

傷抑制を目的とした熱処理レールの導入



須藤 雅人*¹



安藤 洋介*²



吉田 謙一*³

Introduction of a heat treated rail to reduce the rail head defect

Masato SUTO*¹, Yosuke ANDO*², and Kenichi YOSHIDA*³

*¹ Researcher, Technical Center, Research and Development Center of JR EAST Group

*² Chief Researcher, Technical Center, Research and Development Center of JR East Group

*³ Senior Researcher, Technical Center, Research and Development Center of JR East Group

Abstract

In recent years, surface scratches on the rail head often occur in heat treated rails with gentle curves. Therefore, we have developed and introduced a heat-treated rail to reduce the number of such scratches. The heat treatment rail is softer and more easily wear than the conventional heat treated rail, and can suppress the occurrence of scratches. This paper describes the test results of the heat treatment rail and the background of its introduction.

●**Keywords:** Head checks, Gauge corner cracking, Gauge face wear, Heat treated rail, Rrail usage classification

*¹JR東日本研究開発センター テクニカルセンター 研究員

*²JR東日本研究開発センター テクニカルセンター 主幹研究員

*³JR東日本研究開発センター テクニカルセンター 上席研究員

1. はじめに

JR東日本（以下、「当社」という）では、線路等級および曲線半径に応じて熱処理レールの使用区分¹⁾を定めて普通レールと熱処理レールを使い分けている。しかしながら、この使用区分は、国鉄時代にレールの摩耗進みの調査結果に基づいて定められたものを踏襲しており、現在の熱処理レールの性能や車両条件・軌道構造を十分に反映したものではない。現に、近年は比較的緩やかな曲線の外軌の熱処理レール（以下、「HH340レール」という）でシェリングやきしみ割れなどの頭部表面傷が多く発生しており、軌道工事費の削減という観点からも喫緊の課題となっている。

そこで、このような頭部表面傷の発生を抑制するため、現在敷設されている熱処理レールの状態を調査・分析するとともに、HH340レールと比較して耐損傷性に優れた摩耗促進型の熱処理レールを用い、室内試験および営業線での敷設試験による各種検証を経て熱処理レールの使用区分を改正し、2021年度から本格的に導入した。

本稿では、今回導入に至った熱処理レールの各種試験による評価および検証結果、熱処理レールの使用区分改正の内容について報告する。

2. 摩耗促進型熱処理レールの目的

2・1 レール交換の現状

修繕工事におけるレール交換理由は、主にレール傷、摩耗、累計通過トン数に分けられる。図1に、当社のレール交換理由の割合（2016年度～2018年度平均、延長ベース）を示す。同図より、当社においては、レール交換理由の約半分を頭部表面傷が占めていることがわかる。なお、この頭部表面傷の大半は、転がり接触疲労傷であるシェリングやきしみ割れによるものである。

また、図2に曲線半径ごとのレール探傷車による頭部表面傷の検出個数を集計した結果を示す。同図より、頭部表面傷は半径501m～800mの比較的緩やかな曲線の熱処理レール（HH340レール）で発生しやすいことがわかる。なお、近年このような曲線の頭部表面傷の検出個数は増加傾向に

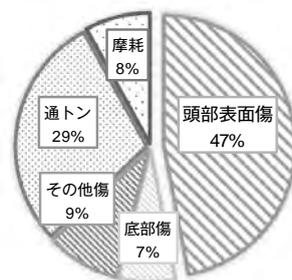


図1 レール交換理由

あり、探傷車の検査周期短縮やレール傷のランク判定の見直しなどのレール損傷管理の強化を実施したことに加えて、車両の軽量化や熱処理レールの性能向上などにより、曲線外軌において摩耗の進行よりも頭部表面傷の発生が優位になったためと考えられる。

