

# 防食塗膜の損傷を軽減した レール防食工法および締結装置の開発

細田 充\* 坂本 達朗\*\* 田中 俊史\*  
鈴木 実\*\* 片岡 宏夫\* 庄野 真也\*\*\*

## Development of a Method of Protecting the Rail against Corrosion and a Rail Fastening System for Decreasing Anticorrosive Coating Injury

Mitsuru HOSODA Tatsuro SAKAMOTO Toshifumi TANAKA  
Minoru SUZUKI Hiroo KATAOKA Shinya SHONO

The maintenance work on rail defects, especially rail corrosion in tunnels, is very important in ensuring railway safety. As one of the methods of protecting the rail against corrosion, anticorrosive coating of rails is used. However, it has a problem of anticorrosive coating injury by the contact of the rail with the rail fastening device. In this paper, to decrease anticorrosive coating injury, the authors proposed improvement of the methods of protecting the rail against corrosion and a rail fastening system in which resin material is applied between the coated rail and the spring clip. Finally, we confirmed these methods are excellent in long term durability.

キーワード：レール，腐食，電食，レール防食工法，塗膜，レール締結装置

### 1. はじめに

腐食性の高い環境下に設置されたレールには腐食による断面積の減少や腐食孔を起点としたレール折損，電食による局所的な腐食等の課題があるため，防食材料による対策が講じられることがある（以下，対策が講じられたレールを「防食レール」という）。鉄道総研でも過去に，レール底部にテープを巻いて腐食の進行を妨げるテープ工法<sup>1)</sup>，および，耐腐食性と電気絶縁性を有し，かつ，レールを保護するレール防食ガード等を提案<sup>2)</sup>し，鉄道事業者にも採用されている。しかしながら，防食レールではレール締結部に生じる擦れや保守作業に伴う材料の損傷が生じる場合があり，耐腐食性に加えて外力に対する耐久性を向上させた防食材料の開発が求められている<sup>3)</sup>。これまでの検討で，まず，レール防食工法における列車荷重を考慮した耐久性および防食性を評価するための試験法を提案した<sup>4)</sup>。さらに，防食塗膜の損傷軽減策として，レールの押さえ部材への樹脂材の使用およびレールと接する軌道パッドの表面を平滑にすることで損傷を軽減できることも確認した<sup>4)</sup>。

この状況を踏まえ本報では，トンネル内において直接漏水が滴下するような一般的な腐食環境下を対象としたレール防食工法に対して，後述する試験を行い，耐久性

および防食性に優れた防食工法を選定した。さらには，レール底部上面における防食塗膜へのレール押さえ部材の食込みおよびレール底面の軌道パッドの変形に起因する防食塗膜の損傷等を軽減するために，レール押さえ力を調整可能，かつ，押さえ部に樹脂材を介在した板ばねによるレール締結装置を開発したので報告する。

### 2. 耐久性を考慮した防食工法の選定

#### 2.1 選定条件

本研究では塗料を中心とした防食材料に着目し，要求性能は防食性および耐損傷性とした。また，各性能の比較対象を，過去に提案されたテープ工法とした<sup>1)</sup>。選定する工法は経済性を含めてテープ工法と同等以上の性能を有することを目指した。表1に各要求性能の概要を示す。

防食工法の適用箇所を塩の影響が無いトンネルの漏水箇所とし，テープ工法と同等以上の防食性および耐損

表1 レール防食工法に要求される性能

項目	概要	
耐損傷性	耐列車荷重性	繰返しの列車荷重に対する耐久性を想定する
	耐衝撃性	施工時の損傷を想定する
	耐摩耗性	締結部の摩耗を想定する
防食性	塩の影響の無いトンネル漏水環境を想定する	
施工性	・保守基地内での施工が可能である ・レール締結装置の組立に支障しないような膜厚	
経済性	既往の工法と同等程度とする	

\* 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  
\*\*\* 軌道技術研究部 軌道構造研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

