

論文 レール締結装置の損傷が軌道の冗長性に及ぼす影響分析

太田 晋一¹・弟子丸 将¹・楠田 将之¹

¹正会員 公益財団法人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: ota.shinichi.81@rtri.or.jp, deshimaru.tadashi.45@rtri.or.jp, kusuda.masanobu.75@rtri.or.jp

レール締結装置の効率的な保守を実現するために、締結ばねの損傷発生時期を予測する研究が進められている。既往研究では、レール締結装置に作用する分散荷重を算定する際、全てのレール締結装置が健全であることを前提としている。一方、締結ばねが損傷した場合、損傷箇所近傍のレール締結装置に作用する分散荷重は変動するが、この変動分を考慮した検討はなされていない。

本研究では、既往研究で提案されたレール締結装置の分散荷重算定法と寿命推定法を用いて、レール締結装置の損傷パターンを複数設定したパラメータスタディを実施し、レール締結装置の損傷が近傍箇所の分散荷重に与える影響を明らかにするとともに、レール締結装置の余寿命を試算し、損傷形態等が保守管理上必要な耐用期間に対する余裕度、すなわち冗長性に及ぼす影響を検討した。

Key Words : Rail fastening, Rail clip, Stress, Train load, Track condition, Laboratory test, Fatigue life

1. はじめに

鉄道における軌道部材のうちレール締結装置は、基本的には永久構造物ではなく取り替え部品として設計されている。このことから、効率的な保守管理を実現するため、締結ばねの損傷発生時期や交換周期を予測する手法の確立が必要とされている。このような背景を踏まえ、既往研究^{1,2)}では、レール締結装置一組に作用する分散荷重や余寿命の算定を実施しているが、前提条件として全てのレール締結装置および軌道支持状態が健全であるとしている。一方、使用期間中に締結ばね等の損傷や浮きまくらぎの発生等により軌道支持状態が悪化した場合、損傷箇所近傍ではレール締結装置に作用する分散荷重が変化しレール締結装置の余寿命が減少することが考えられるが、どの程度影響するかは不明である。

そこで本研究では、既往研究で提案されたレール締結装置に対する分散荷重算定法^{1,3)}と寿命推定法²⁾を用いて、レール締結装置の損傷パターンおよび軌道支持状態をパラメータとしたケーススタディを実施し、レール締結装置の損傷および軌道支持状態が近傍箇所の分散荷重に与える影響について検討するとともに、レール締結装置の余寿命推定を行い、保守管理上必要な耐用期間に対する余裕度に及ぼす影響を検討した。なお、この余裕度を、安全性を維持するために必要となる期間に対するレール

締結装置の余寿命の余裕期間と捉え、本研究ではレール締結装置の冗長性と定義する。

2. 冗長性の検討

(1) 冗長性の概念

冗長性を考慮したレール締結装置の保守管理方法策定の概念を図-1に示す。例えば、まくらぎ間隔を従来より拡大した場合、従来と同等の保守管理を適用すると、レール締結装置の損傷が発生した際に冗長性の不足が生じる可能性がある。このため、レール締結装置の連続不良を防止する観点から、従来にないようなまくらぎ間隔を適用する場合は、冗長性の観点から保守管理方法の見直

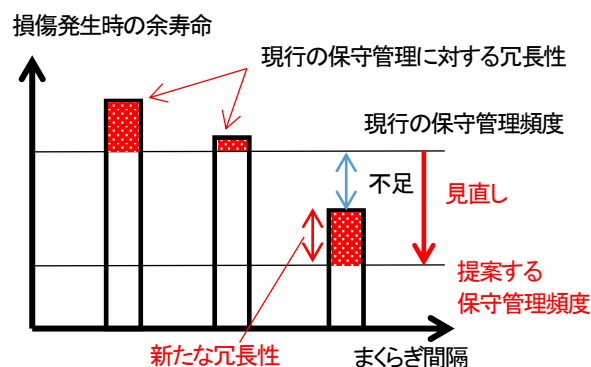


図-1 冗長性を考慮した保守管理方法策定の考え方

しを検討する必要があると考えられる。

(2) 冗長性検討のプロセス

レール締結装置の冗長性を評価するにあたって、レール締結装置の余寿命算定は、以下のプロセスにより行うことにする。

- ① 対象のレール締結装置を選定し、レール締結装置一組に対して様々な角度で単軸の静的載荷試験を実施し、締結ばねの応答値を確認する。具体的には、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（以下、「レール圧力」という。）および水平方向成分（以下、「レール横圧力」という。）とレール締結装置の締結ばねにおける発生応力との関係を把握する。
- ② ①の結果より、レール圧力・横圧力を説明変数、締結時応力からの変動応力を目的変数とする重回帰分析により回帰式を導出する。
- ③ 軌道条件（曲線半径等）および車両条件（軸重）を設定し、検討に用いる設計作用を決定する。
- ④ 対象のレール締結装置の各種ばね特性より、鉛直および水平方向の荷重分散率を算定し、③より定まる設計作用に対するレール締結装置一組への分散荷重（レール圧力・横圧力）を算出する。
- ⑤ ④で得られた分散荷重を②の回帰式に適用し、設計作用に対する変動応力を推定する。
- ⑥ ⑤で得られた変動応力と試験時に得られた締結時応力より平均応力を算定する。さらに、応力振幅と平均応力を用いて応力を0からの両振り片振幅に換算する。
- ⑦ ばね鋼のS-N曲線式を用いて、⑥の応力に対する疲労被害を算定する。また、その逆数より余寿命を算定する。
- ⑧ レール締結装置が損傷した状況を考慮する場合は、④においてレール締結装置の各ばね特性を損傷を模擬して調整することで、レール締結装置がレールを適正支持していない状況とし、隣接するレール締結装置に作用する分散荷重を導出する（図-2）。なお、⑤から⑦までの算定過程は同一とする。

