

非金属材料を主材料としたレール締結装置の開発と性能評価

松尾 淳史* 弟子丸 将* 栞田 吉弘** 鈴木 実**

Development and Performance Evaluation of Rail Fastening System Using Non-metallic Materials Applied to Its Main Components

Atsushi MATSUO Tadashi DESHIMARU Yoshihiro MASUDA Minoru SUZUKI

A function of rail fastening systems is to fasten rails to supporting structures such as sleepers. In addition to the fastening function, rail fastening systems are designed to provide a certain level of electrical insulation to prevent rail current from leaking through the supporting structures to the earth. Despite this, some cases have been reported where the electrical insulation of rail fastening systems has deteriorated in some installation environments, resulting in transport disturbances such as ground faults and short circuits. Thus, we studied the applicability of resin materials to the rail fastening components to prevent the reduction of the electrical insulation. Based on the results of this study, we produced a prototype of a rail fastening system using resin components and evaluated its performance. In order to evaluate the performance of the prototype, design reference values were proposed to reflect the influence of the installation environment on the material strength. The performance evaluation of the prototype based on the proposed value confirms that the prototype has the performance to be installed on a conventional rail track.

キーワード：レール締結装置, CFRP, FRTP, GFRP, 性能確認試験

1. はじめに

レール締結装置は、まくらぎや軌道スラブといった支承体上にレールを固定するための軌道部材であると同時に、レールに流れる信号電流および帰線電流が支承体に漏れ出ることを防止するためにレールと支承体間で一定の電気絶縁性を確保する構造となっている。一方で、営業線に敷設されているレール締結装置の中には、飛来物や湿潤環境下での塵埃の堆積等の影響により電気絶縁性が低下するものがあり、これらを原因として鋼桁とレールの間で地絡が生じ、火災や発煙事象につながり、大きな輸送障害に至った事例も報告されている。これらの課題を解決する手段として、塵埃の堆積する環境下でも所定の電気絶縁性を確保可能なレール締結装置の開発が考えられる。

また、現在実用に供しているレール締結装置の構成部材のうち締結ばね、図1中に示すタイプレートや図2中に示す横圧受金具などの列車からレールを介して伝達する荷重を負担する主要な部材は耐久性や加工性に優れた金属材料を適用しているため、電気絶縁性には劣る。それに対し、非金属材料は電気絶縁性の確保に必要な箇所限定して適用するに留まっていることから、主要な部材に非金属材料を適用することで、塵埃の堆積する環

境下でも電気絶縁性の低下の回避が期待できる。一方、これまでレール締結装置の主たる構成部材に非金属材料を適用した事例は少ないため、非金属部材の荷重を負担するための最適な構造や外的な作用に対する評価手法に関する知見がほぼない状況であった。

以上の背景を踏まえ、レール締結装置の電気絶縁性に起因する輸送障害の発生リスクの大幅な低減を目的として、非金属材料を主材料としたレール締結装置の実現可能性を検証した。本稿では、レール締結装置の主要な構成部材への非金属材料の適用性検討と、検討結果を踏まえて試作したレール締結装置の性能確認試験を実施したので報告する。

2. 検討対象とするレール締結装置の構成

2.1 検討対象とするレール締結装置種別の選定

非金属材料の適用性の検討は、既存のレール締結装置の構成部材を非金属材料に置き換えることを前提として実施した。今回、検討の対象とする基本構造として、直

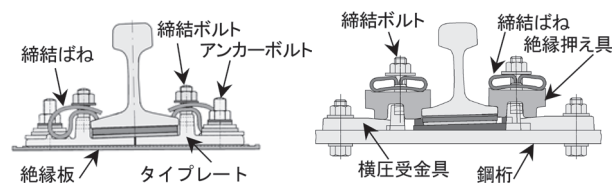


図1 直結8形
レール締結装置

図2 鋼直5形
レール締結装置

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

** 材料技術研究部 防振材料研究室

結8形レール締結装置(図1)を選定した。選定理由は、①電気絶縁性が求められている直結系軌道用レール締結装置の代表的な種別である。②レールとアンカーボルト締結位置とのレール直角方向の間隔は、他のタイププレート式の直結系軌道用レール締結装置と比較して狭く、塵埃の堆積による電気絶縁性能の低下の面から最も厳しい設計条件となる。以上の①と②より、直結8形レール締結装置を基本とした構造が実現できれば、その知見を他の直結系軌道へ応用することが容易であると考えられる。

