

レール締結装置性能評価法の高精度化

弟子丸 将* 玉川 新悟* 野口 雅人*
杉野 満** 片岡 宏夫*

Improvement in the Precision of Verification Method for Rail Fastening Systems

Tadashi DESHIMARU Shingo TAMAGAWA Masato NOGUCHI
Mitsuru SUGINO Hiroo KATAOKA

International Standards of the test method for the rail fastening system has been developed in recent years. In order to make the Japanese test methods incorporated in the international standards, the validity of Japanese test method should be indicated with reasonable argument. In particular, it is apprehended that the conventional rail tilting model applied to calculation of the biaxial loading test condition is not accurate enough. For the solution of this problem, a calculation method of a rail tilting angle using the FEM analysis model whose several stiffness regarding the rail fastening system can be set as non-linear property has been proposed and its validity has been confirmed. In addition, expected effects of number of a set of fastening assembly, loading position, loading direction and temperature on the test result of the rail restraint test have been experimentally found out.

キーワード：レール締結装置，性能照査，安全性，有限要素解析，レール小返り，ふく進抵抗力

1. はじめに

レール締結装置に関する試験方法は旧日本国有鉄道の鉄道技術研究所において確立され、現在に至るまでその試験方法と評価法を用いた性能照査を実施している。

試験方法を巡っては、近年レール締結装置一組による斜角載荷試験において、試験の荷重条件の算出に用いるレール小返り計算の精度不足等が懸念されている。そこで、本研究では非線形性を考慮した有限要素法（FEM）によるレール小返り解析モデルを提案して試験結果との比較によりその妥当性を検証した。また、提案した解析モデルを用いて斜角載荷試験で実施する二方向載荷試験の荷重条件を算定し、試験軌道における載荷試験の結果との比較によりその妥当性を確認した。

また、レール締結装置に要求される機能の一つとして、レールのふく進に対する抵抗力（以下「ふく進抵抗力」という）がある。これは、レールのふく進やレール破断時の開口量、および、直結系軌道における下部構造への作用力の増減に寄与することが知られており、レール締結装置では軌道構造に応じて適切なふく進抵抗力を有するように設計がなされている。

このレール締結装置のふく進抵抗力は、標準的にレール締結装置1組でふく進抵抗試験を実施して確認している。しかしながら、同一の締結装置で実施されたふく進

抵抗試験の結果に十分な再現性が見られない場合が多い。うえ、締結数を増やして試験を実施した場合に1組あたりのふく進抵抗力が大きくなる事例が報告されるなど、試験方法について検証が必要となっている。そこで、様々な試験条件を設定した実験的検証によりレール締結装置のふく進抵抗試験の適正化に関する検討を行った。

2. FEM レール小返り解析モデルの提案

2.1 現行モデルとその課題

鉄道構造物等設計標準（軌道構造）¹⁾（以下「軌道構造標準」という）に示されたレール締結装置の疲労破壊に関する安全性の照査では、要求性能や性能項目に応じて定まる作用の特性値に変動輪重・横圧係数を乗じて求められる設計作用に対する応答値は、①レール締結装置一組の試験、②複数のレール締結装置とレールから成る試験軌道の載荷試験のいずれかの方法で求める。

ここで、①の方法で応答値を求める場合、レール締結装置の各種ばね定数（鉛直、締結ばね先端、横方向）を取得し、設計作用である極まれに発生する極大荷重（A荷重）およびしばしば発生する最大荷重（B荷重）が軌道に作用した際のレール締結装置一組に作用する鉛直方向の分散荷重（以下「レール圧力」という）および水平方向の分散荷重（以下「レール横圧力」という）を弾性支承上の梁の理論により算定した後、所定の理論に基づき分散荷重下のレール小返り（以下「実用解」という）