特集：軌道技術

傷性を有することとした。防食工法に用いる材料の最大厚みは、レール締結装置の組立状態への影響を考慮して1000 μmとした。さらに、経済性を考慮して、材料施工前に実施する素地調整はテープ工法と同程度とし、高額な素地調整機器を必要としないこととした。また、施工費用についても既存工法と大きく異ならないこととした。これらの条件に基づき防食工法を3種類選定した。表2に3種の防食工法の概要を示す。

2.2 防食工法の室内評価試験

選定した防食工法および比較対象としてテープ工法を加えた4工法に対して、防食工法に要求される性能を評価する室内試験を以下のとおり実施した。

2.2.1 列車荷重に対する耐久性試験

(1) 試験内容

列車荷重に対する耐久性試験は、列車荷重が作用した際のレール締結部における耐久性の評価を目的として、過去に提案した塗膜損傷の再現を加速する2軸での繰返し斜角載荷試験<sup>4)</sup>を実施した。試験の状況を図1に示す。防食塗膜の損傷要因を考慮し、横圧はしばしば発生する最大荷重であるB荷重相当とし、輪重は平均荷重であるC荷重相当とした。載荷回数は50万回とした。荷重条件を表3に示す。供試体は、防食処理を施したレール(50kgNレール)とナブラ型および平滑化パッドによる組合せで構成した。

(2) 試験結果

図2に試験後のレール底部上面の状況を示す。ガラスフレーク工法は、防食塗膜表面が擦れにより若干摩耗する程度であり割れや浮き等の変状は認められなかった。ポリウレタン工法では、塗膜表面の摩耗に加えて、一部の試験片においてレール底部隅角部で割れが認められた。FRP工法については、ガラス繊維シートに損傷が認められた。テープ工法は、目視による確認では損傷に至っ

表2 選定した防食工法の概要

防食工法	仕様
ガラスフレーク工法	専用プライマー，ガラスフレーク含有ビニルエステル樹脂
ポリウレタン工法	専用プライマー，ポリウレタン樹脂
FRP工法	エポキシ樹脂，ガラス繊維シート

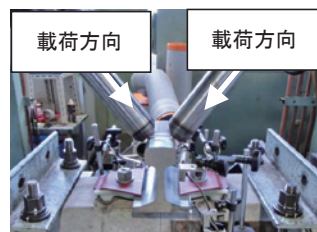


図1 列車荷重に対する耐久性試験の状況

表3 列車荷重に対する耐久性試験の荷重条件

角度	52.2°
試験荷重	25.6kN
周波数	5.5Hz

ていないが、ナブラ型の樹脂ブロック先端位置に塗料の偏りが認められた。レール底面については、いずれの工法においても変状が認められなかった。

2.2.2 耐衝撃性評価試験

(1) 試験方法

各防食材料の耐衝撃性を比較評価するため、JIS K 5600 5-3「耐おもり落下性」に準じた落錘試験(デュボン式)を行った。材料表面に撃ち型をあてがい、その上からおもりを複数回落下させ、材料の変状程度から材料の耐衝撃性を評価する試験である。本試験では撃ち型の先端形状を半径10mmの半球状とし、1000gのおもりを500mmの高さから落下させ、皮膜の割れ、剥がれ、浮きなどの塗膜変状程度から耐衝撃性を評価した。

(2) 試験結果

図3に落錘後の試験片の外観を示す。FRP工法では1回の落錘によって鋼材素地が露出した。テープ工法では1回、ガラスフレーク工法では1~2回の落錘で鋼材素地の露出や落錘箇所近傍での塗膜浮きが見られた。ポリウレタン工法では3~4回の落錘で落錘箇所近傍での塗膜浮きや微小な塗膜割れが見られたが、鋼材素地の露出は見られなかった。以上の結果から、各材料の耐衝撃性は良好な順からポリウレタン工法>ガラスフレーク工法>テープ工法>FRP工法と考えられる。