3. 静的載荷試験による応力推定式の算定²⁾

前章で示したプロセスに準じ、具体的なレール締結装置を選定して、応力の測定および応力推定式の算定を行った。

(1) 対象とするレール締結装置

対象とするレール締結装置として、主にバラスト軌道で使用実績の高い線ばね形レール締結装置（Pandrol社

製・e2009形、バラスト軌道・PCまくらぎ・JIS 50kgNレール用）を採用した。

(2) 静的載荷試験による応力の把握

レール締結装置の安全性の照査⁴⁾における試験方法を準用し、一組のレール締結装置に固定したレールに静的載荷を実施し、応答値としてレール締結装置の締結ばねに発生する変動応力を測定した。

図-3に示すとおり、1軸の静的載荷試験により軌間内側から軌間外側方向に載荷し、載荷過程における軌間内側および軌間外側の締結ばねに発生する変動応力を測定した。測定箇所は、経験的に損傷が発生していることが確認されており、大きな応力が発生する部位であるフロントアーチ部とした（図-4）。測定には3軸のひずみゲージを使用し、出力値から最大主応力を整理して変動応力とした。荷重条件は、1軸載荷の載荷角度を45度～65度の範囲で5度刻みで変化させた。なお、載荷荷重の増

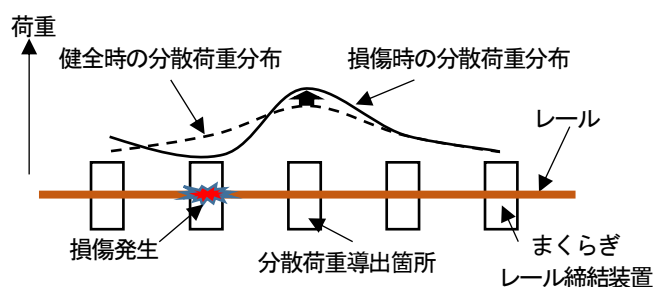


図-2 損傷発生時における分散荷重の変動

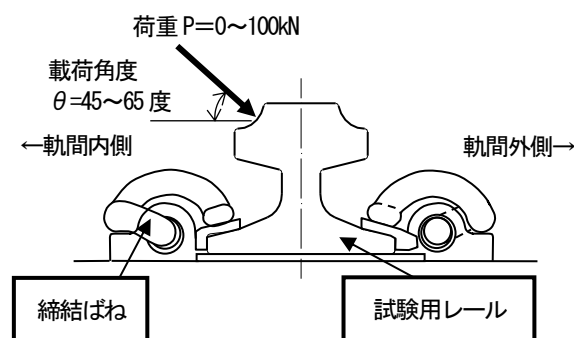


図-3 静的載荷試験の方法

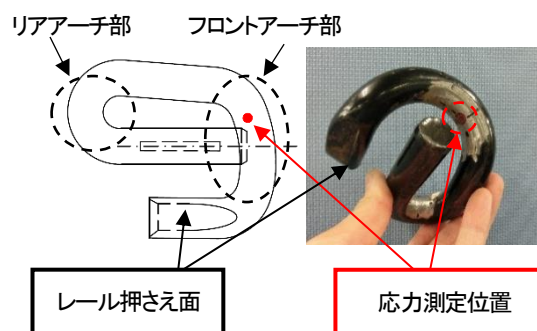


図-4 締結ばねの応力測定位置

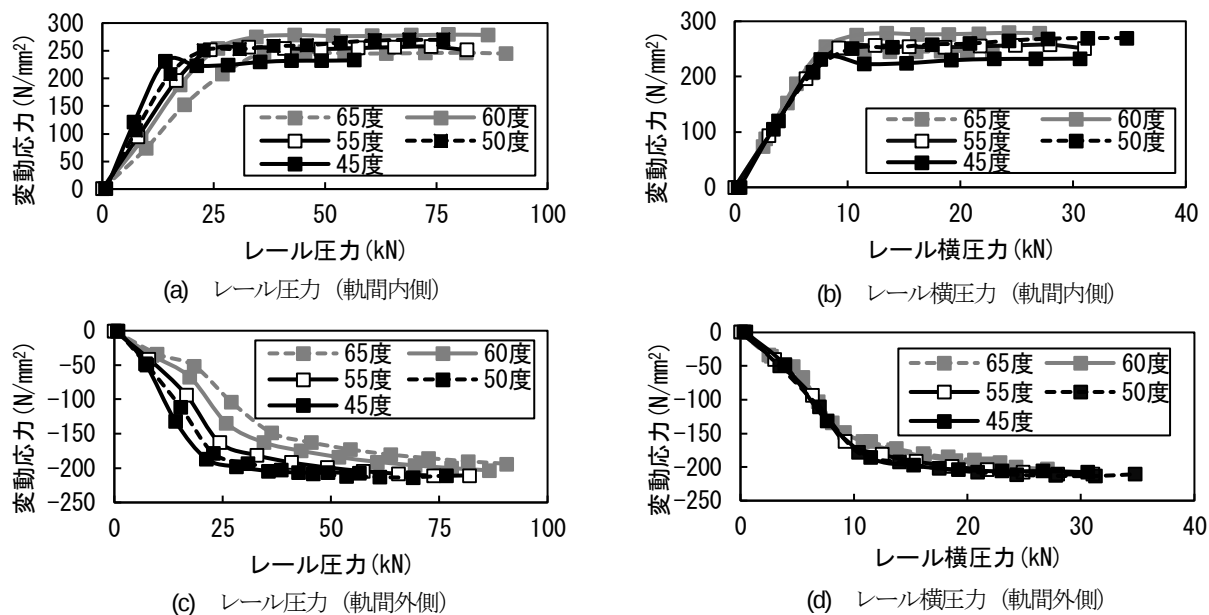


図-5 レール圧力・横圧力と変動応力の関係

加とともにレールの小返りが過大となり、安定した荷重が困難となることから、載荷荷重は45度は最大80kNまで、50度～65度は最大100kNまでとした。

(3) 応力推定式の算定

試験で載荷させた荷重をレール圧力・横圧力に分離し、これらと締結ばねの変動応力の関係について分析した。図-5に軌間内側および軌間外側の締結ばねにおけるレール圧力・横圧力と変動応力の関係を示す。軌間内側の締結ばねでは、載荷荷重の増加に伴って引張の応力が発生するのに対して、軌間外側の締結ばねでは圧縮の応力が発生している。これは、載荷荷重の増加に伴ってレールが軌間外側に小返ることで、軌間内側締結ばねのレール押さえ面が持ち上がり、反対に軌間外側締結ばねのレール押さえ面は沈みこむことが要因として考えられる。

次に試験結果を用いて、締結ばねの変動応力に関する重回帰分析を実施した。締結ばねの変動応力を目的変数、レール圧力およびレール横圧力を説明変数とすると次の回帰式で表すことができるものとする。

$$S = a \cdot W + b \cdot H + c \quad (3.1)$$