2.2 構成部材に対する要求性能

レール締結装置の構成部材を非金属材料化した場合、電気絶縁性を向上できる一方、列車通過時のレールの沈みこみに対する締結ばねの追随性や列車からレールを介して伝達する水平方向の荷重に対する耐荷重性能が低下する可能性がある。そのため、部材別に所定の要求性能を定め、非金属材料の選定を実施した。本節では、直結8形レール締結装置の主要な構成部材である締結ばねおよびタイププレートを非金属材料に置き換えた場合に想定される課題を抽出し、部材ごとに実現すべき性能を検討した結果を述べる。

(1) 締結ばね

締結ばねを非金属材料化することの長所としては、電気絶縁性の向上に加えて、耐腐食性の向上があげられる。一方で、非金属材料化にあたっては、ばね特性の実現が課題となる。レールを直接押さえる部材として非金属材料を使用する場合、既往のレール締結装置では、図2のように非金属材料と金属製ばねの組み合わせでばね特性を実現していた。これは、金属製の板ばねのような、曲げに起因するたわみにより発揮するばね特性を非金属材料単独で実現することは、疲労強度の観点から困難であったためである。そのため、今回の検討では、非金属材料単独でばね特性を発揮できる材料と形状の実現を目的とした。

(2) タイプレート

現行の直結系軌道用レール締結装置では横圧受け装置としてタイププレートや横圧受け金具を使用していることが多い。これらを非金属材料化することによる長所として、部材の体積抵抗率が大幅に向上することから、大電流に対する電気絶縁性を確保しつつ、既存のレール締結装置において電気絶縁性を確保するために必要な絶縁板の機能を統合し、部材点数を減じることがあげられる。一方で、材料の機械的強度の違いから、耐荷重性能が金属材料製のものと比較して低下することが予想される。以上より、今回の検討では、横圧受け装置として十分な強度を有する材料と形状の実現を目的とした。

2.3 非金属材料の種別の選定

前節までの課題を踏まえ、部材に適用する非金属材料

表1 適用部材および材料種別

適用部材	目標とする性能	材料種別
締結ばね	非金属材料単体でのばね特性	CFRP
タイププレート	既往の締結装置相当の耐荷重性能	GFRP FRTP

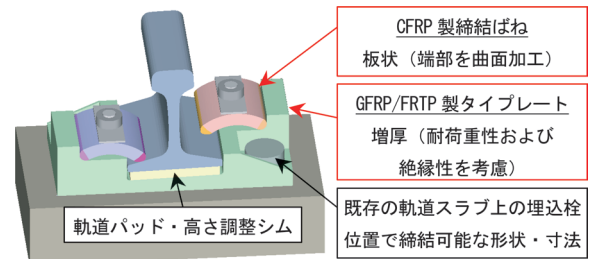


図3 提案構造の概要

の選定を実施した。選定にあたっては、レール締結装置の機能維持のための必要強度や許容変形量の観点から比較的機械的強度やヤング率が大きい繊維強化プラスチックを中心に検討した。その中から、疲労強度、耐候性、加工性および量産性を考慮し、

- ・炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRP)
 - ・ガラス繊維強化プラスチック(以下、GFRP)
 - ・ガラス短繊維強化熱可塑性プラスチック(以下、FRTP)
- の3種類を選定した。このうち、CFRPについては他の材料と比較して一般的には電気絶縁性に劣るものの、ばね特性の実現性に加え耐腐食性の向上が見込めることから、締結ばねへの適用を検討した。GFRPおよびFRTPについては電気絶縁性に優れることに加え、比較的高い機械的強度を有していることから、タイププレートへの適用を検討した。表1に適用する非金属材料種別、適用対象とする部材およびその要求性能の一覧を示す。