2.2.3 耐摩耗性評価試験

(1) 試験方法

各防食材料の耐摩耗性を評価するため、JIS K 7204「プラスチック-摩耗輪による摩耗試験方法」に準じた試験を行った。材料表面を摩耗輪が回転移動することによって生じる材料の摩耗程度から耐摩耗性を評価する試験で

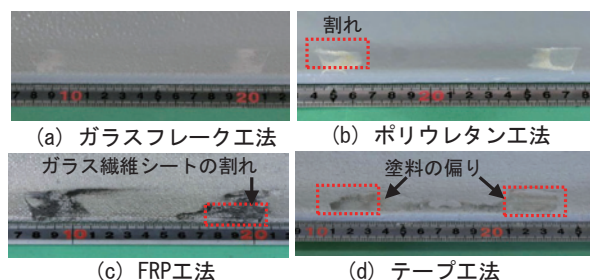


図2 列車荷重に対する耐久性試験後のレール底部上面

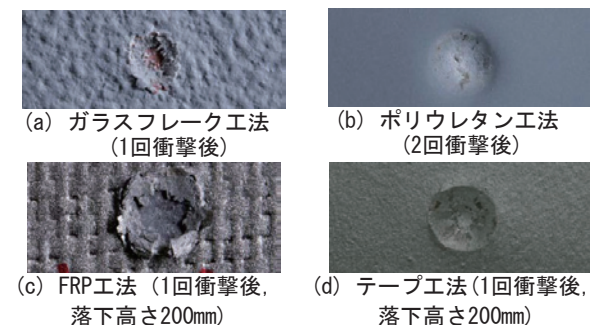


図3 耐衝撃性評価試験後の状況

ある。本試験ではJISに規定されるCS10の摩耗輪を荷重約15Nで押しつけながら6000回転させ500～1000回転毎の試験片質量を測定し、質量減少量から耐摩耗性を評価した。なお、材料の表面が平坦ではない場合には摩耗特性を正しく評価できないため、回転数の経過に伴う試験片の表面状態を観察し、摩耗輪の接触面積が実際に摩耗している面積と概ね一致した段階から耐摩耗性を評価した。

(2) 試験結果

図4に回転数と試験片の質量減少量の関係を示す。ポリウレタン工法以外の各材料の表面は平坦でなかったために試験初期の測定結果を省いた。ただし、FRP工法の表面は著しい凹凸を生じており6000回転後も平坦にならなかったため、実測値をそのまま評価した。これより、FRP工法の6000回転時点の質量減少量を除き、回転数と質量減少量には線形の関係が見られた。グラフの傾きが小さいほど耐摩耗性が高いことを示し、各材料の耐摩耗性は良好な順からガラスフレック工法≒ポリウレタン工法>FRP工法>テープ工法になると考えられる。テープ工法については表面の凹凸によってみかけより接触面積が小さくなっており、実際には傾きから求められる評価よりもさらに低い耐摩耗性であったと考えられる。

なお、FRP工法で6000回転時点の質量減少量が大きくなったのは、塗膜中の繊維と樹脂が均一に分布していないため、摩耗輪が接触する場所の材質によって質量減少量が異なっていたことが原因として挙げられる。

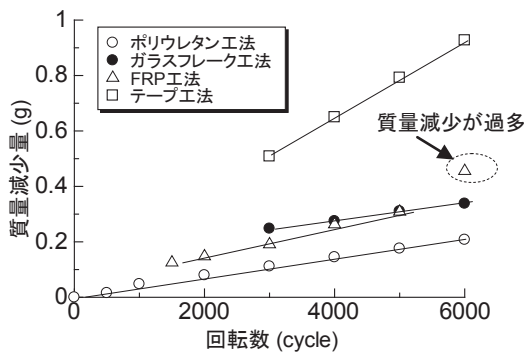


図4 耐摩耗性評価試験結果

表4 防食性評価試験の試験条件（1サイクル）

工程	試験内容	時間 (h)
1	試験液噴霧	68
2	40℃乾燥	4
3	試験液噴霧	20
4	40℃乾燥	4
5	試験液噴霧	20
6	40℃乾燥	4
7	試験液噴霧	20
8	40℃乾燥	4
9	試験液噴霧	20
10	40℃乾燥	4