ここで、 S ：変動応力 (N/mm^2)、 W ：レール圧力 (kN)、 H ：レール横圧力 (kN)、 a, b ：偏回帰係数、 c ：定数項 である。

重回帰分析の結果を表-1に示す。軌間内側および軌間外側の重相関係数はともに0.83であり、いずれも締結ばねの変動応力とレール圧力およびレール横圧力は概ね相関があることを確認した。また、標準偏回帰係数に着目すると、軌間内側締結ばねの変動応力に対してはレール圧力の方が寄与する一方、軌間外側締結ばねの変動応力に対してはレール横圧力の方が寄与することがわかった。

表-1 重回帰分析の結果

位置	偏回帰係数 (標準偏回帰係数)		定数項	重相関係数
	a	b	c	R
軌間 内側	1.52 (0.48)	1.73 (0.20)	110.4	0.83
軌間 外側	-0.51 (-0.19)	-5.52 (-0.74)	-47.9	0.83

4. レール締結装置の余寿命推定手法

(1) 余寿命推定手法の概要

図-6にレール締結装置の寿命推定フローを示す。まず、入力する輪重 $P_i (1 \leq i \leq m)$ および横圧 $Q_j (1 \leq j \leq n)$ の分布を定め、これらの確率密度 $f(P_i) (1 \leq i \leq m)$ および $g(Q_j) (1 \leq j \leq n)$ を定義する。なお、 m および n は確率密度における頻度分布の階級の数に相当する。また、実軌道では輪重・横圧が分散し、レール締結装置一組に対してレール圧力 W_i およびレール横圧力 H_j として軌道部材に作用することを踏まえ、その分散荷重を過去に開発した非線形有限要素法を用いたレール小返りモデル¹³⁾(以下、「レール小返り解析モデル」という。)を用いて求める。応答値 S_{ij} (レール締結装置の締結ばねの変動応力)は、前章で得られた重回帰式により算定する。

次に、変動応力 $S_{ij} (\text{N/mm}^2)$ に対する疲労被害 $(1/n_{ij})$ を算出する。まず、レール圧力 W_i およびレール横圧力 H_j が作用した際の締結ばねの変動応力 S_{ij} を算定し、締結ばねに発生する変動応力および平均応力を考慮した0からの両振り片振幅に換算した応力振幅 S'_{ij} に換算する⁹⁾。

$$S'_{ij} = \frac{\sigma_T}{\sigma_T - \sigma_m} \sigma_A \quad (4.1)$$

ここで、 σ_T ：ばね鋼の真破断強度（ $=2,070\text{N/mm}^2$ ）， σ_m ：平均応力（ N/mm^2 ）， σ_A ：応力振幅（ N/mm^2 ）であり，図-7 に換算のイメージを示す．同図の S'_{ij} と σ_T を結ぶ線は，ある破壊確率で疲労破壊する時間強度線を示すものであり，その条件の下で応力換算を実施している．なお，平均応力と応力振幅は下式を用いて求める．

