

論文 軌道の支持状態がレール締結装置に作用する分散荷重に及ぼす影響の研究

弟子丸 将¹・片岡 宏夫²・園田 佳巨³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:deshimaru.tadashi.45@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 九州大学大学院工学研究院教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

レール締結装置の安全性の照査において実施するレール締結装置一組による載荷試験の荷重条件の算定では、過去に提案した非線形ばね特性を導入可能な有限要素法のレール小返り解析モデルを活用している。本モデルでは軌道の支持状態を良好で一律の状態と仮定してきたが、実際のバラスト軌道では軌道の支持状態は様々であり、支持状態がレール締結装置一組に作用する分散荷重の鉛直方向成分であるレール圧力に及ぼす影響は明らかでなかった。本研究ではレール小返り解析モデルのまくらぎ下のばね特性を個別に設定できる拡張を行い、まくらぎが支持されていない浮きまくらぎ状態を模擬した試験軌道の載荷試験によりその妥当性を確認した。また、この拡張モデルを用いて様々な軌道支持状態を設定した解析を実施し、浮き量や浮きの分布がレール締結装置に作用するレール圧力に及ぼす影響を定量化した。

Key Words : rail fastening system, ballasted track, unsupported sleeper, distributed force, FEM

1. 研究の背景と目的

(1) 背景

レール締結装置の性能確認試験のうち、安全性の照査のために実施するレール締結装置一組での静的載荷試験(斜角載荷試験)と動的載荷試験(二軸疲労試験)の二方向載荷の荷重条件は、従来は過去に提案された離散支持された弾性支承上の梁理論に基づく算定法により、設計作用に対するレール締結装置一組に作用する分散荷重、レール小返り角および小返りモーメントを算定し、この結果を用いて二方向載荷時の最小荷重およびつり合い条件を考慮して決定していた¹⁾⁹⁾。しかし、従来の算定法には以下に示す課題があった。

- 締結ばねの先端ばねについては二段線形の特性を設定可能であるが、それ以外のレール締結装置周りのばね特性は非線形特性を設定できない。このため、非線形性の強いばね特性を有するレール締結装置の場合はその特性を正確に反映できない。
- 従来の算定法により二方向載荷試験の荷重条件を算定し、静的載荷試験を実施した場合、従来の手法で推定されたレールの小返り角と比較して試験で得られるレール小返り角が相対的に小さいことが確認さ

れていた。これは、従来法では特にレール小返りに対して特に寄与の大きい締結ばねの先端ばね定数とレール締結装置の鉛直ばね定数の非線形性が考慮されていないことが原因であると推察された。

- 従来の算定法は、同一のばね特性を有するレール締結装置が一定間隔に配置されている状況を模擬して二方向載荷時の荷重算定を行うものである。このため、レール継目部のようにまくらぎの配置が不連続であったり、継目部以外でも局所的に締結間隔が変化するような条件を設定した厳密な算定が困難であり、解析上簡略化を図るか、実物の軌道材料を用いて複数締結で構成される試験軌道を構築し、直接設計作用を適用して二方向載荷を行う必要があった。

これらの課題を解決する目的で、玉川らは従来手法の基本思想を引き継ぎつつ、従来手法が抱える課題を解消する新たな二方向載荷試験の荷重算定法として、非線形有限要素法を用いたレール小返り解析モデル(以下、「レール小返り解析モデル」という。)を用いる手法を構築し、バラスト軌道を模擬した試験軌道を構築して実施した載荷試験の結果との比較によりその妥当性を確認した⁹⁾。また、筆者らは同モデルに対して非線形性の強い低弾性軌道パッドが適用された場合について、直結系

軌道を模擬した試験軌道に対する載荷試験の結果により解析モデルの妥当性を検証した⁷⁾。

これらの結果を踏まえ、レール小返り解析モデルを用いて、レール締結装置の疲労破壊に関する安全性の照査において実施する二方向載荷の静的載荷試験および動的載荷試験の荷重条件を算定する新たな手法を構築し、性能照査において実際に運用を開始している。

(2) 研究の目的

レール小返り解析モデルでは、全てのレール締結装置に対し同一の非線形ばね特性を設定しており、軌道の支持状態を示す支承体下ばね特性は、軌道が適切に支持されていることを前提として一律に設定されている。一方、実際のバラスト軌道では、まくらぎ下の軌道支持状態は保守状態等により様々である。

また、軌道構造設計標準⁸⁾に示された、一般部に敷設されるレール締結装置の設計作用の算定に用いる変動係数(表-1)のうち、変動輪重係数については全てのまくらぎが適正に支持されている状態を前提として設定されたものであり、軌道の支持状態のばらつき、すなわちまくらぎが道床バラストに接触せずまくらぎとバラスト表面の間に隙間が生じた状態(以下、「浮きまくらぎ状態」という。)の有無や浮きの分布、浮き量の影響を考慮したものではなかった。

そこで、本研究ではレール小返り解析モデルを基本とし、任意の軌道支持状態を再現するため、支承体下ばね特性を個別に設定可能な拡張を行った。この拡張モデルの妥当性を検証する目的で、実物の軌道部材を用いて浮きまくらぎ状態を設定した試験軌道を構築し、載荷試験の結果と同じ条件を設定して実施した解析結果を比較することにより拡張モデルの妥当性を確認した。また、拡張モデルを用いて種々の軌道支持状態を設定したパラメトリックスタディを実施し、軌道支持状態がレール締結装置に作用する分散荷重のうち鉛直方向成分(以下、「レール圧力」という。)に及ぼす影響を検証し、レール締結装置の変動輪重係数についての検討を行った。

