

既設 PC まくらぎに適用可能な 無螺締板ばね式レール締結装置の開発

山岡 大樹* 弟子丸 将** 玉川 新悟*

Development of Unloosening Rail Fastening System with Leaf Spring Clip
and Existing Concrete Sleeper

Daiki YAMAOKA Tadashi DESHIMARU Shingo TAMAGAWA

Rail fastening systems using leaf spring clips and bolts are widely used in Japan. This rail fastening system requires regular maintenance to prevent the bolts from loosening. Some railway companies are replacing rail fastening systems using leaf spring clips with boltless rail fastening system using round bar clips in order to eliminate the need for re-tightening of bolts. This replacement involves replacing existing concrete sleepers with dedicated sleepers for round bar clips. Therefore, some railway companies find it difficult to introduce boltless rail fastening systems using round bar spring clips due to construction costs and labor. In response to this problem, we have developed unloosening rail fastening systems using leaf spring clips and existing concrete sleepers.

キーワード：板ばね，既設 PC まくらぎ，無螺締，レール締結装置，締結座金，締結工具

1. はじめに

現在国内で使用されているレール締結装置は，締結ばねを，ボルトやナットの回転によりたわませてレールを押さえつける「螺締式」と呼ばれる方式が主流である。国内で導入されている螺締式レール締結装置では，一般的に板状のばね鋼を加工した板ばねが使用されている。図1に螺締式レール締結装置の一例として，国内において汎用的な5N形レール締結装置（3号PCまくらぎ用・在来線50kgNレール用）を示す。螺締式レール締結装置は，レールを押さえつける力（以下，レール押さえ力）を維持するために，ボルトの緩みを定期的に管理し，緩みが確認された場合には締結トルク等の指標に基づいた締め直しを行う必要がある。

これに対して，ボルトやナットの締め直しが不要なレール押さえ方式を「無螺締式」という。図2に無螺締式レール締結装置の一例として，国内で普及しているe2009クリップを示す。本レール締結装置は線状のばね鋼を加工した線ばねを使用したものであり，あらかじめPCまくらぎに埋め込まれたショルダーに，専用工具で線ばねを差し込むことで，所定のレール押さえ力が発現される。そのため，板ばねを用いた螺締式レール締結装置を，線ばねを用いた無螺締式レール締結装置に置き換えることで，ボルトの締め直し作業を省力化することができる。

しかしこの置き換えの際には，既設のPCまくらぎを，線ばねに対応したPCまくらぎに取り換える作業が必要であり，工事の労力と設備投資費の面で線ばねを用いた無螺締式レール締結装置の導入が困難な鉄道事業者がある。

そこで既設のPCまくらぎを撤去せずにその構造を活

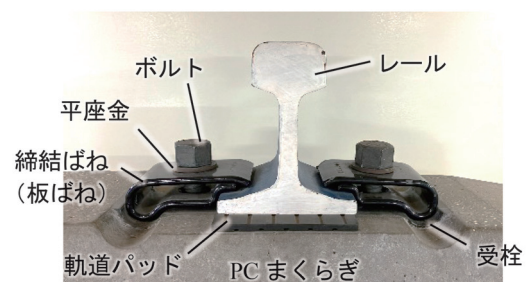


図1 螺締式レール締結装置の一例
(5N形レール締結装置)

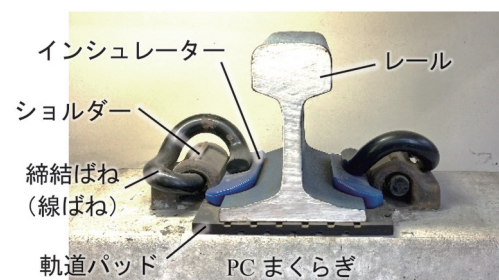


図2 無螺締式レール締結装置の一例
(e2009クリップ)

