

曲線外軌の損傷低減を目指した熱処理レールの長期敷設試験

兼松 義一* 寺下 善弘**

Long-Term Installation Test of Head-Hardened Rails for Reducing Rolling Contact Fatigue on High Rails in Curved Sections

Yoshikazu KANEMATSU Yoshihiro TERASHITA

Head-hardened rails (HH340) are characterized by reduced wear compared to standard as-rolled rails. As a result, they extend the replacement life of rails due to wear on high rails in curved sections. However, HH340 can develop rolling contact fatigue (RCF) damage in the form of gauge corner cracks. Therefore, to reduce both wear and RCF damage, several new types of head-hardened rails have been developed and its resistance to damage was evaluated in long-term installation tests. These tests showed that some of the developed rails exhibited less wear than standard as-rolled rails. Moreover, fewer horizontal cracks that could develop into gauge corner cracks than HH340 rails.

キーワード：熱処理レール，摩耗，転がり接触疲労，ゲージコーナキ裂，敷設試験，硬さ

1. はじめに

既存の熱処理レール（以降，HH340 レールと呼ぶ）は，直線用の普通レール（以降，AS レールと呼ぶ）に比べて硬さが高いため，車輪との繰り返し接触による摩耗が少なくなり，曲線外軌の摩耗によるレール交換寿命を延伸する効果がある。しかし，曲線半径 600m～800m 程度の外軌に敷設された HH340 ではゲージコーナキ裂が発生しやすい傾向が見られる¹⁾。ゲージコーナキ裂は，転がり接触疲労損傷であるシェリングと同様に水平裂（外観上，山形き裂が形成される）から横裂へ進展し，折損に至る場合がある（図1）。また，ゲージコーナキ裂はきしみ割れと混在するため外観の識別が難しいことや，群発することがあるため超音波探傷検査や継目板の設置が困難になる等，保守管理上の課題となる。

そこで，このゲージコーナキ裂へのレール材質面からの対策として，素材や硬さが異なる新型熱処理レールを開発し，溶接条件の検討，敷設試験を行った。本報告はこれらの結果をまとめたものである。

2. 新型熱処理レールの開発

2.1 曲線外軌の損傷発生率

曲線外軌の損傷発生率の状況について傾向を把握するため，鉄道事業者が保有するレール探傷車のデータを集約して解析した。対象とした曲線は，曲線半径 400m 以上，レール削正履歴なし，塗油潤滑なし，累積通過トン数 1.5 億トン以上の曲線延長 100m 以上の円曲線の範囲とした。図 2 に AS レールおよび HH340 レールの損傷発生率を示す。曲線外軌の AS レールの損傷発生率は HH340 レールよりも低く，特に曲線半径 600m 以上 700m 未満における AS レールの損傷発生率 18.7% に対し，HH340 レールは 57.1% であった²⁾。これは，レールの硬さ等を変えることによって，ゲージコーナキ裂を抑制できる可能性を示すものと考えられた。