2.2.4 防食性評価試験

(1) 試験方法

試験片には、実レール切り出し部材または寸法150×70×3.2mmの小型鋼板に各工法を適用したものをを用いた。材料の健全部および損傷部の防食性を評価するため、実レール切り出し部材については施工後に実施した2軸疲労試験によって締結部材接触部やレール底面等へ損傷箇所を導入し、小型鋼板については先端がφ3mmまたはφ10mmの半球状である打撃針による打痕と、短辺のエッジ部にグラインダによるカット傷を導入した。

(2) 試験条件

防食工法の適用箇所におけるレールの腐食要因に挙げられるのは、漏水による濡れや比較的高湿度時間の長い乾湿の繰返しである。そこで、防食性評価試験は表4に示すサイクルの乾湿繰返し試験とした。濡れ工程で使用する溶液は、これまでに調査したトンネルの漏水成分のうち最も電解質濃度が高かったものを模擬し、塩化ナトリウム(35mg/l)と硫酸アンモニウム(90mg/l)を溶解した水溶液とした。防食性の評価は試験片の外観観察により行った。外観観察のタイミングは3サイクル毎とし、打痕部、損傷部、一般部のそれぞれについて、塗膜変状(塗膜の割れ、剥がれ、膨れ)やさびの発生程度を記録した。

(3) 試験結果

(a) 実レール切り出し部材

9サイクルまでの試験体の外観の例としてテープ工法の場合を図5に示す。テープ工法を適用した試験片では1サイクル経過段階で全体的に点さびが発生し、その割合はわずかではあるが増加傾向にあった。その他3種類の防食工法はいずれも疲労試験に伴う材料損傷箇所からのわずかな腐食は確認されたが、損傷の無い箇所では大きな変化は見られずテープ工法と同等以上の防食性が得られた。

(b) 小型試験体

実レール切り出し部材の試験片では防食性の比較が困難だった各防食工法について、小型試験体による試験では差異がみられた。27サイクル時点の試験片外観を図6に示す。

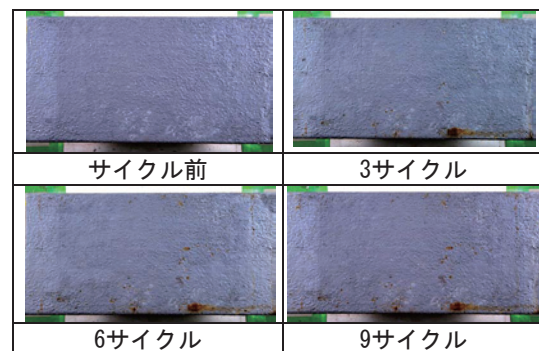
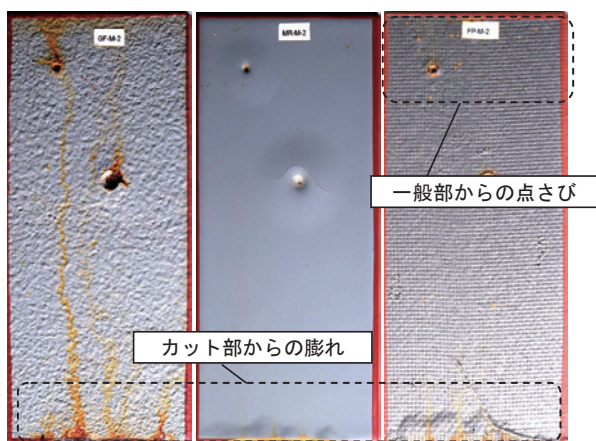