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_A = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (4.3)$$

ここで、 $\sigma_{\max}$ および $\sigma_{\min}$ は無載荷時の締結ばねの応答値（締結時応力）と W_i および H_j が作用した際の応答値により定まる（図-8）．

次に，ばね鋼の S-N 曲線（レール締結装置の寿命推定に用いられる破壊確率 10%のもの）の式は，過去の知見⁹⁾に基づき次に示される．

$$\begin{cases} S'_{ij} = -100 \log_{10} n_{ij} + 1000 & (n_{ij} \leq 10^7) \\ S'_{ij} = 300 & (n_{ij} > 10^7) \end{cases}$$

上式を変形すると，応力振幅 S'_{ij} に対する寿命 n_{ij} （回）は $n_{ij} \leq 10^7$ の範囲において，

$$n_{ij} = 10^{\left(\frac{1000 - S'_{ij}}{100}\right)} \quad (4.4)$$

と表され，この逆数 $(1/n_{ij})$ が 1 車軸通過時の疲労被害である．

一方，変動応力 S_{ij} の発生確率は P_i と Q_j の同時発生確率によって求めることができ，

$$\{f(P_i) \cdot g(Q_j)\} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (4.5)$$

と表される．したがって，1 回の車軸通過時に期待される疲労被害は，(4.5)式に示すように発生応力の発生確率（輪重・横圧の同時発生確率）と疲労被害の積の総和となる．

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{f(P_i) \cdot g(Q_j)}{n_{ij}} \quad (4.6)$$

累積疲労被害則では，この累積値が 1 となった時点で疲労寿命に達したと判定するので，通過軸数を N （軸）とおけば，

$$N \cdot \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{f(P_i) \cdot g(Q_j)}{n_{ij}} \right\} = 1 \quad (4.7)$$

となる．(4.7)式を満足する N の値が疲労寿命（軸）であり，軸重を乗じて累積通過トン数に換算することができる．

(2) レール締結装置の損傷を考慮した分散荷重算定

a) レール小返り解析モデルの概要

レール締結装置一組当たりに作用する分散荷重，すなわちレール圧力 W_i およびレール横圧力 H_j を，前項で示したレール小返り解析モデルを用いて算出する．図-9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

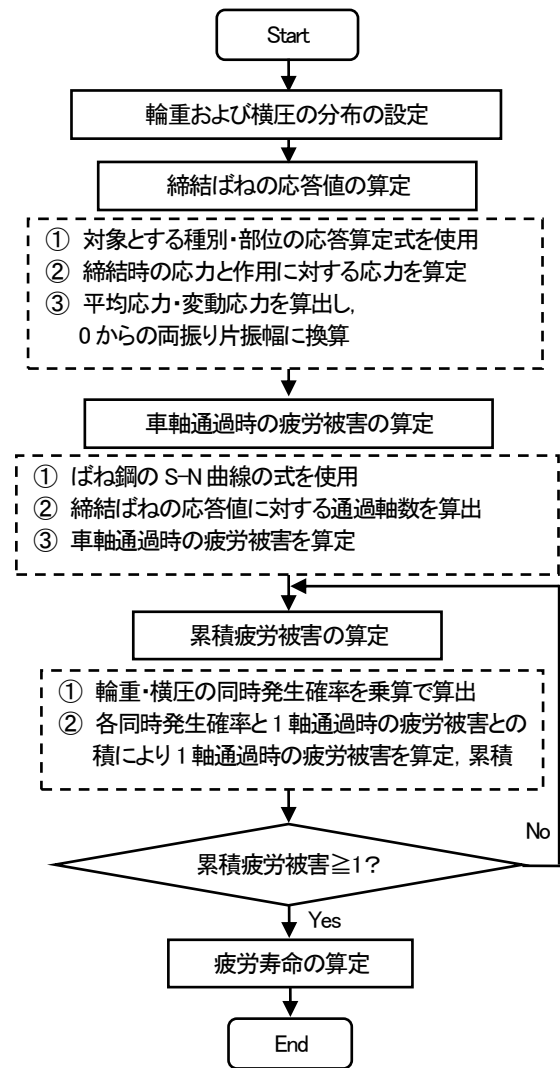


図-6 レール締結装置の寿命推定フロー

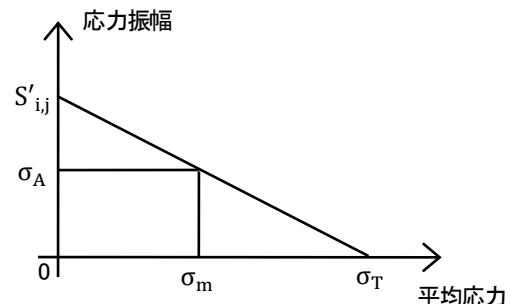


図-7 発生応力の換算のイメージ

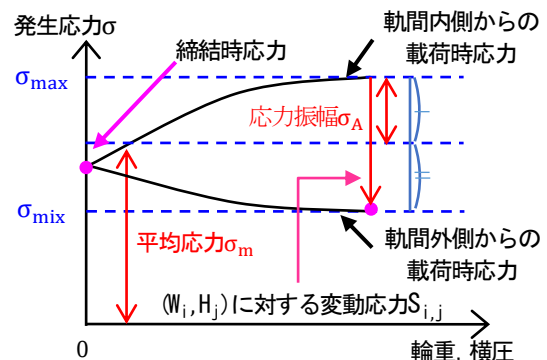


図-8 平均・変動応力の考え方

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、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。

b) レール小返り解析モデルの拡張

弟子丸ら²⁾は本解析モデルを拡張し、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。）を再現し（図-10）、室内試験との比較により拡張モデルの妥当性を確認している。本研究では、前述の拡張モデルを用いて締結ばねの先端ばね剛性およびレール締結装置の横方向ばね剛性を0に近づけることで、レール締結装置の損傷を模擬した解析を行った。

