

レール損傷の発生メカニズムを探る

名村 明
 鉄道力学研究部
 (軌道力学研究室 室長)

石田 誠
 同
 (主管研究員)



なむら あきら



いしだ まこと

はじめに

鉄道は二本のレール上を一对の車輪(輪軸)が回転しながら移動するシステムです。車輪・レールには、①車両の重さの支持、②「走る」ための駆動力の伝達、③「曲がる」ための形状の工夫や力の伝達、④「止まる」ためのブレーキ力の伝達といった基本的な役割のほかに、信号システムや電回路の一部も担っています。これらの役割を担うなかで車輪とレールの転がり接触により、レール損傷などの問題が発生します。

ここでは、車輪とレールの転がり接触による主なレール損傷とその発生・進展メカニズムを解明するための車輪・レール高速接触疲労試験装置を用いた実験技術について紹介します。

転がり接触による主なレール損傷

レールは、輪重(車輪・レール間に作用する上下方向力)を直径10mm程度の楕円形状をした接触面で支えています。1GPaにも及ぶ大きな応力が発生してレール表面が変形する状態で、車輪が転がるとレールに様々な損傷が発生します。

(1) レールシェリング

転がり接触疲労損傷の一つであるレールシェリング(以下、シェリング)を図1に示します。このき裂は、車輪がレール上を転がることによる応力の繰り返しによりレールの表

面付近に発生し、徐々に内部に進行していきます。シェリングの名前の由来は、疲労き裂の進展過程を示す破面の模様が貝殻(shell)のように見えるためです。

シェリングは、古くは1951年頃、山陽本線の曲線において、レール頭頂面が落ち込んで黒ずむ現象が多数発生し、黒裂と呼ばれて、大きな問題となりました。その後、1964年10月に開業した東海道新幹線において、1973年頃からシェリングの発生が顕著になりましたが、1977年頃から軌道保守量を低減するために進められた50Tレールから60kgレールへの交換により、損傷部分が交換され、見かけ上問題が消滅しました。1972年10月に開業した山陽新幹線新大阪～岡山間でも累積通過トン数(通過トン数:列車荷重による軌道へのダメージを評価する指数で「軸重×通過軸数」で表現する)1.5億トンを超える頃から、シェリングが発生し始め、2億トンを超える1982年頃からその増加傾向が顕著になりました。

(2) きしみ割れ

半径400m程度以下の急曲線の緩和曲線中あるいは半径がそれ以上の円曲線中の曲線外側レール(以下、外側レールを外軌、内側レールを内軌)のゲージコーナにおいて、図2に示すような比較的間隔が狭いき裂が連続して発生する場合があります。このようなゲージコーナに連続して発生するき裂をきしみ割れと呼びます。このきしみ割れは、進展するとき裂とき裂の間の部分がはく離する場合があります



図1 シェリングの外観と破断面の例

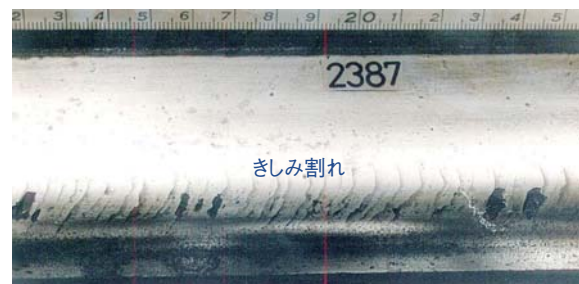


図2 きしみ割れの例

観察されますが、連続するき裂のうち、一部のき裂から頭頂面に生じるシェリングと同様なき裂に進展する場合があります。これをゲージコーナき裂と区別して呼ぶ場合があります。

(3) 空転傷

走行する車輪とレールの摩擦は通常、わずかなすべりを伴う転がり接触ですが、粘着力が不足した状態で車輪を駆動した場合、空転現象が発生し、レール頭頂面表層部では急加熱・急冷により組織が変化し、空転傷が発生します。空転傷でその程度の大きいものは凹みが大きく、その状態では車両走行が困難になります。

(4) 摩耗

急曲線の外軌ゲージコーナは車輪フランジとの接触により摩耗が大きく、レール交換の主因の一つとなっています。このゲージコーナの摩耗のことを側摩耗と呼びます。一方、レール表面がある一定の間隔に摩耗あるいは塑性変形して連続した凹凸が形成される場合があります。これを波状摩耗と呼びます。主な波状摩耗としては、急曲線内軌、曲線外軌および直線に発生する比較的短い波長と長い波長の2形態の計4形態があります。特に都市鉄道などでは、急曲線内軌頭頂面に、図3に示すような波長30～150mmの波状摩耗が発生し、列車通過時に生じる騒音・振動が大きな問題になっています。

