

1601 ゲージコーナキ裂の進展予測に関する一考察

正 [機] ○辻江 正裕 (鉄道総研) 正 [機] 赤間 誠 (鉄道総研)

正 [機] 谷本 啓 (鉄道総研)

A Study on the Prediction About the Propagation of Gauge Corner Cracking

Masahiro TSUJIE, Makoto AKAMA and Hiraku TANIMOTO, Railway Technical Research Institute.

Various shapes of crack occur on rail with train passage. Especially, transverse crack which propagates towards to rail bottom is dangerous for rail defect, and then, management of this crack is very important. If the propagation of transverse crack can be predicted exactly, it will be expected the economical benefit with securing rail safety. On the other hand, the generation of new shape of crack called gauge corner cracking (GCC) is appeared on the high rail. GCC will branch on horizontal split and transverse crack which is also dangerous for rail defect. In this research, we constructed the model for predicting transverse crack propagation. Also, we conducted the measurement of residual stress in rail head and of wheel/rail contact forces on site where GCC generated to analyze more accurately. Then, we estimated the temperature of rail from atmospheric temperature to consider the effect of thermal stress of rail by changing of atmospheric temperature. According to these results, we conducted the propagation analysis of GCC which was generated on investigation site.

Keywords : gauge corner cracking, transverse cracking, propagation analysis, meshfree method, wheel/rail contact

1. はじめに

近年、曲線半径 800m 程度の曲線外軌において、ゲージコーナキ裂 (GCC) と呼ばれる損傷の発生が確認されている。この形態のき裂は、ゲージコーナ (GC) 部に発生するきしみ割れに混在しており、初期の段階では目視による発見が困難である。またレール表面の開口部を起点として水平裂が大きく進展すると横裂が分岐し、この横裂がレール底部へと進展することにより、レール折損を引き起こす恐れがある。しかしこれらのき裂に関してその進展状況を予測することはとても重要であるが、数値解析等の定量的な評価は行われていないのが現状である。

筆者らは先行研究¹⁾において、レール頭頂面に発生したシェリングの横裂進展解析を行った。本研究では、このモデルを改良することにより、GCC を起点とする横裂進展予測モデルを構築した。また、より精度よく解析を行うため、対象となる熱処理レール材について材料特性試験やレール内部の残留応力測定、1 年間の気温の変化によるレール軸力を算出するためにレール温度の推定、き裂面に作用する応力状態を把握するために輪重・横圧測定を行った。これらの結果をもとに、ある在来線の曲線外軌に発生している GCC をモデルに進展解析を行った。

2. モデル線区

本研究では、国内のある在来線の曲線区間 (電化複線) をモデルに横裂の進展解析について検討を行った。モデルとした線区の諸元を表 1 に示す。なおこの曲線区間には、図 1 に示すように GC 部にきしみ割れが発生しているほか、そのきしみ割れに混在して GCC の発生が確認されている。

Table 1 Track Condition

Curve Radius	800m
Type of Rail	JIS 60kg
Track Structure	Ballasted track
Annual Passing Tonnage	16.6 MGT
Rail Material	Heat Treated (HH340)

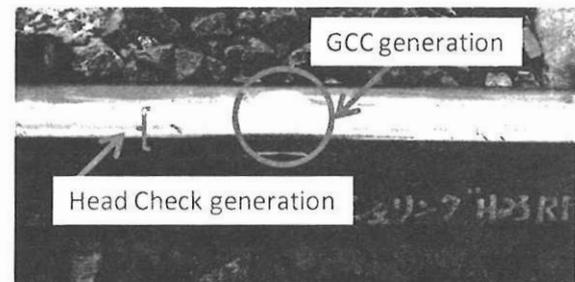


Fig.1 Overview of GCC generation

3. 材料特性試験

本研究では、高精度な材料パラメータを解析モデルに組み込むために、熱処理レール材についてモード I (き裂面に垂直) 負荷のみを与えた材料特性試験を行った。試験に用いた材料の化学成分を表 2 に、機械的性質を表 3 に示す。試験は、コンパクトテンション試験片を用い、応力比を 0.1 として、引張圧縮疲労試験機にて行った。得られた結果を図 2 に示す。

