

# ベイナイトレールの長期耐久試験による 耐シェリング性の評価

佐藤 幸雄\* 辰巳 光正\*\*

上田 正治\*\*\* 三田尾 眞司#

## Evaluation of Dark Spot Resistance of Bainitic Steel Rail in Long-Term Durability Test

Yukio SATOH Mitsumasa TATSUMI

Masaharu UEDA Shinji MITAO

Long-term durability test was carried out in a revenue line of narrow gauge track in order to examine the resistant performance of bainitic steel rail against squat type of defect. The bainitic steel rail was developed to prevent the defect and reduce the rail maintenance cost with the focus placed on a slightly higher wear rate than that of the as-rolled standard carbon rail under normal rolling contact with wheel based on the effective self-removal of rail surface damage of rolling contact fatigue. The test rails with several levels of hardness were supplied to the durability test and showed that the bainitic steel rails with lower hardness provided the target wear rate and better resistant performance for the squat type of defect than the as-rolled standard carbon rail.

キーワード：レール，シェリング損傷，耐シェリングレール，ベイナイトレール，敷設試験

### 1. はじめに

新幹線および在来線の幹線では、レールにシェリングと呼ばれる損傷を生じることがある。シェリングは、車輪との繰り返し接触によるレール頭頂面表層の金属疲労や車輪が空転・滑走した時の摩擦熱によってレール頭頂面に生成する熱変態層（白色層）を起点とした転動疲労損傷である。シェリング損傷が生じたレールの使用を続けると、レール頭頂面に落ち込みや剥離が生じレール折損に至ることもあることから、探傷検査などレールのメンテナンスに多くの労力と費用が費やされている。

その対策としてレール削正が新幹線で実施され<sup>1)~4)</sup> 効果を上げており、現在、在来線へ展開<sup>5)~7)</sup> されつつある。このことから、レール削正量に相当する分量だけレール摩耗を促進すればシェリング損傷の発生を抑制できると考え、レール素材の変更により新たにベイナイトレールを開発した。

本報告では、ベイナイトレールの耐シェリング性を確認するため、実際の線路に敷設して長期耐久試験を行った結果について述べる。

### 2. これまでの耐シェリング用レールの開発とその結果

耐転動疲労損傷用レールのこれまでの開発コンセプトは、日本および諸外国ともにレール素材の合金化や熱処理による高強度化によって転動疲労き裂の発生を抑制しようとするものであった<sup>8)</sup>。日本では東海道新幹線において開業後約10年（累積通過トン数約120MGT）経過した時点からシェリング損傷が顕在化してきた。そこで、その対策として上述の開発構想に沿って耐シェリング用レールが開発され、敷設試験に供された。この時、試験レールとして、ベイナイト系高強度レール、パーライト系高強度レール2鋼種および焼戻しマルテンサイト系高強度レールの計4鋼種が第一次耐シェリング用レールとして1976年に試作された<sup>9)</sup>。敷設試験の結果、焼戻しマルテンサイト系高強度レールおよびパーライト系高強度レール2鋼種にシェリング損傷が発生し交換・撤去された。また、ベイナイト系高強度レールは溶接部の落ち込みが大きく、シェリング損傷の発生確認以前に保守上の問題から交換・撤去された。これに対し、比較用として敷設された普通レールには、上記各試験レールが撤去された時点でシェリング損傷は検知されていない。

この試験結果を受け、第二次敷設試験<sup>10)</sup> が1983年から東海道新幹線で開始された。この敷設試験に用いられた試験レールも、高強度化のコンセプトに沿って選定さ

\* 材料技術研究部（摩擦材料）  
\*\* 軌道技術研究部（レール溶接）  
\*\*\* 新日本製鐵（八幡技術研究部）  
# JFE スチール（スチール研究所）