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

** 前 軌道技術研究部 軌道構造研究室

特集：軌道技術

の推定を行う^{2)~6)}。さらに、斜角載荷試験に用いる試験用レールの載荷点高さや水平方向の載荷点位置といった条件をパラメータとして分散荷重と小返りモーメントのつり合いにより二方向載荷の荷重条件を算定し、これを適用して斜角載荷試験を実施している。

この手法による照査法は国内で過去より数多くの実績がある。しかし、本手法で算定し荷重条件を適用して二方向載荷の試験を実施した場合、②の試験軌道の載荷試験で得られたレール小返り角と比較して、実用解が十分に一致しない事例が報告されている⁷⁾。

2.2 提案した解析モデルの概要

前節に示した課題を解決し、実用的かつ精度の高い小返り推定法を提案することを目的として、レール締結装置のばね特性を非線形とする有限要素法によるレール小返り解析モデルを構築し、試験軌道の載荷試験のレール小返り角や実用解との比較により妥当性を検証した。

図1に構築したレール小返り解析モデル（以下「解析モデル」という）の概要を示す。解析モデルはレールと27組分のレール締結装置からなる半軌きょうを模擬したものであり、レール締結装置の鉛直方向のレール下ばね、まくらぎ等の支承体下ばね、締結ばねの先端ばね、およびレール締結装置の横方向のばねを設定した。このうち、締結ばねの先端ばねおよび軌道パッドのばね定数に相当するレール下ばね特性について、実用解の導出では線形あるいは二段線形特性を設定しているのに対し、解析では別途実施したレール締結装置一組での先端ばね定数試験および鉛直ばね定数試験より得られた実測値と概ね一致するように非線形特性を設定した(図2)。また、本解析では先端ばねおよびレール下ばね特性について、図中に示すように無載荷時の初期締結力を考慮したオフセットを行った。

表1に実用解の算定に用いたパラメータと解析に用いたパラメータを併せて示す。なお、レール締結装置はバラスト軌道用のJIS 50kgNレール用9形レール締結装置（以下、「9形」という。）および直結系軌道用のJIS 60kgレール用直結8改(低)形レール締結装置（以下、「直結8低形」という。）の二種類とした。

2.3 解析モデルの妥当性検証

提案した解析モデルを用いて試験軌道の載荷試験の再現解析を実施した。9形・直結8低形それぞれの解析モデル中央部において、図3に示すように載荷角度45度、55度および65度の3パターンで0から100kNまで連続的な静的載荷を実施し、得られたレールの変位から

小返り角を算定した。

また、比較として実際の軌道部材を用いて試験軌道の

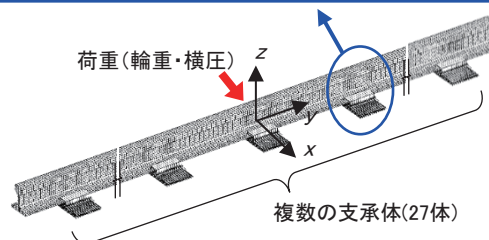
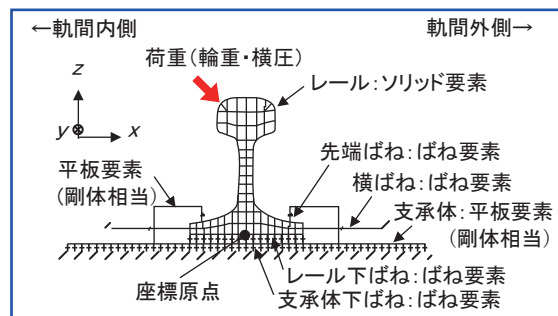