5. レール締結装置の損傷を考慮した余寿命推定

前述した余寿命推定手法に基づき、レール締結装置の損傷パターンを複数設定したパラメータスタディを実施し、レール締結装置の損傷が近傍箇所の分散荷重に与える影響を明らかにするとともに、レール締結装置の余寿命を試算した。

(1) 余寿命推定の条件

表-2に解析条件の概要を示す。まくらぎ間隔および損傷パターンをそれぞれ3パターン、浮きまくらぎを有、無の2パターン設定した。また、損傷発生時期を累積通過トン数2,000万トン到達時と仮定した。

ここで、輪重の確率密度 $f(P_i)$ ($1 \leq i \leq m$)および横圧の確率密度 $g(Q_j)$ ($1 \leq j \leq n$)はレール締結装置の性能照査⁴⁾に用いる設計作用の考え方を準用し正規分布に従うと仮定した。具体的には、本照査で用いられるA荷重（極まれに発生する極大荷重）を平均値+3×標準偏差となる値とし、B荷重（しばしば発生する最大荷重）を平均値+標準偏差となる値とする。そのうえで、輪重の確率密度 $f(P_i)$ は、平均荷重 P_{mean} を75kN、A荷重（平均値 P_{mean} +3×標準偏差 P_{SD} ）を97.5kNとして算出されるものとした。また、横圧の確率密度 $g(Q_j)$ は、軌間内側載荷時はA荷重（平均値 Q_{mean} +3×標準偏差 Q_{SD} ）を60kNとし、軌間外側載荷時はB荷重（平均値 Q_{mean} +標準偏差 Q_{SD} ）を30kNとして、標準偏差 Q_{SD} (kN)を3パターン設定し、それに合わせて平均荷重を設定した。設定した輪重および横圧の確率密度分布を図-11に示す。

a) 損傷パターン

軌間を適正に保持するという観点から、鉄道事業者で

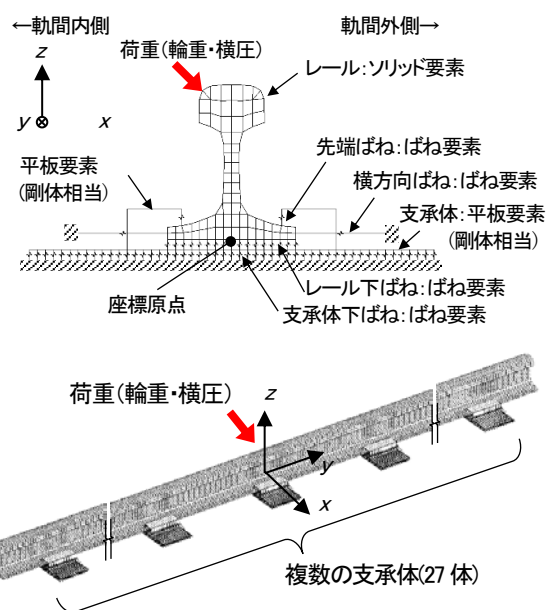
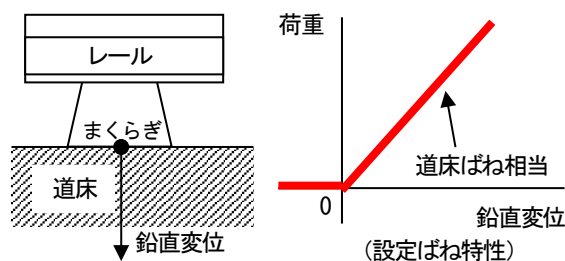
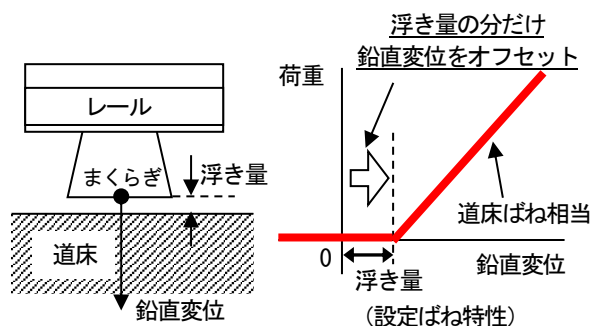


図-9 レール小返り解析モデルの概要



(a) 適切な支持状態



(b) 浮きまくらぎ状態

図-10 浮きまくらぎのレール支承体下ばね特性

表-2 解析条件

レール種別	JIS 50kgN レール
レール締結装置	e2009 (50kgN 用)
まくらぎ間隔	610, 735, 1041mm
曲線半径	600m 以下
車両軸重	150kN
損傷パターン	3 パターン
浮きまくらぎ	有, 無
損傷発生時期	累積通過トン2,000万トン