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

** 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

用できる、板ばねを用いた無螺締式レール締結装置（以下、無螺締板ばね式レール締結装置）を開発した^{1) 2)}。

2. 無螺締板ばね式レール締結装置の構造検討

2.1 適用対象と要求仕様

無螺締板ばね式レール締結装置の適用対象として、前述の5N形レール締結装置を選定した。

無螺締板ばね式レール締結装置の構造検討にあたり、以下の要求仕様を設定した。

- ・既設のPCまくらぎの構造を活用できること
- ・既設のPCまくらぎへの設置が容易であること
- ・レールを締結後、部材の緩みを生じないこと

2.2 構造案の検討

部材点数や製作の容易さ、部材強度の観点から踏まえ、図3に示す構造を考案した。構成部材は、板ばね・ボルト・締結座金の3点である。本構造案は、あらかじめPCまくらぎの埋込栓にボルトを接着剤で固定したうえで板ばねをまくらぎ座面の受栓に設置し、ボルトと板ばねの間に締結座金を差し込むことで、板ばねの上ばね部が下ばね部に押しつけられ、レールが締結されることを期待したものである。

2.3 構成部材の試作

2.2節で考案した無螺締板ばね式レール締結装置の構造案を踏まえて、構成部材である板ばね・ボルト・締結座金を試作した。図4に試作した構成部材の外観を示す。

板ばねについては、5N形レール締結装置の板ばねと断面形状は同一とした。ただし、ボルトを埋込栓に固定した後に板ばねを脱着できるように、板ばねの円孔部はボルト頭部が通過できる大きさとした。また、板ばねのたわみ時に上ばね部と下ばね部が接触するより先に、上ばね先端がレールに接触し、ボルトと板ばねの隙間が想定よりも小さくなる場合もあることが懸念された。そこで、上ばね部先端に曲げ加工部を設けず、レール締結過程で上ばねと下ばねが先端で必ず接触する形状とした。

締結座金については、ボルト幹部を囲う形で、ボルトと板ばねの間に差し込むことができるようにコの字型構造とした。また、締結座金の上面は、ボルト首下部と嵌合する形状がより有効であると考えられるものの、ここでは試験的に平滑形状とした。

ボルトについては、ボルト首下からまくらぎ座面までの距離が一定になるように、ボルト幹部に異なる径のフランジ部を設定して、フランジ部より上部はボルトが挿入されない構造とした。なお、ボルト首下からフランジ部までの距離は標準寸法で51mmとし、加工時の許容寸法誤差は $\pm 0.5\text{mm}$ とした。また、締結座金の上面と

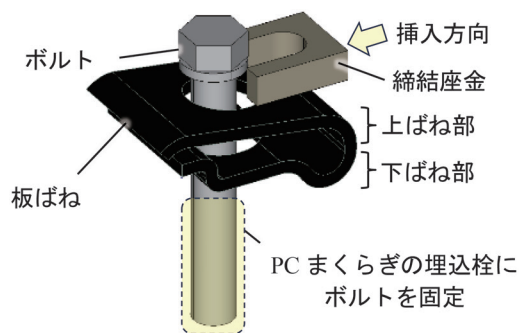


図3 無螺締板ばね式レール締結装置の構造案



図4 試作した構成部材の外観

接触する首下部は、締結座金と同様に試験的に平滑形状とした。

2.4 レール締結方法

図5にレール締結方法の概念図を示す。具体的なレール締結の手順は以下の通りである。

- ① 板ばねをたわませて、上ばね部と下ばね部を接触させた状態とする。
- ② ①の状態を維持している間に、締結座金をボルトと板ばねの隙間に設置する。
- ③ 板ばねのたわみ状態を解放し、板ばねの復元力によりボルトとの間で締結座金を挟み込んでレールを締結する。

上記の手順でレール締結を実施したところ、ボルトに大きな負荷をかけることなく、図6のように締結できる

ことを確認した。

2.5 レール押え力の検討

開発した無螺締板ばね式レール締結装置では、螺締式レール締結装置と異なり、締結時に締結トルクが作用しないことによりレール押さえ力が5N形レール締結装置と比較してやや小さくなるのが懸念される。そこで本レール締結装置のレール押さえ力について検討した。

レール押さえ力はふく進抵抗に影響するパラメータであり、両者には以下のような関係がある³⁾。

$$\gamma = 2P\mu_1 + 2P\mu_2 \quad (1)$$

ここで、 γ ：レール締結装置1組（締結ばね2個）のふく進抵抗（kN）、 P ：締結ばね1個あたりのレール押さえ力（kN）、 μ_1 ：レールと締結ばねの摩擦係数、 μ_2 ：レールと軌道パッドの摩擦係数である。

