

レールガス圧接の加熱変形解析手法の構築

伊藤 太初* 山本 隆一* 相澤 宏行*

井筒 宏樹** 岩崎 幹大***

Thermal Deformation Analysis of Gas Pressure Welding of Rail

Hajime ITOH Ryu-ichi YAMAMOTO Hiroyuki AIZAWA

Hiroki IZUTSU Mikihiro IWASAKI

We developed thermal deformation analysis model by using numerical calculation in order to quantitatively understand deformation behavior of gas pressure welding of rail. We found that the deformation degree at the center of the rail base and the jaw part of the rail head are smaller than that of other parts. Furthermore, we also identified that the hot cracks occur at their parts in the simulative tests of the crack. This paper describes the developed thermal deformation analysis model of gas pressure welding of rail and its validation test results.

キーワード：レール溶接，ガス圧接，数値解析，再現試験，変形

1. はじめに

レールガス圧接法は継手の信頼性が高く、かつ使用機器が比較的小型であることから、主にロングレールのための二次溶接法として用いられており、JRグループにおけるレール溶接施工総数の40%を占める主要なレール溶接法である¹⁾。その接合は、酸素-アセチレン炎による加熱および軸方向への加圧に伴う、突合せ面（接合界面）の温度上昇および塑性変形により、酸化介在物の分断・微細化を促進することでなされる。また、本工法では接合時の塑性変形によりレールにふくらみが生じるが、このふくらみを圧接直後に専用バイトで押抜くことで仕上げ作業の労力を低減している。しかしながら、図1に示すように、酸化介在物が存在する粗悪で低強度の接合界面において、押抜き時に作用する引張応力に耐えきれずに割れ（以下、押抜き割れと称す）が生じることが報告されている²⁾。図2にレールガス圧接部に生じた押抜き割れの一例を示す。押抜き割れは、高温状態で開口することから、図2(a)に示す通り高温酸化膜に覆われた黒色の破面形態を呈することが多い。また、拡大観察すると微細な凹凸を有する高温酸化面が観察される（図2(b)）。押抜き割れはレール隅角部やレール底面に生じやすい傾向があり、特にレール頭部あご下やレール底面中央に生じた場合、施工直後に実施される磁粉探

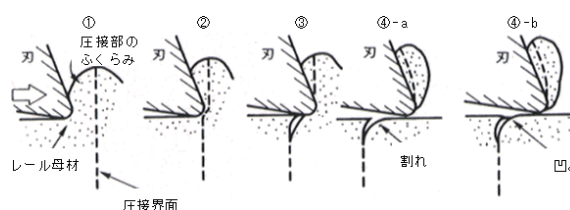
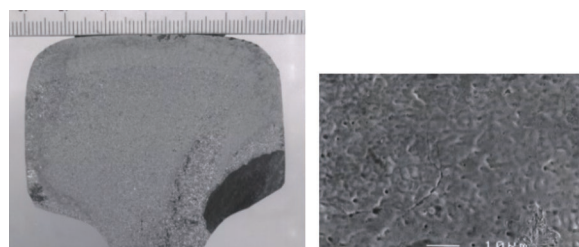


図1 ガス圧接部に生じる押抜き割れの模式図



(a) 破断面 (b) 拡大観察結果

図2 ガス圧接部に生じた押抜き割れの一例

傷検査で見逃す可能性が高く、最終的にレール折損に至る場合がある。

これまで、押抜き割れの防止を目的に、原因となる接合界面の酸化介在物の低減方策として、加熱バーナの改良³⁾、変圧法の採用³⁾、強還元炎の適用⁴⁾などが提案され、いずれも一定の成果が得られている。一方、押抜き割れがレール隅角部に生じやすい原因は、これらの部位の変形度が相対的に少ないためと考えられてきた。しかしながら、ガス圧接時の変形挙動をその場で観察することが極めて難しいことから、各部位の変形量に着目した検討はこれまで実施されておらず、変形を考慮した抜本的な防止策を提案するには至っていない。

この状況において、近年、数値解析技術の発展や計算

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室
 ** 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室
 (現 双葉鉄道工業株式会社)
 *** 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室
 (現 東日本旅客鉄道株式会社)

リソースの増加により、大規模かつ複雑なモデルの数値解析が比較的容易に実施可能な環境が整備されてきており、溶接分野においても数値解析を利用した検討が増加している⁵⁾。