図5 防食性評価試験におけるテープ工法を適用した試験体の外観（点さびの発生状況）



ガラスフレーク工法 ポリウレタン工法 FRP工法

図6 27サイクル時点の試験片外観

表5 各防食工法の試験結果の比較

項目		ガラスフレーク工法	ポリウレタン工法	FRP工法
耐損傷性	耐列車荷重性	◎	△	△
	耐衝撃性	○	◎	×
	耐摩耗性	◎	◎	○
防食性		◎	○	○
施工性		△	△	△
総合評価		◎	○	△

注：表中の記号は以下の通り。◎…検討した防食工法の中で最も高い性能を有する，○…テープ工法よりも高い性能を有する，△…テープ工法と同程度の性能を有する，×…テープ工法より性能が低い

FRP工法を適用した試験体では1サイクル目から点さびの発生が確認され、他の試験片と比較して防食性が低い可能性が示された。ポリウレタン工法の試験片では21サイクル目に打痕部およびカット傷部からのさび膨れが生じており、皮膜下で腐食が進行していることが確認された。ガラスフレーク工法の試験片では27サイクル目にカット傷部からのさび膨れが確認されたが、打痕部からの膨れは見られなかった。以上の結果から、各防食工法の防食性は良好な順からガラスフレーク工法>ポリウレタン工法>FRP工法と考えられる。

### 2.3 考察

各防食工法の室内評価試験における試験結果を表5に示す。耐衝撃性評価試験を除きガラスフレーク工法が各試験項目で良好な性能を示した。ここで耐衝撃性評価試験は、各防食塗膜の衝撃に対する耐久性を相対的に比較したものであるが、保守作業時の外力はレール敷設後に常時作用するものではなく、外力として常に作用する列車荷重に対する耐久性を重視すべきである。保守作業時の問題については後述する。これらを考慮し各試験項目の試験結果を要求性能に基づき総合的に評価した結果、ガラスフレーク工法が有効なレール防食工法であると判断した。

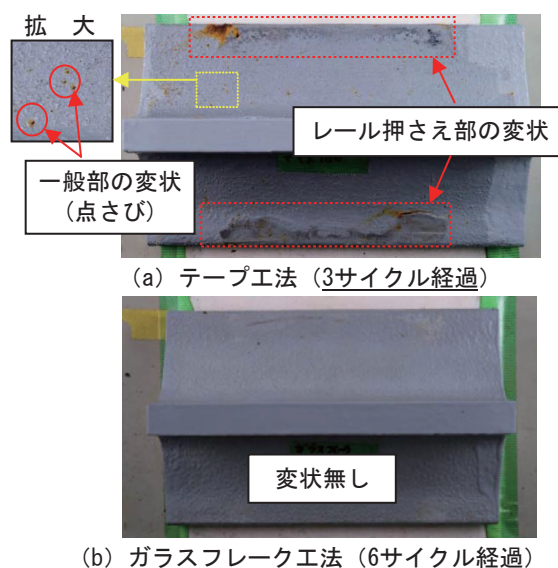


図7 繰り返し載荷試験後の腐食促進試験結果

さらに、2.2.4節の実レール切り出し部材の試験において、ガラスフレーク工法はテープ工法に比べて2倍以上の防食性能を有することを確認した(図7)。

## 3. 防食レール用レール締結装置の開発

過去に実施した<sup>4)</sup>防食塗膜の損傷軽減の検討では、レールの押さえ部材が樹脂材であり、営業線において使用実績のあるナブラ型を適用し、損傷が軽減できることを確認した。ナブラ型は通常の板ばねに比べて高いレール押さえ力を有していることが知られている<sup>5)</sup>。レール押さえ力を高くすることで、レールのふく進に対しては有利に機能するが、レール押さえ部の接触圧が大きくなり防食塗膜の耐久性に対しては不利となることが想定される。そこでレール締結部における防食塗膜の損傷を軽減するため、レール押さえ部に樹脂材を使用し、かつレール押さえ力を調整可能な板ばね方式のレール締結装置を開発した。