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

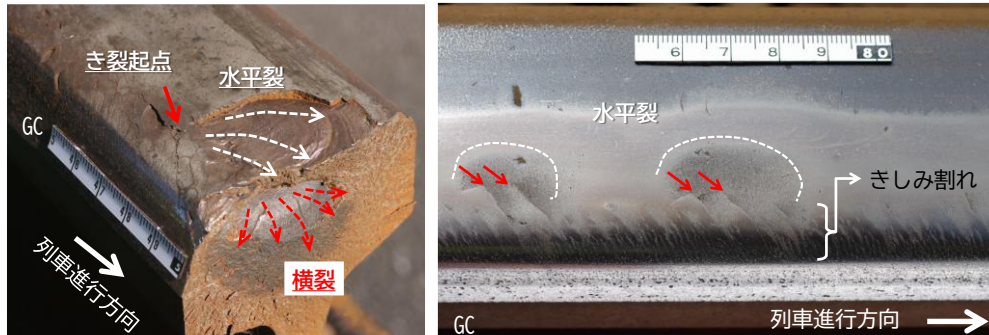


図1 ゲージコーナき裂で折損したレール・ゲージコーナき裂の外観

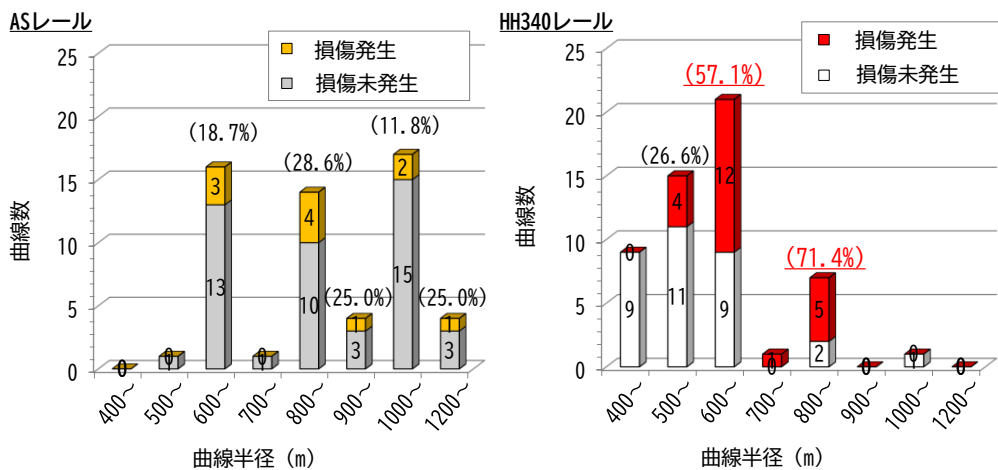


図2 曲線外軌の損傷発生率²⁾

2.2 新型熱処理レールのコンセプト

新型熱処理レールは既存のレール（ASレール，HH340，HH370）を素材として熱処理によって硬さを変更しており，二種類のコンセプトの4鋼種である（表1）．第一のコンセプトは疲労損傷を抑制するため適度に摩耗を進行させることを目指した「摩耗重視型」であり，硬さの異なる3鋼種（HH320，JHH1，JHH2）を試作した．第二のコンセプトは強度向上によって疲労損傷の前駆現象である塑性変形を抑制して損傷の予防を目指した「強度重視型」で1鋼種（JHH37）を試作した．いずれも金属組織はパーライト組織である．

2.3 新型熱処理レールの溶接

2.3.1 溶接条件

溶接条件の検討対象とした溶接法は，敷設試験に適用されるフラッシュ溶接，ガス圧接およびテルミット溶接の3工法である．なお，本検討にあたっては，各レール鋼種の化学成分および頭部硬さを考慮した．フラッシュ溶接では既存のASレールおよびHH340レールのどちらについても同一の溶接条件で施工されている．新型熱処理レールは何れの鋼種も既存の各レール鋼種の化学成分の規格範囲内であり，機械的性能も既存鋼種と大差ないことから，既存レールに対する溶接条件をそのまま適用することとした．ガス圧接では，ASレールとHH340レールの圧接条件（圧縮量）に差があり，これは各鋼種の化学成分の差に基づいている．このことから，新型熱処理レールの圧接条件についても各レール鋼種の化学成分を考慮して圧縮量を設定した．また，テルミット溶接では，溶接部の頭部硬さを考慮して適用するテルミット溶剤を選定した．なお，JHH37は，化学成分および頭部表面硬さが既存熱処理レール（HH370）に相当することから，既存の溶接条件および後熱処理条件がそのまま適用できると考え，溶接試験を省略した．

表1 新型熱処理レールと既存レールの諸元

| 鋼種 | HH320 | JHH1 | JHH2 | JHH37 | AS | HH340 |
|--------|------------|------------|-------|------------|------------|-------|
| 種別 | 新型熱処理レール | | | | 既存レール | |
| コンセプト | 摩耗重視型 | | 強度重視型 | | - | - |
| レール素材 | AS | HH340 | HH340 | HH370 | - | - |
| 炭素量 | 0.63-0.75% | 0.72-0.82% | | 0.63-0.75% | 0.72-0.82% | |
| ブリネル硬さ | 320HB | 285HB | 310HB | 370HB | 260HB | 340HB |