図1 提案したレール小返り解析モデル

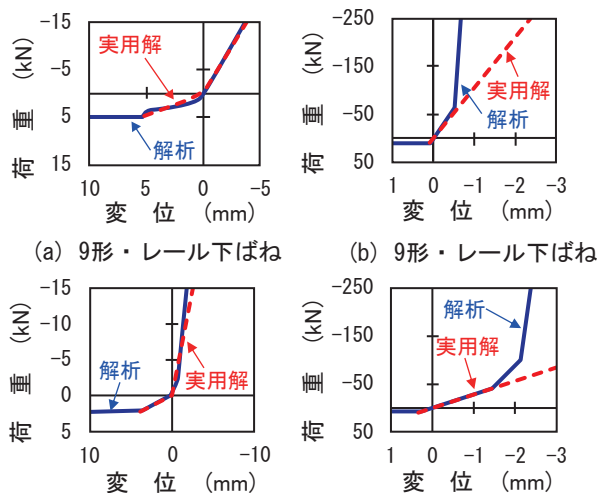


図2 解析モデルにおける鉛直ばねの特性

表1 解析パラメータ

項目	単位	解析	実用解	解析	実用解	
締結装置種別	—	9形		直結8低形		
レール種別	—	JIS 50kgNレール		JIS 60kgレール		
支承体間隔	mm	610		625		
レール下ばね幅	mm	127		140		
レール押え点間隔	mm	99		116		
レールのヤング率	kN/mm ²	206				
レールのポアソン比	—	0.3	—	0.3	—	
レールの断面2次モーメント	強軸回り	mm ⁴	—	196 × 10 ⁵	—	309 × 10 ⁵
	弱軸回り	mm ⁴	—	322 × 10 ⁴	—	512 × 10 ⁴
レールのねじり剛性	kN・mm	—	161 × 10 ⁶	—	235 × 10 ⁶	
初期締結力(締結ばね片側)	kN	5		3.94		
レール下ばね定数	kN/mm	図2(a)	106.7	図2(c)	27.9	
先端ばね定数(ばね片側)	沈下方向	kN/mm	0.94	図2(d)	0.58	
	浮上方向	kN/mm	3.95		5.95	
横ばね定数(ばね片側)	kN/mm	16.85	16.9	209.63	243.9	
支承体下ばね定数	kN/mm	48.8	48.8	300.0	300.0	

載荷試験を実施した。図4に試験概要を示す。軌きょうに用いたレール締結装置は、解析モデルと同様に9形と直結8低形とし、試験機定盤上に試験軌道（長さ5m）を構築した。また、中央に位置するレール締結装置直上のレール頭部に対し、解析と同様に図3に示すように45度、55度、65度の3パターンの角度で0から100kNまで連続的に載荷し、レール変位を測定して小返り角を算定した。

図5に解析結果と試験結果のレール小返り角の比較を示す。なお、図中に併せてレール小返りの実用解を掲載した。9形については、実用解と比較して解析結果はいずれの載荷角度でも試験結果とよく一致した。直結8低形については、実用解・解析結果ともにいずれの載荷角度でも試験結果よりも大きくなるが、荷重が増加すると解析結果が試験結果に近づく傾向が認められた。

この要因として、別途実施したレール締結装置一組による一軸載荷試験の結果より、直結8低形ではレールとタイプレートショルダーが接触して生じる摩擦力がレール小返り角に及ぼす影響が無視できず、期待した小返り角に対して試験結果では小返りが小さくなる傾向にあることが考えられる。

3. 二方向載荷試験の載荷条件の妥当性検証

前章で妥当性を検証した解析モデルを用いてレール締結装置一組の二方向載荷の荷重条件の算定手法（以下、「提案法」という。）を提案した。また、算定した荷重条件を適用した試験を実施し、レール締結装置の応答値の観点から提案した荷重条件算定法の妥当性を検証した。

3.1 提案解析モデルに基づく荷重条件算定法

図6に解析モデルにおける載荷点直下のレール締結装置の力のつり合い状態を示す。解析モデルに輪重Pと横圧Qが作用しつり合い状態にあるとき、載荷点直下の締結装置におけるレール圧力W，レール横圧力H，小返りモーメントMは式(1)～式(3)の関係にある。

$$W = \sum_{i=-n}^n (W_i) - (P_i + P_r) \quad (1)$$

$$H = R_l + R_r \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot b_i) - \sum_{i=-n}^{-1} (W_i \cdot b_i) + (P_l \cdot d_l - P_r \cdot d_r) + (R_l + R_r) \cdot c \quad (3)$$

