

損傷低減型レール高低調整用可変パッドの開発

鈴木 実* 栴田 吉弘* 弟子丸 将**
浦川 文寛** 矢口 直幸* 佐藤 大悟*

Development of Damage Reduction Products of the Rail Height Adjustment Pad

Minoru SUZUKI Yoshihiro MASUDA Tadashi DESHIMARU
Fumihiko URAKAWA Naoyuki YAGUCHI Daigo SATO

Rail height adjustment pad (RHAP) is one of the components of the rail fastening device “Type 8” on the slab track. It is made of thermosetting polymer resin, such as unsaturated polyester (UP) resin reinforced with glass fiber sheet. However, PHAP is sometimes subjected to shear damage by the slide of ends of continuous welded rail, due to expansion and contraction by rail temperature fluctuation. Therefore, the authors have developed two types of countermeasure products. One is made of conventional UP resin reinforced with liquid crystal polyester fiber sheet, and the other is cycloolefin resin. In this paper, the required performances of RHAP and the characterization of developed products were also described.

キーワード：スラブ軌道，レール高低調整，可変パッド，環状オレフィン樹脂，液晶ポリエステル繊維

1. はじめに

スラブ軌道は、軌道スラブと呼ばれるコンクリート板上にレールを締結する軌道構造である。軌道保守作業の省力化をはかる目的で開発され、山陽新幹線の建設以来、現在に至るまで新幹線の標準軌道構造として採用されている¹⁾。この軌道構造に主に用いられる直結8形レール締結装置(図1)は、可変パッドと呼ばれるレール高さ調整用の部材により、1mm以下の精度でレール高さを保持できる特徴がある²⁾。可変パッドは、開発以来、圧縮強度や耐衝撃性などの改善が図られた結果、現在では耐久性の高い製品が使用されているが、主としてレールの温度伸縮の影響による損傷事例も一部でみられている。

この対策の一つとして、著者らは液晶ポリエステル補強繊維や環状オレフィン樹脂を適用した損傷低減型可変パッド(損傷低減対策品)を開発した。

本報では、上記の損傷低減に向けた要求特性の検討結果に加え、開発品の材料特性や実用性評価の結果などについて述べる。

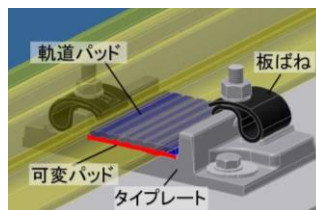


図1 直結8形レール締結装置

2. 可変パッドの現状

2.1 現用品の概要

(1) 可変パッドの材料構成

可変パッドは、ポリアミド/ポリエチレンなどのラミネートフィルム製の袋の内部にエポキシアクリレート、ウレタンアクリレートなどのビニルエステル系や不飽和ポリエステル系の反応硬化型液状樹脂を現地で注入して施工するものである。袋内には樹脂の補強と破損時の飛散防止を目的とした平織り構造のガラス繊維シートが予め挿入されており、硬化後は耐衝撃性や寸法安定性に優れた厚さ4～14mmのガラス繊維強化樹脂の板となる。

(2) 可変パッドの使用区分

スラブ軌道では、長さが数kmに及ぶロングレールが一般的に用いられている。ロングレールは、その中間部でレールの温度伸縮に伴うひずみが抑制されるのに対して、端部ではレール長手方向の軸力(レール縦荷重)がレール/締結装置間の抵抗力(ふく進抵抗力という)を超過する際にレールの伸縮が生じる。このため、端部には伸縮継目(EJ)が設けられ、EJ付近ではレールの移動(ふく進)が生じる。同様のふく進は橋梁やトンネルなどの構造境界の前後でもみられ、これらの区間を可動区間と定義している。これに対し、ロングレールの中間部や温度変化の少ないトンネル内部などを不動区間と定義し、可変パッドにはそれぞれ2つの使用区分が設けられている。