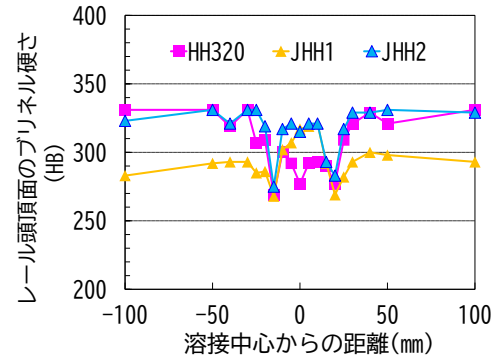


図3 フラッシュ溶接部の頭頂面硬さ分布 (溶接したままの状態)

表2 選定した新型熱処理レールの溶接条件および後熱処理条件

| 溶接法/条件/鋼種 | | HH320 | JHH1 | JHH2 | JHH37 |
|-----------|------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| フラッシュ溶接 | 溶接 | 従来条件 | 従来条件 | 従来条件 | 従来条件 |
| | 後熱処理 | RSQ: 風圧-* | なし | なし | RSQ: 風圧 2.94kPa |
| ガス圧接 | 溶接 | ASレールの従来条件 | HH340レールの従来条件 | HH340レールの従来条件 | HH340レールの従来条件 |
| | 後熱処理 | RSQ: 風圧 1.57kPa | なし | RSQ: 風圧 0.98kPa | RSQ: 風圧 2.94kPa |
| テルミット溶接 | 溶接 | ASレールの従来条件 | ASレールの従来条件 | HH340レールの従来条件 | HH340レールの従来条件 |
| | 後熱処理 | SQ: 風圧 4.41kPa | なし | なし | なし |

※空冷風圧については、今回の試験では実施できなかったことから、今後検討が必要

2.3.2 溶接後熱処理条件の検討

JHH1, JHH2, HH320の新型熱処理レールの頭部硬さは、ASレールとHH340レールの中間的な硬さに設定されている。そこで、各レール母材の硬さレベルを考慮して、溶接後熱処理条件を検討した。図3に溶接したままの状態のフラッシュ溶接部の頭頂面硬さ分布を一例として示す。例えばHH320のように、溶接しただけの状態では溶接部の頭頂面硬さが母材レールと比べて低くなるレール鋼種に対しては、溶接直後に強制空冷(SQ)処理、または強制空冷だけでは溶接部頭頂面の硬さが上昇しない場合には、再加熱・強制空冷(RSQ)処理を施すこととした。なお、検討にあたっては複数の後熱処理条件で溶接試験体を作製し、溶接部の頭頂面硬さ分布を測定することで適切な後熱処理条件を選定した。

表2に本検討により選定した各新型熱処理レール同士の溶接に対する溶接条件と後熱処理条件を示す。なお、HH320については、フラッシュ溶接の後熱処理における空冷風圧に関する検討が未実施である。また、新型熱処理レール同士の溶接条件についても今後検討を進める必要がある。

3. 敷設試験による耐摩耗性と耐損傷性の調査

3.1 敷設試験箇所

敷設試験箇所は、主に曲線半径600mから800mの曲線区間とし、敷設試験のためのレール交換前のHH340レールにゲージコーナキ裂が発生している線区から16箇所を選定した。敷設試験箇所には、表1に示した各新型熱処理レールと、比較としてASレールおよびHH340を同一曲線内に敷設し、摩耗や損傷の傾向を調査した。敷設開始からの累積通過トン数は1.4億トン~3.8億トンである。

3.2 調査方法

摩耗量測定は、MiniProf（Greenwood Engineering 社製）を用いて各レールの断面形状を測定し、設計断面形状における45度摩耗量を求めた。外観観察でゲージコーナキ裂の特徴である不均一なきしみ割れや山型き裂が見られた箇所、および局所的な照面の変化が見られた箇所について、超音波厚さ計（日本非破壊検査協会 KT-310D）を用いて探傷検査を実施した。探触子を表面き裂の軌間外側先端付近で接触させ、深さ3～5mm程度のき裂が検知された場合にレール内部に進展した水平裂とみなした。