3. 非金属材料の適用性検討

3.1 非金属材料を用いたレール締結装置の構造提案と試作

適用性の検討にあたって、前節で決定した部材構成と材料について、これらを組合わせた構造の提案および試作を実施した。提案した構造の概要を図3に示す。提案にあたっては、寸法上の制約条件として、タイププレートのアンカーボルト用の長穴を既存の軌道スラブ埋込栓の設置位置と一致させ、互換性を確保するようにした。CFRP製締結ばねはボルト・ナット締結とし、形状は端部を曲面に成型した板状とすることでレールの高低調整に対して締結ばねの姿勢変形によって追随可能な構造である。GFRPおよびFRTP製タイププレートは直結8形レール締結装置に使用される絶縁板の機能を統合し部材

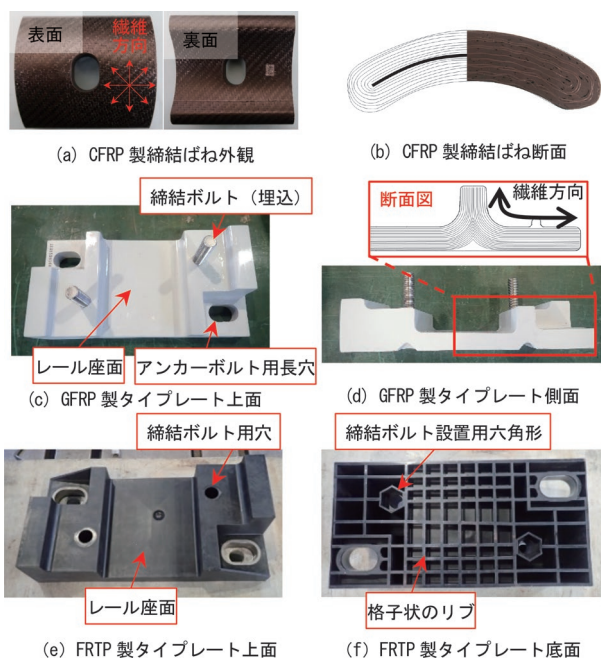


図4 開発した部材

表2 開発品の材料構成

部材	CFRP 製 締結ばね	GFRP 製 タイププレート	FRTP 製 タイププレート
樹脂	エポキシ樹脂	ビニルエステル樹脂	ポリアミド 610
繊維	カーボン (プリプレグ)	ガラス (織布)	ガラス (短繊維)
製法	プレス成形	ハンドレイアップ 成形	射出成形

点数を減じつつ、ショルダー部を増厚することで耐横圧性能および電気絶縁性を高めた構造とした。

提案構造をもとに、選定材料を用いた部材の試作を実施した。開発した部材を図4に、材料構成を表2に示す。

(1) CFRP 製締結ばね (図4(a), 図4(b))

エポキシ樹脂を含浸したカーボン繊維織布（プリプレグ）を積層し、レール長手方向、レール直角方向およびその±45°方向にカーボン繊維を配向させた補強構造とした。

(2) GFRP 製タイププレート (図4(c), 図4(d))

エポキシ樹脂を含浸させたガラス繊維の織布を積層し、加圧成型により製作した。耐荷重性能を付与するため、ショルダー部は断面の補強繊維の方向を90°上向きに屈曲した構造としている。

(3) FRTP 製タイププレート (図4(e), 図4(f))

加熱溶融した樹脂を金型に注入する射出成型により製作した。底部を格子状としているのは、中実構造にした場合に徐冷過程で生じるひずみや残留応力の影響を低減するためである。