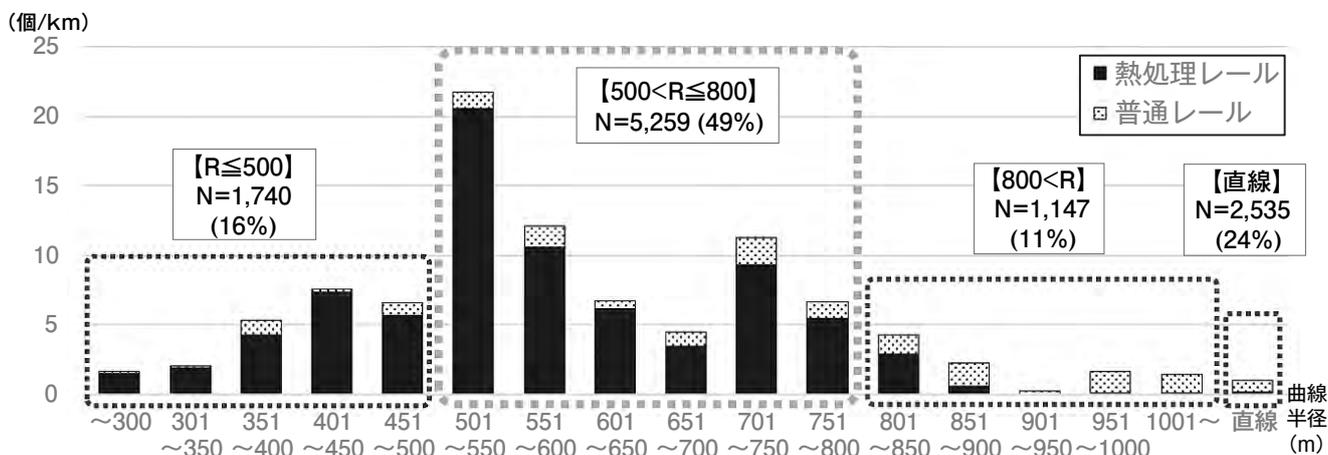


図2 曲線半径ごとの頭部表面傷の発生傾向 (2019年度、1,2級線)

2・2 曲線区間の頭部表面傷

半径501m~800mの比較的緩やかな曲線においては、外軌のゲージコーナー部にレール横断方向に比較的時間の短いき裂が連続して発生しやすく、このような傷は、きしみ割れ (図3) と呼ばれる。このきしみ割れは、レール横断方向の長さに応じて保守基準が定められているが、成長するとき裂とき裂の間にはく離が生じて騒音等の問題につながることもある。きしみ割れはゲージコーナー部に発生するため、探傷車での検出が難しい。したがって、実際には、先掲の図2に示した以上に多くの頭部表面傷が存在していると考えられる。また、曲線区間では、図4に示すようなきしみ割れの中に山型のき裂を起点として水平裂が進行し、その後レール内部に分岐して横裂傷に至る形態もよく見られる。このような形態の頭部表面傷は、ゲージコーナーき裂と呼ばれ、レール破断に至ることもあるため、特に注意して管理する必要がある。

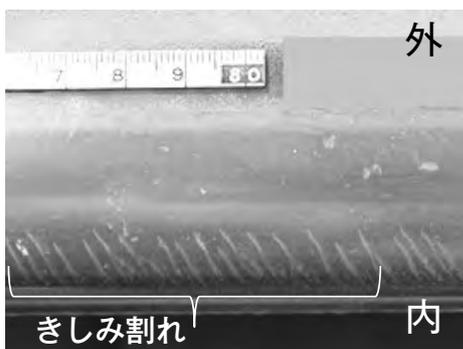


図3 きしみ割れ



図4 ゲージコーナーき裂

2・3 摩耗促進型熱処理レールの特徴

当社のレール交換の現状を鑑みると、曲線外軌のきしみ割れやゲージコーナーき裂などの頭部表面傷の発生を抑制することがレール交換数量、ひいては軌道工事費の削減に直結する。そこで、現行のHH340レールよりもレール頭部を軟らかくして摩耗を促進させることで頭部表面傷の発生起因となる疲労層を除去し、曲線外軌ゲージコーナー部の頭部表面傷の発生を抑制できる摩耗促進型熱処理レール²⁾ (以下、「HH320レール」という。この呼び名は、HH340レールと区別するために弊社内の通称として用いている。)を用いて試験等を実施することとした。

