# 平成 16 年 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'04)

S8-4-4.

# 反発係数を用いたレール表面硬化層の評価

〇中村 崇 [土]石田 誠 ((財)鉄道総合技術研究所) [機]松田 健次(九州工業大学)

# Estimation for hardened surface layer of rail using the coefficient of rebound

Takashi Nakamura, Makoto Ishida (Railway Technical Research Institute) Kenji Matsuda (Kyushyu Institute of Technology)

Martensitic transformation layer on rail surface which is called white etching layer is formed by friction heat generated by wheel sliding. This layer is harder and more brittle than the perlitic steel of standard rails, which means it may have larger potential to give rise to the squat type of rolling contact fatigue defect, which is called rail surface shelling in Japan, than the perlitic steel. The relation between the thickness of white etching layer and the possibility of rail surface shellings has not been still understood clearly enough. But it has been practically recognized that the thicker the white etching layer is, the larger the possibility of rail surface shelling in the white etching layer becomes. Then thickness of white etching layer can be one of parameters to estimate the possibility of rail surface shelling. In this paper, focusing on the difference in hardness between the white etching layer and perlitic steel, the estimation of the thickness of the white etching layer based on the coefficient of rebound which is used in the Shore type hardness tester has been studied. Some experiments and FEM analysis models have been described here.

キーワード:白色層,シェリング,反発係数,FEM,マルテンサイト Keywords:white etching layer, rail shelling, the coefficient of rebound, FEM, martensite

### 1. はじめに

鉄道レールの頭頂面が車輪の空転や滑走による摩擦熱 等により高温になると、白色層と呼ばれるマルテンサイト の熱変態層が形成される.この白色層は一般的に硬くて脆 いため普通レール鋼のパーライトと比較して、レールの転 がり疲労き裂の一つであるレールシェリング(以下「シェリ ング」と略称)が発生しやすい傾向がある.シェリングが成 長するとレール折損に至ることもあるため、その成長を管 理し適切な処置を施すことが重要である.白色層が厚くな るとシェリングの発生確率が高まることが考えられるため、 シェリングの発生を予防する指標として白色層の厚さが一 つの候補であると考える<sup>(1)</sup>.図1にレール頭頂面に発生し た白色層とそれに起因するシェリングを、図2にそのレー ル表層断面組織を示す.

松田らは,実験および汎用有限要素プログラムを用いた 弾塑性衝突解析により,金属表面のメッキ厚さと反発係数 の関係を求め、反発係数より表面硬化層の評価が可能なことを示した<sup>(2)</sup>.

本報告では、レール頭頂面の反発係数から白色層厚さを 推定するための実験および有限要素法を用いたシミュレー ションを行ない、反発係数と白色層厚さの関係を求めた結 果を紹介する.



図1 白色層とシェリング



図2 白色層の断面組織

## 2. 実験および解析方法

初めに、有限要素法を用いた弾塑性衝突解析の妥当性を 確認するために、レールから切り出した試験片にクロム (Cr)メッキを施し、そのメッキ表面硬さを反発式の JIS-D 型ショア硬度計と携帯型硬度計(Krautkramer Branson 社製 Hardness Tester)の2つの硬度計を用いて実験を行なった. 次に、汎用有限要素解析プログラム MARC を用いてシミュレ ーションを行ない、実験値とシミュレーションの比較を行 なった.ここでは、その実験方法と解析方法について紹介す る.

# 2.1 実験方法

実験では普通レール鋼 (Hv270 程度)の上部に膜厚が 5 ~200[ $\mu$ m]のCrメッキを施した5種類の試験片を用いた. また、シミュレーションでは実験に用いたショア硬度計の 圧子形状および質量を求めてモデル化し、その圧子がメッ キ試験片をモデル化した弾塑性体に衝突する弾塑性衝突解 析を行なった.レール鋼の材料特性は、E=208GPa、 $\rho$ =7.83 ×10<sup>-9</sup>ton/mm<sup>2</sup>、 $\nu$ =0.3、降伏点 450MPa、引張り強さ 850MPa とした.また Cr については E=253CPa、 $\rho$ =7.19×10<sup>-9</sup> ton/mm<sup>2</sup>、 $\nu$ =0.3、降伏点 2200MPa であり、弾完全塑性体と した.図 3(a)に実験に用いた圧子を、図 3(b)にシミュレー ションモデルを示す.

#### 2.2 解析方法

次にレール鋼の上部に白色層を模擬したマルテンサイト の膜があるシミュレーションモデルを作成し、そこに圧子 が衝突する弾塑性衝突解析を行なった.表1にシミュレー ションで用いた圧子の形状と特性を示す.マルテンサイト の材料特性は軸受鋼 SUJ2 の値を用い E=208GPa,  $\rho$ =7.83 ×10<sup>-9</sup>ton/mm<sup>2</sup>,  $\nu$ =0.3,降伏点1370MPa,引張り強さ1570MPa とした<sup>(3)</sup>. それぞれの圧子においてマルテンサイト(SUJ2) の膜厚と反発係数の関係を求め、白色層の厚さの推定に有 効な圧子の形状と特性について検討した.