バラスト軌道用レール締結装置のふく進抵抗は、一般的に道床縦抵抗の標準値 $6\sim 10\text{kN/m}^3$ を上回る必要がある。そこで、ふく進抵抗が道床縦抵抗の標準値の最大である 10kN/m を上回るために必要な締結ばね1個あたりのレール押さえ力 P を、まくらぎ間隔を 641mm 、 $\mu_1 = 0.25^{4)}$ 、 $\mu_2 = 0.65^{4)}$ として式(1)より逆算すると、 3.56kN となる。

無螺締板ばね式レール締結装置のレール押さえ力を把握するため、FEMによる線形弾性解析を実施した。図7に板ばねの解析モデルを示す。使用した解析ソフトはNX Nastran ver.10.0である。本モデルでは、ボルト軸力が上ばね部中央において鉛直下方向へ作用するものとし、その拘束反力として下ばね部の先端でレール押さえ力が、下ばね部の尻部で残りの反力が生じるものとした。板ばねの初期開口量は 9mm であり、たわみ時の上ばね部と下ばね部の接触は考慮しないものとした。板ばねのたわみ量は、上ばね部の先端とボルト軸力の作用点の2か所で取得した。

図8に、解析で得られた板ばねのたわみ量とレール押さえ力の関係を示す。上ばね部と下ばね部が接触するとき（上ばね部の先端におけるたわみ量が、初期開口量 9mm と等しくなる）のレール押さえ力は 4.08kN となり、確保すべきと考えられる前述のレール押さえ力 3.56kN を上回った。

また、レール押さえ力が 4.08kN となるときのボルト軸力の作用点におけるたわみ量は 3.97mm 、確保すべきとされる値である 3.56kN となるときのたわみ量は 3.46mm となり、この場合ボルト軸力の作用点におけるたわみ量の差は 0.51mm となる。ここで、ボルト首下からフランジ部までの距離については、加工上の許容寸法誤差を $\pm 0.5\text{mm}$ としている。そのため、板ばねを上ば

