

ベイナイトレールによるシェリングの予防

佐藤 幸雄
材料技術研究部
(摩擦材料 主任研究員)

辰巳 光正
軌道技術研究部
(レール溶接 主任研究員)



さとう ゆきお たつみ みつまさ

はじめに

駅のホームで電車を待っている時に線路を眺めると、レールが遠くまで続いている風景が目に入ってきます。この時、レールはいつもと変わらない姿でそこにあります。そのため、ずっと変わらずに使われ続けているように思われるかもしれませんが、レールにも寿命があって時期が来ると交換されます。

レールの交換時期は、摩耗量および累積通過トン数によって決められています。摩耗量は新品レールと摩耗レールの頭部の寸法差で表され、単位はmmです。また、累積通過トン数は、(車両の車軸軸重) × (その地点を通過する車軸の数) で表され、単位はtonです。摩耗量によるレール交換は「摩耗交換」、累積通過トン数によるレール交換は「通トン交換」あるいは「周期交換」と呼ばれています。

摩耗交換および通トン交換は、摩耗量および累積通過トン数が予め決められた限度値(計画寿命)に達した時に行われる計画的な交換です。レールは摩耗で交換される以外、通トン交換まで使用することが前提とされています。しかし、実際には計画寿命に達する前に損傷によって交換される事があります。ここでは、これを「交換寿命」と呼ぶことにします。この交換寿命の原因の一つにシェリングと呼ばれる損傷があります。この損傷は、放置しておくともレール折損に至ることがあるので、傷の監視やレール交換に多くの労力と費用が投入されています。

ここでは、シェリング損傷の発生を抑制することにより、レールの交換寿命延伸を目差したベイナイトレールの開発とその実用化に向けて行った敷設試験の結果¹⁾についてご紹介します。

シェリングとは

レールは、列車走行時に車輪の転がり接触を受けます。この時、車輪と接触するレール頭部の上面をレール頭頂面と言います。車輪の転がり接触を受ける回数が多くなると、

レール頭頂面の表層が金属疲労します。また、車両の駆動・制動時に車輪が空転・滑走すると、摩擦熱によってレール頭頂面の表層部が硬くて脆い金属組織(白色層)に熱変態します。この金属疲労や白色層を起点としてき裂が生じる場合があります。それらのき裂を放置したまま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ります。シェリングとは、そのような損傷を包括した名称であり、車輪との転がり-すべり接触に起因した転動疲労損傷に分類されます。この損傷は、列車の運転本数が多く、列車速度の高い直線部に多く発生する傾向があります。また、雨水等の水が介在する環境で発生する特徴があり、漏水のない乾燥トンネルでは発生しません。

図1にレール頭頂面上方から見た初期段階のシェリングの外観を示します。レール頭頂面の落ち込みにより、局部的に車輪接触面の幅が広がっています。シェリングが発見された段階では、図1のような外観をしている場合が多く見受けられます。

図2にシェリングのき裂進展状態の模式図を示します。き裂は次のように進展すると考えられています。き裂起点から発生したき裂は、先ずレール頭頂面にほぼ平行に進展して水平裂を形成します。水平裂は列車進行方向に優先的に進展する傾向を示します。この水平裂が進展して行く途中段階で、レール底部方向へ向かう横裂が分岐します。水