* 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

特集：材料技術

(3) 可変パッドの仕様

表1は鉄道事業者が現在採用している可変パッド用樹脂材の物性に関する仕様の例である。この仕様は先駆製品の材料物性を基にし、寒冷地域での大規模な建設工事が計画された1980年代に標準化されたものである。

当時、現地敷設試験の結果や経済性などを考慮し、使用区分に応じて材質や特性の異なる可変パッドが適用された結果、不動区間用と可動区間用の2つの適用種別が設けられ、現在に至っている。可動区間では構造上の理由などから不動区間に比べて荷重条件が厳しいことに加えて、低温環境中での脆化による損傷が懸念されたため、可撓性や耐衝撃性を重視した仕様が採用されている。

表1 可変パッド用樹脂材の物性に関する仕様の例

評価項目	適用 単位	適用種別		
		不動区間用	可動区間用	
圧縮特性	圧縮強さ	MPa	140以上	140以上
	降伏点	MPa	40以上	20以上
引張特性	引張強さ	MPa	35以上	20以上
	破断点ひずみ	%	5以上	30以上
曲げ特性	曲げ強さ	MPa	50以上	20以上
耐衝撃性	シャルピー衝撃強さ	kJ/m ²	5以上	15以上

(4) 損傷事例と課題

新幹線の建設初期の可変パッドでは比較的早期の損傷が確認され、圧縮強度や耐衝撃性などの見直しが行われた。その結果、現用品の耐久性は向上し、敷設後30年以上経過したものでも経年劣化が少なく、概ね良好な状態が維持されている。

しかしながら、可動区間などの一部では、可変パッドが損傷し、補修を要するケースが生じている。その主なものは凸状端部(リブ)の亀裂や破断である。図2は可変パッド上面(軌道パッド側)を起点とし、下部の補強繊維を終点とするリブ亀裂損傷時の断面イメージである。この損傷はレールのふく進に伴い、レールに固着または摩擦の高い状態で移動した軌道パッドがリブに乗り上がるため、同様の損傷は可変パッドが移動し、リブがタイププレートへ乗り上がる際にも生じる場合がある。

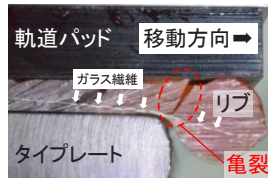


図2 可変パッドリブ亀裂損傷の断面イメージ

3. 損傷低減対策品の開発

レールふく進時の損傷を低減するためには、可変パッドの要求特性を明確にした上で、その特性の改善が重要である。そこで、可変パッドの典型的な損傷といえるリブの破断や亀裂の発生低減を目標に以下の検討を行った。

① 要求特性の明確化

・敷設温度環境、荷重条件等の使用条件の検討

② 補強繊維シートの材質や配置の変更による補強効果

の向上

・補強繊維シートの偏在解消、樹脂との付着性向上

③ 母材の素材変更による特性の向上

・樹脂の温度特性の改善

3.1 要求特性の明確化

(1) 敷設温度環境

可変パッドの敷設温度環境を明確にするため、鉄道総研構内の土路盤上スラブに設置した直結8形締結装置の各部材温度を測定した(東京都国分寺市、2017年5月から翌年3月の10カ月間)。図3はレールと可変パッドの温度の関係を示したもので、両者間の相関が認められた。1時間平均(1時間毎の平均温度)の最高温度はレール53.0℃、可変パッド46.8℃であり、同最低温度はレール-9.3℃、可変パッド-5.0℃であった。レール温度は日射条件や気温の影響が大きく、国内で50℃を上回る頻度は比較的少なく、その継続時間も一日数時間程度である^{2) 3) 4)}。このため、可変パッドの実用温度範囲は一般的には-10℃~50℃前後と想定される。しかしながら、レール温度が-20℃や60℃を超える過酷な地域では、-20℃~60℃前後の敷設温度環境を想定する必要がある。

