程度の範囲では, 従来形と改良形の差がないが, まくらぎ直角変位量が増大するにつれ, 改良形の効果が認められ, 軌きょうとして変形しにくくなることが確認された(図中矢印)。

6. 解析による抑制策の効果の検討

レール締結装置の回転抵抗力を増加させる対策により, まくらぎ直角変位を抑制できる可能性があることがわかった。しかし, 実際の軌道では, まくらぎの回転に対して, レール締結装置の回転抵抗に加え, 道床の縦抵抗抗力が反力として作用する。そこで, 実軌道を想定したレールふく進力によるまくらぎ直角変位の解析を実施し, 対策工の効果を検証した。

(1) 解析方法

本解析では, 図14に示すとおり, まくらぎ1本をまくらぎ長さ方向に分布させた道床縦抵抗抗ばねで支持するモデルを用いた。締結部には回転抵抗ばねを取り入れ, 道床縦抵抗抗ばねは, 図15に示す非線形のはね特性を考慮した³⁾。荷重条件は, レールの位置に列車の1台車分のレールふく進力を繰り返して作用させた。

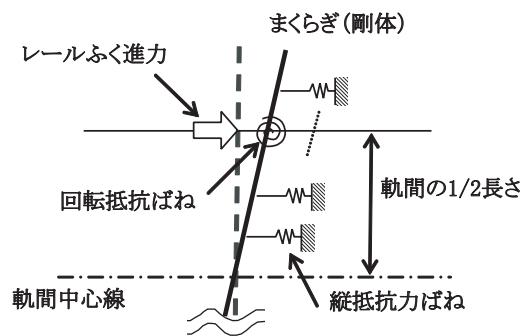


図14 まくらぎ直角変位の解析モデル

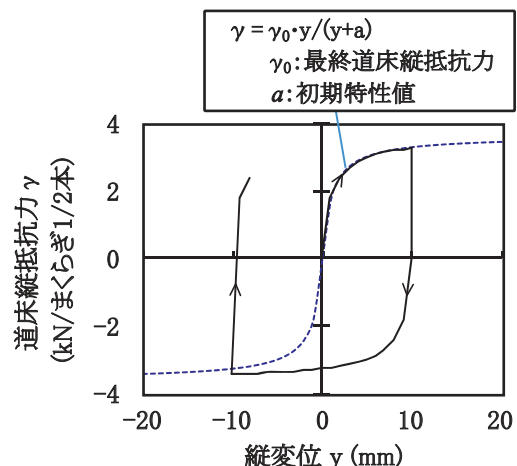


図15 解析に使用した道床縦抵抗抗力特性³⁾

特集：軌道技術

表2 解析条件

項目	値	
レールふく進力	1000 N	
まくらぎ長さ	2000 mm	
軌間	1067 mm	
最終道床縦抵抗力 γ_0 ³⁾	3.6 kN/まくらぎ 1/2 本	
縦抵抗力の初期特性値 a ³⁾	1 mm	
縦抵抗力ばねの分割数 (まくらぎ 1/2 本あたり)	5 個	
回転抵抗力 係数	5形従来形	27.6 kN・m/rad
	5形改良形 ^{*)}	54.2 kN・m/rad
	座金形 ^{*)}	151.6 kN・m/rad