ここで、Wは図中の下方向、Hは図中の右方向、Mは原点回りで時計回りをそれぞれ正とする。レール締結装置一組で試験を実施する場合、算定したレール圧力、レール横圧力と小返りモーメントをレールに作用させればよい。ここで、連続した軌きょうの状態を一組のレール締結装置の特性で代表させるため、載荷点高さが通常

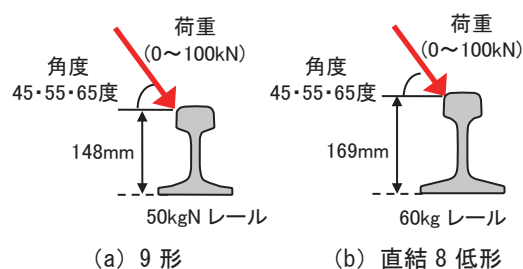
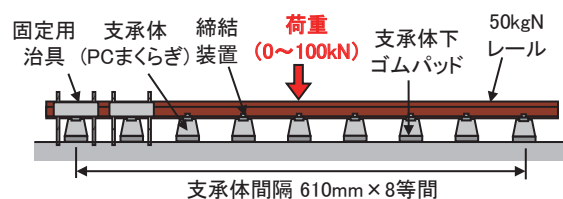
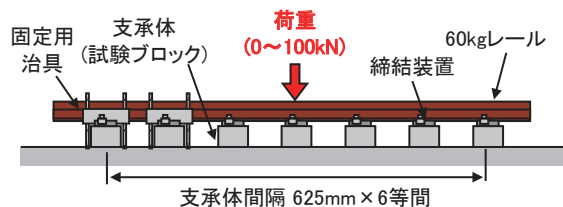


図3 解析および試験の載荷条件



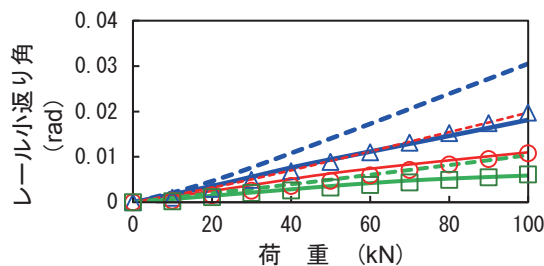
(a) 9形レール締結装置



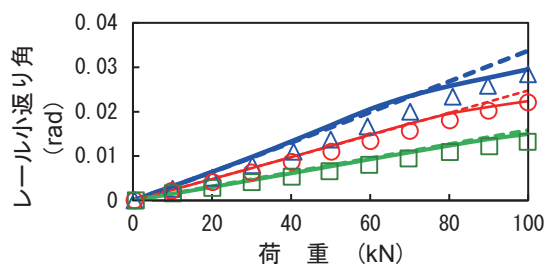
(b) 直結8低形レール締結装置

図4 試験軌道の構成

	45度	55度	65度
FEM解析結果	— (solid blue)	— (solid red)	— (solid green)
実用解	- - - (dashed blue)	- - - (dashed red)	- - - (dashed green)
試験結果	△ (blue triangle)	○ (red circle)	□ (green square)