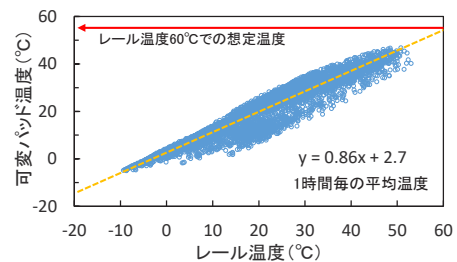


図3 レール温度と可変パッド温度の関係

(2) 荷重条件

可変パッドに作用する考慮すべき外力は、主に鉛直方向の圧縮力(レール支持力)と軌道パッド/タイププレート間のせん断力(レールふく進力)の2つである。以下にその検討結果を述べる。

① レール支持力

直結8形締結装置を対象とし、図4(a)に示すレール小返りFEM解析モデルを用いて、設計標準に定める設計A荷重作用時の締結部のレール底部変位を軌間内側(GC側)・軌間外側(FC側)でそれぞれ求めた^{5) 6)}。次に、軌道パッド形状をソリッド要素でモデル化し、同図(a)で求めたレール底部変位を与え、非線形静解析により軌道パッド下面応力を算出した(同図(b))。その結果、軌道パッド下面応力は、同図(c)に示すように軌道パッドの縦溝の縁部に集中し、一部で局所的に35MPaを超え、その他の部位では10MPa以下となった。このため、可変パッドの圧縮応力に関する要求特性の目標値を圧縮強さ40MPa、圧縮降伏応力10MPaとした。

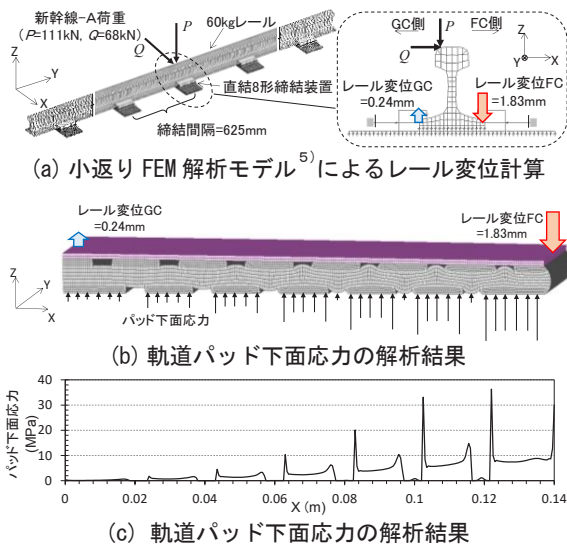


図4 新幹線設計A荷重作用時の軌道パッド下面応力

② レールふく進時の抵抗力

レールふく進時にリブに作用する局所荷重を推定するため、以下に示すレールふく進試験を実施した。

i) 試験方法

中央の締結装置のみでレールを締結した図5の装置を用いて表2の試験条件によりレールを長手方向に水平加振し、このときのレール加振力から1締結当たりの抵抗力を求めた。この際、レール締結部のレール/板ばね間にはグリースを塗布し、摩擦を低減した。また、軌道パッドは、図6に示すばね数や形状が異なる4種類の

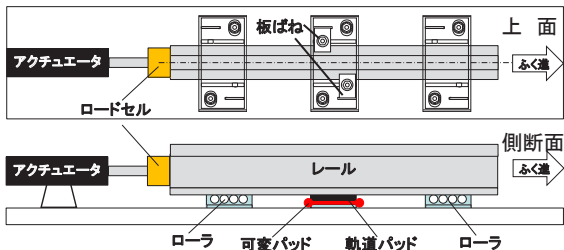


図5 レールふく進試験装置概略図

表2 ふく進抵抗試験の試験条件

項目	試験条件
レール種別	60 kgレール
締結装置	直結8形改, 軌道パッド: 4種類(図6参照, いずれも超硬質ゴム; エポナイト製滑材付), 締結軸力: 5.0kN/本
レール加振	三角波 0.5Hz, 振幅± 5.0mm