は連続したレール締結装置の不良を未然に防止する保守管理を実施している。そこで、図-12のとおり2～3箇所

続の不良が発生する前段の状況を損傷パターンとして設定し、荷重作用位置であるまくらぎCにおいてレール締結装置の損傷が発生するまでの余寿命を検証することとした。

b) 浮きまくらぎ

浮きまくらぎの設定範囲は、図-13に示すとおり荷重作用位置であるまくらぎCに隣接するまくらぎDからHまでの連続5本分の直下とした。これは、荷重作用位置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、荷重作用位置直下のまくらぎにおけるレール圧力が顕著に大きくなる傾向にあることが確認されているためである²⁾。また、浮きまくらぎの実態調査結果⁷⁾によると、図-14に示すとおり連続した浮きまくらぎの延長は、まくらぎ間隔に関わらず、3m以下が約90%、5m以下が約98%を占めている。本実態を踏まえ、連続した浮きまくらぎの最大延長を考慮し、浮きまくらぎ本数を5本に統一した。

浮き量は、図-13のとおりに浮きまくらぎの実態に応じてまくらぎ別に1~4mmを設定し、図-10に示す方法でレール支承体下ばねを設定した。

以上の推定条件を組み合わせ、表-3に示す計10パターンの解析パターンを設定した。

(2) 余寿命推定結果

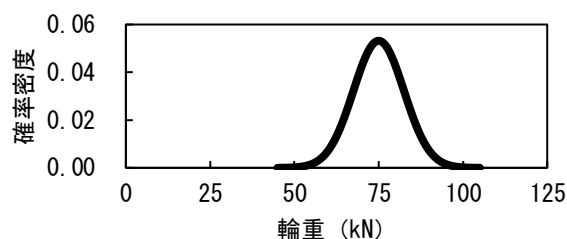
図-15に解析結果を示す。以下に、レール横圧力の確率密度分布、損傷パターン、まくらぎ間隔および浮きまくらぎの影響について考察する。

a) レール横圧力の確率密度分布の影響

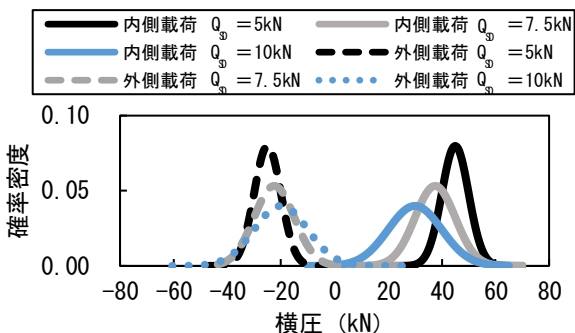
図-15より、レール横圧力の分布設定に用いた標準偏差を小さく設定するほど余寿命が短くなることがわかった。また、解析パターン1~10における余寿命の大小関係は標準偏差の設定に関わらず同様の傾向を示した。

b) 損傷パターンの影響

解析パターン1~3を比較すると、浮きまくらぎ無し、かつ同一まくらぎ間隔の場合、最も軽微な損傷パターンである①に対して、損傷パターン②と③ではいずれも余寿命が短くなり、特に③の損傷パターンの場合が最も余

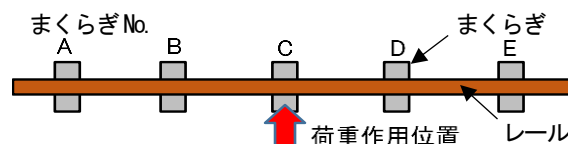


(a) 輪重の分布



(b) 横圧の分布

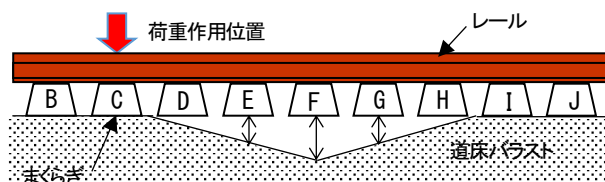
図-11 輪重・横圧の確率密度分布



まくらぎ No.	A	B	C	D	E
損傷パターン①	○	×	○	○	○
損傷パターン②	×	×	○	○	○
損傷パターン③	○	×	○	×	○

凡例 ○：損傷なし，×：損傷あり

図-12 損傷パターン



まくらぎ No.	B	C	D	E	F	G	H	I	J
浮きまくらぎの有無	無	無	有	有	有	有	有	無	無
浮き量 (mm)	/	/	1	3	4	3	1	/	/

図-13 浮きまくらぎの設定

表-3 解析パターン

解析パターン No.	まくらぎ間隔	損傷パターン	浮きまくらぎ
1	610mm	①	無
2		②	
3		③	
4	735mm	①	有
5		②	
6		③	
7	1041mm	①	無
8		③	
9		①	
10		③	