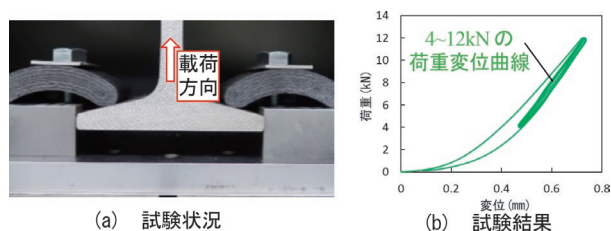


図5 CFRP 製締結ばねのばね特性

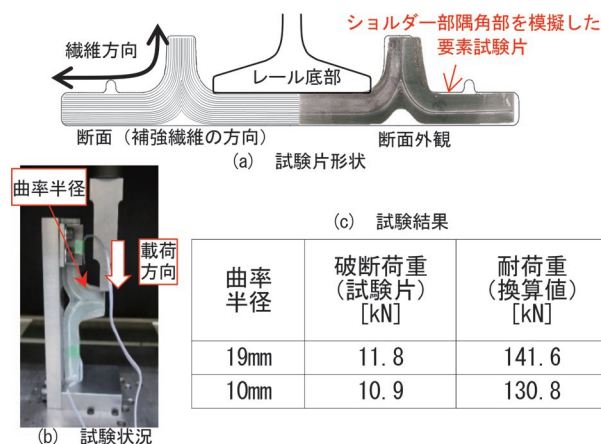


図6 GFRP 製タイププレートの荷重試験

3.2 要素試験および数値解析による適用性検討

本節では、試作の前段階で行った要素試験および数値解析の結果から、目標とする性能を満足するか確認することにより実施した非金属材料の選定部材への適用性検討について述べる。検討にあたって想定した設計条件は、設計軸重 170kN、締結間隔は 625mm とした。

(1) CFRP 製締結ばね¹⁾

CFRP 製締結ばねについては、先端ばね特性を試験により取得し、現行のレール締結装置で使用されている鋼製の板ばねと比較した。試験状況および結果を図5に示す。従来の直結8形レール締結装置における締結ボルト軸力 5kN を想定した荷重範囲 4~12kN における先端ばね定数は 7.7MN/m となり、現行の板ばねと比較すると 13 倍となったものの、試作した締結ばねが従来用いられていた金属製の締結ばねと同程度のばね特性を実現できることを確認した。なお、今回得られたばね特性については、ばねの形状を薄くすることでたわみ量を増やせばばね定数を小さくするなど、今後形状や寸法を更に検討することで現行のレール締結装置と同等まで調整していくことができると考える。

(2) GFRP 製タイププレート

GFRP 製タイププレートでは、図6に示す要素試験片を用いた荷重試験により、ショルダー部の耐荷重性能の評価を実施した²⁾。試験片は、タイププレートのショルダー部隅角部を模擬した形状とし、曲率半径を 10mm および 19mm とした場合について実施した。要素試験の結果

果、曲率半径 10mm においてタイププレート幅に換算した耐荷重が 131kN 相当となり、設計上最も厳しい曲線半径 600m 未満における、レール締結装置一組当たり作用する横圧の設計荷重 54kN に対して十分な強度を有することを確認した。

(3) FRTP 製タイププレート

FRTP 製タイププレートでは、底部を格子状としたことから、最大応力の発生箇所がショルダー隅角部に限らないと予想されたため、FEM 解析によりレール横圧力に対する耐荷重性能の評価を行った。FRTP は射出成型により樹脂中の短繊維がランダムに配向することから疑似的に等方性材料とみなした。また、アンカーボルト締結穴下側の縁部の変位を完全拘束した。直線および曲線半径 800m 以上を想定した荷重 30kN をショルダー部に負荷した場合の発生応力分布を図 7 に示す。タイププレートの剛性が低く、横圧負荷時には変形により底面の摩擦が期待できないものと仮定した場合、発生応力の最大値は、アンカーボルト孔周辺部の 127MPa であり、FRTP の引張強さ 231MPa を下回っており、耐荷重性能を有することを確認した。なお、曲線半径 800m 未満の条件においても解析を実施した結果、発生応力の最大値が 310MPa となり、引張強さを上回り、破断に至る可能性があることを確認したことから、試作品は直線および曲線半径 800m 以上への適用を前提として試作することとした。