(a) 9形レール締結装置



(b) 直結8低形レール締結装置

図5 実用解および解析結果と試験結果の比較

特集：軌道技術

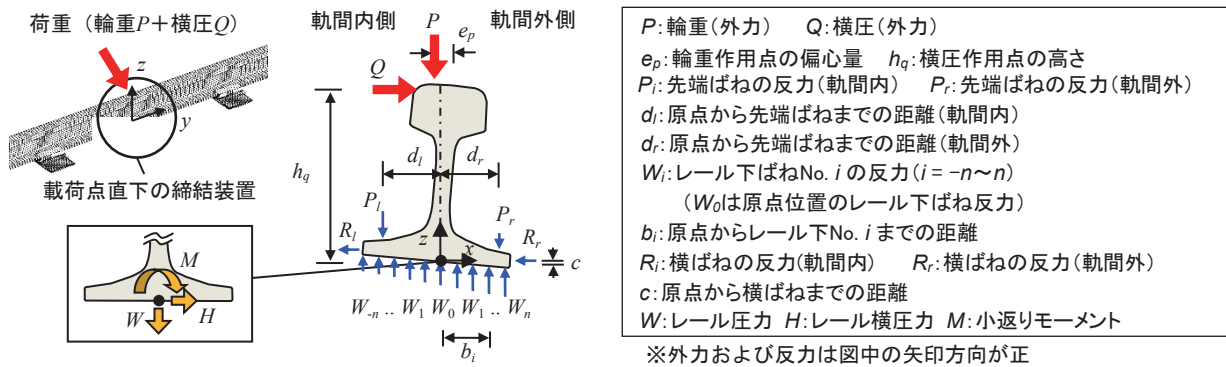


図6 解析モデルにおける荷重点直下のつり合い状態

のレールよりも低い試験用レールを使用する。

3.2 二方向荷重の荷重条件の算定法

図7に斜角荷重試験で実施する二方向荷重の荷重条件を示す。実用解による方法と提案法による方法のいずれについても、算定したレール圧力、レール横圧力および小返りモーメントのつり合いより荷重条件を算定する。ここで、 L_0 は L_A もしくは L_B の荷重時に安定した荷重を実現するために反対側から荷重する荷重であり、実際の試験では10kNを標準としている。また、算定した H_A 、 H_B と従来の小返り理論より得られる H_A 、 H_B が極力近い値になる高さの試験用レールを採用する。

以上の手法に基づき、9形および直結8低形を対象として図8に示すように軌間内側からA荷重（輪重98kN、横圧60kN）、軌間外側からB荷重（輪重86kN、横圧30kN）をそれぞれ単独で作用させる解析を行ってレール圧力、レール横圧力、小返りモーメントを算定し、前述の荷重条件算定法により二方向荷重の荷重条件を求めた。

また、比較として、同じく2種類のレール締結装置を対象とし、従来用いられている実用解を用いて同様に二方向荷重の荷重条件を求めた。なお、解析パラメータは表1に示した値を採用した。表2に各手法により求めた二方向荷重の荷重条件を示す。

3.3 荷重条件算定法の妥当性の検証

3.3.1 検証方法と結果

前節により算定した荷重条件を適用して9形および直結8低形のレール締結装置一組の試験を実施し、レールの小返り角と変位を測定した。なお、直結8低形については併せて締結ばね応力を取得した。一方、これらの荷重条件の妥当性を検証する目的で、試験軌道に対する二方向荷重の試験を実施した。図9および図10に各試験で得たA荷重作用時のレールの小返り角と上下変位の比較を示す。9形・直結8低形のいずれも実用解による試験方法と比較して提案法による試験方法を適用した結果の方が試験軌道の試験結果に近い。9形では、レール小返

L_A : 試験荷重(軌間内側) L_B : 試験荷重(軌間外側)
 θ_A : 載荷角度(軌間内側) θ_B : 載荷角度(軌間外側)
 L_0 : 対側の最小荷重 h : 載荷点高さ
 e : 試験用レール中央から載荷点までの水平距離