製品を用いた。いずれもレールとの接触面に超硬質ゴム(エポナイト)製滑材(EB材)を一体成型したものである。



図6 軌道パッドの形状(可変パッド面)

ii) 試験結果

図7に試験結果の一例として、30MN突起形状-U型の軌道パッドを用いた際のレール変位と1締結当たりの抵抗力の関係を示す。レールふく進時の抵抗力は、レールを締結する板ばね/レール間の摩擦を除くと、レール/軌道パッド/可変パッド/タイプレートのいずれかの2者間の相互作用力(摩擦力や接触力などの和)と等しくなる。図の例では、レールに強制変位が与えられると、抵抗力(絶対値)が約2kNまで増加し、摩擦の低い可変パッド/タイププレート間で僅かな滑りが生じた直後に、可変パッドのリブとタイププレートとの接触抵抗が増加して、約4.5kNに到達した時点でレール/軌道パッド間の滑りが生じた。

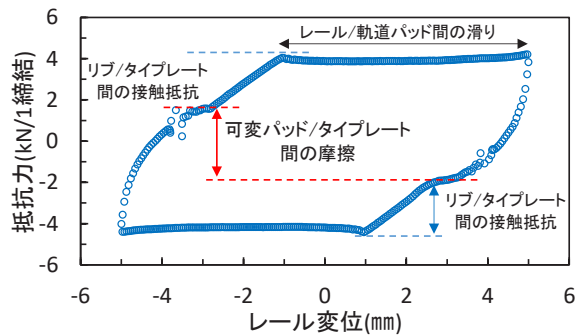


図7 レール変位と1締結当たりの抵抗力の関係(30MN突起形状-U型の軌道パッドの例)

レールふく進時のレール/軌道パッド間の1締結当たりの抵抗力は表3に示すように2.9kN~5.3kNであった。したがって、可変パッドのリブへの負荷

表3 EB材付軌道パッド1締結当たりの抵抗力

項目	1締結当たりの抵抗力(kN)	備考
平均値	3.9	左記は軌道パッド4種の測定結果
最大値	5.3	
最小値	2.9	
標準偏差	0.6	

は、可変パッド/タイププレート間の摩擦力を約2kNとすると、これを差し引いた0.9kN~3.1kNとなる。

次に、レール底部の腐食などによるレール/軌道パッド間の固着や高摩擦の状態を想定し、軌道パッドをレール底部に拘束し、滑りが生じない状態で同様の試験を実施した。このときのタイププレート側リブ高さ(1締結当たりの抵抗力)の関係を図8に示す。

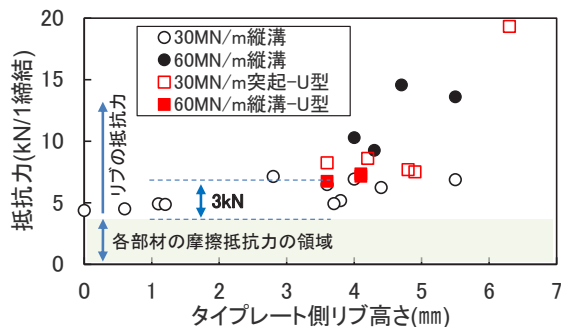


図8 レールふく進時の1締結当たり抵抗力とリブ高さの関係

1 締結当たりの抵抗力は軌道パッドのばね定数や形状によって異なり、リブの大きさに依存する。すなわち、ゴム材の剛性の低い30MN/m縦溝の軌道パッドでは、リブとの接触部が変形するため、可変パッドへの乗り上がり比較的生じ易く、リブ高さが3mmを上回る場合でも抵抗力が低いものがみられた。一方、30MN/m突起-U型軌道パッドでは表面の凹凸形状により可変パッド面の滑りが殆ど生じず、U型形状によってリブの上昇が抑制されるため、抵抗力が高くなることが確認された。