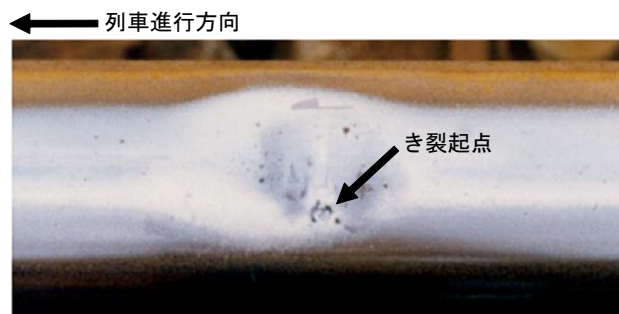


図1 シェリングの外観²⁾

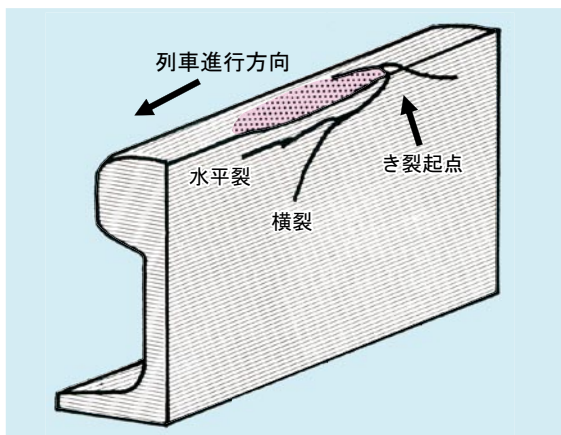


図2 シェリングのき裂進展状態³⁾

平裂，横裂ともに材料の疲労破壊によって形成される「疲労き裂」です。き裂面（破面）が貝殻状模様（Shell Pattern）をしていることから，この損傷はシェリング（Shelling）と呼ばれるようになりました。

ベイナイトレール

開発コンセプト

耐シェリング用レールの開発は，これまでも数回試みられ，複数の試作レールが製造されています。それらの試作レールの開発コンセプト⁴⁾は，材料の強度を高く（高強度化）すると金属疲労が起りにくくなるという材料科学の基本的考え方に基づくものでした。このようなコンセプトにしたがい，レール素材となる鋼に合金を加えたり，あるいは熱処理を行うことによって高強度の試作レールが製造されました。これらの試作レールは，日本工業規格（JIS）に定められたレールの材質規格試験を経て，耐シェリング性を確認するため，実際に列車が走る営業線に試験的に敷設されました（このような試験を敷設試験といいます）。しかし，シェリングの発生やシェリングの発生が確認される以前に溶接部に問題が生じ，所期の目的を果たすことができませんでした。

そこで，今回の耐シェリング用レールの開発では，これまでに行われた開発の結果を踏まえて，レールの高強度化という従来のコンセプトから離れ，新たな方向を探ることにしました。

種々検討した結果，「レール頭頂面に金属疲労層が形成される速度よりも，レールが摩耗する速度を適度に促進することによって金属疲労層を自己除去する摩耗促進型耐シェリング用レール」という新たなコンセプトを考案しました。図3にその開発構想の概念図を示します。さらに，このレールには「車輪の空転・滑走時に発生する摩擦熱によって生成する白色層とそれを起点としたき裂の発生を抑制する」という性能も兼ね備えさせるこ

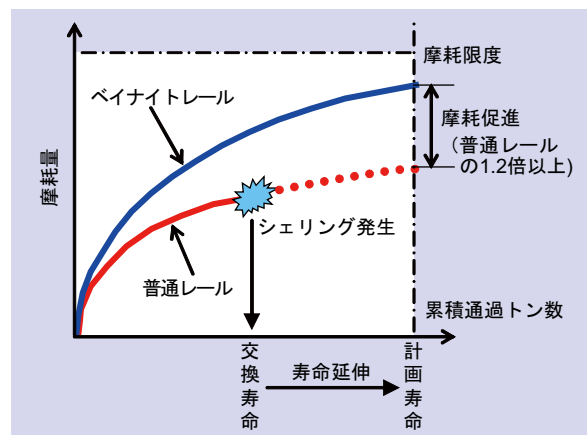


図3 開発構想の概念図

とにしました。

開発コンセプトの要となる摩耗促進の目標値については，シェリングの原因となる金属疲労層を砥石で強制的に削正除去する「レール削正」の効果に着目し，その室内削正試験⁵⁾および実機削正試験⁶⁾の結果を参考にして普通レールの1.2倍以上とすることにしました。