特集：材料技術

れたものである。敷設試験には、急曲線用の耐摩耗レールとして開発されたNHHレール（高炭素微細パーライト系レール）が試験レールとして用いられ、比較材として普通レールが同時に敷設された。敷設試験の結果、NHHレールに白色層を起点としたシェリング損傷が多発した。そのため、試験開始から約6年経過した時点（累積通過トン数約250MGT）で試験を終了し、NHHレールの全数が交換・撤去された。これに対し、比較材とした普通レールには、NHHレールが全数撤去された時点で、白色層およびシェリング損傷は検知されていない。現地から撤去されたNHHレールの損傷原因調査の結果、シェリング損傷の発生起点はレール頭頂面に生成した白色層であることが明らかにされた。さらに、白色層の生成については、レール頭頂面にスキッド痕（ブレーキ時の車輪滑走によって生じる線状痕）が観察されたこと、および当該試験区間が道床交換に伴う徐行の減速区間に設定されていたことから、車輪の滑走が原因であると推定された。

3. ベイナイトレールの開発<sup>11)</sup>

3.1 開発コンセプト

図1に開発構想の概念図を示す。著者らは、これまでに行われた敷設試験の結果を踏まえ、レールの高強度化という従来からのコンセプトを離れ、新たな方向を探ることにした。その結果、レール削正のシェリング損傷抑制効果に着目し、レール削正車によるレール頭頂面の研削除去分を列車の車輪接触による摩耗によって代替すること、すなわち、転動疲労の蓄積速度よりもレールの摩耗速度を高くすることによってシェリング損傷の抑制を図るといった新たなコンセプトを提案した。

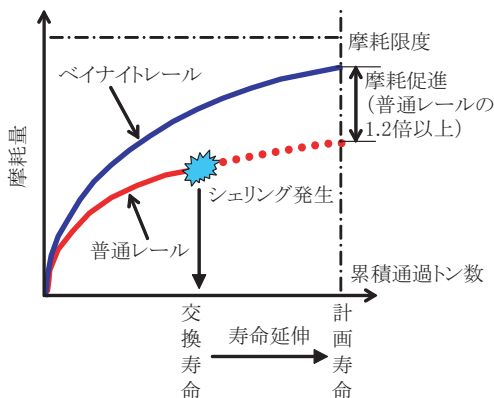


図1 開発構想の概念図

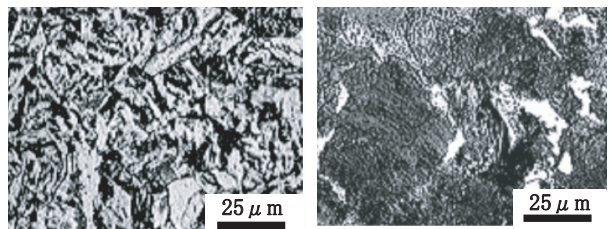
3.2 レール素材の選定

新たに提案したコンセプトに基づいて「適度な摩耗の促進によってシェリング損傷の原因となる転動疲労層を自己除去する摩耗促進型レール」を開発した。このレール

の素材は、次の事項を前提として選定した。

- 1) レールの強度は、JIS規格範囲内とする。
- 2) 現行のレール溶接方法が全て適用できることとする。
- 3) レールの電気抵抗は、現行の規定範囲内とする。
- 4) 鉄道用レールとして受け入れられる価格帯とする。

広い範囲の材料について検討した結果、レールの素材となり得る対象は鉄鋼材料に絞られ、その中から最終候補としてベイナイト鋼を選定した。図2<sup>12)</sup>にベイナイト鋼とパーライト鋼の金属組織を示す。両者の違いは主に炭化物(Fe<sub>3</sub>C)の析出形態にあり、ベイナイト鋼は鉄と炭化物の混合組織であり、パーライト鋼はそれらが交互に層状に並ぶ組織を呈している。