表1にHH320レールの諸元を示す。一般的に炭素量が多いほど、また熱処理を施すことによりレール頭部表面は硬くなるが、HH320レールは普通レールと同様の母材を熱処理しているため、炭素量は普通レールと同様で硬さを抑制している。レールの硬さは同表中のブリネル硬さで表わされ、HH320レールの硬さは普通レールとHH340レールの中間程度である。したがって、摩耗進みも普通レールとHH340レールの中間程度となることが期待される。なお、HH320レールの溶接条件は、基本的にはHH340レールと同様である。

表1 熱処理レール (HH320レール) の諸元

レール種別	熱処理の有無	プリネル硬さ	化学成分 (%)						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	V
普通レール	無	235以上	0.63~0.75	0.15~0.30	0.70~1.10	0.03以下	0.025以下	-	-
HH320	有	291~355	0.63~0.75	0.15~0.30	0.70~1.10	0.03以下	0.025以下	-	-
HH340	有	321~375	0.72~0.82	0.10~0.55	0.70~1.10	0.03以下	0.020以下	0.20以下	0.03以下

3. HH320レールの評価および検証

3・1 室内試験による評価

HH320レールの頭部表面傷に対する耐損傷性を評価するため、HH320レールおよびHH340レールを含めた4種類の試験輪を用いた車輪・レール転動試験装置 (図5) による室内試験³⁾を実施した。HH320レールがJISに定める普通レールの規格内であることに対し、残り2種類のうち、鋼種AはJISの熱処理レールの規格内でプリネル硬さ350以上のもの、鋼種Bは炭素量を0.85~0.95%と増加させ硬さを高めたものであり、いずれもHH340レールより硬いレールである。本試験では、半径800mの曲線を速度80km/hで列車が走行することを想定し、き裂がはく離に至るまでの通トン数を評価した。図6に、試験後の試験輪の外観状態を示す。同図に示すように、HH320レールの試験輪は通トン1.5億トン程度まではく離が発生しなかったが、HH340レールの試験輪は0.7億トン程度ではく離が生じ、1億トン程度で大きく欠損した。結果として、き裂がはく離に進展するまでの時期は、長い順番にHH320レール、鋼種A、鋼種B、HH340レールとなり、HH320レールは他の鋼種と比べて耐損傷性に優れていることがわかった。



図5 車輪・レール転動試験装置

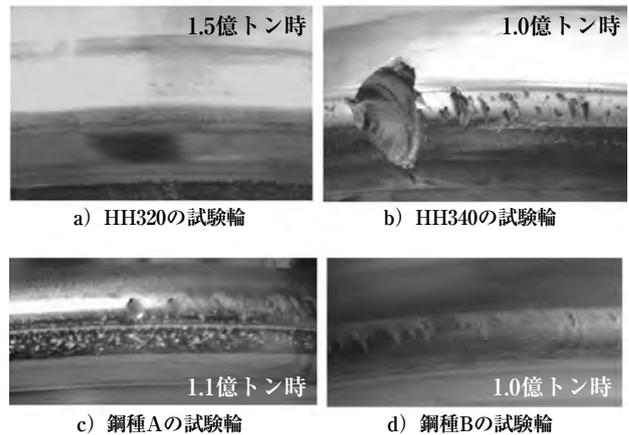


図6 車輪・レール転動試験の結果

3・2 営業線長期試験敷設による検証

HH320レールを営業線に長期的に試験敷設し、耐損傷性および摩耗量を検証した^{3) 4)}。敷設箇所は、累積通トン1.5億トン程度でHH340レールの頭部表面傷が原因で交換が計画されていた年間通トン3千万トン程度の総武快速線の曲線 (R=800m、C=75mm) の外軌である。試験敷設は、2010年2月~2017年2月の期間で、累積通トン約2億トンまで実施した。なお、比較検証のため、当該円曲線中にはHH320レールの他にHH340レールも含めた室内試験を実施した3種類のレールも同時に敷設した。敷設延長はいずれのレールも50mである。