2. レール小返り解析モデルとその拡張

本章では、検討の基となるレール小返り解析モデルについて概説し、軌道支持状態を模擬するために実施した解析モデルの拡張の詳細について論述する。

(1) レール小返り解析モデルの概要⁹⁾

図-1にレール小返り解析モデルの概要を示す。本モデルは27体のレール支承体(まくらぎ)とレール締結装置、および1本のレールで構成される非線形有限要素モデルであり、特にレール締結装置の周囲については、レール

表-1 レール締結装置の変動係数

線別	荷重種別	直線・曲線[m]	A 荷重	B 荷重
新幹線	輪重	直・曲	1.3	1.15
	横圧	直・曲	0.8	0.4
在来線	輪重	直・曲	1.3	1.15
	横圧	$R \geq 800$	0.4	0.2
		$800 > R \geq 600$	0.6	0.3
		$600 > R$	0.8	0.4

※ A 荷重:極まれに発生する極大荷重

※ B 荷重:しばしば発生する最大荷重

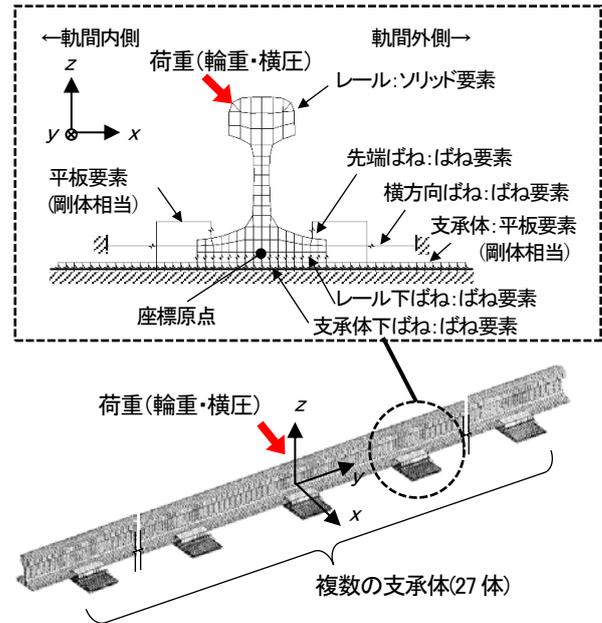


図-1 レール小返り解析モデル

締結装置の性能確認試験において実験的に取得が可能な各種ばね特性、具体的には締結ばねの先端ばね特性、軌道パッドによるレール下ばね特性、レール締結装置の横方向ばね特性および支承体下ばね特性の4種類のばね特性を非線形として解析モデルに設定することができる。

なお、レール締結装置の性能確認試験を実施する際、本解析モデルを用いて二方向載荷の荷重条件を算定する場合、通常はレール締結装置周りの各種ばね特性のうち横方向ばね特性と支承体下ばね特性を線形とし、その他のばね特性は非線形として設定している。

(2) レール小返り解析モデルの拡張

レール小返り解析モデルは、非線形性の強いレール締結装置であっても、締結ばねの先端ばね特性と軌道パッドによるレール下ばね特性を非線形として設定することにより、レール小返り角の算定値をより実態に近い値に近づけることを目的として構築したものであるが、軌道の支持ばねに相当する支承体下ばね特性の設定により、浮きまくらぎ状態の有無、およびまくらぎ下面とバラスト表層の間隔(以下、「浮き量」という。)を再現でき

る。この解析モデルにより、軌道の支持状態がレール圧力に及ぼす影響を検証することができるものと考えた。

ここで、軌道の支持状態を支承体下ばね特性に反映させる手法について概説する。図-2に軌道の支持状態と支承体下ばね特性の関係を示す。バラスト軌道においてまくらぎが道床上で適切に支持されている場合は、図-2(a)に示すように初期状態からまくらぎが鉛直下向きに移動する場合に道床のばね特性となる一方、アップリフト等により初期状態からまくらぎが持ち上がる場合には常にばね特性を0として設定することで軌道支持状態を表現できる。一方、浮きまくらぎ状態にある場合、図-2(b)に示すように、初期状態から浮き量の分だけ沈下するまではばね特性が発現せず、初期状態での浮き量を超えて鉛直下向きにまくらぎが変位した場合に、道床のばね特性が発現するようなばね特性のオフセットを行った。

このように、個々のまくらぎに軌道支持状態を考慮した支承体下ばね特性を設定する拡張を行うことにより、解析モデル上の任意のまくらぎに対して任意の浮き量となる浮きまくらぎ状態を設定することとした。

3. 試験軌道の載荷試験

前章に示した、拡張されたレール小返り解析モデル（以下、「拡張モデル」という。）の妥当性を検証する目的で、試験軌道を構築して室内載荷試験を実施し、その結果の分析を行った。