Table2 Chemical Composition

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0.72~0.82	0.10~0.55	0.70~1.10	~0.03	~0.02

Table3 Mechanical Properties

Young's Modulus (MPa)	206940
0.2% proof stress (MPa)	802
Ultimate tensile stress (MPa)	1082

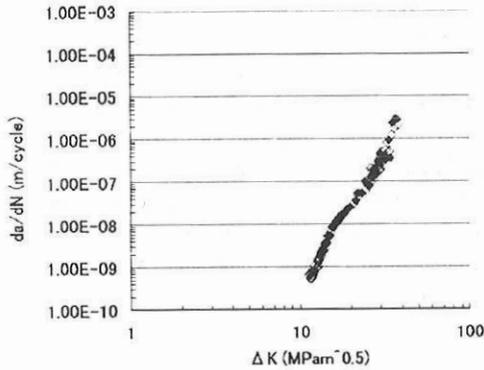


Fig.2 Crack propagation rate versus stress intensity factor

4. 残留応力測定

横裂の進展には列車通過による曲げ応力だけでなく、レール製造時ならびに運用時の残留応力も大きく影響すると考えられる。そこで過去に敷設されていた熱処理レール（累積通過トン数：2億トン）、ならびに比較のため新品レールについて、レール内部の残留応力測定を行った。

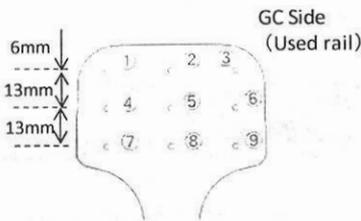


Fig.3 Measurement spots of residual stress

図3に示すように、レール断面9箇所の測定箇所を設けた。そして切り出し法によって残留応力を測定した。それらの結果を図4に示す。

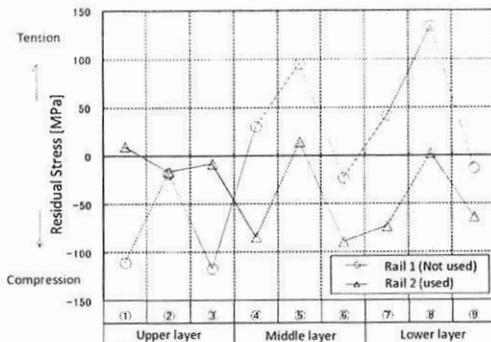


Fig.4 Results of residual stress measurement

図4に示すように、未使用レールの下層部中央において最大 150MPa の引張残留応力が測定されたが、解析で与える初期き裂（き裂深さが 12.5mm 程度）のき裂前縁付近となるレール中央部では、100MPa 程度であった。また全体的に、使用レールは未使用レールに比べて、全体的に圧縮側の応力が測定された。

5. レール温度の推定

日射や気温の影響を受けレール温度が変化すると、レール敷設時の設定温度を基準に、レールには圧縮もしくは引張方向の軸力がレール内部に作用する。そこである地点における1日の平均気温とレール温度の平均値を1年分について集約した。それらの結果を図5に示す。

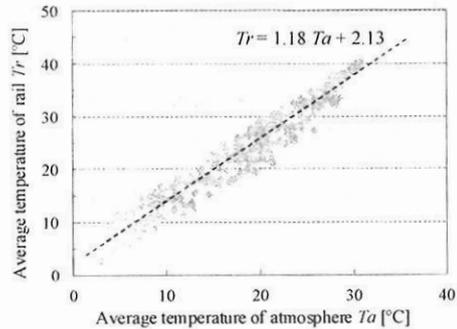


Fig.5 Relationship between temperature of atmosphere and that of rail

このように平均気温からレール温度は図5の近似式で推定することができる。この近似式より、昨年度の気温から当該線区におけるレール温度を推定した。それらの結果を図6に示す。