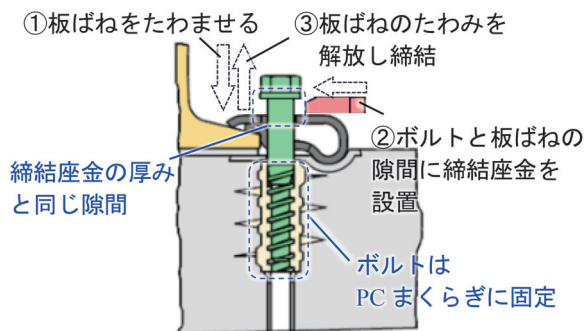


図5 レール締結方法の概念図

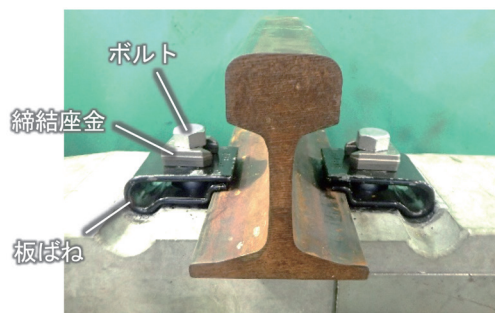


図6 締結状態

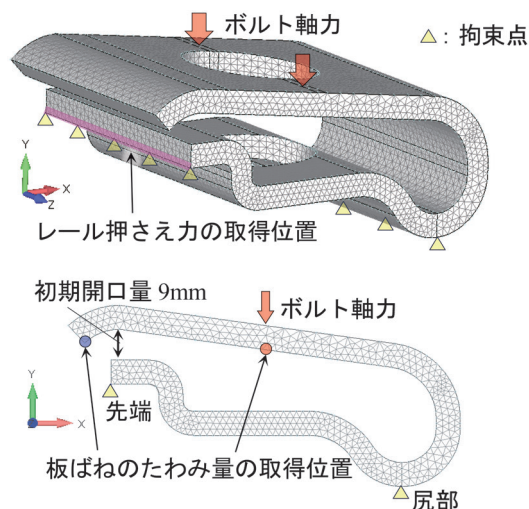


図7 板ばねの解析モデル

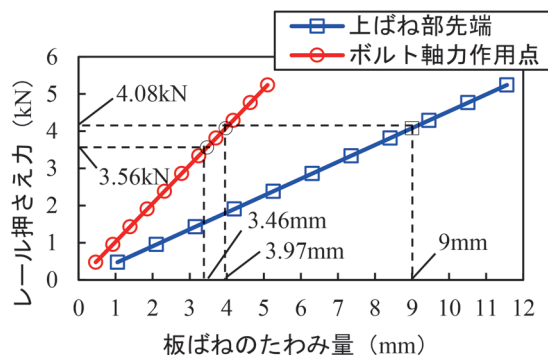


図8 解析結果

ね部と下ばね部が接触するまでたわませたときの、板ばねのボルト軸力の作用点におけるたわみ量も $\pm 0.5\text{mm}$ の誤差に収まることから、必要なレール押さえ力を確保できる設計となっている。

3. 性能評価試験

2次試作品の性能評価を目的として、レール締結装置の疲労破壊に関する安全性照査³⁾のための先端ばね定数試験および二方向载荷試験を実施し、さらにふく進抵抗試験を実施した。

3.1 先端ばね定数試験

板ばね先端の鉛直方向のばね定数である先端ばね定数と、締結時のレール押さえ力を把握するため、先端ばね定数試験を実施した。図9に試験状況を、図10に試験結果を示す。アクチュエーターを試験用レール頭部に固定し、レールがある程度上昇したところで軌道パッドを抜き取った後、上下方向に繰り返し载荷した。レール変位の符号はレールの上昇方向が正で、下降方向が負であり、上昇時の経路から先端ばね定数とレール押さえ力を把握した。先端ばね定数は板ばね1枚あたりに換算すると 1.0MN/m となった。レール押さえ力については板ばね1枚あたりに換算すると 4.10kN となり、2.5節で実施したFEM解析の結果と概ね一致した。

3.2 二方向载荷試験

表1に示す設計作用および軌道条件、先端ばね定数試験で取得した先端ばね定数、レール押さえ力をもとに、表2のとおり二方向载荷試験の载荷条件を算定し⁵⁾、試験を実施した。なお、本試験ではボルトにエポキシ樹脂系の接着剤を塗布してPCまくらぎに固定した。

図11に二方向载荷試験の状況を示す。試験は、2つのアクチュエーターで片側ずつレールに対して静的に载荷し、板ばねの発生応力やレール頭部左右変位量を把握する静的载荷試験と、2つのアクチュエーターを交互に動的に载荷したときの部材異状の有無を確認する動的载荷試験の2つを実施した。

図12に静的载荷試験で得られた板ばねの発生応力を、板ばねの材質であるSUP9の耐久限度線図上にプロットしたものを示す。板ばねの応力状態は、第2破壊限度線および第2へたり限度線の内側に入っており問題なかった。また、試験用レールに生じた頭部左右変位量から換算した 50kgN レールの頭部左右変位量の設計応答値は 0.5mm 程度であり、在来線の設計限界値である 7.0mm より小さかった。