(1) 試験概要

図-3および表-2に構築した試験軌道の概要と諸元を示す。長さ5mのレールの下にPCまくらぎ（長さ半分）9本を締結間隔610mmとなるように設置し、同数のレール締結装置で固定して半軌きょうを構築した。また、試験機の定盤と各まくらぎの下面の間隔には、道床ばねに相当するばね特性を有する支承体下パッド（静的ばね特性：41.3MN/m）を設置し、バラスト軌道の軌道支持状態を模擬した。一方、レール締結装置の設計において道床のレール直角方向のばね特性を考慮せず、レール締結装置の横方向ばね特性のみを考慮することから、まくらぎの側面も治具を設置し水平方向の移動を拘束した。

この試験軌道に対し、表-3に示す浮きまくらぎの無い適正な軌道支持状態（以下、「浮き無し」という。）とまくらぎ下面と支承体下パッド間に浮きまくらぎ状態を設定する場合（以下、「浮き有り」という。）で4つの軌道支持条件を設定し、図-4に示すように軌間内側よりレール高さ148mmの位置のレール頭側面に対して45度から5度刻みで65度までの単軸載荷（荷重100kNまでの3往復載荷）を実施し、まくらぎの鉛直方向変位およびレール小返り角を整理した。なお、まくらぎの鉛直方向変位

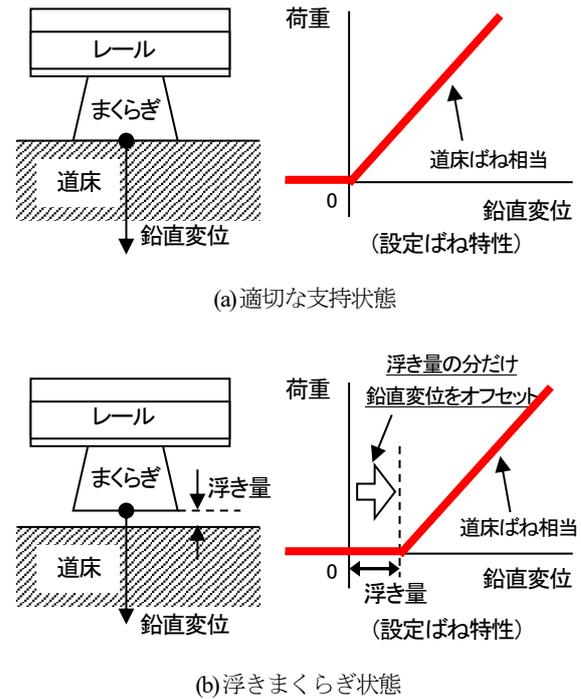
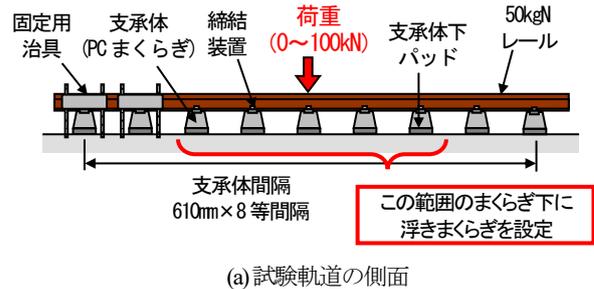
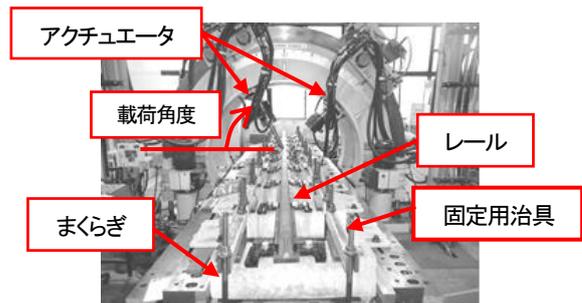


図-2 軌道の支持状態とレール支承体ばね特性



(a) 試験軌道の側面



(b) 載荷状況

図-3 試験軌道の概要

表-2 試験軌道の諸元

項目	詳細
レール種別	JIS 50kgN 普通レール (長さ: 5m)
レール支承体	6号 PCまくらぎ (半分) × 9本
締結間隔	610mm (25mあたり 41本換算)
レール締結装置	9形改レール締結装置 50kgN レール用
軌道パッド	SBR製 (公称ばね定数: 110MN/m)
支承体下パッド	41.3MN/m

は鉛直下向きを正，レール小返り角は載荷時のレールの回転方向を正とした．ここで，試験に用いたまくらぎはまくらぎ下面の2点で弾性支持する構造としたため，載荷条件によってはまくらぎの回転が生じる可能性がある．このため，まくらぎ上のレール中心から等間隔にある軌間内外の2点でのまくらぎ鉛直変位の測定値の平均をレール底部中央直下におけるまくらぎの鉛直方向変位として評価した．また，レール小返り角はまくらぎ上面を基準とする相対角度について整理した．

(2) 試験結果

図-5に載荷3回目における100kN載荷時の載荷点直下の試験条件別のまくらぎの鉛直方向変位およびレール小返り角を示す．

図-5(a)より，いずれの軌道支持条件でも，載荷角度が増加するにつれてまくらぎ鉛直変位が増加する傾向が認められた．浮き有りの場合，条件B（浮きまくらぎ1本）ではいずれの載荷角度でもまくらぎ下面が支承体下パッドと接触しなかったが，条件C（浮きまくらぎ3本）および条件D（浮きまくらぎ5本）では，すべての載荷角度でまくらぎ鉛直変位が浮き量3mmを超過しており，まくらぎ下面が支承体下パッドと接触していた．なお，条件CおよびDでまくらぎ鉛直変位に大きな差は認められなかったが，これは載荷時にまくらぎ下面が支承体下パッドに接触し浮きまくらぎが解消した結果，軌道支持状態に差がなくなったことが原因であると推察される．