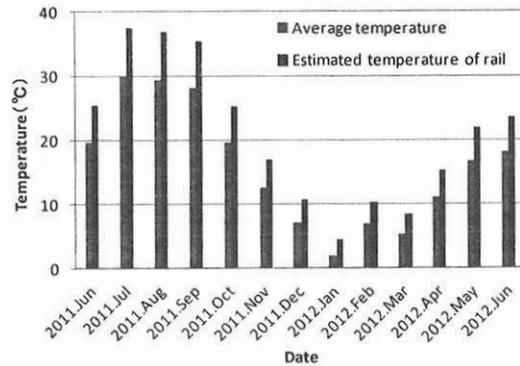


Fig.6 Estimated temperature of rail

推定されたレール温度と当該線区におけるレール敷設温度の差から、気温の変化によるレール軸力を以下の式(1)により算出した。

$$P = E \cdot A \cdot \beta \cdot \Delta t \quad (1)$$

ただし P : 軸力, E : レール鋼の弾性係数, A : レール断面面積, β : レール鋼の線膨張係数, Δt : レール温度と敷設時の設定温度の差である。

式(1)を用いて、推定されたレール温度よりレール軸力を月毎に算出し、それらの結果を横裂進展解析に反映させた。

6. 輪重・横圧測定

横裂の進展解析を精度良く行うためには、き裂面先端における応力拡大係数 (K 値)、熱応力や残留応力によるレール軸力を精度良く求めることに加えて、列車通過時にき裂面に作用する応力を精度よくもとめることも重要である。そこで本研究ではモデル線区における GCC 発生箇所近傍において、輪重・横圧測定を行った。測定箇所におけるセンサ等の取り付けの様子を図 7 に示す。

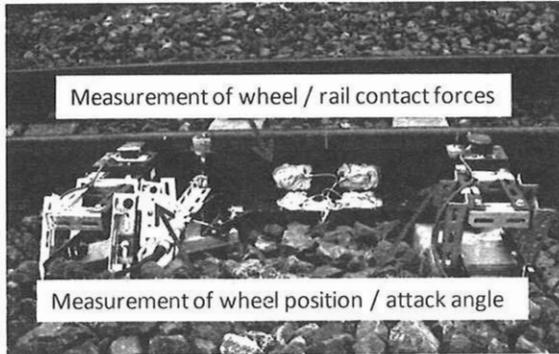


Fig.7 Overview of wheel/rail contact force measurement

当該線区では大きく分けて 4 形式の車両が通過する。そこで本研究では、最も多く現場を通過する車種である貨車について測定した輪重・横圧 ($n=524$ 軸) から、1 軸における最大値 (輪重: 83.5kN) を解析に採用した。

7. メッシュフリー法による横裂の進展解析

モデル線区に発生した GCC の横裂の進展を数値解析によってもとめるため、横裂進展モデルを構築し、進展解析を行った。

7.1 解析モデルの概要

横裂の進展は、前述のように種々の応力の影響を受けるため、進展するにつれてき裂面の形状は変化する。本研究では、メッシュフリー法の一つである境界節点法³⁾ (BNM) の三次元弾性解析プログラムを作成し、横裂の K 値解析および進展解析を行った。

図 8 に示すように、シェリングを起点とした横裂はレール軸心を中心にほぼ線対称に進展しているのに対し、GCC を起点とした横裂は GC 側に寄って進展している。そこで本研究における解析においては、レール中心位置から GC 側に 15mm ずらした箇所を中心に半径 12.5mm の半円状の初期き裂を配置して進展解析を行った。なお横裂の進展角度はレール頭頂面に垂直とした。また解析領域内に 10×10 の節点を配置した。



(a) Rail squats (b) Gauge corner cracking
Fig.8 Appearance of fracture surface

7.2 進展解析

横裂の進展解析は、前述の BNM と重ね合わせの原理を用い、以下の手順で行った。

(1) き裂のないレール頭部の応力解析を行い、仮想き裂

面上の応力分布 $\sigma(x,y)$ を求める。この解析はき裂のない場合を対象とするため、有限要素法 (FEM)、材料力学による計算や測定結果などで簡単に求めることができる。