### 3.1 防食レール用レール締結装置の概要

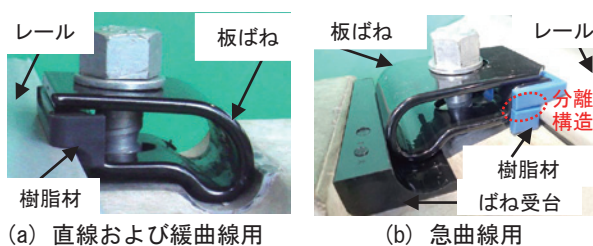
開発した防食レール用レール締結装置(50kgNレール用)を図8に示す。主な特徴は以下のとおりである

#### (1) 共通

- レール押さえ部に樹脂材を使用し、先端部に丸みを設け局所的な接触圧を軽減する形状とした。
- 樹脂材の厚さは、底部上面、底部側面ともに5mm以上確保する形状とした。
- 樹脂材と下ばね接触面において抜け出し防止を設けた。
- 必要最小限のふく進抵抗力の確保を条件とし板ばね形状によりレール押さえ力の低減を図った。

#### (2) 直線および緩曲線用

- 3号PCまくらぎへの適用を前提とし、板ばねの形状



(a) 直線および緩曲線用 (b) 急曲線用

図8 防食レール用レール締結装置

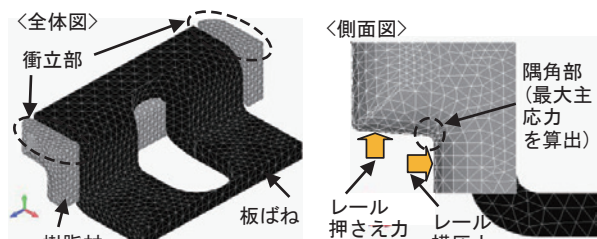


図9 樹脂材形状検討の解析モデル (直線および緩曲線用)

は5N形を基本とした。

- ・板ばねの形状は軌間内外で統一し、軌間調整機能は厚さの異なる樹脂材の組合せで対応することとした。
- ・樹脂材の隅角部で発生する応力を静的有限要素解析で算出し樹脂材の底側部高さおよび隅角部の曲率半径を大きくすることで発生応力の低減を図った(図9, 10)。

(3) 急曲線用

- ・6号PCまくらぎへの適用を前提とし、板ばねの形状は9形を基本とした。
- ・樹脂材の形状は軌間内外で統一し、軌間調整機能は従来通り板ばねとばね受台で対応することとした。
- ・樹脂材を上下分離構造とし、隅角部の応力集中をなくした構造とした。

3.2 防食レール用レール締結装置の性能試験

(1) ふく進抵抗試験

レール締結装置の機能として必要なふく進抵抗試験を実施した。試験の結果、直線および緩曲線用は、50kgNレール用で9.1kN/組、60kgレール用で7.8kN/組であり、急曲線用は、50kgNレール用で7.9kN/組、60kgレール用で7.1kN/組であった。バラスト軌道用のレール締結装置のふく進抵抗力は、まくらぎの道床縦抵抗力6kN/m<sup>6</sup>より大きくする必要があり、試験から得られたふく進抵抗力はこれを満たしていた。

(2) 疲労破壊に関する安全性の照査

レール締結装置1組から構成される供試体に対して組立試験および各ばね定数試験より得られた結果に基づいて2軸での静的斜角载荷を実施し、板ばねに発生する応力およびレール頭部左右変位量により安全性を照査した。板ばねの発生応力についてはばね鋼(SUP9)の耐久限度線図、レール頭部左右変位量については在来線に

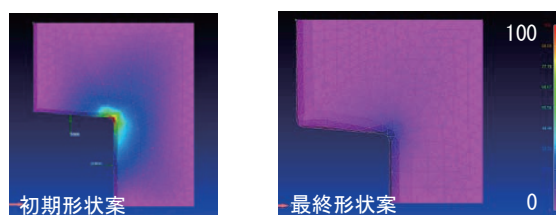


図10 樹脂材形状検討結果(単位はN/mm<sup>2</sup>, 直線および緩曲線用)