動的载荷試験は、载荷周波数 5.5Hz で100万サイクル実施した。試験の結果、载荷完了後に締結座金の脱着

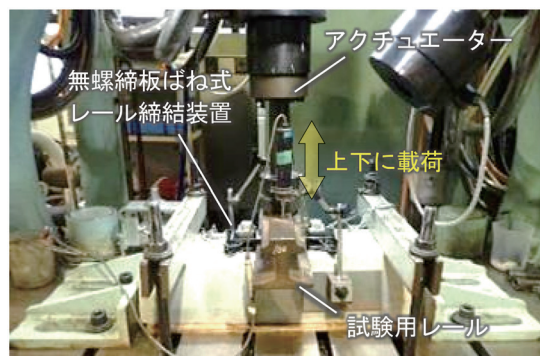


図9 先端ばね定数試験の状況

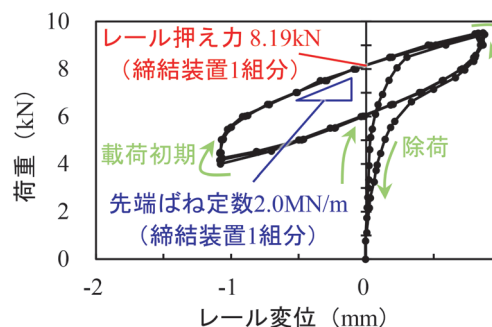


図10 先端ばね定数試験の結果

表1 設計作用および軌道条件

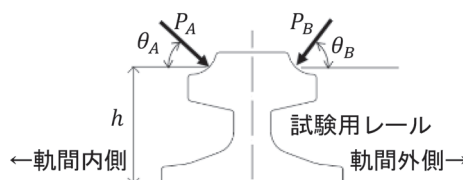
設計輪重	A 荷重 ^{※1} (kN)	98
	B 荷重 ^{※2} (kN)	86
設計横圧	A 荷重 ^{※1} (kN)	30
	B 荷重 ^{※2} (kN)	15
レール締結間隔 (mm)		641
軌道パッドばね定数 (MN/m)		110
まくらぎ下ばね定数 (MN/m)		40
横方向ばね定数 (MN/m)		90

※1 ごく稀に発生する極大荷重に相当

※2 しばしば発生する最大荷重に相当

表2 载荷条件

载荷荷重 P_A	最大値 (kN)	34.2
	最小値 (kN)	10.0
载荷角度 θ_A (度)		58.7
载荷荷重 P_B	最大値 (kN)	27.7
	最小値 (kN)	10.0
载荷角度 θ_B (度)		67.1
载荷点高さ h (mm)		100.0



や移動は認められず、部材の異状は認められなかった。

3.3 ふく進抵抗試験

図13にふく進抵抗試験の状況を示す。PCまくらぎを試験機定盤に固定した状態で、レールに長手方向に2回载荷し、ふく進抵抗を測定した。図14に試験結果を示す。ふく進抵抗は2回载荷分の平均でレール締結装置1組あたり7.78kNとなり、まくらぎ間隔641mmで換算すると12.1kN/mとなり、道床縦抵抗力10kN/mを上回る結果となった。

4. 締結工具の開発

提案したレール締結方法を実現するためには、作業工程の一つである板ばねを容易にたわませるための機構が必要である。そこで、人力施工方式と機械施工方式の2種類の工具を開発した。図15に開発したそれぞれの工具を示す。

人力施工方式は、電動の機械等を用いることなく、人力で板ばねをたわませる工具である。本方式は、レール首下で反力を取り、アームを操作者側に倒すことによりアーム先端で板ばねをたわませる、てこの原理を活用した機構である。

機械施工方式は、電動の機械等と組み合わせ、機械の出力を用いて、板ばねをたわませる工具である。工具の下部に取り付けられた2つの爪状プレートをレール底面に当てることで反力を取り、頭部に取り付けられた六角部を、保守作業で広く用いられるインパクトレンチ等の工具と連結して回転させ、工具内部に格納されたブロックにより板ばねをたわませる機構である。

この2種類の締結工具を用いて施工性の確認を実施した。その結果、どちらの締結工具についても、板ばねをたわませて上げね部を下げね部に密着させることができ、その状態でボルトと板ばねの隙間に締結座金を適切に設置できることを確認した。

5. 現地敷設試験

実際の敷設環境下での性能を確認する目的で、営業線への試験敷設を実施した。敷設場所は5N形レール締結装置が敷設されている、在来線の直線区間を選定した。図16に、前述の図15(a)に示した人力施工方式の締結工具を用いた施工の状況を示す。

無螺締結板ばね式レール締結装置の敷設数量はまくらぎ1本おきにまくらぎ計5本分（レール締結装置10組分）とした。人力施工方式の締結工具を用いて2.4節に示したレール締結の手順で施工し、図17に示すように本レール締結装置を営業線に問題なく設置できることを確認した。