そこで、本研究では数値計算を用いてレールガス圧接部の加熱変形解析モデルを構築し、レールガス圧接部の変形挙動を定量的に把握することを試みた。ここでは、構築したレールガス圧接部の加熱変形解析モデルの詳細および解析モデルの有効性を検証するために実施した各試験の結果について報告する。

2. レールガス圧接部加熱変形解析モデル

図3に本検討で使用したモデルの概略を示す。解析モデルはレールガス圧接部の接合界面を中心とした1/4対称モデルとなるよう境界条件を設定した。また、加熱範囲として設定した領域に、ガス炎による熱流束分布および放射による境界条件、加熱範囲以外には放射および大気の熱伝達による境界条件を設けた。ここで放射は Stefan-Boltzmann の法則を適用した。また、圧縮量 24mm に到達するまで腹部領域に図に示す向きの荷重を負荷した。なお、初期条件はレールおよび周囲温度とも 30℃ とした。また、ソルバーは汎用解析ソフトである ADINA を用いた。

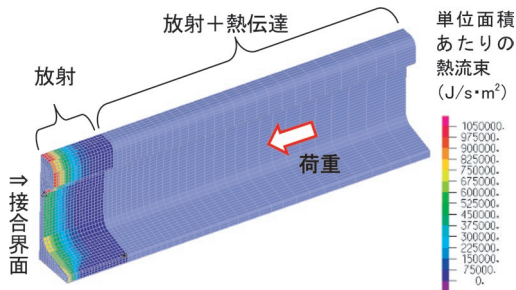


図3 レールガス圧接部の加熱変形解析モデルの概略

2.1 加熱モデルの検討

上述した通り、本検討ではガス炎からレールに流入する熱量を熱流束として与える。一般的にアセチレン用ガスバーナを用いて加熱する場合、バーナ火口に形成されるガス炎（燃焼炎）は、図4 (a) に示すような白芯（内炎）と外炎に分けられ、白芯に比べ、外炎の温度が低いことが知られている。また、ガス炎は流体であることから、物体に接触することでその形状が容易に変化するが、平板や丸棒等のような一様な表面形態を有する部材を加熱する場合には図4 (b) に示すように一定の形状をなすものとみなせる。そこで、本検討ではガス炎からレールに流入する入熱量分布を熱流束分布として与えることとした。これまで、ガス炎による入熱量分布をガウス分

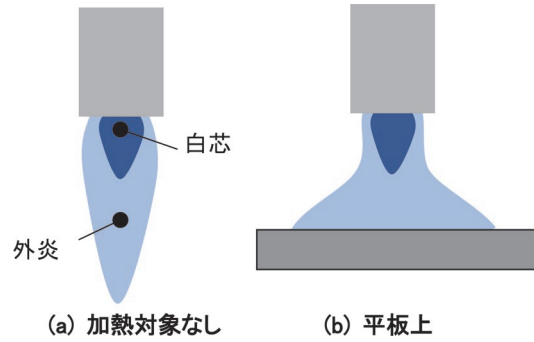


図4 ガス炎の形状

布（正規分布）とみなし、いくつかの解析的検討がなされている^{6) 7)}が、使用するバーナ形状や火口数によりその分布は変化する。ここでは、レール長手方向の熱流束分布として、式(1)に示すガウス分布型関数を用いた。

$$q(r) = \frac{q_0}{(\alpha + \beta)} \left(\alpha e^{-\frac{r^2}{2\sigma_{\alpha}^2}} + \beta e^{-\frac{r^2}{2\sigma_{\beta}^2}} \right) \quad (1)$$

ここで、 r は加熱中心からの距離、 q_0 は圧接中心における単位面積当たりの熱流束、 α 、 β は白芯と外炎との熱流束比である。また、 σ_{α} 、 σ_{β} は正規分布で言うところの加熱炎分布の標準偏差に該当し、加熱範囲の1/3となるように設定した。アセチレン流量から計算した発熱量に伝達率を乗じた総投入熱量 Q が加熱範囲内に投入されると仮定すると、ガウス積分により式(2)、式(3)が導かれる。

$$Q = A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} q(r) dr \quad (2)$$

$$q_0 = \frac{(\alpha + \beta) Q}{A_0 \sqrt{2\pi} (\alpha \sigma_{\alpha}^2 + \beta \sigma_{\beta}^2)} \quad (3)$$