また，図-5(b)より，いずれの軌道支持条件でも，載荷角度が増加するとともに載荷した荷重の水平方向成分が減少し，レール小返り角も減少するという傾向が認められた．ここで，軌道支持状態の差の影響に着目すると，載荷角度が45度の場合は浮きまくらぎの本数が増加するにつれ小返り角が減少したものの，載荷角度が50度以上の場合は傾向が異なり，浮きまくらぎ1本の場合にレール小返り角が最も大きくなる傾向が認められた．その原因については浮きまくらぎ状態の影響がレール小返り角に寄与していることが考えられるが特定に至らなかった．

以上の結果より，以降はまくらぎの鉛直変位に着目して拡張モデルの妥当性検証を実施することとした．

4. 拡張モデルの妥当性検証

2章にて概説した拡張モデルに対し，3章に示した室内試験と同一条件を設定し，室内試験の結果の比較を行い，その妥当性について検証した．

表-4に拡張モデルに設定した解析諸元を示す．3章に示した室内試験での軌道諸元，すなわちレール締結装置周りの各種ばね特性やレール締結間隔，表-3に示した軌道支持条件を設定したうえで，拡張モデルに対して室内

表-3 軌道支持条件

条件	支持条件	備考	浮き量
A	浮き無し	標準締結状態	—
B	浮き有り	浮きまくらぎ1本	3mm (一律)
C		浮きまくらぎ3本	
D		浮きまくらぎ5本	

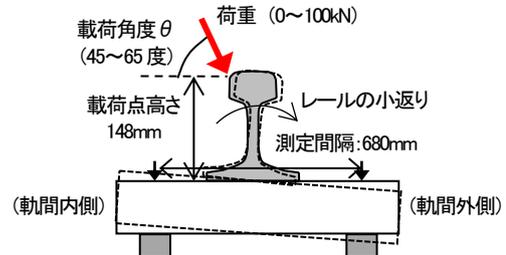
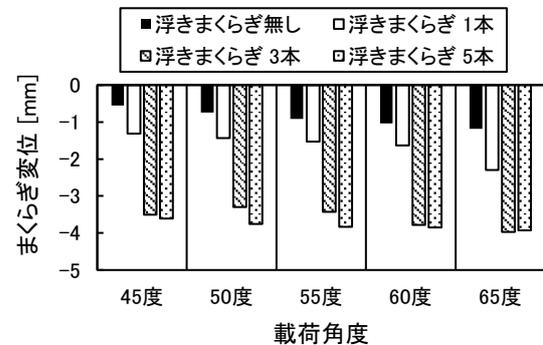
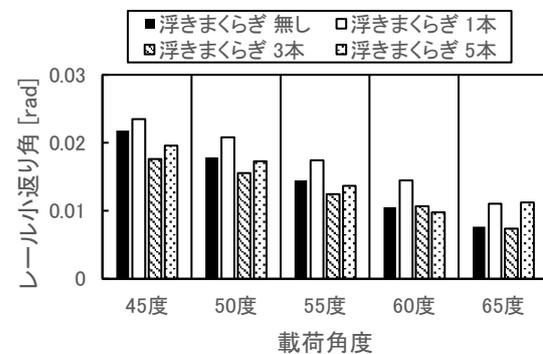


図-4 載荷位置とまくらぎ鉛直変位



(a) まくらぎ鉛直変位



(b) レール小返り角 (残留考慮)

図-5 室内載荷試験結果

表-4 拡張モデルの解析諸元

レール種別	JIS 50kgN レール
締結間隔	610mm(41本/25m)
レール押え点間隔	99mm
レール支承体長さ (レール長さ方向)	180mm
先端ばね特性	図-6に示す非線形特性
鉛直ばね特性	
横方向ばね特性	
支承体ばね特性	41.3 MN/m (浮きまくらぎ無しの場合)

試験と同様、5度刻みで45～65度での角度で荷重解析（荷重100kNまでの3往復載荷）を実施した。

ここで、締結ばねの先端ばね特性、軌道パッドによるレール下ばね特性およびレール締結装置の横方向ばね特性については、室内試験で用いたレール締結装置一組に対する荷重試験により得られた実測値を非線形で設定した。図-6に各種のばね特性を示す。また、支承体下ばねは室内試験で使用した支承体下パッドのばね特性である41.3MN/mとして設定した。

図-7に室内試験と解析で得られた荷重角度が45度、55度および65度の場合のまくらぎの鉛直変位の比較を示す。浮きまくらぎ1本の場合で、荷重角度が45度および55度載荷の場合に室内荷重試験の結果と解析結果の間に差が認められるものの、その他の荷重条件および軌道支持条件の場合は両者が良好に一致していた。この結果より、拡張モデルは室内試験の試験軌道を適切に表現しており、当該モデルを用いて軌道支持状態がレール圧力に及ぼす影響を把握することについては妥当性があるものと判断した。