車輪・レール高速接触疲労試験装置

車輪・レール高速接触疲労試験装置は、東海道・山陽新幹線で大きな問題となっていたシェリングの発生要因および有効な対策を検討することを主な目的に、1987年度に設置されました。この試験装置は、車輪とレールの力学的な環境を再現するために、車輪とレール間に作用する輪重、横圧および前後接線力、さらに車輪とレールの接触面のすべり率を制御して、転がり試験を行うことを目的に開発されました。また、車輪とレールの試験輪の接触状態を可能な限り実際の状態に近づけるために、アタック角やレールの傾斜敷設角も設定が可能になっています。さらに、シェリングの発生に水が関係していることから、試験輪の回転中にその接触部への散水や散油も可能になっています。

レールシェリングの予防研削

この試験装置を用いて、まずシェリングがどのような状況で発生しやすいかを約5年間にわたって検討しました。その間、いくつもの試験輪において損傷が発生するまで疲



図3 急曲線内軌波状摩耗の例

勞試験が継続され、試験輪の疲労と同時に試験装置自体の疲労も進みました。

そのシェリングの発生機構に関する試験により、結果的には圧縮残留応力（塑性変形）が大きい試験輪の方が、残留応力が小さいものより転がり疲労き裂の発生が早く、すべり率はあまり大きくない場合の方が発生しやすいことなどの傾向が得られました。このことは、転がり接触においては大きな圧縮残留応力を発生させる大きな荷重が繰り返し作用する方が、結果的にき裂が発生しやすく、またすべり率が大きいと摩耗しやすく疲労層が適当に除去されるため、摩耗があまり進まない適度なすべり率の方がき裂が発生しやすいことを意味すると考えられます。なお、シェリング発生状況の統計分析から、シェリングの発生に水が大きく関与していることが明らかになったため、試験はすべて散水状態で行いました。

以上、シェリングの発生機構という点では、き裂発生の大まかな傾向を確認したに留まりましたが、その傾向を踏まえ、シェリングが発生しやすいと想定される条件で、予防研削に関する転がり疲労試験を引き続き約5年間にわたって行いました。

実験パラメータの研削周期については、1980年から5年程度続けられた東海道新幹線米原地区における研削試験結果と、材料あるいは金属組織に着目した結晶学的な面からの研究成果も考慮し、通過トン数5000万トン程度が望ましいと考えられ、研削周期を5000万トン（一定）として転がり疲労試験が実施されました。研削周期も重要なパラメータですが、5000万トンの場合のみで実験に5年程度も要したことから、実験結果がこれまでに得られた知見から妥当と考えられたため、研削周期を5000万トンとする場

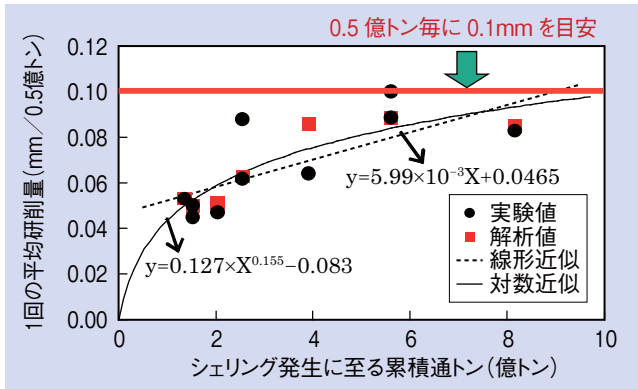


図4 予防研削によるシェリング抑制効果

合のデータで実験結果がまとめられました。図4は、レール予防研削によるシェリング抑制効果に関して、5000万トンごとに研削する場合、その1回の研削作業における研削量とシェリングが発生するまでの累積通過トン数の関係を示します。図中には、実験値を統計解析した値を線形あるいは対数近似した直線あるいは曲線が示されています。例えば、線形近似した直線は研削周期5000万トンの場合、約0.1mmの研削量で平均的には累積通過トン数で8億トンを超えるまでシェリングの発生を抑制できることを示します。

レール側摩耗の影響因子

次に、それまでのシェリングに代わって、もう一つの大きな問題である急曲線外軌に生じる側摩耗について、様々な影響因子について検討しました。摩耗評価および予測に関しては、単純な試験片の組み合わせによる基礎摩耗試験を通して摩耗係数を推定し、接触応力、すべり率などのパラメータによる摩耗形態を統一的にウエアマップと呼ばれる図で表わすことが一般的です。これらの試験は、材料評価などの基礎研究として一般性はありますが、実物と寸法や接触状態などの差が大きいため、実現現象との相関性は小さく、実際の摩耗現象の再現が困難です。実現現象を予測するためには、試験片の寸法、接触状態などが実物と近い条件での摩耗試験が望ましいことから、この試験装置を使用しました。