3.3 調査結果

敷設試験16箇所中、トンネル内の漏水によって部分的なレール交換が行われた区間、車上からの塗油によって摩耗量が適切に評価できない区間、レール削正が実施された区間等の7箇所については摩耗やゲージコーナキ裂の評価対象から除外した。評価対象となった9箇所のうち、敷設試験の経過が特徴的であった3箇所を紹介する。表3に当該箇所の諸元・特徴を示す。

3.3.1 敷設試験箇所1

① 摩耗量

定点調査箇所の45度摩耗量の推移を図4に示す。各種レールの摩耗量は、いずれの調査時の通過トン数においてもHH320>HH340>JHH37の傾向であった。2.03億トン時点の摩耗量は、HH340レールに比べて、HH320は約1.6倍、JHH37はHH340レールに比べて約0.8倍であった。

② 外観観察および超音波探傷検査

図5は、水平裂が形成された各レールの外観を示す。照面の変化が認められた箇所について超音波探傷検査を実施し、水平裂の有無を確認した。水平裂はHH320では50m中の敷設延長で1箇所、HH340では5箇所

表3 各敷設試験箇所の諸元

| 敷設試験箇所 | 曲線半径 カント | 調査時点の 累積通過 トン数 | 敷設レール |
|--------|-----------------|----------------------|---------------------------------|
| 1 | 800m C:95mm | 2.03億トン | HH320, JHH37, HH340 |
| 2 | 800m C:102mm | 3.8億トン | HH320, JHH1, JHH2, AS, HH340 |
| 3 | 600m C:40mm | 1.4億トン | HH320, JHH1, JHH2, AS |

番号1：JHH37は当該試験箇所でのみ試験
番号2：敷設試験箇所中最も通過トン数が多い
番号3：駅構内での敷設試験

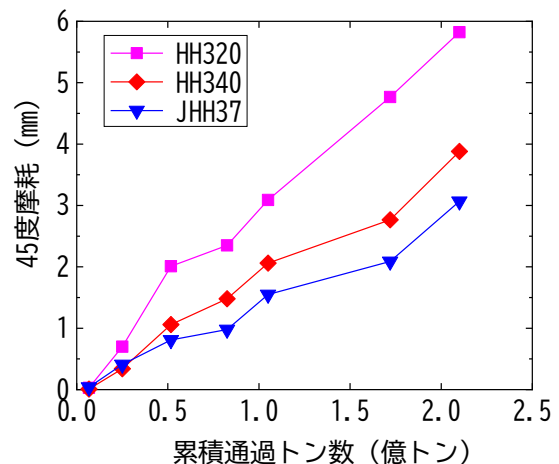


図4 敷設試験箇所1の各レールの45度摩耗の推移³⁾

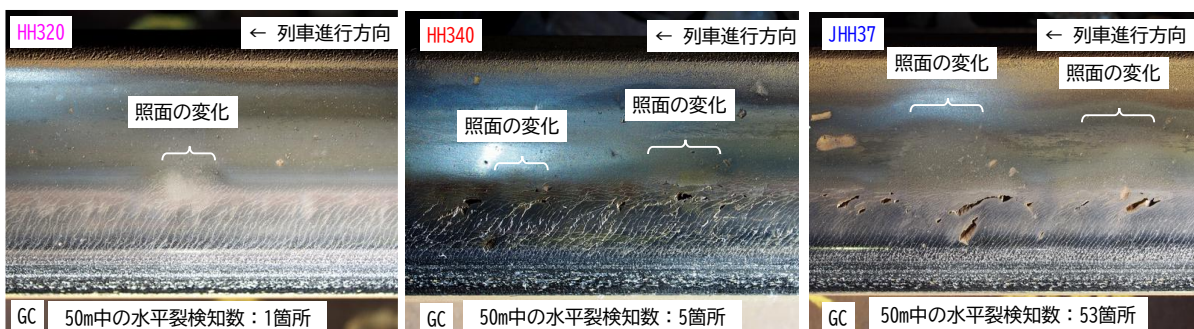


図5 敷設試験箇所1の水平裂が形成された各レールの外観³⁾

所, JHH37では53箇所検知された。なお, JHH37は隣接する水平裂が連結し, 水平裂の個数の把握ができない場合があった。その場合には, 照面の変化箇所の個数を計上した。損傷が顕在化したため, 本敷設試験は2017年に終了した⁴⁾。