レール頭部の表面状態について、HH320レールは敷設期間中に軽度のさしみ割れが見られたものの、顕著な頭部表面傷は確認されなかった。一方、HH340レールは累積通トン1.9億トン程度で頭部水平裂の起点となる山型き裂が確認された。そこで、試験敷設後のHH320レールとHH340レールの山型き裂の数をそれぞれ調査した。調査は山型き裂を目視で確認し、その頂点の周りを超音波厚さ計で探傷して水平裂の有無を確認した。図7に、水平裂を伴った山型き裂の数を示す。同図より、HH320レールはHH340レールと比べて山型き裂の数が少なく、より耐損傷性に優れていることがわかった。鋼種A,Bのレールについても最終的にはHH340レールを上回るはく離、山形き裂および水平裂が確認されており、この傾向は前節の室内試験の結果と同様であった。

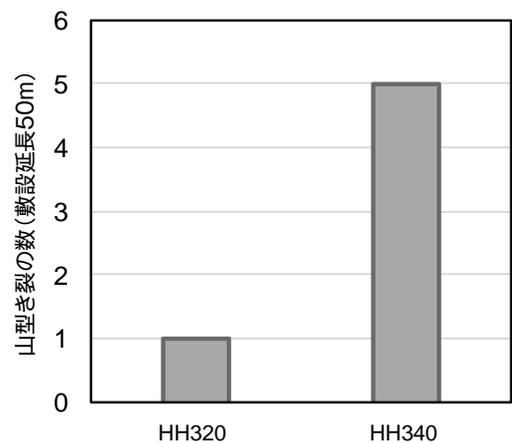


図7 山型き裂の数

また、試験敷設期間中に各レールの摩耗量を定期的に調査した。摩耗量は、

レール断面形状測定機 (MiniProf) を用いてレール頭部の断面形状を測定し、45°位置の敷設時からの摩耗量をそれぞれ評価した。図8に、摩耗量の調査結果を示す。同図中の普通レールの摩耗量は、試験敷設前 (2004年10月~2010年2月) の探傷車で測定した45°摩耗の平均値±1σであり、参考値として記載している。同図より、HH320レールはHH340レールと比べて1.6倍程度摩耗しやすいことがわかった。この結果はHH320レール利用の当初のコンセプトどおりであり、HH340レールと比べてレール頭部表面が早く摩耗することで表面傷の発生起因となる疲労層が除去されやすいと考えられる。

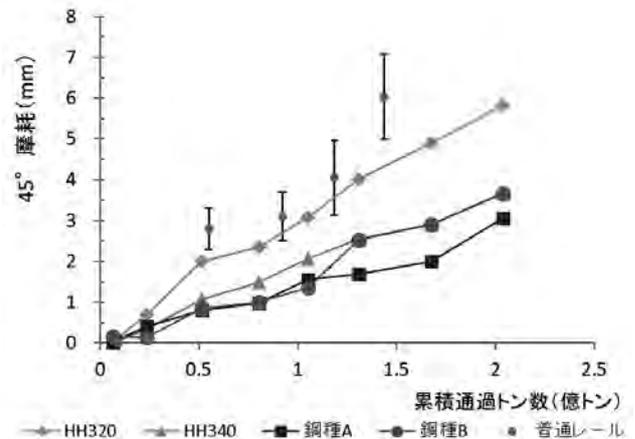


図8 摩耗量の比較

3・3 試験敷設箇所の拡大と追跡調査

総武快速線での長期試験敷設の結果より、HH320レールの耐損傷性および摩耗量が当初の想定どおりの傾向を示すことが確認できたことから、本導入に向けてさらなるデータ収集を行うことを目的に、2019年度に新たに総武快速線や東北本線など総延長約4.5kmにわたって試験敷設箇所を拡大した。なお、比較検証のため、各箇所においてHH320レールの敷設箇所と線路線形や年間通トン、軌道構造が概ね同条件の箇所にHH340レールを同時期に敷設した。