ここで、 A_0 は加熱範囲の面積、 q_0 は圧接中心の熱流束である。図5に本検討で使用した熱流束条件および熱流束分布例を示す。

ここまでは、レール長手方向の分布に着目した検討で

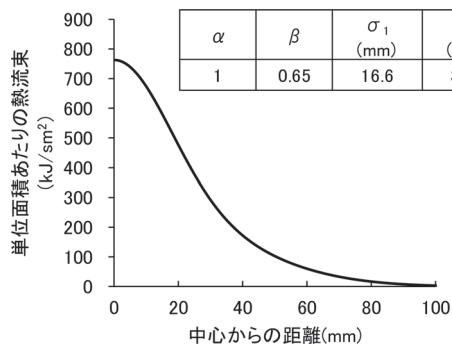
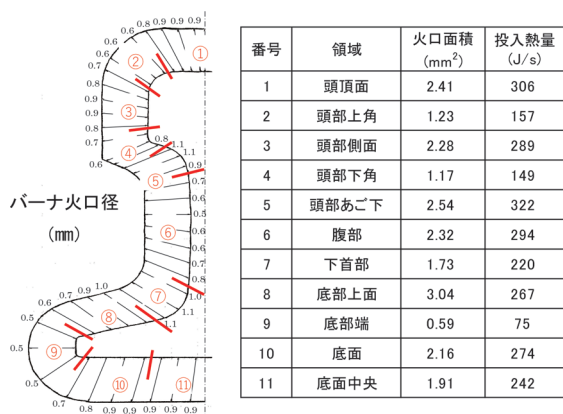


図5 熱流束条件および熱流束分布

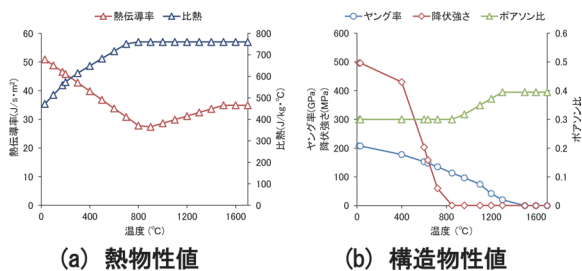
あったが、レールガス圧接ではレール周方向の加熱炎分布も決定する必要がある。そこで、ガス流量から計算した総投入熱量 Q にバーナ火口径から算出した面積比（火口面積 / 総面積）をかけることで、火口毎の投入熱量を設定した。また、各火口で形成される加熱炎は隣接火口で形成される加熱炎と相互に影響を及ぼしていると仮定し、レール外周を 11 箇所部位に分割し、各部位に該当する火口からの投入熱量を平均化した。表 1 にレール周方向の投入熱量を示す。

表 1 レール周方向の各部位における投入熱量



2.2 材料モデルの検討

本解析における材料モデルは、比熱 (c)、熱伝導率 (k)、ヤング率 (E)、ポアソン比 (ν)、降伏応力 (σ_y) の温度依存性を考慮した。図 6 に各材料定数の温度による変化を示す。また、塑性変形を考慮する解析であることから、温度依存性を考慮した応力 - ひずみ関係が必要となる。ここでは、レール鋼から切り出した試験片を用いて高温引張試験（試験温度：1000℃、1100℃、1200℃）を実施し、その結果を基に引張応力 σ とひずみ ε を $\sigma = a\varepsilon^b$ の関係で近似した。ここで、 a および b はいずれも高温引張試験結果を基に定めた温度に依存する値であり、各試験温度間には線形補間した。



(a) 熱物性値

(b) 構造物性値

図 6 解析モデルで用いた各種材料物性値

2.3 解析結果検証のためのレールガス圧接試験

解析結果の検証のため、長さ 0.75m の JIS60kg 普通レール 2 本を突合せ、TGP-HA ガス圧接機によるガス

圧接試験を実施した。図 7 にレールガス圧接試験状況を示す。ガス圧接条件は、標準的なレールガス圧接施工条件である酸素 100 l/min、アセチレン流量 105 l/min の弱還元炎、加圧力 22MPa（荷重 171kN）に設定した。また、レール端面に設置した接触式変位計でガス圧接時の圧縮量を測定し、レールの加工穴に挿入した K 型熱電対で接合界面の中心温度を測定した。圧縮量が 14mm に達した時点からバーナ揺動（表面の溶融を防止するため、バーナを左右に動かす作業）を実施し、圧縮量 24mm となった時点で加熱・加圧作業を中止した。なお、試験後のガス圧接試験体に対し、縦断面および水平断面上の圧接部のふくらみ量（変形高さ）を測定し、解析結果と比較した。



