

氏名（本籍） 佐藤 幸雄（宮城県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 乙第 949 号
学位授与の日付 平成 29 年 3 月 18 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目 鉄道用パーライト鋼レールの表面損傷に関する研究

論文審査委員 (主査) 教授 野口 昭治
教授 溝口 博 教授 萩原 慎二
教授 佐々木信也 教授 向後 保雄

論文内容の要旨

レール交換原因の約半数が損傷に起因するものであり、その要因の約 80%が表面損傷によって占められている。本研究は、表面損傷の主な部分を占めるシェリング損傷の防止を目指して行われたものである。

新幹線および在来線においてシェリング損傷が発生して交換に至ったレール中から、累積通過トン数[車軸通過回数[本]×軸重[t/本]，単位(MGT: Million gross tonnage)]がほぼ等しいものを解析対象として選定し、車輪との繰り返し転がり接触を受けたレール頭頂面およびその直下の金属結晶粒子の負荷応答挙動について解析を行った。その理由は、金属結晶レベルでの材料応答を把握することは、車輪との繰り返し転がり接触によって発現する現象すなわち塑性変形あるいは転がり疲れについて理解するための本質的な情報を与えてくれると考えたからである。その結果、新幹線では表面下約 20 μm 、在来線では少なくとも 100 μm より浅い位置に車輪との繰り返し転がり接触の影響を強く受けた領域すなわち疲労層が形成されていることを確認した。また、X線回折による軸密度測定により α -Fe {111} 結晶面がレール頭頂面に平行に配向していること、111 軸密度が深さ方向に特徴的な変化を示すことを把握した。さらに、EBSP による局所方位解析により実使用レールの頭頂面表層における金属結晶粒子が車輪との転がり接触の繰り返しを受けて細粒化し、歪みや転位の蓄積が進行していることをつきとめた。また、そのような領域は 111 軸密度の深さ方向変化が先鋭的なピークを示す位置に相当していることが分かった。

しかしながら、実際に線路で使用されるレールに発現した材料応答現象は、輪重、すべ

りおよび潤滑など多くの要因が複雑に組み合わさって作用した結果として現れたものである。そのため、実使用レールの分析からだけではレールに表面損傷を発生させる支配要因を分離・特定してその影響を明確に把握することは難しいのではないかと考えた。

そこで、制御された負荷条件下で室内試験を行うことにより、試験片の材料応答に及ぼす接触条件の影響を分析・把握することにした。試験は、Hertz 接触圧力、すべり率および潤滑をパラメータとして、他の因子の影響を極力排除するように考慮して実施した。先ず、Hertz 接触圧力の影響を検討するため、すべり率および強制潤滑を与えない条件で試験した。その結果、設計形状断面の車輪とレールを静的に接触させた際に発生する Hertz 接触圧力 $P_{\max.} = 0.9\text{GPa}$ 以下では軸密度、局所方位に対する影響は少ないことが判明した。また、走行中の新幹線車両において発生する輪重変動のうちで著大とされる輪重を想定した Hertz 接触圧力で試験を行った場合、シェリング損傷の発生確率が最も高いとされるレール軸芯位置における 111 軸密度の深さ方向における変化に較べて過大になり過ぎることが分かった。実使用レールにおける軸密度の応答挙動に近くなるのは、Hertz 接触圧力 $P_{\max.} = 1.2\text{GPa}$ であることを確認した。次に、すべり率の影響について検討を行うため、Hertz 接触圧力を $P_{\max.} = 1.2\text{GPa}$ に固定、潤滑条件は大気中無潤滑として実験した。すべり率は、レール軸芯位置の接触条件に相当するすべり率=0%、クリープ領域内のすべり率 $S=0.2\%$ 、巨視すべり領域の $S=0.6\%$ の 3 水準を採用した。その結果、すべりを与えると転がり接触面表層に塑性流動および結晶配向を生じることが確認できた。結晶配向はすべり率の大きさによって異なり、すべり率 $S=0.2\%$ では本研究で転がり疲れの指標として着目した 111 軸密度以外の面方位の軸密度にも変化が生じることが確認された。また、すべり率 $S=0.6\%$ では結晶配向は非常に弱く、どの軸密度にも変化がほとんど見られなくなることが分かった。一方で、EBSP 解析によって得られる結晶方位像分布図および回折線品質像分布図は、すべり率の増加による結晶粒の細粒化、歪みあるいは転位の集積を良くとらえていることが確認できた。この実験では、すべりを与えると軸密度の深さ方向変化および局所方位分布はシェリング損傷の発生確率が最も高いとされるレール軸芯位置の状況とは乖離することが分かった。実使用レールの金属組織変化、軸密度の深さ方向における変化挙動および局所方位分布に最も近い挙動を試験片に与えるすべり率は $S=0\%$ であることを突き止めた。さらに、シェリング損傷の発生に対して影響を与えると考えられる水潤滑の影響について検討を行うため、Hertz 接触圧力を $P_{\max.} = 1.2\text{GPa}$ に固定、すべり率 $S=0\%$ とした実験を行った。その結果、接線力係数、転がり接触面表層の金属組織、断面硬さ分布および 111 軸密度の深さ方向における変化に対して水による潤滑の影響は小さいことが判明した。