(2) 初期き裂形状を仮定し、 $-\sigma$ を BNM でメッシュ分割したモデルのき裂面に負荷し、変位内挿法でき裂前縁の K 値を求める。

(3) き裂進展は、次の Paris 則を積分することで行なう。

$$\frac{dc}{dN} = C (\Delta K_{\text{eff}})^m$$

c はき裂長さ、 N は繰返し数、 C 、 m は材料定数である。これらの値は図 2 の疲労き裂進展曲線より、 $C=1 \times 10^{-15}$ 、 $m=5.8$ とした。また ΔK_{eff} は、次式で与えられる K 値範囲である。

$$\Delta K_{\text{eff}} = \begin{cases} K_{\text{max}} - K_{\text{min}} & (K_{\text{min}} > 0) \\ K_{\text{max}} & (K_{\text{min}} \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

K_{max} 及び K_{min} は、一サイクル中の最大応力 σ_{max} 及び最小応力 σ_{min} に対応する K 値である。

7.3 解析結果

この節では解析結果について示す。考慮する応力は、車輪通過時にレール頭部に発生する応力、残留応力及び軸力である。

最初に車輪通過時にレール頭部に発生する応力を、FEM 解析で求める。先に述べた輪重・横圧測定より、車輪とレールの接触圧力を Hertz 理論で計算した。そして輪重に関しては、次の半楕円体型分布を得た。

$$a=7.17\text{mm}, b=5.87\text{mm}, p_0=948\text{MPa}$$

ここで a 及び b は接触楕円の長径及び短径、 p_0 は最大接触圧力である。この分布をレールの中心から GC 側に 15mm ずらした位置が中心となるように配置し、解析を行った。得られたレール長手方向の垂直応力分布を、図 9 に示す。

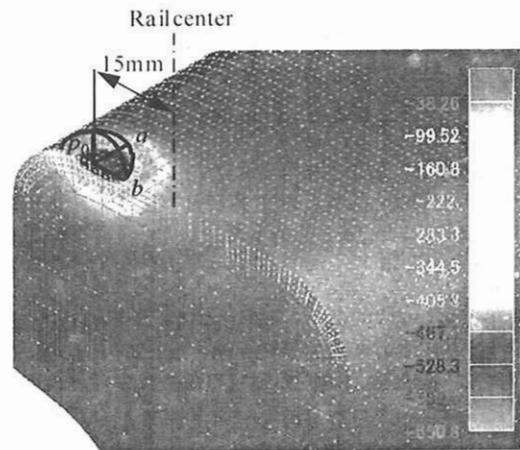


Fig.9 Normal stress distribution for longitudinal direction in rail head

残留応力については、レール頭部で一定の 100MPa とした。また温度変化による軸力については、式(1)で得られたものを 60kg レールの断面積 (7750mm^2) で除し、変動は図 6 に示すように月ごとに変化させたが、各月では一定とした。

き裂面に負荷する応力分布は、表面からの距離の二次式で近似した。図 10 に、き裂面に作用させる全体の応力

範囲 $\Delta\sigma$ ($= \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$) の例 (2011 年 6 月) を示す。断面方向は一定とした。

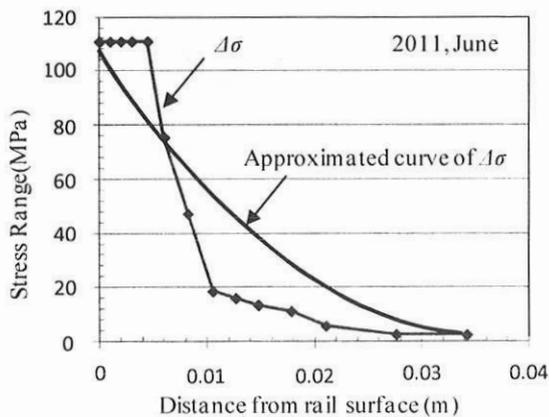


Fig.10 Example of stress range applied to crack surface

BNM メッシュは図 11 に示すように、き裂の中心での応力分布の対称性を仮定し、片側だけを解析領域とした。この図に示すき裂面に、図 10 で示すような応力分布を負荷し、 K 値を求める。