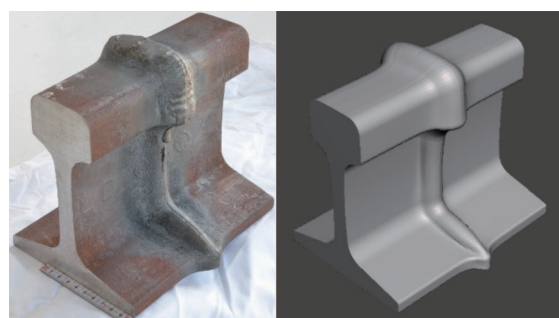
(a) ガス圧接試験状況

(b) 温度測定箇所

図 7 レールガス圧接試験

2.4 レールガス圧接解析モデルの妥当性検証

図 8 にレールガス圧接部の外観状況を解析結果と併せて示す。全体的に実験結果と解析結果に顕著な差は認められないが、実験結果（レールガス圧接試験体）の頭部領域のふくらみ部は表面溶融により縞状の凹凸が生じているのに対し、解析結果では溶融現象を無視しているため、滑らかな余盛形状を形成している。変形高さを比較するため、レールガス圧接試験体の外径を三次元測定機にて測定し、縦断面および水平断面の各部位の変形高さを解析結果と比較した。図 9 および図 10 にガス圧接部の変形高さの比較結果を測定位置と併せて示す。中央