5. 拡張モデルを用いた軌道支持状態の影響評価

前章で妥当性が確認された拡張モデルを用いて、様々な軌道支持状態を条件とするパラメトリックスタディを実施し、レール圧力への影響を検証した。

なお、以降に示す拡張モデルを用いた解析では、浮き無しの場合の支承体下ばね特性を48.8MN/mと設定した⁹⁾。その他のばね特性等の解析諸元については、表-4および図-7に示した値と同一にした。

(1) 浮きの分布の影響

まくらぎの浮きの分布形状や浮き量の差によるレール圧力への影響を把握する目的で、複数の軌道支持条件を設定し、軌道の支持状態とレール圧力の関係を検討した。

図-8に設定した軌道支持状態を示す。浮き有り状態で一律の浮き量を設定する矩形分布と、左右対称の三角形分布の2種類を設定し、それぞれの浮きの分布の中央（荷重点A）と分布に隣接する適正支持箇所（荷重点B）のそれぞれに設計A荷重相当荷重（鉛直方向成分97.5kN、水平方向成分60kNの合成力）を載荷する解析を実施して各まくらぎに生じるレール圧力を算定した。なお、矩形分布の浮きの分布については浮き量は一律3mmとし、三角形分布の浮きの分布については荷重点直下での浮き量を最大として両側のまくらぎで1mmずつ減少するような分布を想定した。

図-9に荷重点直下を含む9本分のまくらぎに作用するレール圧力の推定結果を示す。なお、比較のために浮き無しの場合のレール圧力の算定結果を併せて示した。矩

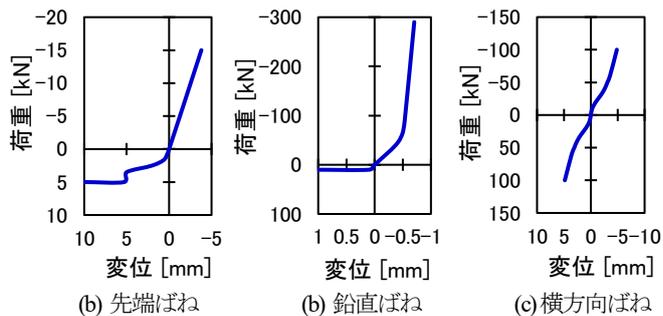


図-6 解析に用いた非線形ばね特性

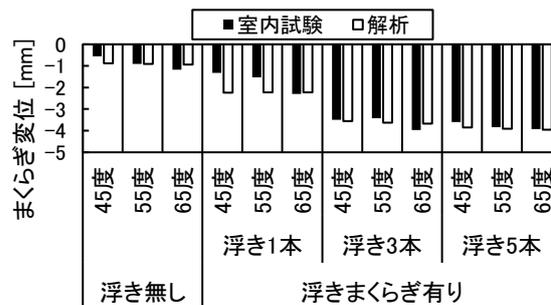
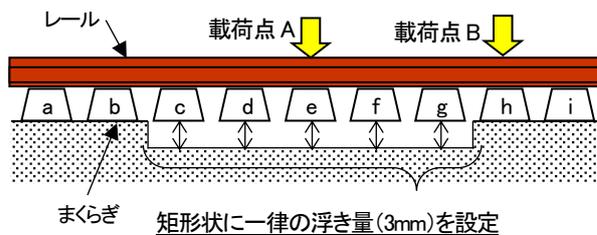


図-7 解析結果と試験結果の比較（まくらぎ変位）



A点載荷時の浮き量の設定（単位：mm）

軌道支持条件	まくらぎ位置								
	a	b	c	d	e	f	g	h	i
浮きまくらぎ1本	0	0	0	0	3	0	0	0	0
浮きまくらぎ3本	0	0	0	3	3	3	0	0	0
浮きまくらぎ5本	0	0	3	3	3	3	3	0	0
浮きまくらぎ7本	0	3	3	3	3	3	3	3	0

B点載荷時の浮き量の設定（単位：mm）

軌道支持条件	まくらぎ位置								
	a	b	c	d	e	f	g	h	i
浮きまくらぎ1本	0	0	0	0	0	0	3	0	0
浮きまくらぎ3本	0	0	0	0	3	3	3	0	0
浮きまくらぎ5本	0	0	3	3	3	3	3	0	0
浮きまくらぎ7本	3	3	3	3	3	3	3	0	0

(a) 矩形分布の浮きの分布

図-8 解析条件（軌道の支持状態）

形状の浮き分布の場合で分布中央のA点載荷時（図-9(a)）は、浮きまくらぎ1本では荷重点直下の1本分、浮きまくらぎ3本の場合は荷重点に隣接する2本でレール圧力は0となり、まくらぎが浮いた状態のままであった。この時、各まくらぎに生じるレール圧力に着目すると、浮き無しの場合に荷重点直下で45.6kNであったのに対し、軌道支持条件が浮きまくらぎ7本の場合の荷重点直下で

レール圧力が最も大きくなり48.2kNとなり、同じまくらぎで浮き無しの状態で生じるレール圧力で除した比率（以下、「レール圧力比」という。）を算定すると、最大で1.05であった。一方、同じ矩形形状の浮きの分布の直近の適正支持箇所であるB点載荷時（図-9(b)）は、浮きまくらぎ本数の増加とともに載荷点直下で顕著にレール圧力が増加し、特に浮きまくらぎ7本の場合に71.6kNに達した。これは、レール圧力比で1.57に相当する。