追跡調査では、摩耗量ときしみ割れ深さを測定して評価した。摩耗量の測定については、前節と同様にレール断面形状測定機 (MiniProf) を用いた。一方、きしみ割れ深さについては、図9に示す渦電流探傷装置⁵⁾を使用した。この装置は被検査材料に渦電流を発生させ、表面傷などがあるとその渦電流が著しく変化することを利用して傷の深さを測定できるものである。

図10に、追跡調査箇所である総武快速線の累積通トン約2千万トン時の摩耗量の調査結果の例を示す。同図より、長期試験敷設時と同様、HH320レールはHH340レールと比べてレール頭部の摩耗量が大きくなる傾向が確認できる。

また、図11に累積通トン約2千万トン時のきしみ割れ深さの調査結果を示す。同図より、HH320レールのきしみ割れ深さは、HH340レールと比べて大きく抑制されていることがわかる。円曲線区間における平均値で評価すると、HH320レールのきしみ割れ深さは、HH340レールの0.22倍程度であった。

以上のように追跡調査の結果からもHH320レールはHH340レールと比べて摩耗量が大きく、耐損傷性の向上が期待できる結果となった。



図9 渦電流探傷装置

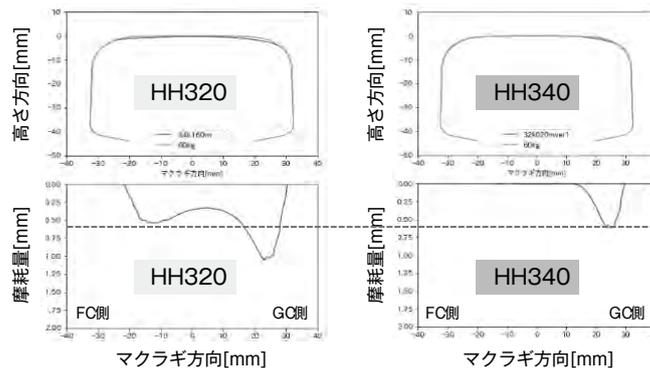


図10 摩耗量の調査結果 (2千万トン時)

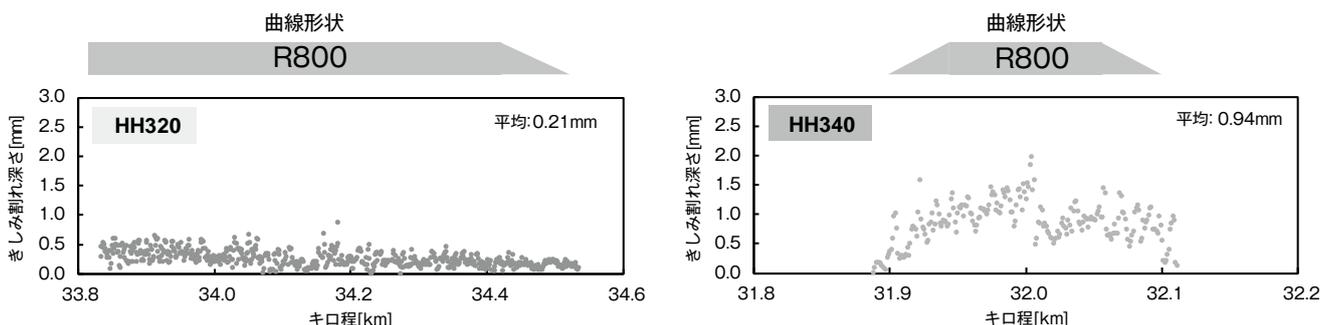


図11 きしみ割れ深さの調査結果 (2千万トン時)

4. レール使用区分の改正

室内試験および営業線への試験敷設の結果から、HH320レールの耐損傷性および摩耗量は、当初のコンセプトどおりであることが確認された。そこで、HH320レールの導入に向けて熱処理レールの適切な使用区分の検討を実施した。この検討にあたっては、頭部熱処理レールは曲線外軌における使用を前提とし、曲線半径に応じて頭部表面傷の発生と摩耗のバランスを適切に考慮した使用区分とすることを基本方針とした。