以上の検討をもとに、試作した部材の適用範囲を設定した。

4. 樹脂部材の設計基準値の算定法の提案

レール締結装置の疲労破壊に関する安全性の照査は、組み立てたレール締結装置に対し、列車走行時に発生する荷重に相当する試験荷重を繰り返し作用させたときの応答値を試験により取得し、応答値が設計基準値以内であることを確認することにより実施する。ただし、樹脂材料では、機械的強度の温度依存性や紫外線劣化などの高分子素材特有の性質があるため、実使用環境条件が部材強度に与え得る影響を考慮した、樹脂材料の設計基準値の算定式を暫定的に提案した。算定式を式 (1) に示す。

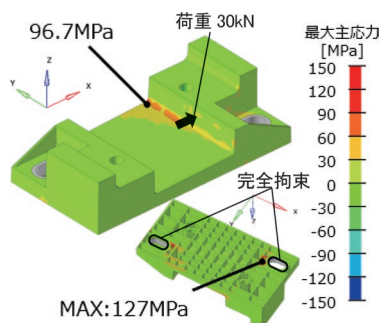


図 7 FRTP 製タイププレートの解析結果 (発生応力)

$$D_{si} = (P_s - 3\sigma) \times (1 - C_T) \times (1 - C_{WA}) \times (1 - C_F) \times (1 - C_W) \quad (1)$$

ここで、 D_{si} は設計基準値、 P_s は標準温度物性値、 σ は標準温度物性値の標準偏差、 C_T は温度低減係数、 C_{WA} は吸水低減係数、 C_F は疲労劣化低減係数、 C_W は耐候劣化低減係数である。式 (1) は、標準温度 (23℃) における物性値について、そのばらつきを見込んだうえで、さらに環境条件に応じた材料強度の低減を考慮した設計値を算定するものである。この算定に用いた各種低減係数の詳細について以下に述べる。

(1) 温度低減係数 C_T

各種の物性試験³⁾⁴⁾⁵⁾を実施し、標準温度での標準物性値に対する -20℃~60℃ 最低物性値の低減割合を温度低減係数とした。

(2) 吸水低減係数 C_{WA}

吸湿による機械的強度の低下が生じる FRTP では、絶乾時および吸水時の物性値を取得し、絶乾時に対する吸水時の物性値の低減割合を吸水低減係数とした。

(3) 疲労劣化低減係数 C_F

今回の評価では、大幅な強度低下が生じない疲労限度以下での使用を想定し、暫定的な値として 0.1 を仮定した。

(4) 耐候劣化低減係数 C_W

紫外線の影響は表層の数百 μm 以下の領域に留まり、内部構造に及ばないため、大幅な強度低下が生じないと想定し、暫定的な値として 0.1 を仮定した。

上記の特性のほか、樹脂材料の適用にあたっては、さらにクリープ特性および耐摩耗特性に関する試験を実施し、適用する樹脂材料の寸法変化や摩耗対策を十分に検討する必要がある。以上の検討を踏まえ、低減係数に実測値および暫定的に仮定した値を設定し、式 (1) より設計基準値の暫定値を算定した。表 3 に算定結果を示す。今後、基準値を実用化するうえでは今回推定値とした係数について、材料特性評価を適切に行い設計基準値の精度を高める必要がある。

5. 試作品の性能確認試験

本章では、試作品について組立状態での実軌道への敷設可能性を検証するため、鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造⁶⁾に準拠し性能確認試験を実施した。試験は CFRP 製締結ばねを共通とし、タイププレートを GFRP および FRTP とした 2 種類について実施した。本稿ではふく進抵抗試験、横圧強度試験、静的・動的二方向載荷試験および電気絶縁抵抗試験について記述する。