(1) ベイナイト鋼 (2) パーライト鋼

図2 金属組織

3.3 摩耗促進の目標値

摩耗促進型レールが耐シェリング用レールとして機能するために必要とされる摩耗促進の目標値については、次のように考えた。石田ら<sup>13)</sup>は室内実験を行い、累積通過トン数50MGT (Million Gross Tonnage: 百万トン) 毎に0.06mm, 0.08mmおよび0.10mm程度削正すると、それぞれ平均的(破壊確率50%)に累積通過トン数200MGT, 450MGTおよび800MGT程度までシェリング損傷の発生が抑制できることを報告している。また、黒田<sup>14)</sup>は、新幹線レールの転がり接触疲労層の厚さがレール頭頂面から0.05mm以下であること<sup>15)</sup>に着目して、東海道新幹線の線路条件の異なる3箇所において約4年間にわたって現地削正試験を行った。この試験では、累積通過トン数40MGT (1年間) 毎に0.08mmのレール削正が行われた。その結果、3箇所の試験対象区間では、シェリング損傷が発生しなかったことを報告している。

これらのことから、レール頭頂面表層を僅かに除去することによってシェリング損傷が抑制できること、すなわち、レール削正車によって強制的に削正除去する分を車輪接触による摩耗によって代替すればシェリング損傷の抑制が可能であると考えた。そこで、削正量に相当する摩耗促進分を上記削正試験の削正実績である0.08mm / 40MGT (累積通過トン数100MGTに換算して0.20mm)、また、直線区間における普通レールの摩耗速度<sup>16)</sup>については1.0mm / 100MGTとして両者を加算した値である1.2mm / 100MGT以上を確保することにより、シェリング損傷を抑制できると仮定した。そこで、ベ

イナイトレールの摩耗目標を敷設対象線区における普通レールの1.2倍以上とすることとした。

#### 4. バイナイトレールの敷設試験

実用条件下において摩耗目標を確保するための最適硬さの探索と耐シェリング性の確認を目的として、バイナイトレールを1994年5月から順次現地敷設して長期耐久試験を行った。試験場所は列車の速度が高く運転本数が多い複数の区間とし、在来線の4線区で試験した。このうち、3線区は直線区間であり主に耐シェリング性の評価を行った。また、1線区は半径1000mの曲線区間とし、耐きしみ割れ性の評価を行った。

##### 4.1 供試レール

供試レールは、JIS規格範囲内で硬さを5段階に設定したバイナイトレールである。また、普通レールを比較材として用いた。図3に供試レールの記号、硬さおよび引張強さを示す。図中の記号は次のとおりである。HLC、MLC（高硬度バイナイトレール）、LC（中硬度バイナイトレール）およびN1E、N2W（低硬度バイナイトレール）である。なお、記号ASは比較材として敷設した普通レールである。供試レールの敷設総延長は、比較材の普通レールを含めて約4600m（レール延長）である。

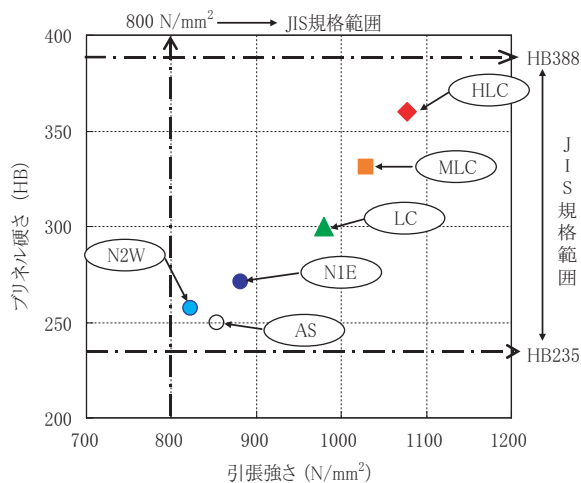


図3 供試レールの記号と強度

#### 4.2 試験結果

##### 4.2.1 摩耗の推移

図4に供試レールの累積通過トン数の増加に伴う摩耗量の推移を示す。なお、ここで示した値は、いずれもレール頭頂面の幅方向中央位置（以下、レール軸芯位置と記す）において測定した左・右レールの摩耗量の平均値である。摩耗量は次のように求めた。まず、吉田式レール断面測定器を用いて、所定の累積通過トン数毎に左・右レールそれぞれの頭部断面形状を測定する。次に、レール