3.3.2 敷設試験箇所2

① 摩耗量

図6に45度摩耗量の推移を示す。各鋼種が敷設された区間の平均摩耗量は, 概ね鋼種の初期硬さに対応しており, ASレールを基準とした場合, HH340は0.49倍, HH320は0.54倍, JHH2は0.75倍, JHH1は0.97倍の摩耗量であった。

② 外観観察および超音波探傷検査

図7に, 各種敷設レールの外観写真を示す。ASレール, JHH1およびJHH2ともに, きしみ割れが見られ, 一部の区間できしみ割れが連結してはく離していた。一方で, HH320およびHH340ではゲージコーナキ裂に進展することが考えられる照面の変化が見られた。

超音波厚さ計による水平裂検査ではHH340において水平裂の形成が最も多く見られ, 敷設延長50mで82箇所であった。HH320にも微小なき裂が2箇所形成されていた(敷設延長100m)。外観観察ではく離が見られたJHH1, JHH2, ASレールでは水平裂は検知されなかった。

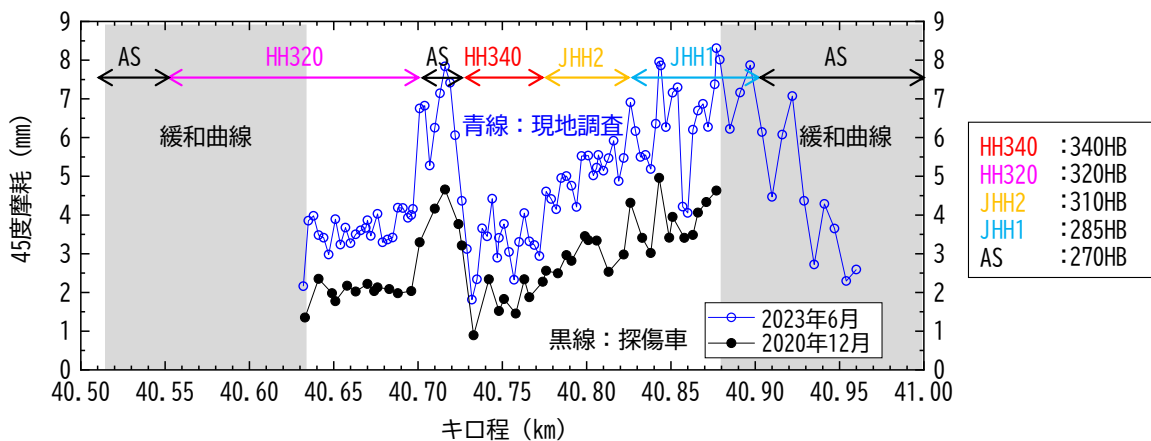


図6 敷設試験箇所2の45度摩耗量の推移(黒線:2020年度探傷車データ, 青線:2023年調査)