レールの表面損傷対策の一つとして回転砥石などを用いてレールを削正する保守方法がある。この保守方法は、開業時期が最も早い東海道新幹線では 1974 年から実施されてきている。在来線では 1987 年の国鉄民営化以降にシェリング損傷に起因したレール折損が顕在化し、その対策として 1993 年頃からレール削正が適用され始めている。ただし、在来線のレール削正条件の多くは新幹線を対象とした削正指針あるいは実線路での削正試験結果

に依拠している。新幹線と在来線では車両走行条件が大きく異なることからレールへの負荷にも大きな違いがあることは容易に想定される。したがって、レール削正によって在来線のシェリング損傷を効率的に抑制するためには、在来線で使用されるレールの転がり疲れ状態を把握した上で策定した削正条件を用いる必要がある。一方、抑制効果を上げている新幹線についても提示された削正指針は実験力学的手法によって推定されたものであり、金属材料学的解析に基づいたものではない。レール削正作業には多大な費用が必要とされることから、新幹線についてもレール保守コスト削減の観点から現状の削正条件が過剰削正になっていないか検証することが重要と考えた。

そこで、本研究で行ってきた金属結晶粒子レベルでの解析手法を適用してレール削正影響ならびに削正後の車輪との繰り返し接触がレール頭頂面表層に及ぼす影響を検討するため、在来線の実線路でレール削正試験を行った供試レールの解析を実施した。その結果、車輪との繰り返し転がり接触によってレール頭頂面に形成される疲労層は現用のレール削正保守車両によって除去可能な深さであること、レール削正によって削正加工を受けないレール頭頂面下の領域においても転がり接触の繰り返し負荷の影響が減少あるいは緩和されること、レール削正を繰り返すとその後招来される繰り返し転がり接触の影響を抑制できることが明らかになった。また、在来線での初回削正開始時期については、少なくとも 100MGt に到達する前に実施することが望ましいことを本研究で用いた材料解析手法および破壊力学的手法を用いたき裂進展試験によって提示することができた。

以上

論文審査の結果の要旨

鉄道の直線区間で使用されるパーライト鋼レールには、車輪との繰り返し接触によって表面損傷であるシェリング損傷が多発し問題となっている。この損傷の発生機構や予防対策について研究を進めることは、鉄道輸送の安全および安定輸送を確保する上で非常に重要である。本研究では、先ず既往の研究調査からシェリング損傷が多発するようになった経緯および使用環境について整理を行って問題点を明確化している。この結果を受け、シェリング損傷が発生したレールの車輪との転がり接触面表層を構成する材料の変化、それら材料負荷応答に対する転がり接触条件の影響を確認するための室内実験および営業線における予防対策の検証を材料学の観点から実施した。実際に使用されて損傷した鉄道レールの調査・研究および営業線を使った試験は希少であり、貴重なデータが含まれている。本研究成果は、学術面の成果に加えて鉄道の安全やレール保守最適化によるコスト削減など実務面での貢献も大いに期待できる。

本論文は、以下の6章から構成されている。

第1章「緒言」では、本研究の背景および関連する既往の研究について述べ、本論文の目的と構成を示している。文献調査からこれまでのレール損傷の実態を整理・分析することにより、近

年行われているレール交換の大半がシェリング損傷によるものであることを明らかにした。鉄道にとってレール表面損傷であるシェリング損傷を防止することが線路保守に重要であることを明確に示した。