(a) 概観写真
(b) シミュレーションモデル
図 3 JIS-D 型ショア硬度計の圧子形状

表1	圧子	の形状	さと特	性(	こつし	いて

No			落下	
	形状	胴体部	先端部	高さ [mm]
1	JIS-D型			19
2	JIS-D型			
3	JIS-D 型を 1/2 に縮小		ダイヤモンド	1.32
4	JIS-D 型を 1/4 に縮小			
5	JIS-D 型を 1/2 に縮小	アルミニウム	セラミックス	2

## 3. 実験および解析結果と考察

ここでは、Cr 膜を用いた実験を行ない、有限要素法による 解析モデルの妥当性を確認し、マルテンサイト膜を想定し た解析により実際にレール表層に形成されるマルテンサイ ト膜(白色層)の厚さを評価する反発係数を利用したシステ ムの可能性を検討した.

#### 3.1 Cr 膜の厚さと反発係数の関係

図4に、レール鋼にCrメッキを施した試験片のショア硬 さを測定した結果とそれをモデル化した有限要素法による 解析結果を示す.実験では JIS-D型ショア硬度計と携帯型 硬度計の2つを用いて試験片のショア硬さを求めた. 母材 であるレール鋼よりもCrの硬さが大きいため、すべての条 件において Cr 膜厚が増加するにつれショア硬さの値が増 加していることがわかる、またこのショア硬さの増加がな くなり一定となると、母材の影響を受けない Cr 膜のみの硬 さが得られていることを示す.2 つの硬度計の測定結果に 差が見られる部分もあるが、これは均一な膜厚を設計値と して製作した試験片においても、実際は場所によりメッキ 膜厚が異なるためであると考えられる. 今回の実験ではCr の膜厚が 5~200 µの試験片を用いたが、2 つの硬度計によ る実験結果ともその膜厚の範囲では Cr 膜のみのショア硬 さは得られず母材の影響を受けた Cr 膜のショア硬さが測 定された.実験結果と解析結果を比較すると,解析はほぼ実 験値に近いショア硬さを示しており、弾性衝突解析による 膜厚推定の可能性が示された.また解析結果より Cr 膜厚 200 μm 以上では測定値に対し母材のレール鋼の影響は無 く、Crの硬さのみが得られることが確認された.

#### 3.2 マルテンサイト膜の厚さと反発係数の関係

Cr メッキ膜については実験と解析を行なったが、マルテンサイトについては解析のみを行ない、膜厚と反発係数の関係を求めた.

図 5~7 に、レール鋼上部にマルテンサイト膜が均一に分 布する弾塑性体モデルのマルテンサイト膜厚と反発係数 の関係を求めた解析結果を示す.

図 5 は圧子落下高さが異なる 2 条件(表 1-No1, No2)の解 析結果である. 図よりマルテンサイト膜のみの反発係数が 測定されるのはNo1では膜厚 400  $\mu$  m以上の場合であり, No2 では反発係数が一定となる膜厚 200  $\mu$  m 以上であることが 確認できる.実際のマルテンサイトである白色層は 100  $\mu$  m 以下であることが多く,解析結果より膜厚 100  $\mu$ 以下では 2 条件とも反発係数の差が小さい.したがって,この 2 つの圧 子条件では白色層の精度の良い推定が出来るとは言い難い. そこで,図 6 に圧子形状が JIS-D 型と,それを相似的に 1/2 と 1/4 に縮小した 3 条件(表 1-No2, No3, No4)の解析結果を 示す. 図より, 1/2 縮小モデルと 1/4 縮小モデルは JIS-D 型原寸モデルに比べ 100  $\mu$  以下での反発係数の差は明瞭で ある. また, 図7は圧子の大きさを1/2モデルにして圧子の 材質が異なる条件(表 1-No3, No5)の解析結果である. 図よ り, 2条件の解析結果とも, それぞれ反発係数の絶対値は異 なるが, 膜厚100μmまでは反発係数が増加する類似した傾 向を示した.







図5 マルテンサイト膜厚と反発係数の関係 (圧子落下高さの影響)







図7 マルテンサイト膜厚と反発係数の関係 (圧子材質の影響)

## 3.3 白色層厚さ評価システムの可能性

以上の実験と解析により,有限要素法を用いた弾塑性衝 突解析により白色層厚さの推定が可能であることが確認さ れた.解析の結果,既存のJIS-D型ショア硬度計では実際の レール表面に多く存在すると考えられる 100 µm 以下の白 色層厚さの推定は困難であることが確認された.つぎに硬 度計の圧子に関する諸条件を変え解析を行なった結果,白 色層厚さを精度良く求めるには,JIS-D型ショア硬度計を 基にし,圧子落下高さを小さく,圧子形状を相似的に縮小 することが有効であることが確認された

#### 4. おわりに

本研究において, JIS-D 型ショア硬度計を基本にした白 色層厚さ評価システムの可能性が示されたので今後は具体 的なシステムの試作と検証を踏まえて, システムの実用化 を進める計画である.

(J-RAIL'04)

# 文献

(1) 例えば,石田誠他:NHH レールの耐シェリング性能,新 線路44巻12号,(1990-12),23-27.

(2)松田・兼田他:日本トライボロジー学会トライボロジー 会議予稿集(1998-11), 91.

(3)日本精工株式会社:NSK テクニカルレポート, No728.a(1991), 214-215.

平成16年 鉄道技術連合シンポジウム