4・1 曲線外軌における最適な摩耗速度の検討

4・1・1 摩耗速度の下限値の検討

摩耗速度が遅すぎると疲労層が除去されにくいいため、頭部表面傷が発生しやすくなる。そこで、頭部表面傷の発生を抑制できる摩耗速度の下限値を設定することとした。ここで、きしみ割れが発生しやすい摩耗速度は、きしみ割れの発生報告が多い半径800mの曲線外軌における摩耗量ときしみ割れの発生有無を調査した過去の知見⁶⁾ から、0.9~1.8mm/億トン程度であることがわかっている。したがって、摩耗速度の下限値は1.8mm/億トンと設定した。

4・1・2 摩耗速度の上限値の検討

摩耗速度が速いと、累積通トンによる交換基準より早く摩耗交換基準に達する可能性がある。そこで、過度な摩耗を抑制するために、摩耗速度の上限値を設定することとした。この検討にあたっては、HH340レールの現状を分析した。表2に、2017年12月時点において、半径500m~800mの曲線外軌のHH340レールの累積通トンごとの摩耗量を調査した結果を示す。同表より、まず累積通トンに着目すると、半径500m~800mの曲線外軌のHH340レールのうち累積通トン4億トン以上使用されているものは、4%程度であることがわかる。これは、半径500m~800mの曲線外軌に敷設されたHH340レールのほとんどが、レール傷または摩耗により4億トン未満で交換されていることを示す。次に、摩耗量に着目すると95%が5mm未満である。つまり、半径500m~800mの曲線外軌に敷設されたHH340レールでは摩耗が進行して交換基準に至ることはなく、累積通トン4億トン未満でレール傷による交換が行われていることになる。したがって、HH320を敷設した場合には、累積通トンを4億トン以上まで延伸できれば、現行のHH340レールよりも有効であると考えられる。そこで、当社の1.2級線の摩耗交換基準が14mm~16mmであることから、累積通トン4億トンのときに摩耗交換基準(16mm)に達する速度として、4mm/億トンを摩耗速度の上限値と設定した。

前項の摩耗速度の下限値の検討結果も考慮し、適切なレール使用区分を検討するための曲線外軌における最適な摩耗速度を1.8~4.0mm/億トンと設定した。

表2 HH340の累積通トンごとの摩耗量

累積通トン	摩耗量				合計
	0mm以上 5mm未満	5mm以上 10mm未満	10mm以上 15mm未満	15mm以上	
1億トン未満	86.9 97%	2.5 3%	0.0 0%	0.0 0%	89.4 100%
1億トン以上	60.6	1.7	0.0	0.0	62.3
2億トン未満	97%	3%	0%	0%	100%
2億トン以上	32.0	4.2	0.2	0.0	36.4
4億トン未満	88%	12%	0%	0%	100%
4億トン以上	3.1	0.1	0.0	0.0	3.2
6億トン未満	95%	5%	0%	0%	100%
6億トン以上	0.7 91%	0.1 9%	0.0 0%	0.0 0%	0.8 100%
合計	183.3 95%	8.6 4%	0.2 0%	0.0 0%	192.1 100%

4・2 曲線外軌における最適なレール使用区分の検討

曲線外軌における最適なレール使用区分を検討するために、これまでに半径500m~800mの曲線外軌に試験的に敷設した普通レールおよびHH320レールの摩耗量および当該箇所における交換前のHH340レールの摩耗量を調査した。図12に、レール種別ごとの曲線半径と摩耗速度の関係を示す。同図より、いずれのレールも曲線半径が小さくなるほど摩耗速度が速くなる傾向があり、同一の曲線半径で比較すると、普通レール、HH320レール、HH340レールの順で摩耗速度が速い傾向がある。表3に、図12中の各レール種別のそれぞれのプロットに対する近似曲線から算出した曲線半径ごとの摩耗速度を示す。これに前節で設定した曲線外軌における最低な摩耗速度1.8~4.0mm/億トンを当てはめると、HH320レールについては、半径500m≤R<800mが該当する。