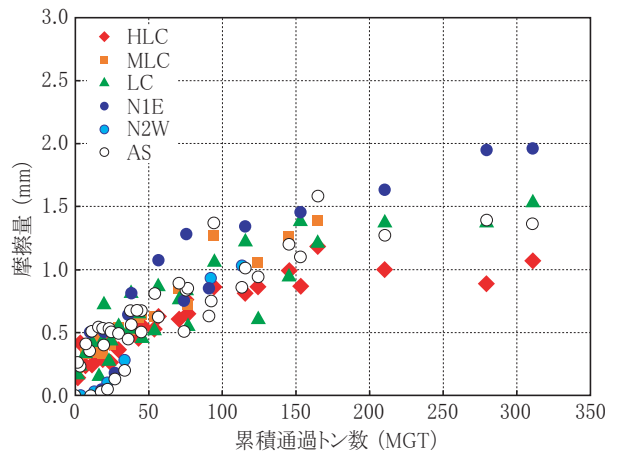


図4 供試レールの摩耗量の推移

ル上首部を基準として、測定した各試験レールの頭部断面形状と新品レールの標準断面形状を重ね合わせる。これにより、重ね合わせた断面形状の距離の差分を摩耗量とした。

各供試レールの摩耗量は、概ね累積通過トン数とともに増加する傾向を示す。摩耗量の増加は、いずれも累積通過トン数の低い段階で大きい。しかし、累積通過トン数が増加するにしたがって摩耗量の増加は緩やかに小さくなる傾向を示す。この傾向は、供試レールの製造時の硬さレベルが高いほど顕著である。摩耗量の順序は、データにばらつきが見られるものの累積通過トン数150MGT以上で見ると、 $N1E > LC \approx AS > HLC$ となる。バイナイトレールの摩耗順位は、製造時の硬さの順序にしたがっている。なお、比較材であるASとLCの摩耗量の差は僅かであるが、硬さはASに比べてLCの方が製造時および次に述べる敷設使用時ともに高い。同じ材質の鋼であれば摩耗量は硬さに強く依存することから、硬さに差があるにもかかわらず摩耗量の違いが僅かであるのは、鋼種の違いによってもたらされた結果であると考えられる。

##### 4.2.2 硬さの推移

図5に供試レールの累積通過トン数の増加に伴う硬さの推移を示す。硬さは、反発式硬さ計を用いて所定の累積通過トン数毎に測定した。この硬さ計は、被測定物に衝突させる測定子の射出速度と反発速度を基にして算出されるL値と呼ばれる測定指標から必要とする硬さ種別の値に換算して被測定物の硬さを表示する。現地調査の際、著者らは実験室で通常用いているピッカース硬さに換算した値を用いた。図示の硬さ値は、左・右それぞれのレール頭頂面軸芯位置におけるピッカース硬さ換算値の平均値である。

累積通過トン数の増加に伴う硬さの推移は、供試レールの種別によって異なる傾向を示す。N1E、N2W、ASは、ほぼ同様の傾向を示し、敷設後の初期段階で硬さの増加割合が比較的大きく、ある程度の累積通過トン数に