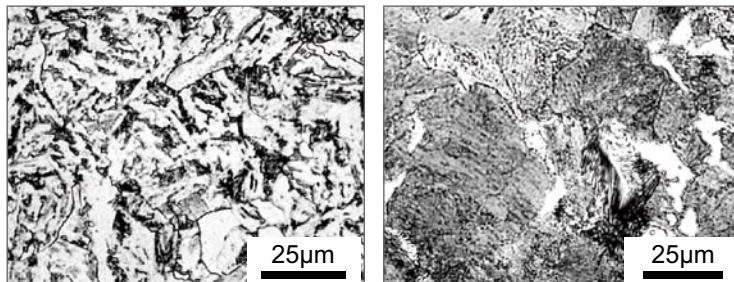
素材の選定

以下に示す前提条件を踏まえて，開発コンセプトに適するレール素材の探索を行いました。

- ①レールの強度は，日本工業規格（JIS）に定められた範囲内とする。
- ②現行4種類のレール溶接法（ガス圧接法，フラッシュバット溶接法，エンクローズアーク溶接法およびテルミット溶接法）を用いて溶接できること。
- ③レールは信号回路としても使用されていることから，電気抵抗値は現行定められた範囲内とする。
- ④鉄道用レールとして受け入れられる価格帯とする。

素材の探索は，鉄鋼材料だけでなく非鉄材料など広い範囲の材料を対象として行いました。その結果，レールの素材として候補となり得る材料は，鉄鋼材料に絞り込まれました。その中から開発コンセプトに適する素材候補として「ベイナイト」と呼ばれる鋼種を最終的に選定しました。