このように、1締結当たりの抵抗力は、ともに敷設される軌道パッドの表面形状やその摩擦の影響を受けるものの、リブ高さが1mm未満では概ね4kNであった。一方、スラブ軌道に求められるふく進抵抗力は、5kN/m(1締結当り約3.1kN)⁶⁾であるが、締結装置の軸力抜けや雪氷等による摩擦力の低下が生じる場合も想定される。厚さを標準最小厚4mmの50%となる2mm(断面積は280mm²)とし、リブが全ての抵抗力を負担すると仮定すると、この際のリブに対する局部応力は約11MPaに相当する。

(3) 可変パッドの要求特性

表4は上記の検討結果等を踏まえて整理した損傷低減対策可変パッドの主な材料特性に関する開発目標値である。敷設環境温度を-20℃から60℃と想定した対策品は、軟化により機械的強度が低下する高温環境下と脆化による可撓性が低下する低温環境下の双方において、これらの目標値を満たすことが求められる。

表4 損傷対策品の主な材料特性の開発目標値

特性項目	目標値	備考
レール支持力		
圧縮強さ	40MPa以上	レール小返り時の応力変動を加味して定めた
圧縮降伏応力	10MPa以上	
圧縮弾性率	0.2GPa以上	
レールふく進力		リブへの局部応力の約3倍相当の曲げ応力とした
曲げ強さ	35MPa以上	
可撓性		不動区間用の現用品(製品A)と同等の特性とした
曲げひずみ	5%以上	

3.2 損傷低減対策品の開発

前節では、可変パッドの典型的な損傷であるリブの亀裂や破断に着目し、開発時の要求特性を整理した。その結果、補強繊維の材質や配置の変更による補強効果の改善、または、母材として用いる熱硬化性樹脂素材の変更による特性向上が必要であることが明らかとなった。このため、以下の損傷低減対策品を開発した。

(1) 補強繊維改良品

可変パッドの補強繊維は、過去にもガラス繊維の代替として合成繊維が検討された事例がある⁷⁾。ガラス繊維に比べて低弾性な合成繊維は、リブへの集中応力や衝撃荷重の緩和が期待できる。ここでは表5に示すビニロン繊維(VF)、液晶ポリエステル繊維(ポリアリレート繊維; PARF)などの平織り構造の各種繊維シートをガラス繊維

表5 繊維シートの概要

試験片	織り構造	素材	密度[本/in]	目付[g/m ²]	厚さ[mm]
GF	平織	ガラス	縦16×横15	328	0.33
VF	平織	ビニロン	縦18×横18	210	0.58
PARF	平織	ポリアリレート	縦12×横12	160	0.25

維(GF)の代替補強繊維として比較・検討した。

従来の不飽和ポリエステル系樹脂にこれらの繊維シートを用いた供試体(複合材)の曲げ試験結果を図9に示す。60℃の高温では、新たな補強繊維の適用による特性の改善はみられないが、0℃以下の低温ではPARFの曲げ強さがGFの約1.5倍となり低温特性の大幅な改善が認められた。このため、PARFを用いた複合材(以下、「改良品」とする)を損傷低減対策品として、その他の特性に関しても比較、検討を行った。

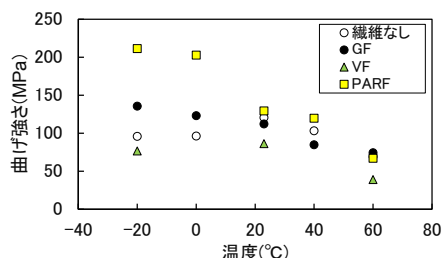


図9 各種補強繊維入り供試体(複合材)の曲げ強さ

(2) 液状樹脂開発品

現地での注入施工が可能で、温度特性に優れた素材として環状オレフィン樹脂の適用を検討し、試作した材料(以下、「開発品」)の樹脂硬化物の特性や施工性に関する評価を行った。液状樹脂の性状は表6のとおりである。なお、この開発品は、樹脂の可撓性が高く、従来素材にみられるような破断時の飛散がないため、補強繊維は用いないこととした。