特集：材料技術

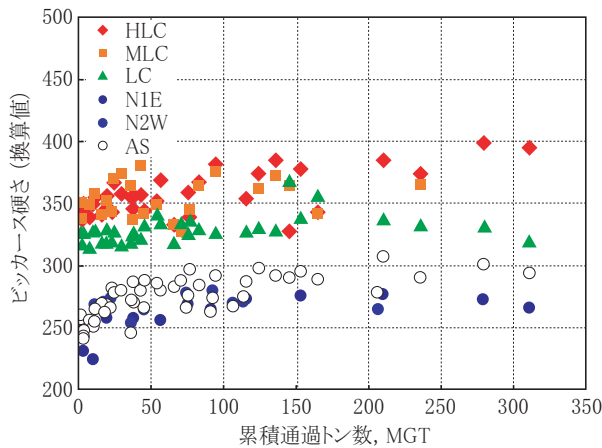


図5 供試レールの硬さの推移

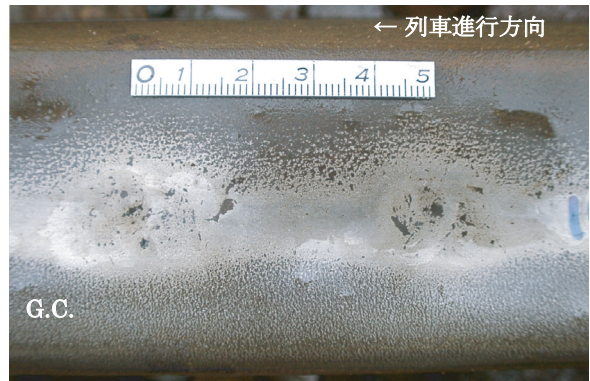
達すると、それ以降の変化はほとんど認められず、ほぼ一定に推移する。また、HLCはデータに若干の変動が見られるものの、累積通過トン数の増加とともに硬さが僅かずつ増加する傾向を示す。また、LCは硬さの変化がほとんど認められず、製造時の硬さレベルで概ね推移する傾向を示す。なお、MLCについてはデータの変動が若干大きいことから、累積通過トン数の増加に伴う硬さ変化の特徴が明瞭でないが、製造時に比べて若干高い硬さレベルを概ね維持して推移している。供試レールの硬さの増加は、車輪との転がり-すべり接触に起因した加工硬化によってもたらされたものと推定される。累積通過トン数150MGT以上における供試レールの硬さレベルは、 $N1E \approx N2W < AS < LC < MLC \approx HLC$ の順序となり、製造時の硬さレベルの順序に従う。

4.2.3 シェリング損傷の発生状況

シェリング損傷の発生状況は、現地調査の際の目視観察によって確認した。供試レールのうち、HLC、MLC、LCおよびASの一部にシェリング損傷の発生が認められた。これに対して、N1EおよびN2Wにはシェリング損傷の発生は認められなかった。確認された損傷は、いずれもレール探傷車で検知される大きさには発達していない。図6に供試レールの中で最も硬度の高いHLCおよび比較材であるASに生じたシェリング損傷の外観を示す。これらの損傷は、累積通過トン数が215MGT時点で実施した現地調査の際に撮影したものであり、累積通過トン数約150MGT時点での現地調査では確認されていない。

4.2.4 きしみ割れの発生状況

供試レールの耐きしみ割れ性を確認するため、半径1000mの曲線区間において敷設試験を行った。なお、N1Eはこの試験場所に未敷設である。きしみ割れの発生状況は、現地調査の際に目視観察によって確認した。供試レールのうち、HLC、MLC、LCおよび比較材であるASのゲージコーナ部にきしみ割れの発生が認められた。このうち、HLCとMLCには、きしみ割れの連結による

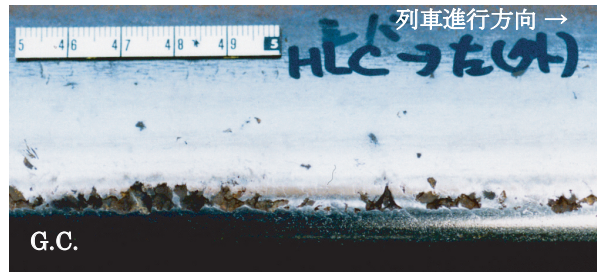


(1) HLC (高硬度ベイナイトレール)