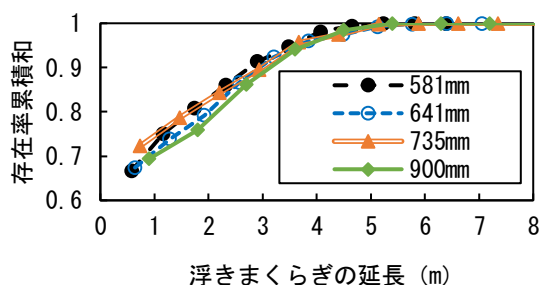


図-14 まくらぎ間隔別浮きまくらぎの延長

寿命が短くなることを確認した。解析パターン1~3におけるまくらぎ位置別のレール圧力およびレール横圧力を確認したところ、図-16に示すとおり各解析パターンにおいてレール圧力に差異はみられないものの、荷重作用位置におけるレール横圧力は解析パターン3が最も大きく、解析パターン1が最も小さい結果となった。これより、余寿命に対する影響因子としてレール横圧力が支配的であることがわかった。

c) まくらぎ間隔の影響

標準偏差 $Q_{SD}=5\text{kN}$ のレール横圧力の確率密度により算出した結果を例として、浮きまくらぎ無し、かつ同一損傷パターンである解析パターン1, 7, 9および解析パターン3, 8, 10の比較結果を図-17に示す。まくらぎ間隔が拡大するほど余寿命は低下するが、その低下比率はまくらぎ間隔が拡大するほど小さくなる結果となった。これは、まくらぎ間隔の増加割合と比べて分散荷重の増加割合が小さいことが原因として考えられる。まくらぎ間隔が拡大した場合、一組当たりのレール締結装置に作用する分散荷重は増加するが、一方で、単位長さ当たりの上下・横方向のばね係数が小さくなるため分散荷重は減少する。この分散荷重を増加および減少させる2つの効果を考慮すると、一組当たりのレール締結装置に作用する分散荷重は、まくらぎ間隔が拡大するほど低下させる効果をより大きく受けると推測される。

d) 浮きまくらぎの影響

同一まくらぎ間隔かつ同一損傷パターンを設定した、解析パターン1と4, 2と5, 3と6をそれぞれ比較すると、浮きまくらぎを設定することで、まくらぎ間隔・損傷パターンに依らず、4割程度余寿命が短くなった。

6. 単一荷重による評価手法の検討

前章では、作用させる輪重・横圧の確率密度分布を仮定し、分散荷重の算定およびレール締結装置の余寿命を推定した。しかし、輪重・横圧の確率密度分布は、走行する車両形式や軌道構造によって異なることから、レール締結装置の余寿命を推定する際には、その都度、車両走行試験による輪重・横圧測定が必要となるため多大な労力を要する。そこで、本章では、輪重・横圧の確率密度分布を考慮せず、単一の荷重を作用させた余寿命評価を行い、確率密度分布を考慮した場合との比較を実施した。

(1) 単一荷重の設定方法

ここでは単一荷重を2パターン設定した。1つは、レール締結装置の損傷発生以前は平均的な荷重が作用する状態、すなわちレール締結装置の性能照査に用いるC荷重が作用し、損傷発生後はA荷重およびB荷重が交互に作

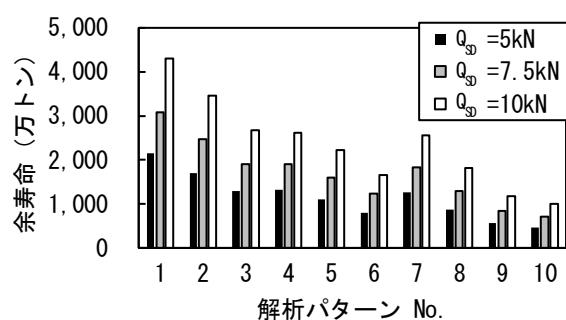
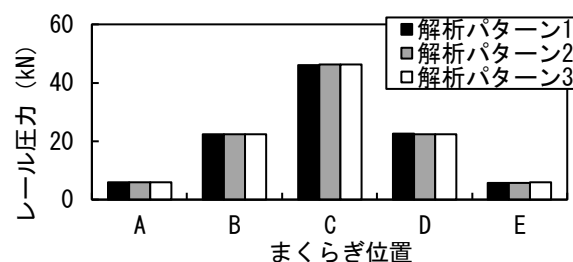
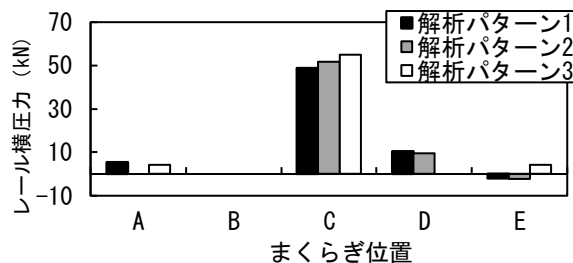


図-15 余寿命推定結果



(a) レール圧力



(b) レール横圧力

図-16 まくらぎ位置別のレール圧力・横圧力

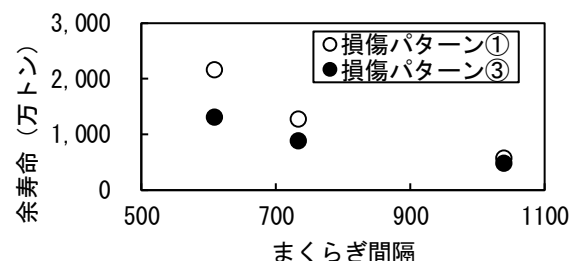


図-17 損傷パターン別まくらぎ間隔と余寿命の関係

用するパターンとした。もう一方は、レール締結装置の損傷が発生した後も常時C荷重が作用するパターンとした。なお、損傷発生時期はいずれも累積通過トン数2,000万トン到達時とした。