三角形形状の浮き分布でA点載荷時（図-9(c)）は、今回設定した全ての軌道支持条件で載荷時に載荷点直下および隣接するまくらぎにレール圧力が生じており、載荷によりまくらぎ下面が道床と接触しており浮き無しの状態となっていることが確認された。レール圧力は浮き無しの場合の載荷点直下で最も大きくなり45.6kNであり、レール圧力比はいずれも1を下回った。一方、同じ三角形形状の浮きの分布の直近の適正支持箇所であるB点載荷時（図-9(d)）は矩形形状の浮き分布の場合と同様に浮きまくらぎ本数の増加とともに載荷点直下のレール圧力が増加し、浮きまくらぎ5本および7本の場合に56.8kNに達した。これは、レール圧力比で1.25に相当する。

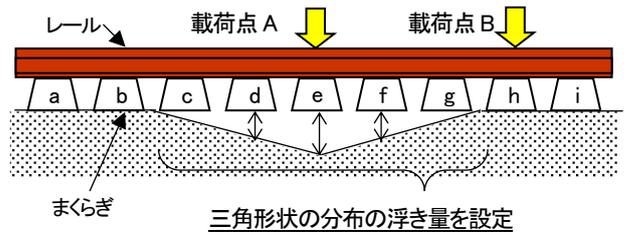
(2) レール締結間隔の影響

図-8(a)に示した矩形形状の浮き分布はそのままとし、3種類のレール締結間隔を設定し、レール圧力への影響について検討した。レール締結間隔は610mmに加え、735mmおよび893mmとした。ここで、610mmは旧日本国有鉄道における線路等級の区分での上級線（1および2級線）の標準的な締結間隔、735mmは下級線（3および4級線）の標準的な締結間隔、893mmは区分上の最大締結間隔に相当する。また、いずれの条件についても、矩形形状分布の中央に対してレール締結装置の設計A荷重相当荷重を載荷した解析を実施しレール圧力を推定した。

図-10に浮き無しの場合と載荷点直下で最もレール圧力が推定された浮きまくらぎ7本の場合の結果を示す。締結間隔を拡大すると、特に載荷点直下で顕著にレール圧力が増加し、また浮きの分布が拡大するほどレール圧力も増加する傾向が確認された（図-10(a)）。浮き無しの場合に対して浮きまくらぎ7本の場合のレール圧力比は、いずれの締結間隔でも1.06程度となった。一方、浮きの有無にかかわらず、隣接まくらぎに生じるレール圧力については締結間隔が拡大すると微減する傾向認められた（図-10(b)）。

(3) 浮き量の実測値を導入したケーススタディ

実軌道上に生じた浮きまくらぎの分布がレール圧力に及ぼす影響を検証する目的で、営業線のバラスト軌道にて得られた浮き量の実測値を導入した解析を実施した。実測値はトンネル内のバラスト軌道、レール締結間隔



A点載荷時の浮き量の設定（単位：mm）

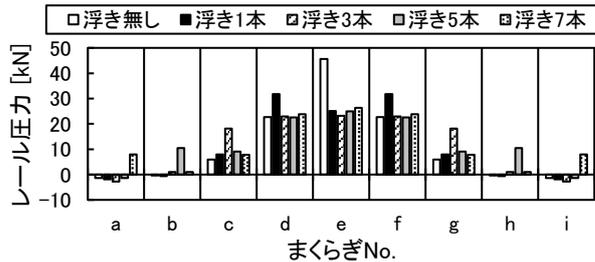
条件	まくらぎ位置								
	a	b	c	d	e	f	g	h	i
浮きまくらぎ1本	0	0	0	0	1	0	0	0	0
浮きまくらぎ3本	0	0	0	1	2	1	0	0	0
浮きまくらぎ5本	0	0	1	2	3	2	1	0	0
浮きまくらぎ7本	0	1	2	3	4	3	2	1	0

B点載荷時の浮き量の設定（単位：mm）

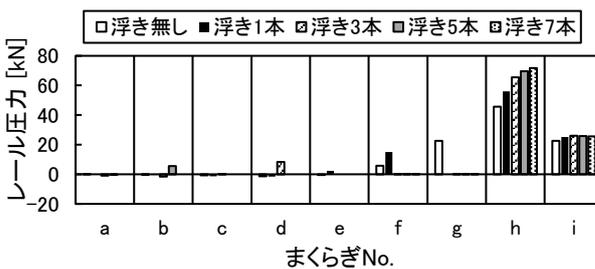
条件	まくらぎ位置								
	a	b	c	d	e	f	g	h	i
浮きまくらぎ1本	0	0	0	0	0	0	1	0	0
浮きまくらぎ3本	0	0	0	0	1	2	1	0	0
浮きまくらぎ5本	0	0	1	2	3	2	1	0	0
浮きまくらぎ7本	1	2	3	4	3	2	1	0	0