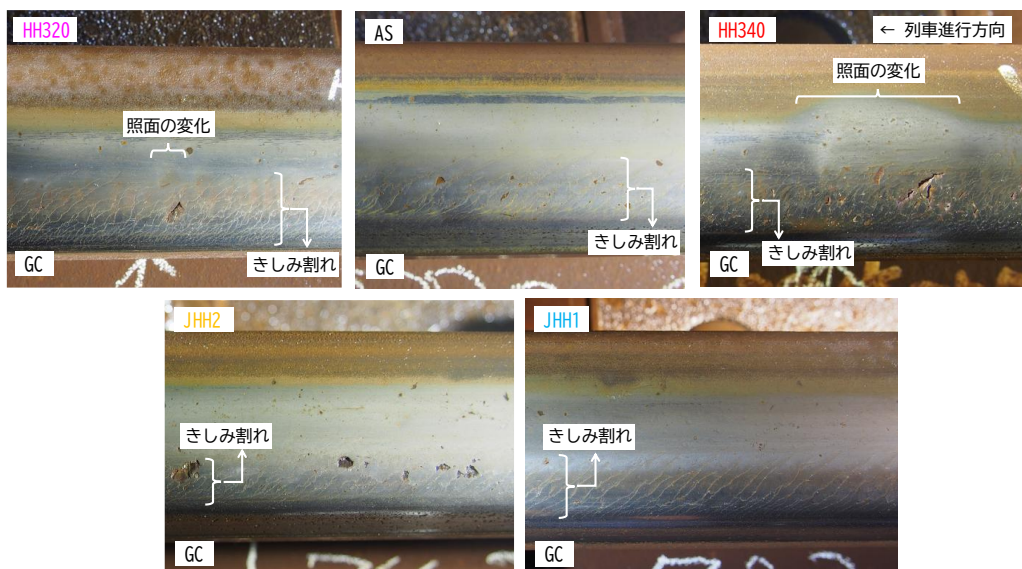


図7 敷設試験箇所2の各種レールの外観写真

3.3.3 敷設試験箇所3

① 摩耗量

図8に、各種敷設レールの45度摩耗量の推移を示す。なお、45度摩耗の測定結果には、2020年度の調査で測定された摩耗量を合わせて示している。摩耗の状態は、停車駅から列車進行方向である起点方から終点方に向かって摩耗量が増加する傾向が見られ、初期硬さに応じた結果ではなく、キロ程によって曲線内における摩耗進みに違いがあることが考えられる。今回の調査ではこの原因は明らかではないが、駅構内における列車通過時の速度差や軌道変位等による車輪・レールの接触状態が起因している可能性がある。なお、本試験箇所には著大な軌道変位は確認されていない。

② 外観観察および超音波探傷検査

ホーム近くに敷設されたHH320には連続的にゲージコーナキ裂が形成されていた(図9左)。また、超音波厚さ計による水平裂の検査の結果、ASレール(敷設延長25m)に6箇所、JHH1(敷設延長50m)に9箇所(図9右)、JHH2(敷設延長75m)に29箇所といずれのレールにも水平裂が形成されている結果であった。なお、HH320は外観上で多数の損傷が確認されたことから検査時間が不足したため検査を省略した。

3.4 敷設試験箇所全体の摩耗重視型3鋼種の摩耗量

探傷車による45度摩耗測定データから各敷設試験箇所の摩耗量を整理した。一部敷設試験箇所では摩耗の明瞭な差が認められず、敷設試験の目的である鋼種による摩耗の差に関する評価が困難であった。これは、特急列車通過に合わせて設定カントが大きいことや、累積通過トン数の少なさが影響していることが考えられる。それ以外の箇所については摩耗の差がみられた曲線を対象とした。表4に45度摩耗の平均値とASレールを基準とした各レールの摩耗比を示す。

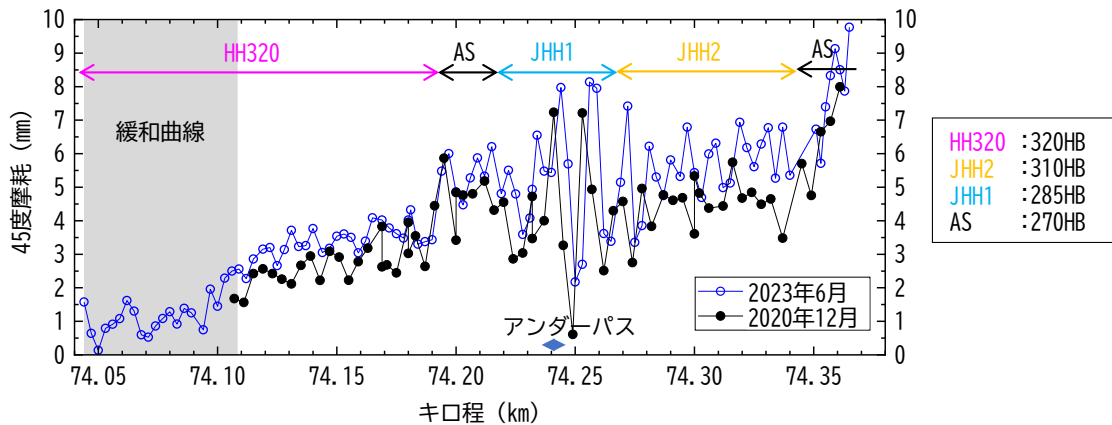


図8 敷設試験箇所3の45度摩耗量の推移(黒線:2020年度探傷車データ,青線:2023年調査)