表6 液状樹脂の性状²⁾

項目	特性値	
	A材	色調
比重		0.98 ± 0.02
粘度		0.30 ± 0.10Pa·s
B材	色調	透明薄緑色
	比重	0.98 ± 0.02
	粘度	0.30 ± 0.10Pa·s
混合樹脂液	可使時間	30 ± 5秒
	硬化時間	100 ± 10秒
	硬化収縮率	0.9%

4. 損傷低減対策品の特性評価

4.1 特性評価方法

損傷低減対策品の候補として改良品と開発品の2種、および比較のための現用品2種(不動区間用の製品A、可動区間用の製品B)について、試験温度-20℃~60℃の範囲で表7に示す樹脂硬化物の特性評価試験を行った。

なお、圧縮特性、引張特性では樹脂単体、その他の特性では複合材の試験片を用いて評価を行った。ただし、補強繊維を含まない開発品では、樹脂単体の試験片を複合材とみなして評価を行った。

表7 樹脂硬化物の特性評価試験の概要

試験項目	試験方法 (引用 JIS, 試験条件)
圧縮特性	JIS K7181, 試験速度 2mm/min, 樹脂単体試験片 12.7 × 12.7 × 12.7mm
引張特性	JIS K7162, 試験速度 5mm/min, 樹脂単体試験片ダンベル形状 1B 形
曲げ特性	JIS K7171, 試験速度 2mm/min, 支点間距離 64mm, 圧子 r = 5mm, 複合材試験片 100 × 80 × 4mm
シャルピー衝撃強さ	JIS K7111-1, 秤量 5J, 複合材試験片 80 × 10 × 4mm, タイプ 1フラットワイズ
引張衝撃強さ	JIS K7160 準拠, 秤量 15J, 複合材試験片ダンベル形状 3 形, 厚さ 4mm

4.2 特性評価結果

損傷低減対策品と現用品の樹脂硬化物の材料物性に関する特性評価試験結果を表8に示し、主な特性の個別試験結果について概要を述べる²⁾。

(1) 圧縮降伏応力 (樹脂単体の評価)

図10の圧縮降伏応力は、可動区間用現用品 (製品B) が軟化により 60℃で 10MPa を下回る一方、不動区間用現用品 (製品A : 改良品と同種)、開発品の2種では 60℃でも目標とする高温時の下限値 10MPa を満たした。

(2) 曲げ強さと曲げひずみ (複合材の評価)

図11に 60℃の曲げ強さと -20℃の曲げひずみの関係を示す。前者は高温時の機械的強度、後者は低温時の可

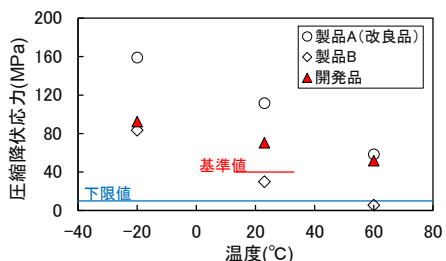


図10 圧縮降伏応力の温度特性の比較 (樹脂単体)

表8 損傷低減対策品の樹脂硬化物に関する特性評価試験結果²⁾

評価項目	単位	提案基準			損傷低減対策品の特性値						
		基準値 (標準温度)	下限値 (高・低温域)		23℃		-20℃		60℃		
			23℃	60℃	-20℃	改良品	開発品	改良品	開発品	改良品	開発品
圧縮特性	圧縮強さ	MPa	140	40	-	308	399	333	482	300	352
	降伏応力	MPa	40	10	-	127	79.9	172	101.3	76.6	60.0
	弾性率	GPa	0.2	0.2	-	3.4	2.0	3.8	2.1	2.3	1.6
引張特性	引張強さ	MPa	35	-	-	90.6	48.7	71.9	66.7	44.6	31.8
	破断点ひずみ	%	5	-	-	6.0	24.9	2.2	20.1	6.1	84.9
曲げ特性 (樹脂単体)	曲げ強さ	MPa	50	35	-	121	-	96.0	-	69.2	-
	曲げひずみ	%	5	-	5	5.3	-	2.7	-	4.6	-
	弾性率	GPa	1	1	-	3.3	-	3.7	-	2.4	-
曲げ特性 (複合材)	曲げ強さ	MPa	50	35	-	130	74.7	212	88.9	67.1	49.4
	曲げひずみ	%	5	-	5	5.5	6.4	5.9	6.4	5.8	5.5
	弾性率	GPa	1	1	-	3.6	2.1	5.1	2.3	1.7	1.6
耐衝撃 特性 (複合材)	シャルピー衝撃強さ	kJ/m ²	50	-	25	57.4	79.3	68.0	91.7	62.6	72.8
	引張衝撃強さ	kJ/m ²	100	-	-	141	227	169	254	109	269
耐熱性	荷重たわみ温度	℃	60℃	-	-	81.2	142	-	-	-	-