図4に選定鋼種であるベイナイト鋼と，現在，直線区間で主に使用されているレール（普通レール）の金属組織を



(1)ベイナイト鋼 (2)パーライト鋼

図4 金属組織

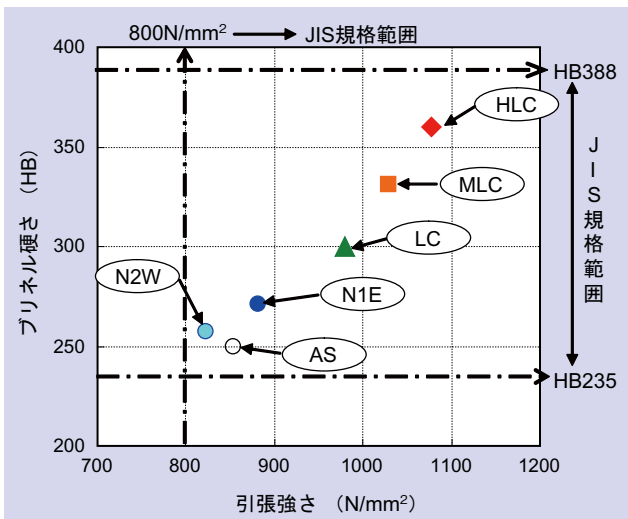


図5 試験レールの硬さと引張強さ

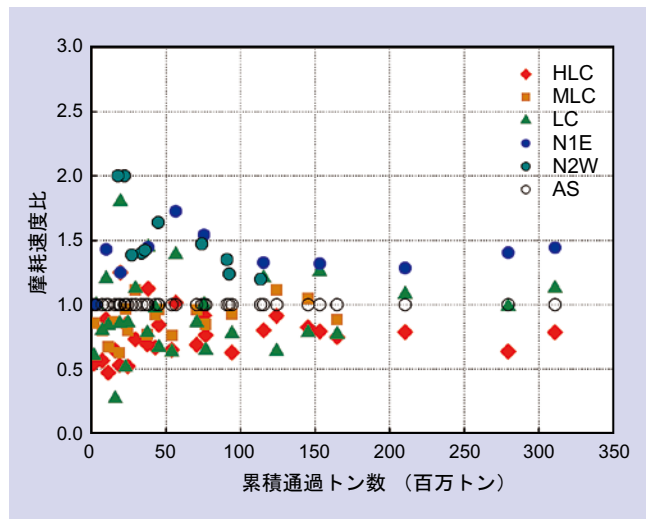


図6 累積通過トン数と摩耗速度比の関係

示します。ベイナイト鋼の金属組織は鋼種名と同じ「ベイナイト」、また、普通レールの素材鋼種の金属組織は「パーライト」といいます。両者の金属組織の違いは、主に化学記号 F_e_3C で表されるセメンタイトと呼ばれる鉄と炭素の化合物(炭化物)の形態にあります。炭化物は、ベイナイト鋼では粒状に分散していますが、パーライト鋼では板状で層状に配列しています。

敷設試験

ベイナイト鋼を素材としたレールを試作し、各種室内試験およびJISに定められた材料試験を行って、材料強度、摩耗特性、転がり接触疲労強度および溶接性能を検証⁷⁾しました。さらに、実使用条件下における摩耗促進性と耐シェリング性を確認するため、約10年間にわたって敷設試験を行いました。

敷設試験は、列車速度が高く運転本数の多い在来線の4線区で行いました。このうち、3線区は直線区間、1線区は半径1000mの曲線区間としました。直線区間では耐シェリング性を評価しました。また、曲線区間では、レール頭部のゲージコーナー部(車輪フランジ部が接触する部分)に生じる転動疲労損傷の一種である「きしみ割れ」に対する耐損傷性評価を行いました。

試験レール

図5に試験レールの硬さと引張強さの関係を示します。ベイナイトレールはJIS規格の範囲内で硬さを5段階(HLC, MLC, LC, N1E, N2W)に設定しました。また、比較材に普通レール(AS)を用いました。以下では、ベイナイトレールの硬さによって便宜的に高硬度ベイナイトレール(HLC, MLC)、中硬度ベイナイトレール(LC)および低硬度ベイナイトレール(N1E, N2W)の3群に分けて説明することになります。なお、試験レールの敷設量は、約4600mです。

試験結果

摩耗促進性

各ベイナイトレールの摩耗促進性を評価するため、普通レール(AS)に対する摩耗速度比と累積通過トン数の関係を求めました。図6に結果を示します。ここでは、(摩耗量÷累積通過トン数)を単位累積通過トン数あたりの摩耗速度とし、各ベイナイトレールの摩耗速度を普通レール(AS)の摩耗速度で除した値を摩耗速度比としました。

低硬度ベイナイトレール(N1E, N2W)の摩耗速度比は、累積通過トン数の低い段階で若干ばらつきがあるものの、全測定期間を通して普通レール(AS)よりも高い値を示します。一方、高硬度ベイナイトレール(HLC, MLC)は、普通レール(AS)とほぼ同じか低い値を示します。これに対して、中硬度ベイナイトレール(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ますが、累積通過トン数が増加することによって、ほぼ普通レール(AS)と同じレベルに収束します。

敷設試験により、低硬度ベイナイトレール(N1E, N2W)であれば、目標とする摩耗速度比(普通レールの1.2倍以上)を維持できることが確認されました。これにより、摩耗促進の目標値を満足するベイナイトレールの硬さは、HB255～HB275の範囲であることがわかりました。

耐シェリング性

表1に各試験レールのシェリングの発生状況を示します。発生状況は、敷設試験現場で調査を行った際に目視によって確認しました。確認されたいずれのシェリングも、超音波探傷システムを搭載したレール探傷車によって検知できる限界寸法の大きさには達していませんでした。なお、表中には、摩耗目標の達成状況も併せて示してあります。結果をまとめると次のようになります。

低硬度ベイナイトレール(N1E, N2W)にはシェリングの

表1 シェリングの発生状況

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

発生は認められませんでした。これに対して、高硬度ベイナイトレール(HLC, LC), 中硬度ベイナイトレール(LC)および普通レール(AS)にはシェリングの発生が確認されました。