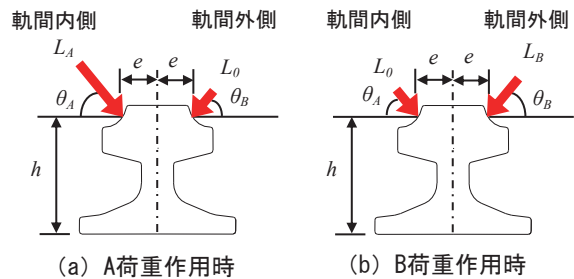


図7 二方向荷重の荷重条件

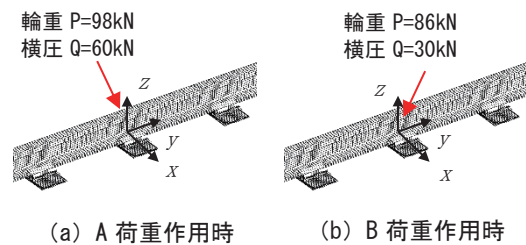


図8 二方向荷重の解析のイメージ

表2 二方向荷重の荷重条件

項目	単位	9形		直結8低形		
		解析	実用解	解析	実用解	
A 荷重	荷重 L_A	kN	57.7	57.7	64.9	40.1
	角度 θ_A	度	41.4	41.4	36.3	39.5
B 荷重	荷重 L_B	kN	38.7	38.7	35.5	30.6
	角度 θ_B	度	39.7	39.7	46.5	48.2
載荷点高さ h		mm	100	90	100	80

※いずれも載荷点の水平方向偏心量は30mm

り角、変位ともに試験軌道の試験結果より大きい、直結8低形では小さい結果となった。これについては、提案法による試験では、荷重条件の算定過程で2.2節に示したレール底部側面とタイプレートショルダー間に滑りが生じ、それに起因する摩擦力が生じることが解析上考慮されていないことが考えられる。そのため、これについては今後さらなる検討を行う必要がある。また、レール

上下変位については、9形・直結8低形ともに実用解による試験結果で軌間内側・外側のいずれも変動が小さいことが分かる（図10）。

一方、疲労破壊に関する安全性の照査では、締結ばね応力は小返り角だけでなく上下変位を含めたレールの挙動により定まる。直結8低形の軌間内側の締結ばね応力に着目すると、図11に示すように最も厳しい応力状態にある下ばね位置で測定された変動応力は、実用解による試験結果では変動応力が小さかったのに対し、試験軌道の試験結果と提案法による試験結果とは近い結果であった。

3.3.2 考察

以上の検討結果より、提案したレール小返り解析モデルを用いたレール締結装置一組の二方向载荷の荷重条件の算定法は、従来の実用解に基づく算定法と比較してレールの挙動の推定精度を向上するものであると考える。

本検討はレール締結装置の性能照査における応答値の算定に必要な荷重分散の算定方法、およびレール締結装置一組の試験条件の算定手法の高精度化に対象を絞って検討したものである。変動係数や設計作用の算定については、横圧が軌間内外に交互に作用することを前提としており、一定の安全余裕を有する照査の方法となっている。今後車両や軌道条件に応じた変動係数といった設計作用の算定方法の検討を行い、本件で得られた知見を活用して評価法全体のさらなる適正化を行う予定である。

4. レールふく進抵抗試験の実施方法の検証

ふく進抵抗試験実施時のレール载荷位置、締結装置の組数、温度条件が試験結果に及ぼす影響を実験的に検証した。なお、本章における検討では、レール締結装置について、直結8低形（JIS 60kg レール用、軌道パッドばね定数 30MN/m）を対象とした。

4.1 载荷位置および締結数の影響

4.1.1 载荷位置の影響

ふく進抵抗試験におけるレールの荷重载荷点を中立軸、頭部、底部とした場合のふく進抵抗抗力におよぼす影響を把握することを目的に試験を実施した。

図12にレールの载荷位置を、図13にふく進抵抗抗力の結果を示す。底部载荷時に直結8低形に求められるふく進抵抗抗力の目標値に最も近い結果が得られた。また、温度伸縮により実軌道でレールにふく進が生じる状況を考慮すると、ふく進抵抗試験においてレールを一様に長手方向に変位させるためには、外力の作用線を締結装置の抵抗抗力が働く作用線と極力一致させればよいと考えられる。そのため、ふく進抵抗試験の载荷位置は、レールの底部を締結する締結装置の場合にはレールの底部とするのがよい。