(b) 三角形形状の浮きの分布

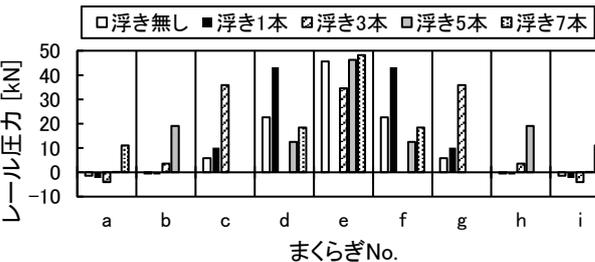
図-8 解析条件（軌道の支持状態）（続き）



(a) 矩形形状の浮き分布・A点載荷時



(b) 矩形形状の浮き分布・B点載荷時



(c) 三角形形状の浮き分布・A点載荷時

図-9 レール圧力の推定結果（浮き分布の影響）

は900mmの直線区間で得られたもので、延長約50m分、まくらぎ57本分の浮き量のデータに相当する⁹⁾。また、当該箇所軌道は局所的に連続したまくらぎの浮きが生じている状態にあった。

この実測値からまくらぎ27本分の浮き量のデータを抽出し、支承体下ばね特性に変換して拡張モデルに設定した。その後、拡張モデル中央に位置するまくらぎに対して設計A荷重相当荷重で载荷する解析を実施し、载荷点直下のレール締結装置に作用するレール圧力を算定した。さらに、浮き量のデータをまくらぎ1本ずつレール長さ方向に移動しながら前述のレール圧力の算定を繰り返し実施し、各まくらぎにおけるレール圧力のレール長さ方向の分布を算定した。

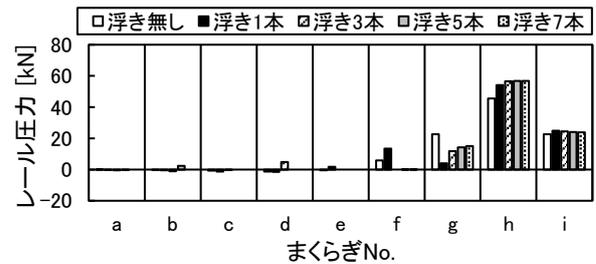
図-11にまくらぎ毎の浮き量の実測値と解析により得られたレール圧力の関係を示す。なお、浮き量は鉛直下向きを正として示した。複数のまくらぎが連続して浮きまくらぎ状態となっている区間で、まくらぎ1本だけで適切支持されている箇所でも局所的に大きなレール圧力が生じており、最大レール圧力は80.2kN、この時レール圧力比は1.36であった。また、この最大レール圧力を観測したまくらぎに隣接するまくらぎは、4本および5本連続して浮きまくらぎの状態にあった。

6. 考察

前章の(1)および(2)の結果より、载荷点直下のまくらぎが適正支持状態にあり、かつ隣接するまくらぎにおいて浮きが連続して生じている場合に、レール圧力およびレール圧力比のいずれも顕著に増加する傾向にあった。

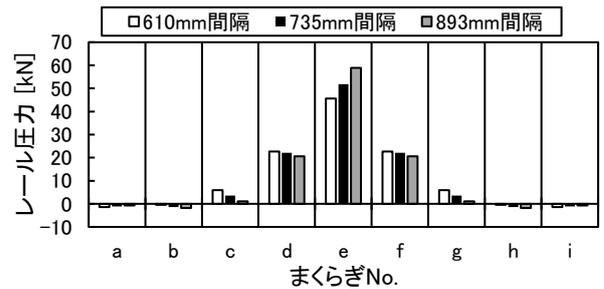
ここで、適正支持されているまくらぎの隣接まくらぎで複数連続して浮きまくらぎ状態になっている実例として、前章に示した浮き量の実測値に基づき得られたレール圧力の解析結果についてレール圧力比を算定し、各まくらぎのレール圧力比が正規分布に従うものと仮定して統計分析を実施した。図-12にレール圧力比のヒストグラムおよび確率密度曲線を示す。レール圧力比の平均は0.988、標準偏差は0.103であり、レール圧力が80.2kNとなるときレール圧力比である1.36は、レール圧力比の(平均+3×標準偏差)である1.30を超過しており、その発生頻度は極まれな突出したデータであるといえる。一方、2番目に大きなレール圧力は66.5kNであり、レール圧力比は1.13であった。

現在、一般部用のレール締結装置の設計作用のうち、新幹線および在来線の急曲線に適用する設計A荷重(極まれに発生する極大荷重)の算定には変動輪重係数1.3を適用している。一方、車上測定データの分析結果より、衝撃輪重が生じる継目部等を除く軌道の一般部では、軌道の高低変位による輪重変動は非常に小さく、静止輪重

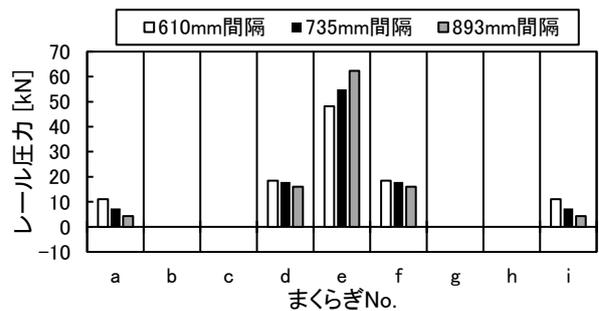


(d) 三角形の浮き分布・B点载荷時

図-9 レール圧力の推定結果(浮き分布の影響) (続き)



(a) 浮き無しの場合



(b) 浮きまくらぎ7本の場合

図-10 レール圧力の推定結果(締結間隔の影響比較)