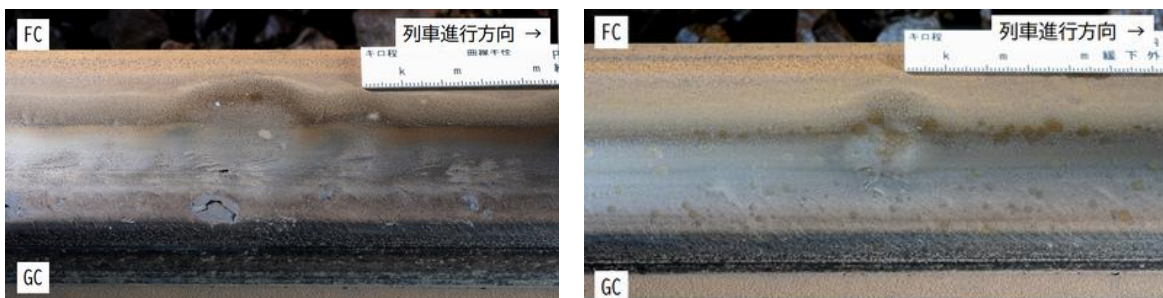


図9 敷設試験箇所3の損傷レールの外観例(左:HH320,右:JHH1)

表4 敷設試験箇所全体の
摩耗重視型3鋼種の摩耗量

| レール鋼種 | 初期硬さ | AS 基準の摩耗比 |
|-------|-------|-----------|
| AS | 260HB | 1.00 |
| JHH1 | 285HB | 0.97~0.98 |
| JHH2 | 310HB | 0.74~0.92 |
| HH320 | 320HB | 0.51~0.80 |
| HH340 | 340HB | 0.49~0.53 |

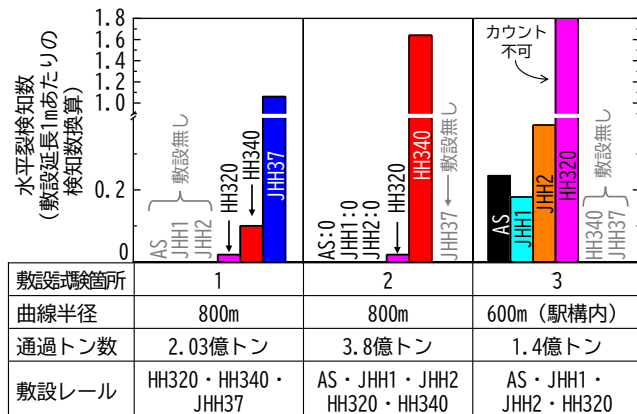


図10 敷設試験3箇所の水平裂検知数

3.5 敷設試験結果に対する考察

図10には現地調査での各レールの水平裂検知数を整理した結果を示す。試験箇所1の結果では、HH320、HH340、JHH37のいずれの鋼種にもゲージコーナキ裂に起因した水平裂が発生していることが確認されたが、累積通過2.03億トン時点で、JHH37はHH340よりも水平裂の発生数が多かった。そのため、JHH37は、当該敷設箇所に関してはゲージコーナキ裂に対する耐性がHH340より低いと判断された。一方、HH320はHH340よりもゲージコーナキ裂に対する耐性が高いと考えられた。

敷設試験箇所1および2の結果では、HH320は、HH340よりもゲージコーナキ裂に発展し得る水平裂の発生数が少なかった。また、敷設試験箇所2では、JHH1とJHH2、ASレールには調査段階においては水平裂が形成されていなかった。なお、JHH1とASレールは45度摩耗に関しては同程度の摩耗量であった。そのため、摩耗による交換寿命は普通レールと同程度であると予想された。