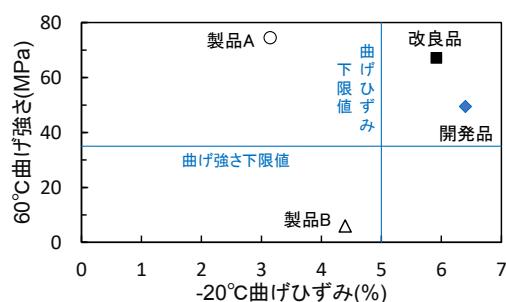


図11 現用品と損傷低減対策品の曲げ特性の比較 (複合材)

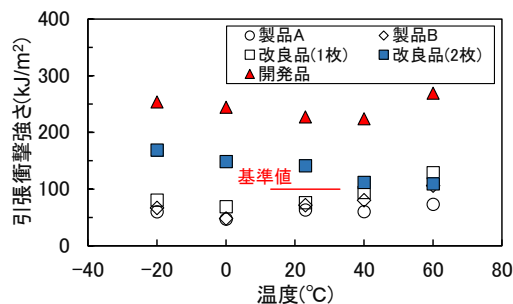


図12 引張衝撃強さの温度特性の比較 (複合材)

撓性に対する指標となる重要な評価項目である。改良品と開発品では、現用の製品2種と比較すると特性のバランスが向上し、いずれも目標とする高温時曲げ強さの下限値 35MPa と低温時曲げひずみの下限値 5% の基準を満たした。

(3) 引張衝撃強さ

図12に引張衝撃強さの温度特性を示す。引張衝撃強さは耐衝撃性評価の重要な指標である。損傷低減対策品では、低温域での現用品との比較で開発品が約3~4倍、補強繊維 (PARF) を上下2層に配置した改良品 (2枚) が約1.5~3倍の高い値をし、耐衝撃性が大幅に向上したことを確認した。なお、PARF を下面に1層のみ配置した改良品 (1枚) では補強による改善効果が認められなかった。

5. 損傷低減対策品の実用化評価

5.1 開発品の性能照査

開発品に関しては、直結8改形 (低) レール締結装置での実軌道への適用の可否を評価するため、列車荷重に対する耐久性とレールのふく進に対する耐荷重性の確認試験を実施した。

(1) 列車荷重に対する耐久性の確認

列車荷重に対する耐久性の確認のため、鉄道構造物等設計標準⁶⁾に準拠した疲労破壊に関する安全性の照査を静的載荷と繰り返し載荷の2項目の試験で実施した。

特集：材料技術

その結果、静的載荷では、60kg レールの頭部左右変位量が設計限界値 5.2 mm 以下の最大 4.5mm であり、疲労破壊に関する安全性を満たした。また、繰り返し載荷ではレール左右変位、上下変位、小返り角、締結ボルト軸力の各値が顕著な変動なく推移し、100 万回載荷後においても亀裂や顕著な摩耗等の変状は認められなかった。

(2) レールのふく進に対する耐荷重性の確認

可変パッドの耐荷重性に関して、強度上最も不利となる最小打設厚さ 4mm でふく進試験を行った結果、リップを含め、可変パッド全体に変状は認められず、良好な状態を維持した。