側摩耗を抑制するために熱処理により硬くしたレールの採用や、外軌ゲージコーナと車輪フランジ間への潤滑などが行われています。これらの影響や車両と軌道の相互作用に関するパラメータである横圧とアタック角に着目し、それらのパラメータと摩耗の関係を求めました。この摩耗試験においては、試験装置が備えるほぼすべての機能を発揮して実施されました。この摩耗試験において得られた結果を図5に示します。これらの図より、摩耗進みに対する横圧(スラスト荷重)、アタック角などの影響が定量的に把握されました。なお、シェリングに関する約10年間の疲労試験による試験装置のダメージは大きく、その後も毎年

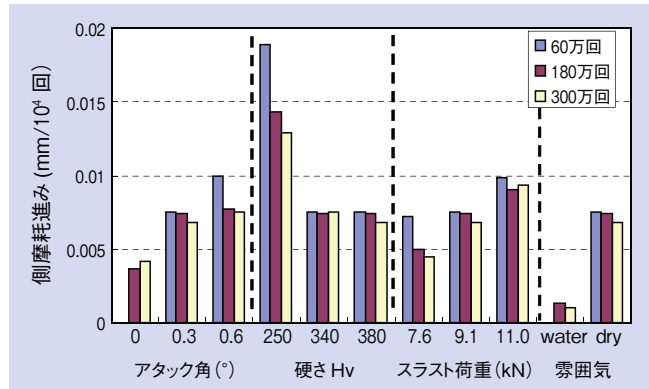


図5 摩耗因子によるレール側摩耗の違い

のように修理と改良を行いながら、この摩耗試験を実施しました。

新しい試験装置

従来の試験装置が老朽化したため、機能向上した新しい試験装置への更新が進められ、2010年10月に完成しました。試験装置の外観を図6に、主な仕様を表1に示します。従来の試験装置では、条件によっては車輪・レールに大きな振動が発生し、回転速度を30km/h程度まで低下せざるを得ず、所定の累積通過トン数または走行キロに到達するまでに長時間を要していました。新試験装置では、反力受けの剛性向上、使用試験速度内での共振現象の回避、回転系の高精度なバランス調整などを行い、振動低減を図っています。また、モータ技術の進歩に伴い、従来の直流モータから交流同期モータに変更し、車輪側・レール輪側2台のモータを高精度に制御することにより、車輪とレール輪間のすべり率またはトルク(接線力)を細かに制御します。このことにより、実際の曲線走行に近い条件で試験することが可能です。さらに、無人自動運転時設備監視システムを備え、速度140km/hでの一昼夜20時間連続試験が可能となりました。

今後の活用計画

新試験装置は、レールや車輪の断面形状変更に伴う摩耗進展評価、車輪フランジ摩耗進展シミュレーションプログラムの検証、レールゲージコーナのきしみ割れ対策などに活用していく予定ですが、ここではきしみ割れの再現試験の必要性について述べます。

きしみ割れの多くは、緩曲線の外軌ゲージコーナに発生し、き裂とき裂の間の部分がはく離し、騒音の原因となったり、一部のき裂から頭頂面に生じるシェリングと同様なき裂に進展する場合がありますため、その対策が望まれています。きしみ割れの再現試験は、国内外の鉄道事業者やレールメーカーで実施されており、きしみ割れが発生し難いレー