(2) AS (比較材；普通レール)

図6 シェリング損傷の発生状況



(1) HLC (高硬度ベイナイトレール)



(2) AS (比較材；普通レール)

図7 きしみ割れの発生状況

剥離の発生が認められた。これに対して、N2Wは摩耗交換（累積通過トン数；約217MGT）まできしみ割れの発生は認められなかった。図7に供試レールの中で硬度の最も高いHLCおよびASの外観を代表として示す。これらの外観は、累積通過トン数が約56MGT時点で行った

現地調査の際に撮影したものである。

#### 4.2.5 溶接部の凹凸進み

溶接部の凹凸量は、ロングレール寿命に大きく影響することから、ベイナイトレール溶接部の累積通過トン数の増加に伴う凹凸進みを測定した。溶接部の凹凸量は、以下のように求めた。まず、原田式レール踏面形状測定器を用いて、所定の累積通過トン数毎にレール溶接部における頭頂面レール長手方向の凹凸形状を測定・記録した。次に、チャートに記録された波形から溶接部の凹凸量を読み取った。なお、凹凸量の測定位置は、レール軸芯位置とした。図8にベイナイトレール溶接部および比較材として敷設した普通レール溶接部の凹凸量と累積通過トン数の関係を示す。図中に示した記号は、(供試レール種別-溶接種別)として表記した。また、溶接種別の記号は、次のとおりである。FB；フラッシュ溶接、GP；ガス圧接、EA；エンクローズアーク溶接である。

累積通過トン数250MGTにおける凹凸量は、AS-FBが最も小さく0.1mm程度に留まっている。また、その順序は、AS-FB<HLC-FB<LC-FB<N1E-FB<AS-GP=N1E-EAとなる。この順序は、試験開始後から変わらずに保たれている。ベイナイトレール溶接部の凹凸量は、製造時の硬さレベルの順序に従っている。ベイナイトレールのフラッシュ溶接部およびエンクローズアーク溶接部の凹凸量は、全測定期間を通してAS-FBより大きいが、AS-GPと同等もしくはそれ以下の値に留まっている。このAS-GPのデータは、溶接後にガススカーフィング・焼ならし処理を行ったものである。そのため、軟化幅が広がることから標準施工方法である押抜き処理を行ったガス圧接に比べて凹凸量が大きくなる傾向にある。その凹凸進み量は、図8から0.1mm/100MGT程度と推定される。このことから、さらに累積通過トン数が増加してもベイナイトレールのフラッシュ溶接部およびエンクローズアーク溶接部の凹凸進み量は、AS-GPの凹凸進みと同程度かそれ以下で推移すると考えられる。