以上のことから、曲線外軌における最適なレール使用区分としては、半径500m以下にHH340レール、半径500m<R≤800mにHH320レール、半径800m超に普通レールが望ましいという結論が得られた。

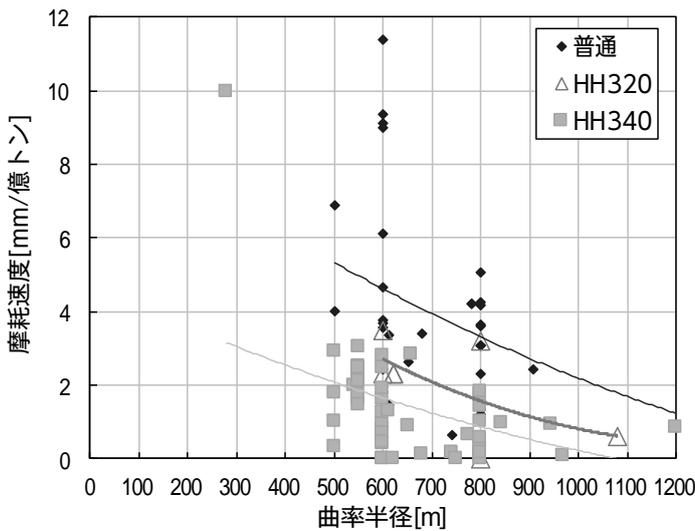


図12 曲線半径と摩耗速度の関係

表3 改曲線半径ごとの摩耗速度

曲線半径[m]	摩耗速度[mm/億トン]*		
	普通レール	HH320	HH340
400	6.1	4.2	2.5
500	5.3	3.4	2.1
600	4.6	2.7	1.6
700	3.9	2.1	1.2
800	3.3	1.6	0.9
900	2.7	1.1	0.5

※最適な摩耗速度は1.8～4.0mm/億トン

4・3 熱処理レール使用区分の改正内容

前節の検討結果より、在来線においては1,2級線の曲線外軌の熱処理レールの使用区分を表4に示すとおりに改正し、2021年度工事から標準化した。これにより、半径500m<R≤800mの曲線ではHH320レールを標準的に敷設することとなり、当該区間における頭部表面傷の発生の抑制が期待できる。また、本改正では、HH340レールやHH320レールを標準的に敷設する箇所においても、きしみ割れの発生が顕著である箇所にはHH320レールや普通レールを敷設することも認めている。これにより、現場の状況に応じて柔軟に敷設するレールを選択できるようになった。

表4 熱処理レールの使用区分の改正内容 (1,2級線、外軌)

曲線半径	現行	改正
R>800m	普通レール	普通レール
500<R≤800m	HH340	HH320 ^{※1}
R≤500m		HH340 ^{※2}

※1 現場の状況を考慮して、普通レールを使用可能
 ※2 現場の状況を考慮して、HH320を使用可能

5. おわりに

本稿では、曲線外軌における頭部表面傷の発生を抑制することを目的としたHH320レールの導入経緯とこれに伴う熱処理レールの使用区分の改正内容について報告した。HH320レールの使用は2021年度から標準化されているが、その効果は5年程度後から発現すると考えられるため、今後はHH320レールの導入効果を検証していく。

参考文献

- 1) 新版軌道材料編集委員会編、新版軌道材料、鉄道現業社、pp.39、2011
- 2) 兼松義一、近年の曲線外軌の損傷事例と新型熱処理レール、新線路、Vol.70、No.7、pp.23-25、2016
- 3) 小木曾清高、元好茂、矢作秀之、曲線外軌への耐きしみ割れ用レール適用に関する研究、鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 J-RAIL、2014
- 4) 兼松義一、松井元英、新型熱処理レールの現地敷設試験の経過、日本鉄道施設協会誌、Vol.57、No.8、pp.15-18、2019
- 5) 小木曾清高、元好茂、松本剛明、渦電流によるきしみ割れ深さ測定の見直し、第20回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2013)、pp.465-468、2013
- 6) 金鷹、石田誠、青木宣頼、レールきしみ割れ発生原因の実態調査と解析結果、日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、pp.163-164、2006