第2章「パーライト鋼レールの車輪接触面表層における塑性変形状態」では、レールの転がり接触面表層の材料負荷状態を明らかにすることを目的としている。実施内容は、新幹線でシェリング損傷を生じたパーライト鋼レールの硬さ、塑性流動、下部組織および微視ひずみの測定、それら事象の考察およびシェリング損傷対策である砥石研削による転がり接触面表層の現行除去量指針の適否検証にある。レール頭頂面表層の塑性流動の形成と流動方向、硬さ・微視ひずみの増加およびパーライト結晶粒のすべり変形など材料応答を確認し、それらを誘引する原因が車輪接触に起因した接線力にあることを明らかにした。また、これらの結果から新幹線ではレールの転がり接触面が最も疲労被害を受けていること、疲労層の深さおよび表面のピット・微細き裂等の欠陥の深さはいずれも概ね20 μm 以内であることを明らかにし、現行のレール削正深さの指針である0.1mmの削正によって、十分疲労層を除去できることを確認した。

第3章「パーライト鋼レールを構成する金属結晶の負荷応答に及ぼす転がり接触の影響」では、レールの車輪の転がり接触面表層における材料の負荷応答挙動を金属結晶の変形という観点から明らかにすることを目的としている。実施内容は、在来線でシェリング損傷を生じたパーライト鋼レールの結晶方位解析および下部組織観察である。在来線で使用されたパーライト鋼レールの転がり接触面表層部では、 $\alpha\text{-Fe}$ 結晶粒子の{111}結晶面が新幹線レールと同様にレール頭頂面に平行に配向すること、111軸密度によって評価される配向度は表面からの深さによって変化すること、その最大値は深さ約100 μm に現れることを明らかにした。さらに、SEM-EBSD解析から最表層部の結晶粒子が細粒化し、かつレールの車輪接触面とほぼ並行に列車進行方向へ伸長することを発見した。金属結晶の負荷応答解析および硬さ測定による微視ひずみの測定結果から、在来線レールも新幹線レールと同様に、転がり接触による疲労ダメージ層は少なく、とも100 μm より浅い領域に形成されていることを把握した。このことから、現状では削正指針が示されていない在来線レールについても、新幹線の現行レール削正指標である0.1mm削正を適用することにより、シェリング損傷の発生を防止できる可能性を明らかにした。

第4章「室内試験によるパーライト鋼レールの材料応答挙動の把握」では、営業線で使用されたレールの転がり接触表面表層の材料応答挙動の支配要因を室内試験によって明らかにすることを目的とする。実施内容は、パーライト鋼レールから採取した円筒試験片を用いて二円筒転がり接触試験を行い、レール相当試験片の転がり接触面表層に発現する材料応答に対する接触圧力、すべりおよび潤滑の影響を金属結晶の変形の観点から明らかにすることである。接触圧力影響検討試験では、Hertz 接触圧力 $P_{\text{max}} = 0.9\text{GPa}$ 以下では軸密度、局所方位にほとんど影響ないことが明らかにした。すべり率影響検討試験では、すべり率の増加と共に111軸密度の深さ方向におけるピーク値が低下し、すべり率 $S=0.6\%$ になるとどの面方位の軸密度にも変化がほとんど見られなくなることを明らかにした。さらに、レール頭頂面中心位置に相当するすべり率 $S=0.0\%$ 試験片では、転がり接触面の断面硬さ分布、111軸密度の深さ方向における変化曲線に及ぼす水潤滑の影響は小さいことを明らかにした。これらの結果からシェリング損傷の再現試験条件は、 $S=0.0\%$ 、 $P_{\text{max}}=1.2\text{GPa}$ 、水潤滑環境が最も実機に近い材料応答を示すことを見出した。

第5章「鉄道用レールの表面損傷防止対策の検討」では、シェリング損傷防止対策の一つであ

るレール削正の在来線レールにおけるシェリング損傷防止効果の検証を目的とする。実施内容は、営業線で行われたレール削正試験の試験体であるパーライト鋼レールの材料応答挙動を金属結晶の変形という観点から把握し、その有効性評価である。在来線レールについてもレール削正を行うことによって、車輪との接触面表層に形成される疲労層を除去することができることを確認した。また、削正砥石と直接接触しないレールの車輪との転がり接触頭頂面下で生じた材料影響についても、レール削正によって減少あるいは緩和することができることを発見した。さらに、レール削正を繰り返すことによって、その後の車輪との繰り返し転がり接触によって招来される材料影響を抑制することができることを明らかにした。

第6章「結言」では、各章で得られた知見をまとめて本研究を総括している。

研究内容を審査委員会で十分検討した結果、博士(工学)を授与するにふさわしい研究であることを審査委員会として認めることとなった。