(2) 余寿命推定結果の比較

図-18に損傷発生後はA荷重およびB荷重が交互に作用するパターンの解析結果を、図-19に常時C荷重が作用するパターンの解析結果を示す。図-15に示す輪重・横圧の確率密度分布を設定した結果と比較すると、各解析パターン間の大小関係に大きな差異はないものの、損傷発生後にA荷重およびB荷重が交互に作用するパターンでは余寿命が顕著に短くなる結果となり、常時C荷重が作

用するパターンでは顕著に長くなる結果となった。

以上より、余寿命算定方法の違いが余寿命推定結果に与える影響が明らかとなった。本研究で提案した算定手法の妥当性を確認するためには、レール締結装置の損傷実態を明らかにするとともに、列車走行時の輪重・横圧の発生実態の把握することが必要である。今後、これらの要素を推定手法に反映し精度向上に繋げていく。

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) 既往研究で提案されたレール締結装置に対する分散荷重算定法と寿命推定法を用いて、レール締結装置の損傷が近傍箇所の分散荷重に与える影響について検討するとともに、レール締結装置の余寿命推定を行った。
- (2) 今回設定した損傷パターンでは、荷重作用位置の両隣のレール締結装置が損傷した条件下で最も余寿命が短くなる結果となった。また、損傷パターンの違いによる余寿命の差異はレール横圧力による影響が支配的であることがわかった。
- (3) まくらぎ間隔が大きくなるほどレール締結装置の余寿命は短くなるが、その減少比率はまくらぎ間隔が大きいのほど小さくなった。これは、まくらぎ間隔の増加割合と比べて分散荷重の増加割合が小さいことが原因として考えられる。
- (4) 損傷パターンの差異によらず、浮きまくらぎを設定することでレール締結装置の余寿命が4割程度短くなる結果となった。
- (5) 単一荷重による評価を実施した結果、輪重・横圧の確率密度分布を設定した結果とは大きく異なる結果となった。

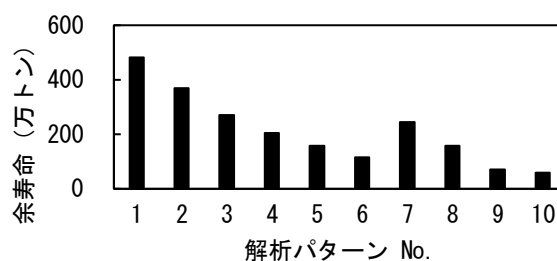


図-18 単一荷重を用いた余寿命推定結果
(損傷発生後 A 荷重および B 荷重が作用するパターン)

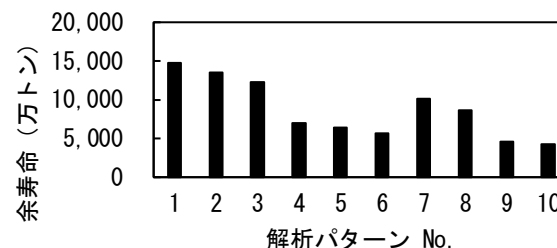


図-19 単一荷重を用いた余寿命推定結果
(常時 C 荷重が作用するパターン)

参考文献

- 1) 弟子丸, 片岡, 園田: 軌道の支持状態がレール締結装置に作用する荷重分散に及ぼす影響の研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第 23 号, 2019.
- 2) 弟子丸, 庄野, 片岡, 古川: 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, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第 18 号, 2014.
- 3) 玉川, 片岡, 弟子丸: 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.
- 4) 国土交通省監修: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (軌道構造), 2012.
- 5) 日本材料学会編: 疲労設計便覧, 普賢堂, 1995.
- 6) 軌道構造と材料-軌道・材料の設計と維持管理-, 交通新聞社, 2001.
- 7) 楠田, 西宮: まくらぎの支持状態を考慮した 軌道の座屈発生温度に関する研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.75, 2019.

(2020.4.3 受付)

A Study on Effect of Failure of Rail Fastening Systems to Redundancy of Track

Shinichi OHTA, Tadashi DESHIMARU and Masanobu KUSUDA

For more efficient maintenance of the rail fastening systems, a study regarding a prediction of the timing of damage of rail clips is conducted. In previous studies, all fastening systems are assumed that they are not broken when calculating distributed loads acting on the fastening systems. On the other hand, when rail clips break, the loads acting on the point locating near a broken clip vary in practice, although there is no discussion considering this effect.

In this study, a parametric study was carried out by using the distributed load calculation method and the fatigue life estimation method for fastening systems proposed in previous studies. By this parametric study under the condition where multiple damage patterns of fastening systems were set, the relationship between the condition of rail clip breaks and the distributed loads became clear. Based on the result, the remaining life of the fastening systems was estimated, and the damage condition effect on the redundancy, which means the margin of fatigue life against required essential life for maintenance, was clarified.