適用される7.0mmをそれぞれの限界値として照査した結果、いずれの防食レール用レール締結装置においても要求性能を満足した。図11に板ばねの照査結果を示す。また、2軸での繰返し斜角载荷において目標繰返し数である100万回を载荷した。その結果、板ばねおよび樹脂材の損傷はみられず、レール締結装置として十分な機能および性能を満たしていた。

(3) 防食レールの塗膜損傷軽減効果の確認

本レール締結装置の板ばねは先端開口量を検討することでレール押さえ力を低減させており、さらに樹脂材はレールとの接触圧力を極力緩和する形状としているため、防食レールの塗膜損傷軽減効果が期待できる。そこで、ガラスフレーク塗料による防食レールと本レール締結装置の組合せによる2.1.1節と同様の防食塗膜の耐久性評価試験を実施した。2.1.1節の室内試験では载荷回数を50万回として耐久性を評価することとしているが、ここではさらに継続的な効果を確認するため300万回まで载荷し、外観観察および防食塗膜の膜厚測定を実施した。

図12に防食塗膜の外観状態、図13に防食塗膜の膜厚測定結果を示す。300万回载荷後、レール底部上面において最大8%の防食塗膜の減少が確認されたが、レール底部側面やレール底面にはほとんど変化はなく、本構造による優れた塗膜の損傷軽減効果が確認された。

4. 営業線への試験敷設および敷設の留意点

検討結果を踏まえ、営業線における耐久性および防食性の効果を確認することを目的とし、試験敷設を行った。

敷設箇所は、在来線(年間通過トン数2~20百万トン)のトンネル内のバラスト軌道で漏水によりレールの腐食が進行している2箇所である。防食工法には、ガラスフレーク工法を適用し、レール締結装置はナブラ型(一部、防食レール用締結装置)と平滑化パッドの組合せとした。ガラスフレークの塗装は、保守用基地内において約2日間で実施し、10日間程度養生した後に営業線に敷設した。敷設2年後に評価したところ2箇所とも、レール締結部のレール底部上面やレール底面において若干の膜厚の減少がみられるものの、防食塗膜に大きな変状は認められなかった。一方で、防食加工を実施していない範囲ではさびの発生が認められた。以上から、敷設2年後に

特集：軌道技術

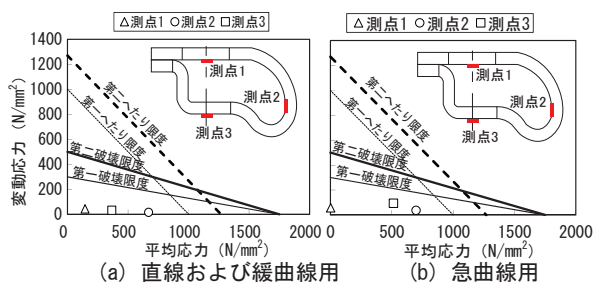


図 11 静的载荷試験結果による板ばねの照査

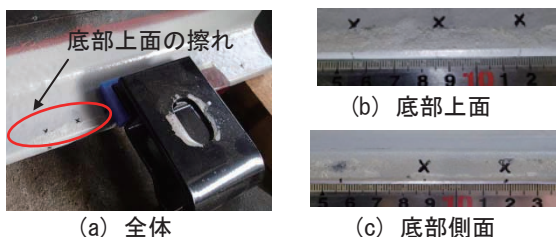


図 12 300 万回载荷後の塗膜の状態

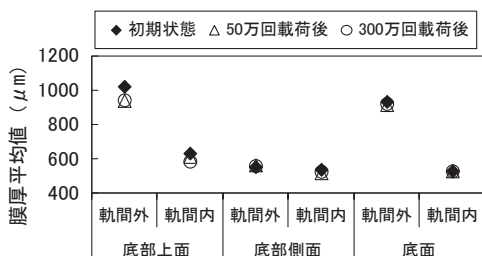


図 13 防食塗膜の膜厚測定結果

においてレール締結部を含め防食塗膜に変状は無く、未施工区間に比べて防食効果が認められた。ただし、長期間における効果を検証するため、今後も継続的に状態を監視していく予定である。