表3 低減係数と算定した設計基準値（暫定）

項目			CFRP		GFRP		FRTP	
			引張	曲げ	引張	圧縮	引張	圧縮
標準温度物性値 (MPa)	P_s	実測値	638.4	462.0	191.8	317.9	204.1	252.1
標準偏差 (MPa)	σ		18.0	9.4	24.3	10.1	2.0	3.1
設計基準値 (MPa) (暫定値)	D_{si}	—	306.6	263.7	85.6	200.8	93.4	119.4

5.1 ふく進抵抗試験

直結系軌道で用いられるレール締結装置については、構造物に伝達するレールの温度荷重が過大にならないよう、適切なふく進抵抗力を有していることが望ましく、その目安値は5kN/m/レールである⁶⁾。ふく進抵抗試験の結果を表4に示す。締付トルク60N・mで締結したところ、10.2kNであった。この値は、締結間隔625mmで換算した締結装置1組あたりのふく進抵抗力の目安値3.1kNよりも過大であった。また、締付トルクを下げ、30N・mで締結した状態でも締結装置1組あたりのふく進抵抗力は6.2kNと、目安値よりも大きい値を示した。実軌道上での適用にあたっては、敷設条件に応じてCFRP製締結ばねの形状変更や、レール底部との接触部の摩擦を低減する等の改良を行いふく進抵抗力を低減する必要がある。以降の試験では締付トルクを30N・mとし、できる限りふく進抵抗力を目安値に近づけた状態で実施した。

表4 ふく進抵抗試験結果

締結ばねの締付トルク (N・m)	1締結あたりふく進抵抗力 (kN)	片側レールあたりふく進抵抗力 (kN/m/レール)
60	10.2	16
30	6.2	10
(目安値)	3.1	5

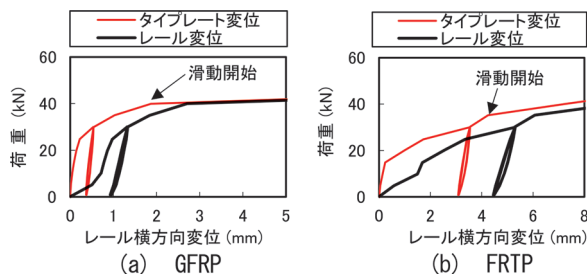


図8 横圧強度試験の結果

表5 設計条件

レール種別	JIS60kg レール
設計軸重	150kN
線形	600m≤R
レール締結間隔	625mm

5.2 横圧強度試験

試作品の横圧に対する耐荷重性能の確認のため実施した、横圧強度試験の結果を図8に示す。2種類の開発品それぞれについて、曲線半径600m未満の軌道条件における設計水平荷重60kNよりも低い荷重でタイププレートが滑動し、特にFRTPタイププレートについては図9のようにアンカーボルト締結部の金属製フレームとFRTP材料付近で破壊が生じた。当初想定していた横圧強度が確認できなかったため、以降の試験では、軌道条件を曲線半径600m以上とし、設計水平荷重を45kNに設定した。

5.3 静的・動的二方向载荷試験⁷⁾

二方向载荷試験は、レール締結装置一組に対する方法を採用した。表5に示す条件に基づき算定した設計作用と、別途実施した鉛直ばね定数試験、横方向ばね定数試験、先端ばね定数試験の結果を用いて、レール小返り解析モデル⁸⁾により定めた载荷試験の荷重条件および载荷角度を表6、図10に示す。なお、荷重条件がGFRPとFRTPで異なる理由は、供試体ごとの各種ばね定数試験結果の違いが、レール締結装置一組あたりの分散荷重に影響を及ぼしたためである。

静的二方向载荷試験で発生した部材の発生応力を図11～図13に示す。GFRP製タイププレート、FRTP製タイププレートともにA荷重作用時に発生した最大引張応力および最大圧縮応力が表3で提案した材料の設計基準値を下回ることを確認した。

また、表6の条件で実施した動的二方向载荷試験の結果、100万回载荷後、試作品にボルト・ナットのゆるみは生じておらず、構成部材の外観に顕著な摩耗等はみられなかった。また、载荷中のボルト軸力およびレール変位の大きな変動はみられなかった。