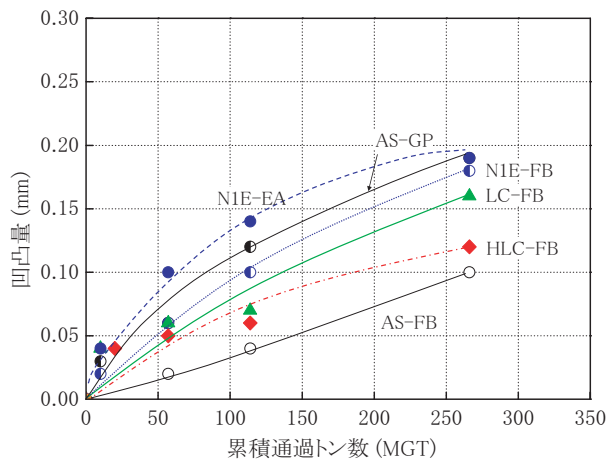


図8 溶接部の凹凸進みと累積通過トン数の関係

したがって、ベイナイトレール溶接部に異常な凹凸が形成されるとは考えがたく、使用上、問題を生じることはないと判断される。

### 5. 考察

#### 5.1 摩耗促進性能について

実用条件下におけるベイナイトレールの摩耗促進性を検討するため、摩耗測定結果をもとにして普通レールに対する摩耗速度比と累積通過トン数の関係を求めた。

摩耗速度比は、次のように求めた。供試レールの摩耗量を摩耗測定時の累積通過トン数で除し、単位累積通過トン数あたりの摩耗速度を求めた。同様に求めたASの摩耗速度とベイナイトレールの摩耗速度の比を摩耗速度比とした。図9に結果を示す。

N1E, N2Wの摩耗速度比は、累積通過トン数が低い段階で若干ばらつきはあるものの、全測定期間を通してASよりも高い。一方、HLCおよびMLCは、ASとほぼ同じか低い。これに対して、LCは累積通過トン数が低い段階でデータにばらつきが見られるが、累積通過トン数の増加によりほぼASと同じレベルに収束する。

長期耐久試験の結果、低硬度ベイナイトレール(N1E, N2W)は、摩耗目標(普通レールの1.2倍以上)を安定して維持できることが確認された。したがって、ベイナイトレールの実用条件下での適正硬さは、HB255～HB275であると判断される。

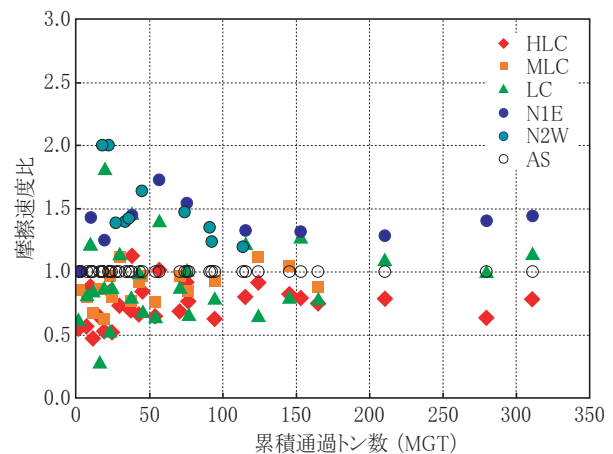


図9 累積通過トン数と摩耗速度の関係

#### 5.2 耐シェリング性について

表1にシェリング損傷の発生状況を示す。表中には摩耗目標の達成状況を併せて示す。摩耗目標を満足するN1E, N2Wにシェリング損傷の発生は認められず、摩耗目標を満足しないHLC, MLC, LCおよびASにシェリング損傷の発生が確認された。

長期耐久試験の実施により、低硬度ベイナイトレール(N1E, N2W)の耐シェリング性の優位が確認されたもの

特集：材料技術

表1 シェリング損傷の発生状況

試験レール	シェリング損傷	摩耗目標値
高硬度ペイナイトレール	発生	未達成
中硬度ペイナイトレール	発生	未達成
低硬度ペイナイトレール	未発生	達成
普通レール（比較材）	発生	未達成

と判断される。

5.3 ペイナイトレールの投入区分について

ペイナイトレールの投入区分は、敷設試験の実績を踏まえ、直線から半径1000mの曲線までと考えられる。この範囲であれば、シェリング損傷およびきしみ割れなどの損傷を抑制できるものと判断される。また、保守上からはシェリング損傷が多発してレール交換される箇所に優先して敷設することが有効と考えられる。なお、ペイナイトレールは、直線および曲線半径の大きな区間への敷設を想定して開発を行った摩耗促進型レールであるため、曲線部への適用については投入対象とする区間の摩耗速度実績を勘案して判断する必要があると考える。