また、室内評価試験で述べたとおり、ガラスフレーク工法は既存のテープ工法に比べて強度は高いが、他の工法も含めて防食塗膜の耐久性のみで保守作業時の損傷を防ぐことは困難である。そこで、防食レールの敷設時には、金属製の工具やバラストが直接防食塗膜に接触しないように以下の点に留意し、作業を行った。

- ・ 鉄製トロへの積載時には、レールの支持部で直接防食レールを支持しないよう、ゴムパッド等の緩衝材を挿入する。
- ・ 防食加工部をバラスト上に直接仮置きせず、レール底面とバラスト間に隙間を設けるように十分な高さを有するまくらぎ等の上に仮置きする。
- ・ レール交換後にバール等を使用し軌道整正する際、防食塗膜と工具間にゴム等の緩衝材を介在させる。
- ・ レール交換後にまくらぎ間のバラストとレール底面が接触しないよう、バラストのすき取りを実施する。

これらについては本研究で対象とした工法だけでなく、一般的にレールの防食を行う際に、適用すべきであると考え。また、敷設作業時には防食塗膜の損傷の有

無を確認し、損傷が認められた場合には腐食が進行しないよう当該部位に同じ塗料を塗布し補修する必要がある。

5. まとめ

本報では、トンネル内において直接漏水が滴下するような一般的な腐食環境下を対象としたレール防食工法に対して、室内評価試験を行い、耐久性および防食性に優れた防食工法および塗膜の損傷軽減を考慮したレール締結装置を開発した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 既存工法と同等以上の耐久性を有する防食工法を選定し、各種室内評価試験を行った結果、ガラスフレーク工法が最も良好な耐久性能を示した。防食効果が高いことから費用対効果の向上が期待できる。
- (2) レール押さえ部に樹脂材を使用し、かつレール押さえ力を調整可能な板ばね方式の防食レール用レール締結装置を設計・試作し、性能確認試験を実施した結果、レール締結装置として十分な性能を満たしていた。本締結装置を用いた防食塗膜の耐久性評価試験を実施した結果、塗膜の損傷や浮き等の変状は認められなかった。
- (3) ガラスフレーク工法と構成部材を変更したレール締結装置を組合せて営業線に試験敷設を実施し、敷設後約2年において防食塗膜が健全な状態で推移していることを確認した。

なお、試験敷設した防食レールについては、引き続き調査を継続し、効果を検証していく予定である。試験敷設に際し、協力頂いた西日本旅客鉄道株式会社および四国旅客鉄道株式会社に謝意を表する。

文 献

- 1) 御船直人：「レール用防錆・防食テープ (BB テープ) の開発」, JREA, Vol.39 No.7, 1996
- 2) 御船直人：鉄道総研の Patent 27 レール防食ガード - 湿潤環境下における防錆・防食・電気絶縁性能向上を目指した材料システム -, RRR, Vol.59, No.2, pp.36-37, 2002
- 3) 堀克則, 長尾正治：腐食環境下におけるレール防食工法の検討, 土木学会年次学術講演会, Vol.64, IV-334, pp.665-666, 2009
- 4) 庄野真也, 片岡宏夫, 坂本達朗, 飯田政巳：レール防食工法の塗膜損傷軽減策の検討と室内評価試験, 土木学会年次学術講演会, Vol.69, IV-382, 2014
- 5) 三田村秀雄：「日本におけるナブラ型締結装置の誕生と製品概要」, 新線路, 第 60 巻, pp.50-52, 2006
- 6) 「鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造」, 国土交通省 鉄道局監修 (公財) 鉄道総合技術研究所編, 2012