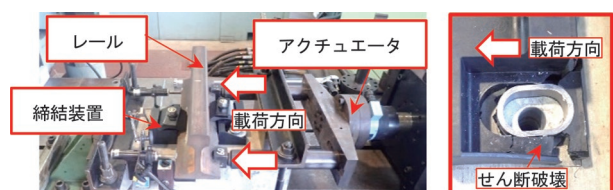


図9 横圧強度試験の破壊状況 (FRTP)

表6 二方向载荷試験の荷重条件

項目	単位	GFRP	FRTFP
試験荷重 P_{Amax}	kN	48.5	49.6
試験荷重 P_{Bmax}	kN	34.1	34.2
载荷角度 θ_A	deg	49.1	51.1
载荷角度 θ_B	deg	58.2	60.3
载荷点高さ	mm	100	110
残留荷重	kN	10	10

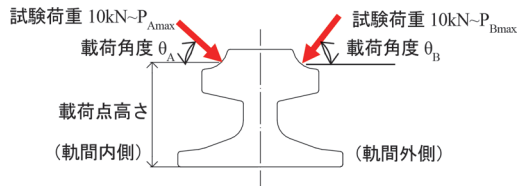


図10 载荷角度

5.4 電気絶縁抵抗試験⁷⁾

試作品の電気絶縁性の向上効果の確認のため、電気絶縁抵抗試験を実施した。電気絶縁抵抗試験は、アースした電極上に置いたコンクリートブロックにレールを締結し、レールーアース間に交流10Vを印加し電気絶縁抵抗値を取得する試験である。試験条件として、乾燥状態、降雨状態（時雨量100mm相当の水道水を散布）、汚損状態（時雨量100mm相当の0.1%食塩水を散布）を設定した。汚損状態は、塵埃が堆積し湿潤状態といった、電気絶縁性にとって厳しい環境を模擬した条件である。試験は2種類の試作品および現行品の直結8形レール締結装置について実施した。散布と同時に測定を開始し、飽和した時点での電気絶縁抵抗値を図14に示す。全ての

試験条件において、乾燥状態、降雨状態、汚損状態となるにつれて電気絶縁抵抗値が低下したものの、表5の設計条件より定めた電気絶縁抵抗値の設計基準値1.6kΩを上回ることを確認した。ここで、2種類の試作品については、最も厳しい試験条件である汚損状態であっても、現行品と比較して設計基準値に対して十分大きな電気絶縁抵抗値を有することを確認した。このことから、試作品は、試験の設定よりも厳しい汚損状態や、高い電位差が生じる環境であっても、現行品より高い電気絶縁性を確保可能な構造であると考えられる。

以上、5.3節および5.4節の結果より、表4に示すレール押え力およびふく進抵抗力の条件においては、2種類の試作品が在来線の曲線半径600m以上の区間に敷設可能な性能を有しており、実軌道に敷設可能である見通しを得た。ただし、5.1節に示したように、今回試作したCFRP締結ばねではふく進抵抗力が一般に構造物の設計作用として用いられる5kN/mレールを超過していることから、実軌道への敷設にあたっては締結ばね形状の見直し等によるふく進抵抗力の低減が課題である。

6. まとめ

本稿では、非金属材料を主材料としたレール締結装置の実現可能性を検証した。直結系軌道用レール締結装置のタイプレートおよび締結ばねを対象とし、非金属材料の適用性を検討した。また、検討結果を踏まえ試作したレール締結装置の性能確認試験を実施した。その結果、締結ばねをCFRP製とし、タイプレートをFRTFP製およびGFRP製として試作した2種類のレール締結装置に