*) 5章で試作したレール締結装置種別

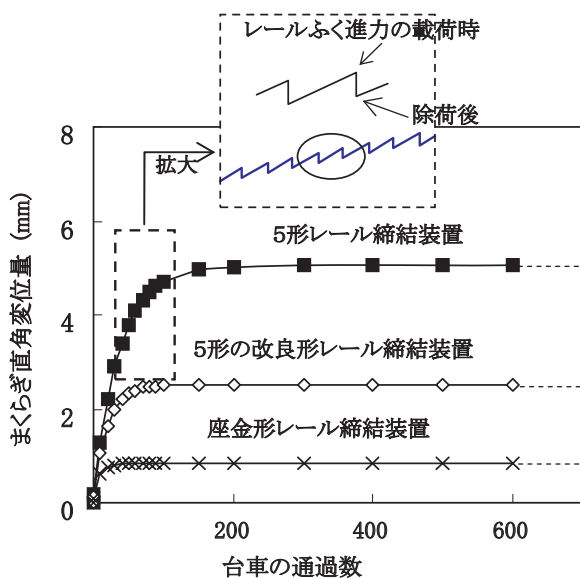


図16 まくらぎ直角変位の解析結果

解析に用いる諸元を表2に示す。解析は5形、5形の改良形および座金形レール締結装置について行い、それらの回転抵抗力特性には5.2節で得られた結果(図11)を用いた。

(2) 解析結果

レールふく進力を繰り返して作用させた場合の解析結果を図16に示す。まくらぎ直角変位量が飽和するなど実現象を再現する結果とはならなかったが、相対的には、5形レール締結装置に比べ、回転抵抗が2倍程度増加した5形の改良形レール締結装置ではまくらぎ直角変位量は1/2、座金形レール締結装置では1/5程度であり、抑制効果の可能性が認められた。

7. 結論

まくらぎ直角変位の実態調査と営業線におけるふく進力測定を実施し、まくらぎ直角変位の発生メカニズムを把握した。その抑制策として改良形のレール締結装置を検討、試作し、まくらぎ直角変位に対する抑制効果を確認した。

その結果は次のとおりである。

- (1) 実態調査により、左右レールの平均ふく進量の差がある箇所でもまくらぎ直角変位が発生しており、内軌が列車進行方向へ、外軌がその反対方向へふく進ることがわかった。また、曲線半径600m~1000mのカント不足量が大きい曲線区間で、まくらぎ直角変位が多く発生する傾向が認められた。
- (2) 現地測定試験により、内軌では列車進行方向へ、外軌ではその反対方向へレールふく進力が発生していることを確認した。すなわち内軌と外軌が逆方向へ継続的にふく進ることにより、まくらぎ直角変位が発生すると考えられる。
- (3) 横圧受け部の幅を広げる、または部材を強化することにより、回転抵抗を増加させる構造とした改良形のレール締結装置を提案した。
- (4) 回転抵抗力試験、軌きょうを用いたまくらぎ直角変位抵抗試験を実施した結果、改良形のレール締結装置は従来形に比べ、回転抵抗が増大したことを確認した。
- (5) 道床抵抗力を考慮した繰り返しのレールふく進力によるまくらぎ直角変位の解析結果と(4)の試験結果より、改良形レール締結装置の抑制効果の可能性が認められた。なお、本報告で提案した改良形の締結装置の適用にあたっては、試験敷設等により効果を確認する必要がある。

8. おわりに

本研究において緩曲線のレールふく進力の発生状況を把握し、まくらぎ直角変位の原因を解明するとともに、その抑制策を検討した。このような抑制策は、ロングレールの設定替えが行われやすい反方向曲線で用いることが考えられる。なお、実際の適用に際しては、レール締結装置の機能確認を行い、営業線における抑制効果を確認していく必要がある。

現地調査に際しご協力をいただいた東日本旅客鉄道株式会社と四国旅客鉄道株式会社、ならびにデータの提供および現地測定試験に際しご協力をいただいた北海道旅客鉄道株式会社および関係者の方々に謝意を表す。

文献

- 1) 大塚孝他：まくらぎ直角狂いの発生原因に関する一考察，土木学会第59回年次学術講演会，2004.9
- 2) 大塚孝他：まくらぎ直角狂いの発生原因に関する一考察，土木学会第60回年次学術講演会，2005.9
- 3) 伊能忠敏他：履歴を持つ非線形道床縦抵抗力によるロングレール軌道の伸縮特性，土木学会論文集，第383号/IV-7, p.55~61, 1987.7