図7に試験レールの中で最も硬度の高いベイナイトレール(HLC)および普通レール(AS)に発生したシェリングの外観を示します。これらのシェリングは累積通過トン数150百万トン時点での現地調査では確認されていませんが、累積通過トン数215百万トン時点で実施した現地調査の際に発見されました。また、シェリングの発生と摩耗目標値との関係に着目してこれらの結果を見ると、摩耗目標値を満足した低硬度ベイナイトレールのみがシェリングの抑制を達成していることがわかります。

以上の敷設試験の結果から、低硬度ベイナイトレール(N1E, N2W)の普通レール(AS)に対する耐シェリング性の優位が確認されました。

溶接部の性能

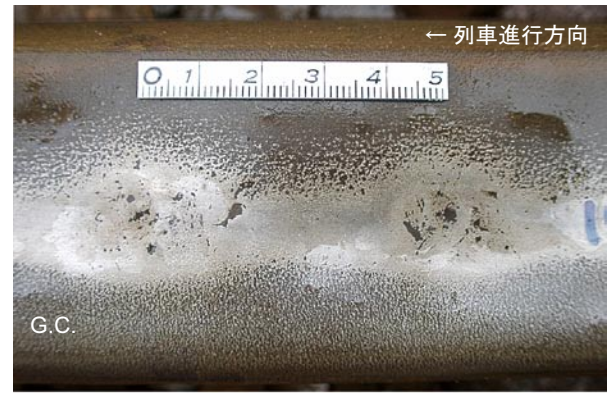
累積通過トン数の増加に伴って溶接部に凹凸が生じます。これは、溶接時の熱影響によるレール母材の軟化や、溶接部とレール母材との硬度差によって摩耗進みに違いが出るなどの原因によって生じると考えられます。この凹凸量を評価尺度として、溶接部の性能評価をしました。その結果、溶接法によって凹凸量に差異は認められますが、試験レールの溶接部に列車走行上特に問題となるような凹凸が形成されることはありませんでした。そのため、営業線での実使用においても溶接部に特に問題が生じることはないと考えられます。

ベイナイトレールの適用範囲について

ベイナイトレールの投入区分は、敷設試験の実績を踏まえて、直線および半径1000m以上の曲線と考えられます。この範囲であれば、シェリングおよびきしみ割れなどの車輪の転がり接触に起因する損傷を抑制することができると考えられます。また、保守上、シェリングの多発によってレール交換される箇所にはベイナイトレールを優先して敷設することが有効と考えられます。

おわりに

約10年間にわたる営業線での敷設試験により、低硬度ベ



(1) ベイナイトレール (HLC)



(2) 普通レール (AS)

図7 シェリングの外観

イナイトレール(N1E, N2W)の耐シェリング性が普通レール(AS)に比べて優れていることが確認されました。また、ベイナイトレールの摩耗目標値を満足する硬さ範囲は、HB255~HB275であることが明らかになりました。さらに、溶接部についても特に問題がないことが確認されました。

現在、ベイナイトレールは、一部のJR会社の営業線において実用化されています。[RRR]

文献

- 1) 佐藤幸雄, 辰巳光正, 上田正治, 三田尾眞司: 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, 鉄道総研報告, Vol.22, No.4, pp.29-34, 2008
- 2) 石塚弘道, 石田誠: 鉄道における車輪とレールの損傷と防止策, ふえらむ, Vol.13, No.12, p.794, 2008
- 3) 松山晋作: レールの瘤 シェリングを斬る, RRR, Vol.44, No.5, p.31, 1987
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 佐藤幸雄, 辰巳光正, 柏谷賢治, 上田正治, 横山泰康: 耐シェリング用ベイナイトレールの開発, 鉄道総研報告, Vol.12, No.10, pp.15-20, 1998