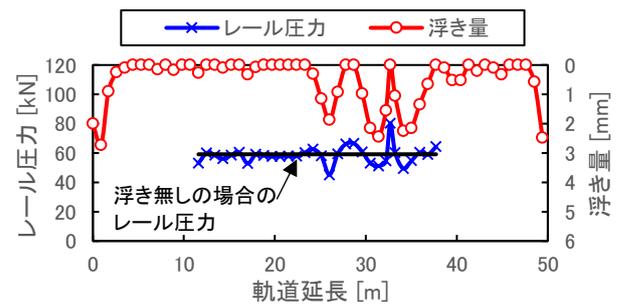


図-11 浮き量の実測値とレール圧力推定結果

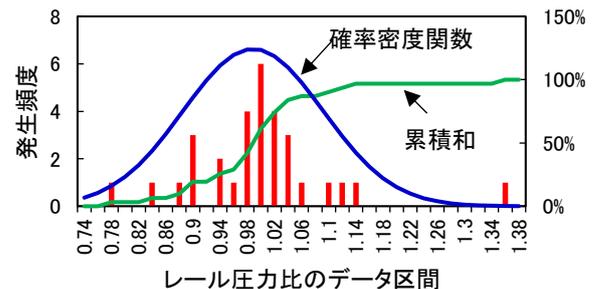


図-12 レール圧力比の頻度分布

の10%を見込めば十分であることが報告されている⁸⁾。

そこで、変動輪重係数が輪重変動の影響と軌道支持状態の影響を表す係数の乗算により決定すると仮定し、前述の2番目に大きなレール圧力に対応するレール圧力比を用いて変動輪重係数を試算すると $1.1 \times 1.13 = 1.24$ となり、本ケーススタディにおいては前述の変動輪重係数1.3に対して安全側となることが分かった。

なお、今後より多くの浮き量のデータを収集して同様の検討を行うことによりレール圧力比の定量化を図り、軌道の実態に即した変動輪重係数を検討する予定である。

7. まとめ

本研究で得られた成果をまとめると次の通りである。

- (1) レール小返り解析モデルを基本とし、任意の軌道支持状態を再現するためレール支承体ばね特性を個別に設定可能な拡張を行った。
- (2) 拡張モデルの妥当性を検証する目的で、浮きまくらぎ状態を設定した試験軌道による載荷試験の結果を分析し、試験条件と同じ条件を設定した解析を実施して両者を比較した結果、同一の軌道支持条件の場合にまくらぎの鉛直変位が良好に一致し、拡張モデルの妥当性を確認した。
- (3) 拡張モデルを用いて種々の軌道の支持状態を設定した解析を実施し、軌道支持状態がレール圧力に及ぼす影響を検証した。その結果、載荷点直下のまくらぎが適正支持状態にあり、かつ隣接するまくらぎが連続して浮きまくらぎ状態にある場合に、レール圧力が顕著に大きくなる傾向にあることが分かった。
- (4) 浮き量の実測値を導入して各まくらぎに作用するレール圧力の分布を算定した結果、連続して

浮きまくらぎ状態にある箇所では適正な軌道支持条件にあるまくらぎにおいて、突出して大きなレール圧力が生じた。また、2番目に大きなレール圧力についてレール圧力比を算定し、軌道の高低変位による輪重変動の割増との乗算により変動輪重係数を試算した結果、レール締結装置の設計A荷重に適用している最大の変動輪重係数1.3に対して安全側となっていることが分かった。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 大西璋，市川茂：新型タイププレートの設計，鉄道技術研究報告，第376号，1963。
- 5) 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。
- 6) 玉川新悟，片岡宏夫，弟子丸将：レールの小返り解析モデルの提案とレール締結装置の性能評価試験への応用，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），73巻2号，2017。
- 7) Deshimaru, T., Tamagawa, S., Kataoka, H., and Sonoda, Y., A Study on Fatigue Test Conditions for Certification of Rail Fastening Systems, Proceedings of International Heavy Haul Conference 2017 (IHHA2017), pp.318-324, 2017.
- 8) 国土交通省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説軌道構造，丸善出版，2012。
- 9) 楠田将之，松本麻美，片岡宏夫：軌道変位データに基づく浮きまくらぎ検出手法，土木学会論文集 A2（応用力学），74巻2号，2018。

(2019.4.5 受付)

EFFECT OF TRACK SUPPORTING CONDITION ON DISTRIBUTED FORCE ACTING ON RAIL FASTENING SYSTEM

Tadashi DESHIMARU, Hiroo KATAOKA and Yoshiomi SONODA

The non-linear FEM rail tilting analysis model which was proposed in our previous study, is applied to calculation of the loading test condition of a single rail fastening system which is conducted for the verification of safety of the rail fastening system. In this model, the track supporting condition is assumed to be good and uniform, but the condition varies in the practical track, and the effect of the condition on the load distribution acting on a rail fastening system was not made clear.

In this study, the non-linear FEM rail tilting analysis model was extended so that support stiffness of each sleeper could be set individually, and the validity of this model was verified by comparing the analysis results with results of a loading test using the test track which simulates the condition that the unsupported sleepers are existing on the ballast layer. In addition, the parametric studies under several track conditions were carried out using this extended analysis model for the purpose of quantification of the effect of the distribution of unsupported sleepers and the gap between the bottom surface of the sleeper and the surface of the ballast layer on the distributed force acting on the rail fastening system.