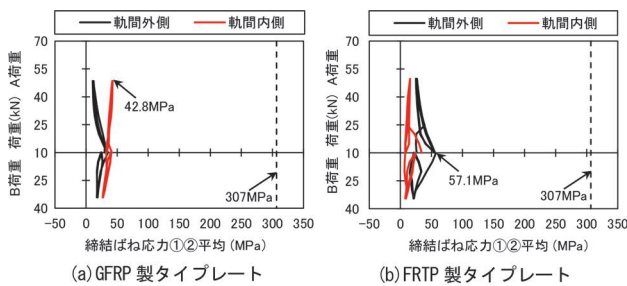


図11 二方向载荷試験結果 (CFRP)

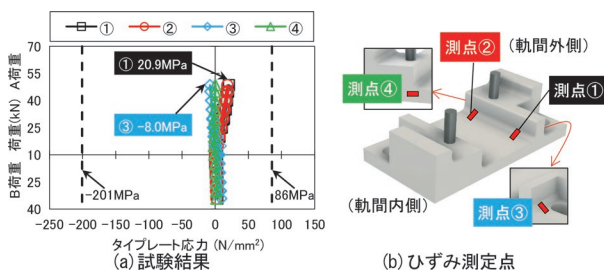


図12 二方向载荷試験結果 (GFRP)

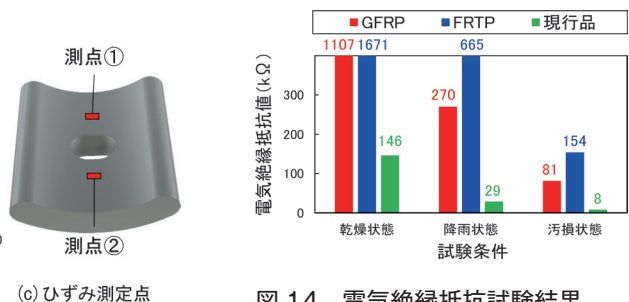


図13 二方向载荷試験結果 (FRTFP)

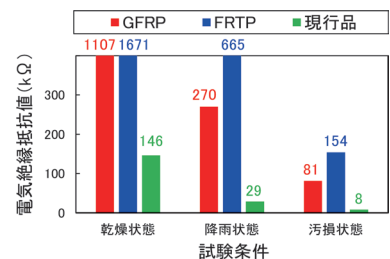


図14 電気絶縁抵抗試験結果 (測定周波数 2.02kHz)

ついて実施した二方向載荷試験および電気絶縁抵抗試験の結果から、在来線・曲線半径 600m 以上の曲線区間の設計条件で敷設可能な性能を有することを確認し、非金属材料を主材料としたレール締結装置の実用化の見通しを得た。一方で、今回の形状ではふく進抵抗力が目標値を超過していたことや、急曲線区間への展開を見据えると、使用条件に合わせて材質や形状等を選定する必要がある、今後、構造を改良していくうえでの課題とする。

なお、本研究の成果の一部は、東レ株式会社と東レ・カーボンマジック株式会社、ならびに株式会社日本コンポジット工業との共同研究により得られたものである。

文 献

- 1) 栢田吉弘, 鈴木実, 弟子丸将, 山本智之: タイプレート式レール締結装置への樹脂材料の適用性の検討, 土木学会第 77 回年次学術講演会概要集, VI-420, 2022
- 2) 鈴木実, 栢田吉弘, 片岡篤史: タイプレート式締結装置用 CFRP 締結ばねの試作と適用性に関する性能評価, 土木学会第 77 回年次学術講演会概要集, VI-419, 2022
- 3) JIS K 7161-2 プラスチック—引張特性の求め方—第 2 部: 型成形, 押出成形及び注型プラスチックの試験条件, 2014
- 4) JIS K 7181 プラスチック - 圧縮特性の求め方, 2011
- 5) JIS K 7084 炭素繊維強化プラスチックの 3 点曲げ衝撃試験方法, 1993
- 6) 国土交通省監修, 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
- 7) 松尾淳史, 弟子丸将, 山本智之, 鈴木実, 栢田吉弘: 非金属材料を用いた直結系軌道用レール締結装置の性能確認試験, 土木学会第 77 回年次学術講演会概要集, VI-421, 2022
- 8) 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, pp.330-343, 2017