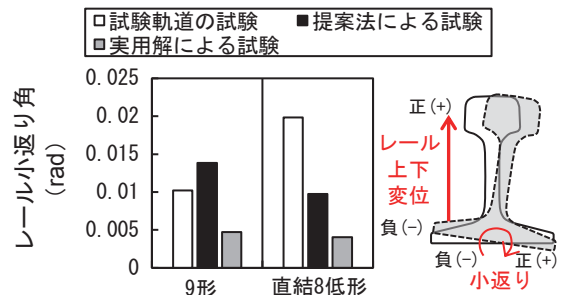


図9 レール小返り角の比較 (A 荷重作用時)

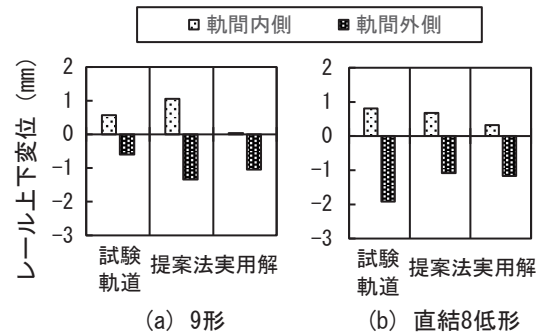


図10 レール上下変位の比較 (A 荷重作用時)

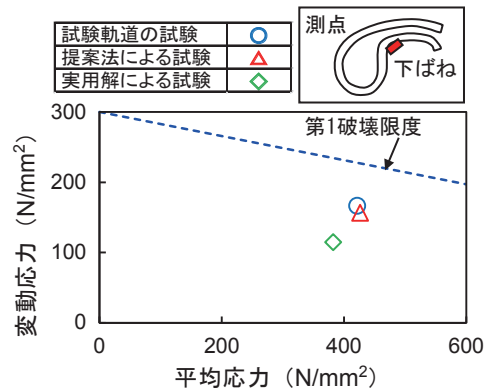


図11 締結ばね応力 (直結8低形)

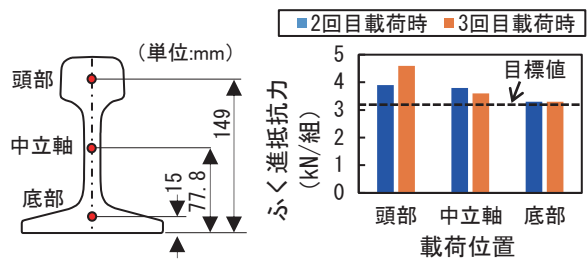


図12 载荷位置 図13 载荷位置とふく進抵抗抗力

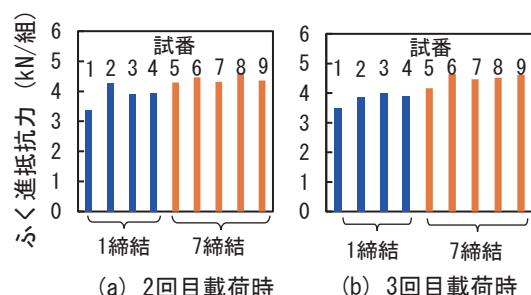


図14 ふく進抵抗抗力に対する締結組数の影響

特集：軌道技術

4.1.2 締結数の影響

試験時のレール締結装置の締結数がふく進抵抗力へ与える影響を調査することを目的に、締結数が1組と7組の場合について、締結装置の軌道パッドには鋼板付き軌道パッドを用いたふく進抵抗試験を実施した。

図14に試験結果を示す。両者のふく進抵抗力について、平均で0.6kN程度の差が生じた。しかし、締結装置1組で試験をした場合、板ばね、鋼板付き軌道パッド、可変パッド等の部材を変更した際のふく進抵抗力は最大で0.9kNの差が生じている。上記の締結数の違いによるふく進抵抗力の差は、これらの部材の個体差の影響を受けたものと考えられる。したがって、ふく進抵抗試験における締結数の違いによる顕著な増減は確認されなかった。