(a) 実験結果

(b) 解析結果

図 8 ガス圧接部の外観状況

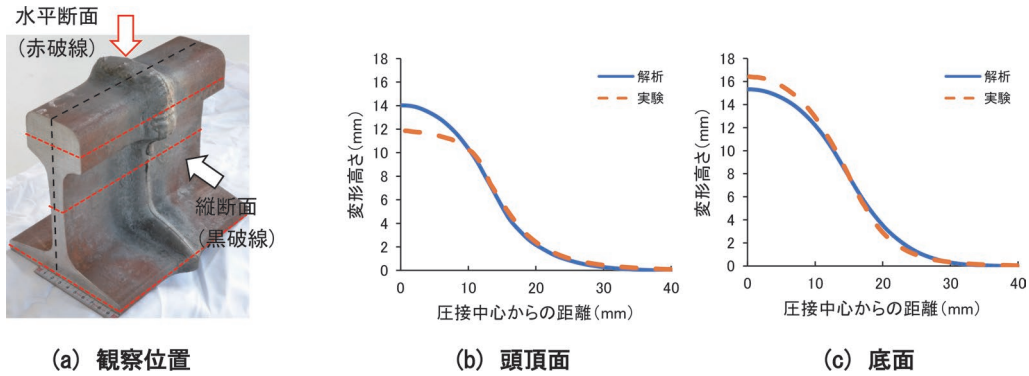


図9 ガス圧接部の変形高さ比較結果（中央縦断面）

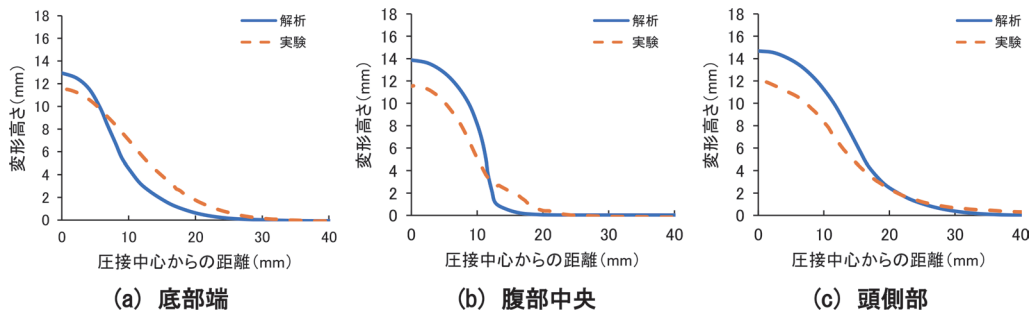


図10 ガス圧接部の変形高さ比較結果（水平断面）

縦断面上における頭頂面および底面の変形高さは、頭頂面の接合界面近傍において解析値と実験値で15%程度の誤差が生じているが、底面では比較的よく一致している。また、水平断面上における底部端、腹部中央および頭側部では、接合界面上の変形高さに加え、変形形状に一定の差が生じているが、いずれも誤差20%以内である。

図11に接合界面温度および圧縮量の解析結果を実験結果と併せて示す。底部領域の温度において若干の誤差が認められるものの、いずれの部位においても接合界面上の昇温曲線は実験結果とよく一致している。また、圧縮量の推移も、変形開始タイミングおよび変形速度共に誤差3%程度に収まっている。

以上より、構築したレールガス圧接部の加熱変形解析モデルを用いることで、レールガス圧接における加熱・加圧プロセスを精度良く再現できると判断した。

3. レールガス圧接部の変形状況の解明

3.1 解析結果によるレールガス圧接部の変形状況

ガス圧接部の変形度を定量的に評価するため、ここでは相当塑性ひずみを指標として用いた。構築したレールガス圧接部の加熱変形モデルで求めた圧縮量に対する接合界面上の相当塑性ひずみ分布を図12に示す。なお、図12(b)はレール原断面上の各部位における相当塑性ひずみをプロットしたものである。図12(a)に示すように、レールガス圧接部の相当塑性ひずみは断面上で均

一ではなく、部位によって差が生じている。例えば、腹部および底部端において大きなひずみが生じる一方、頭部および底面中央では他の部位に比べひずみが小さい。また、図12(b)に示すように、圧縮量の増加に伴って