以上の結果より、開発品は実軌道への適用が可能であることを確認した。

5.2 施工性

開発品の注入施工性を確認するため、日野土木実験所構内のスラブ軌道において施工試験を実施した。施工試験の状況を図 13 に示す。



(a) 二液先端混合装置 (b) 注入状況 (c) 注入口の加温状況

図 13 開発品の注入施工試験の状況

施工試験では、打設厚 4mm と 14mm のケースについて、各 8 箇所の締結装置に 2 液先端混合装置を用いて開発品の液状樹脂を注入し、現用品と同等の注入施工が可能であることを確認した。外気温 5°C (レール温度 7°C)、打設厚 4mm のケースでは樹脂注入後に注入口付近を電熱器で加温することにより、30 分以内で硬化することを確認した。

なお、施工性に関しては、低温時の加温方法や高温時の遅延剤添加などによる改善の余地があると考えられる。

6. まとめ

レール高低調整用可変パッドについて、補強繊維、樹脂等の素材や構成を見直した損傷低減対策品を開発するとともに、その要求特性に関する基準を提案した。その概要は以下のとおりである。

- (1) 損傷低減対策品の敷設温度環境に関する検討を行い、過酷な地域において -20°C から 60°C 前後の使用環境を想定する必要性を明らかとした。
- (2) レール小返り時の軌道パッド下面応力を FEM 解析した結果、軌道パッド縦溝の縁部で 35MPa 超の局所応力が発生し、その他の部位では 10MPa 以下となることが推定された。

- (3) レールふく進試験の結果、1 締結当りの抵抗力は可変パッドのリップ高さや軌道パッド形状などの依存し、リップでは 3kN 程度の局所的な負荷を想定する必要があることが明らかとなった。
- (4) (1)～(3) の検討結果を踏まえ、損傷低減型可変パッドの樹脂硬化物の特性に関する基準を提案した。
- (5) 上記の基準を満たす損傷低減対策品として、補強繊維に液晶ポリエステル繊維 (PARF) を用いた複合材および環状オレフィン樹脂の 2 種類を試作した。
- (6) 上記の損傷低減対策品は -20°C での耐衝撃性が現用品比で約 2～4 倍となる他、高温時の機械的強度も向上するなど温度特性が大幅に改善することが確認された。
- (7) 静的載荷試験などによる性能照査の結果、開発品は安全性の照査を満足するとともに、十分な耐荷重性を有し、実軌道に適用可能であることを確認した。
- (8) 注入施工試験の結果、開発品は現用品と同等の注入施工が可能であることを確認した。一方で、施工効率の向上に関して可使時間の延長や加温方法の検討などの課題があることが明らかとなった。

7. おわりに

省力化軌道の先駆けとなったスラブ軌道は、建設から 50 年余り経過し、補修が必要となる損傷箇所も一部で見受けられる。本研究で得られた成果が今後の軌道保守作業の軽減の一助となれば幸いである。

謝辞

本研究における走行試験の実施にあたり、RIMTEC 株式会社の竹内氏をはじめ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) 佐々木直樹：新幹線のスラブ軌道，(社) 日本鉄道施設協会，1973 年 12 月
- 2) 鈴木実，栢田吉弘：レール高低調整用可変パッドの損傷低減対策品に関する検討，土木学会第 74 回学術講演会概要集，2019
- 3) 清水敬二，吉田弘：軌道整正パッキンに関する研究，鉄道技術研究報告，No.998 (施設編第 446 号)，1976.7
- 4) 浦川文寛：日射を考慮したレール温度予測モデル，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 J-RAIL，2017.8
- 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
- 6) 国土交通省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説，軌道構造，(公財) 鉄道総合技術研究所編，2012.1
- 7) 長谷川真吾，山中貞勇，保坂信克，植松宗弘：繊維形状を変えた新幹線スラブ軌道用可変パッドの開発，土木学会第 66 回学術講演会概要集，2011