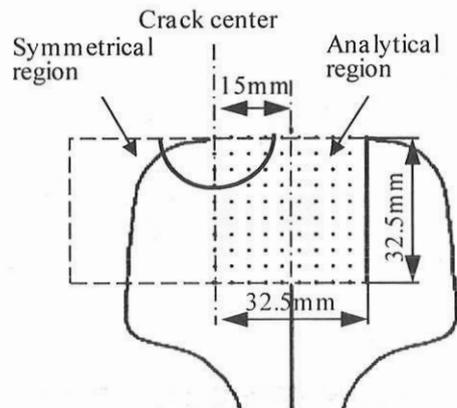


Fig.11 Analysis region of BNM

対象線区で通過する列車の軸数は、運行記録から 1 ヶ月当たり 83760 とした。進展解析は、図 6 に示す温度変化を考慮し、2011 年 6 月から開始した。各月では温度応力は一定とし、図 10 に示すような応力分布をき裂面に負荷した。

解析の結果得られた、き裂の進展形状の変化を図 12 に示す。また横裂深さの変化を図 13 に示す。夏期には温度が高く、温度応力が圧縮となるためほとんど進展しないが、冬期から春先にかけては引張りとなるため、大きく進展することがわかる。

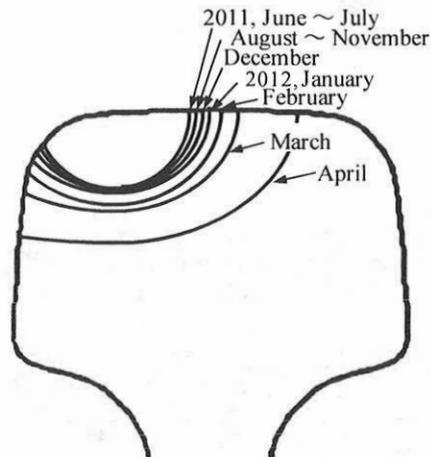


Fig.12 Results of crack growth simulation

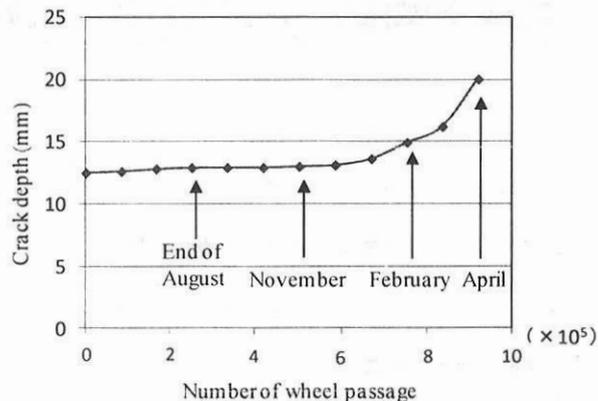


Fig.13 Results of crack depth from crack growth simulation

8. まとめ

本研究では曲線外軌に発生する GCC の横裂の進展を予測するため、メッシュフリー法による進展予測モデルを構築した。またより精度よく解析を行うため、熱処理レール材による材料特性試験やレール内部の残留応力測定、レール温度の変化によるレール軸力を算出するために気温からレール温度の推定を行った。そしてこれらの結果をもとに、横裂進展解析を行った。本研究では列車通過による横圧については採用していないが、今後は横圧による影響についても検討を行う予定である。また、構築したモデルの精度を検証するため、室内曲げ疲労試験や実際の探傷結果との比較を今後行う予定である。

参考文献

- 1) 辻江正裕, 松田博之, 赤間誠, 佐藤幸雄: 適切なレール探傷周期に関する一考察, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail 2009), pp.287-290, 2009
- 2) Mukherjee, YX and Mukherjee S.: The boundary node method for potential problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.40, pp.797-815, 1997.