試験敷設箇所3では、45度摩耗量は各鋼種の初期硬さに応じた結果にならなかった。今回の調査ではこの原因は明らかではないが、駅構内における列車通過時の速度差や低速域でのカント過大等に起因している可能性が考えられる。同敷設箇所の水平裂検査の結果については、摩耗重視型は疲労損傷を抑制するため適度に摩耗を進行させることを意図したものだが、敷設箇所の摩耗量が少ないと摩耗進行が十分でなく、ゲージコーナキ裂が形成されることがあるものと解釈できる。同敷設箇所において、硬さが低いASレールおよびJHH1・JHH2に形成された水平裂の個数はHH320と比較して少ない傾向であった。

4. まとめ

曲線外軌に敷設されたHH340レールに発生するゲージコーナキ裂の低減を目的とした新型熱処理レール4鋼種（摩耗重視型3鋼種、強度重視型1鋼種）を試作し、溶接条件について検討した。また、敷設試験を行い、摩耗や損傷の発生状況などの現地調査や探傷車での摩耗データについて整理した。

(1) 摩耗重視型（3鋼種）

曲線半径800mの敷設箇所において、調査時点の通過トン数において、HH320にゲージコーナキ裂に発展し得る水平裂が発生したが、発生数はHH340よりも少なかった。また、JHH1・JHH2・ASには水平裂の発生は見られなかった（敷設箇所1, 2）。他方、曲線半径600mの駅構内の敷設箇所では、摩耗重視型3鋼種およびASレールの全てでゲージコーナキ裂およびゲージコーナキ裂に発展し得る水平裂が発生した（敷設箇所3）。敷設試験を総括すると、摩耗重視型の鋼種はHH340よりもゲージコーナキ裂に発展し得る水平裂が少ない傾向であった。摩耗進行が不十分な条件ではゲージコーナキ裂が顕在化する例も見られたが、

その場合でも硬さが低い鋼種ほど水平裂の発生数は少ない傾向であった。

AS レールに対して、各レールの摩耗量は、JHH1 は 0.97～0.98 倍、JHH2 は 0.74～0.92 倍、HH320 は 0.51～0.80 倍、HH340 は 0.49～0.53 倍であった。今回の敷設試験では、3 鋼種中最も硬さが低い JHH1 は、AS レールと同程度の摩耗量であった。

(2) 強度重視型 (1 鋼種)

曲線半径 800m の敷設試験箇所において、JHH37 は、HH340 よりも早くゲージコーナキ裂が群発した。同敷設条件においては、JHH37 のゲージコーナキ裂に対する耐性が HH340 より低いと判断された。

同一の曲線半径であっても、摩耗の進みや損傷の発生傾向が変わる。そのため、新型熱処理レールの導入にあたっては、導入箇所に敷設されている既存の AS レールや HH340 の交換寿命に対して、ゲージコーナキ裂に対する耐性と耐摩耗性の両面からの検討が必要と考えられる。また、新型熱処理レールの耐摩耗・耐損傷の効果については投入線区・区間ごとに確認することが重要と考える。

謝 辞

新型熱処理レールの開発では日本製鉄株式会社および JFE スチール株式会社、敷設試験では東日本旅客鉄道株式会社および西日本旅客鉄道株式会社に多大なご協力をいただいた。この場をお借りしてお礼申し上げる。

文 献

- 1) 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.832，pp.23-25，2016
- 2) Kanematsu, Y., and Matsui, M., "Development and Evaluation of the Rail Steel Grade for Damage Restraint to the High Rail in Curve Sections," Proceedings of 10th International Conference on Contact Mechanics (CM2015), Colorado Springs, Colorado, USA, August 30, 2015.
- 3) 兼松義一，寺下善弘：曲線外軌の損傷低減を狙った新しい熱処理レール，JREA，Vol.65，No.12，pp.30-33，2022
- 4) 品川恒平，堀雄一郎，元好茂：レール傷発生抑制の取り組み，新線路，Vol.74，No.885，pp.24-26，2020