6. まとめ

レールのシェリング損傷を防止するため、適度な摩耗の促進によってその発生原因となる転動疲労層を自己除去するタイプのペイナイトレールを開発した。実用条件下において摩耗目標を確保するための最適硬さの探索と耐シェリング性の確認を目的として、高・中・低硬度ペイナイトレールを実際に敷設して長期耐久試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 低硬度ペイナイトレールが摩耗目標（普通レールの1.2倍以上）を安定して維持できることが確認できた。このことから、実用条件におけるペイナイトレールの適正硬さは、HB255～275であると判断される。
- (2) 摩耗目標を満足した低硬度ペイナイトレールのみがシェリング損傷の抑制を達成しており、摩耗目標を満足しない高・中硬度ペイナイトレールおよび普通レールに対する耐シェリング性の優位が確認できた。
- (3) ペイナイトレールの溶接部に異常な凹凸が形成されるとは考えがたく、使用上、問題を生じることはないと判断される。

以上の結果から、低硬度ペイナイトレールは摩耗促進型耐シェリング用レールとしての機能を発揮し、実用に十分耐えると結論される。

謝 辞

本敷設試験は、東日本旅客鉄道株式会社ならびに西日本旅客鉄道株式会社の協力のもとに行った。また、多くの関係者の方々に現地調査をはじめとして種々協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- 1) 高木眞一, 高山判巳: 東海道新幹線におけるレール削正, 日本鉄道施設協会誌, Vol.41, No.4, pp.281-284, 2003
- 2) 楠田将之, 高橋亮一, 小椋強: 山陽新幹線におけるレール削正, 日本鉄道施設協会誌, Vol.41, No.5, pp.351-354, 2003
- 3) 穴見徹広: JR東日本の新幹線におけるレール削正, 日本鉄道施設協会誌, Vol.41, No.6, pp.460-462, 2003
- 4) 多田嘉典, 村上善英: 新幹線のレール損傷の現状, 日本鉄道施設協会誌, Vol.35, No.4, pp.263-265, 1997
- 5) 福田英司: JR東海在来におけるレール削正, 日本鉄道施設協会誌, Vol.41, No.10, pp.770-772, 2003
- 6) 山田知宏: 効果的な在来線レール削正方法の一考察, 新線路, Vol.59, No.10, pp.19-21, 2005
- 7) 室田仁, 阿部司: 在来線で効果的なレール削正手法の開発, 日本鉄道施設協会誌, Vol.44, No.6, pp.491-493, 2006
- 8) 栗原利喜雄: 鉄道用レールの現状と問題点, 鉄と鋼, Vol.64, No.14, pp.149-158, 1978
- 9) 栗原利喜雄: 鉄道線路, Vol.25, No.10, pp.500-503, 1977
- 10) 石田誠, 柏谷賢治, 佐藤幸雄, 阿部則次: NHHレールの耐シェリング性能, 新線路, Vol.44, No.12, pp.23-27, 1990
- 11) 佐藤幸雄, 辰巳光正, 柏谷賢治, 上田正治, 横山泰康: 耐シェリング用ペイナイトレールの開発, 鉄道総研報告, Vol.12, No.10, pp.15-20, 1998
- 12) 佐藤幸雄: 耐シェリング用レールの開発, RRR, Vol.9 No.12, pp.19-24, 1995
- 13) 石田誠, 阿部則次: レールシェリング予防削正効果に関する実験的研究, 鉄道総研報告, Vol.9 No.12, pp.19-24, 1995
- 14) 黒田祐介: 新幹線シェリングの現状と取組み, 日本鉄道施設協会誌, Vol.333 No.12, pp.875-877, 1995
- 15) 井上靖雄, 佐藤幸雄, 柏谷賢治: レール頭頂面変形層の結晶学的解明, 鉄道総研報告, Vol.6, No.12, pp.59-68, 1992
- 16) 佐藤幸雄, 井上靖雄, 柏谷賢治: 新幹線レールのころがり接触面における塑性変形挙動, トライボロジスト, Vol.36, No.8, pp.639-647, 1991