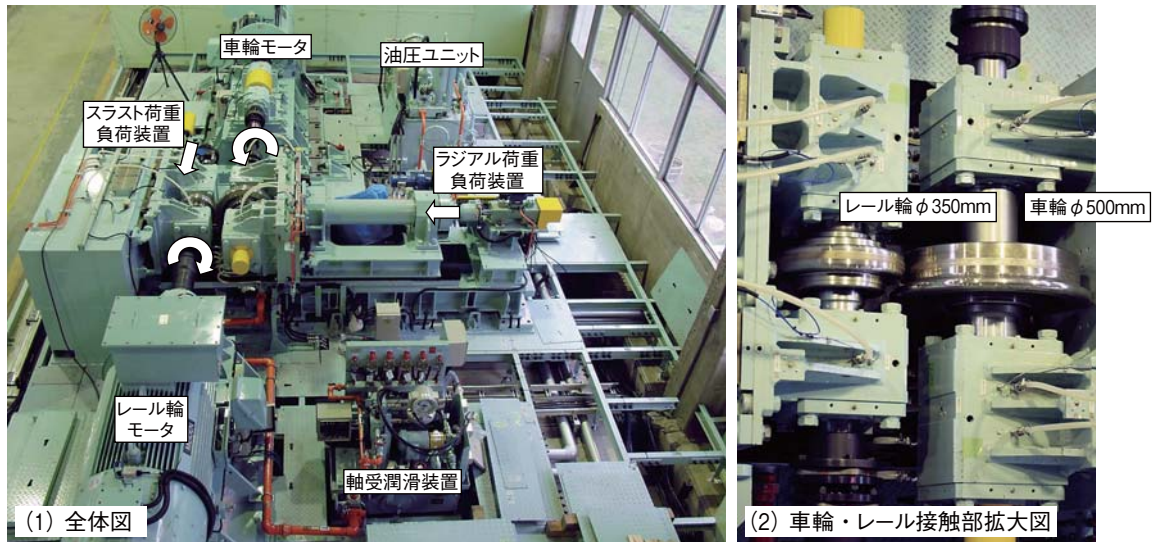


図6 新試験装置

表1 試験装置の主な仕様

試験輪直径	車輪	φ500mm
	レール輪	φ500mmまたはφ350mm
最高試験速度		160km/h(車輪:1700rpm)
最大ラジアル荷重		50kN(輪重82kN相当)
最大スラスト荷重		30kN(横圧60kN相当)
すべり率制御範囲		-10~100%, 精度:±0.1%
トルク制御範囲		±1900N・m, 精度:±19N・m
アタック角		±3度, 0.1度刻み
接触角		-0.5~1.5度, 0.1度刻み
最大連続運転時間		20時間(車輪回転数1500rpm:140km/h相当)

ル材質の相対評価などに活用されています。しかしながら、どのような車輪とレールの転がり接触条件で、きしみ割れにつながる短いき裂が発生・進展しやすいか、あるいは摩耗進展が優勢となり、き裂が発生し難いかについては十分検討されていません。

一方、鉄道総研では、これまでに短いき裂の進展を正確にシミュレーションできるプログラムを作成するとともに、摩耗の進展を予測するモデルも組み込み、その競合を検討できるようにしました。この「短いき裂の進展と摩耗の競合モデル」を用いた解析例を示します。図7に半径610mの曲線外軌熱処理レールの、車輪-レール接触領域付近のせん断応力分布を示します。この図に示す横方向(x方向)でレール中心から26mmの断面Aと、Aからゲージコーナ側に1.77mmの断面BおよびAからレール中心側に1.96mmの断面Cを短いき裂解析領域のx方向断面位置とし、その断面内でレール表面から1mm×1mmの正方形領域内でシミュレーションを行いました(図8)。断面Cでは、せん断応力が大きく、表面のすべりが小さいため、摩耗しにくいことから、き裂が発生して進展していることがわかります。

今後、新試験装置での試験とシミュレーションを繰り返すことにより、きしみ割れ予防または抑制対策の評価に役立てたいと考えています。

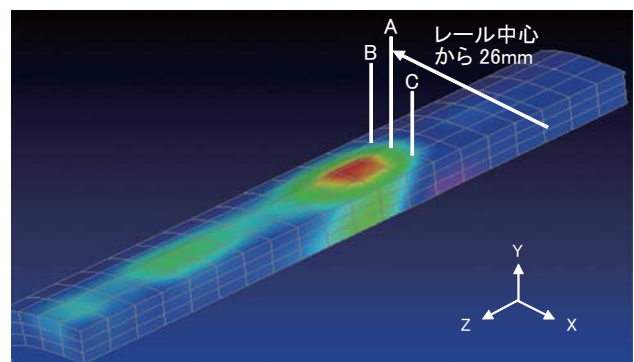


図7 接触領域付近のせん断応力

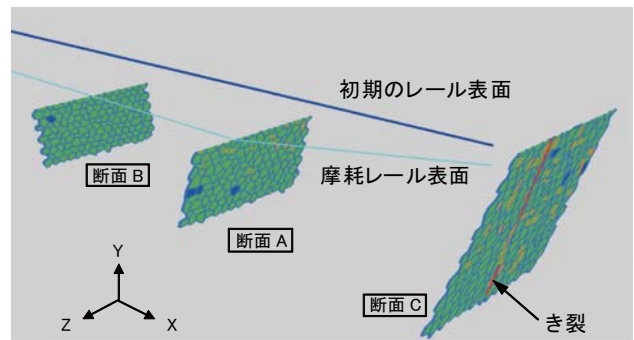


図8 短いき裂と摩耗の競合シミュレーション結果(車輪通過120万回後)

おわりに

以上、試験装置の紹介を通して、鉄道固有の課題の一つである車輪とレールの転がり接触により生じるレール損傷に関して紹介しました。

レール損傷の発生・進展メカニズムに実験的に取り組むと結果が得られるまでに長時間を要しますが、今後もレール損傷は保線において中心課題であることは変わりません。新しい試験装置を活用して、試験装置・研究者の疲労の蓄積が最小限に、研究成果の蓄積が最大限となるよう努力してまいります。RRR