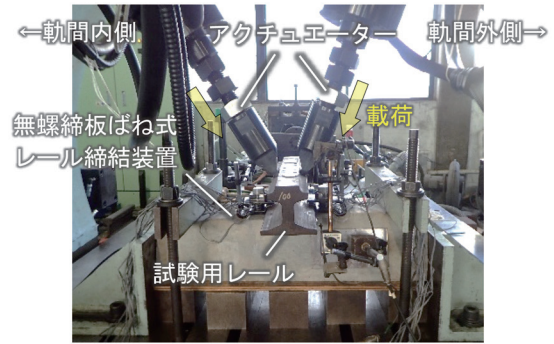


図11 二方向载荷試験の状況

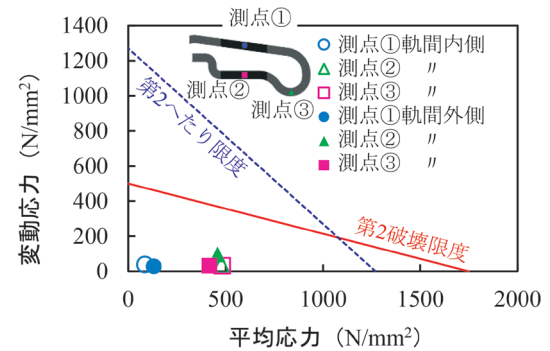


図12 静的载荷試験の結果（板ばねの発生応力）



図13 ふく進抵抗試験の状況

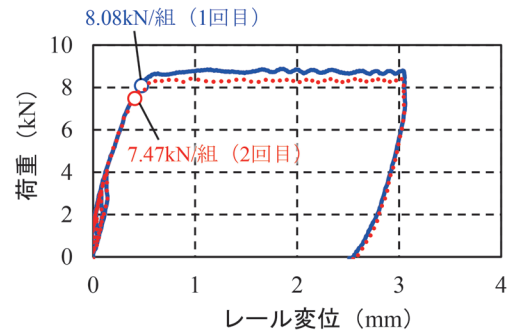
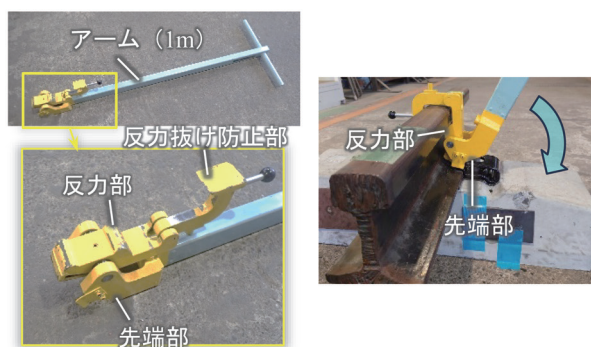


図14 ふく進抵抗試験の結果

6. まとめ

PCまくらぎの交換が不要で、その構造を活用した無螺締結板ばね式レール締結装置を開発し、性能評価試験で



(a) 人力施工方式



(b) 機械施工方式

図 15 考案した締結工具

実軌道に適用可能な性能を有していることを確認した。また、レール締結を容易に行うための締結工具を2種類開発し、施工性を確認した。

本レール締結装置は、締結座金の上面とボルト首下を平滑形状としても、動的載荷試験において締結座金の脱落や移動は認められなかった。ただし、製品化に向けては両部材が嵌合することで、脱落や移動を確実に防止できる構造を付加する予定としている。また、営業線への試験敷設後の経過観察を行いながら、接着剤の耐久性の検証などを進めるとともに、必要に応じてさらなる改良を行う予定である。

謝 辞

本研究における現地敷設試験の実施にあたり、西日本



図 16 締結工具を用いた施工の状況



図 17 敷設後の状況

旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 山岡大樹, 弟子丸将, 玉川新悟: 無螺締板ばね式レール締結装置の開発, 令和6年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会, VI-696, 2024
- 2) 山岡大樹, 弟子丸将, 玉川新悟, 佐藤弘規: トルク管理等が不要な無螺締板ばね式レール締結装置の開発, 新線路, Vol.78, No.7, pp.26-28, 2024
- 3) 国土交通省監修, (公財) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善出版, 2012
- 4) 宮本俊光, 渡辺偕年: 線路-軌道の設計・管理-, 山海堂, 1980
- 5) 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), Vol.73, No.2, pp.330-343, 2017