4.2 軌道パッド温度の影響

欧州規格(EN)に規定されたふく進抵抗試験⁸⁾では周辺温度は(23±5)℃としている一方、日本の試験方法では温度に対する規定はない。そこで、軌道パッドの温度がふく進抵抗力に及ぼす影響を把握するため、軌道パッド温度を条件としてふく進抵抗試験を実施した。

図15に試験概要を示す。SBR製軌道パッド(ばね定数60MN/m)を用いた直結8形レール締結装置を対象とし、締結装置を構成したうえで試験用レールに加熱器を取り付け、加熱しながらレール締結装置のふく進抵抗試験を実施した。なお、併せてレール下に設置された軌道パッド側面の表面温度を非接触式の温度計を用いて把握した。

図16に試験結果を示す。締結ボルト軸力を調整し、一定の締結状態とした場合に、ENが定める温度範囲に限らず10～45℃の温度範囲において軌道パッド温度とレールふく進抵抗力の間に有意な関係が認められなかった。したがって、今回対象としたSBR製軌道パッドでは軌道パッド温度がふく進抵抗力に及ぼす影響はなく、ふく進抵抗力への影響はレールと軌道パッド上面の摩擦状態が支配的であることが分かった。

5. まとめ

本研究では、レール締結装置の性能評価法の精度向上の一環として、解析によるレール小返り角の算定精度向上および実験的手法によるふく進抵抗試験の適正化を行った。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) レール締結装置の小返り角の精度向上を目的として、実用解に代わるレール小返り解析モデルを提案し、試験軌道での荷重試験の結果との比較により妥当性を確認した。
- (2) 提案した解析モデルを用いて求めたレール締結装置



図15 温度を管理したふく進抵抗試験の概要

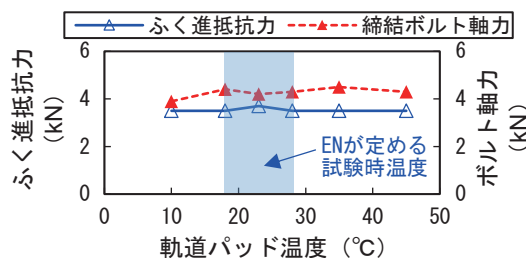


図16 軌道パッド温度とふく進抵抗力の関係

の二方向荷重の荷重条件により実施した荷重試験の結果、レール小返り、レール変位および締結ばね応力について実用解による試験と比較して試験軌道の荷重試験に近い結果が得られることを確認した。

- (3) ふく進抵抗試験の試験方法の適正化を目的として荷重位置や締結組数、軌道パッドの温度を条件とするふく進抵抗試験を実施し影響を明らかにした。

文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善出版, 2012
- 2) 佐藤裕:横圧に対する軌道強度の研究, 鉄道技術研究報告, 第110号, 1960
- 3) 星野陽一:レールのねじれ(小返り)の実用解, 土木学会論文報告集, 第210号, pp.33-46, 1973
- 4) 峯村芳郎, 市川茂:101型(新幹線標準型)レール締結装置の設計および性能試験, 鉄道技術研究報告, 第388号, 1963
- 5) 大西璋, 市川茂:新型タイプレートの設計, 鉄道技術研究報告, 第376号, 1963
- 6) 山本武史, 梅田静也, 金森敏行:レール締結装置のばね定数とレール小返り角, 鉄道技術研究報告, No.1161, 1981
- 7) 弟子丸将, 庄野真也, 片岡宏夫, 古川敦:車両からの作用に対するレール締結装置の締結ばねの応答に関する実験的検討, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, 第18号, pp.95-102, 2014
- 8) EN 13146-1:2012+A1:2014 Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 1: Determination of longitudinal rail restraint.