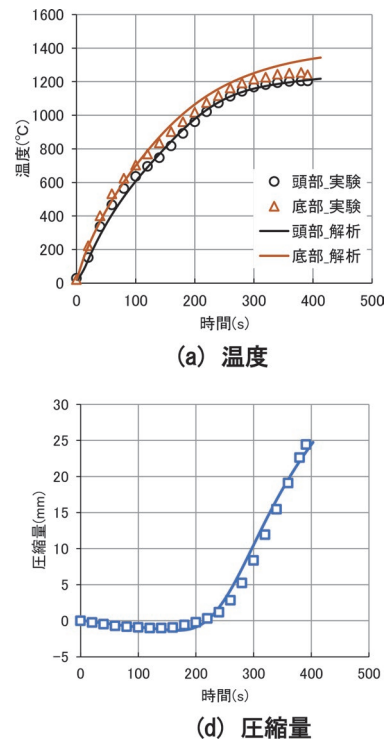


図11 温度および圧縮量比較結果

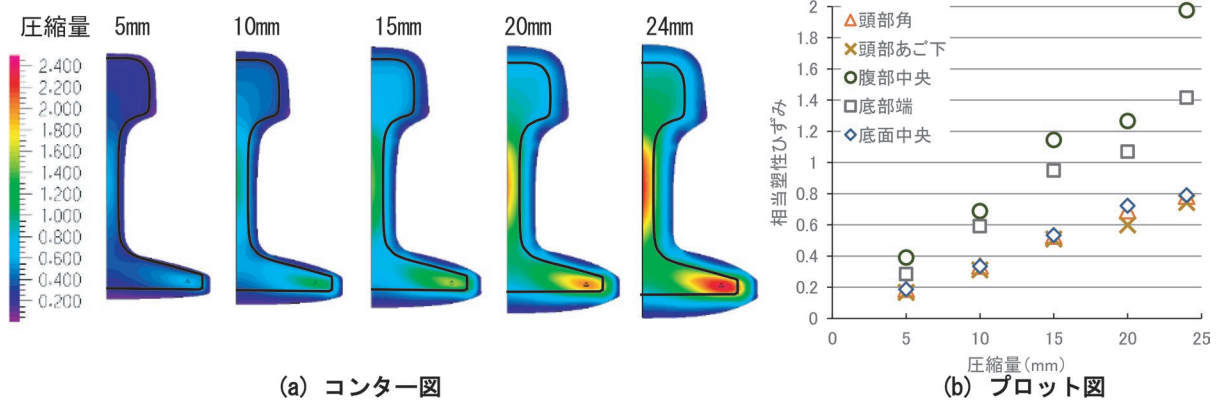


図 12 各圧縮量における相当塑性ひずみ分布

各部位のひずみは増加するものの、その傾きは腹部や底部端で大きく、頭部あご下および底面中央では小さい。これより、頭部あご下や底面中央は変形度が小さいために圧接部の品質が確保し難く、結果的に押抜き割れが生じやすくなっているものと推定される。なお、腹部や底部端は断面積が小さいため、同一圧縮量とした場合に変形度が大きくなっているものと考えられる。

3.2 押抜き割れ再現試験

上記の解析結果により、頭部および底面中央の変形度が相対的に小さいことが判明し、変形度に起因してこれらの部位に押抜き割れが生じている可能性が示唆された。一方、標準条件で作製したレールガス圧接部には押抜き割れが生じないため、変形度に起因してこれら部位に押抜き割れが生じているか否かを判断することが難しい。そこで、ガス圧接部の変形に不利になる圧接条件を意図的に設定したレールガス圧接試験を実施し、押抜き割れの再現を試みた。

表 2 に本検討で用いたガス圧接条件を示す。ガス流量は、標準条件である酸素 100 l/min, アセチレン 105 l/min の弱還元炎としたが、加圧力は標準条件の約 2 倍となる荷重 332kN (加圧力 43MPa), 圧縮量は標準条件の約 60% である 15mm とした。図 13 に当該条件による加熱変形解析結果 (接合界面の相当塑性ひずみ分布) を示す。これによると、図 12 に示す圧縮量 24mm の条件に比べ全体的に変形度 (塑性ひずみ) が低下しており、特に頭部あご下部および底面中央部において顕著である。なお、圧縮量が少ないことからガス圧接部のふくらみ高さが足りず、専用バイトによる押抜きに支障が生じる可能性が考えられたが、本試験では問題なく押抜き作業が可能であった。

3.3 作製試験体における欠陥発生状況

図 14 に作製した試験体に対する各種探傷試験結果を示す。磁粉探傷試験の結果、頭部あごおよび底面中央に

表 2 ガス圧接条件

ガス流量 (l/min)		荷重 (kN)	加圧力 (MPa)	圧縮量 (mm)
酸素	アセチレン			
100	105	332	43	15

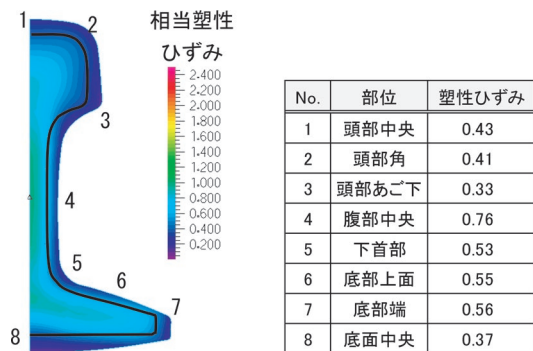
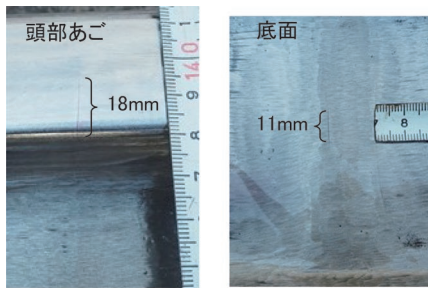


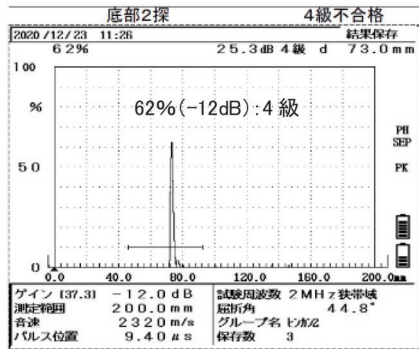
図 13 再現試験条件による加熱変形解析結果

長さ 18mm および 11mm のきず指示模様が認められた。また、超音波探傷試験の結果、底部二探触子法にて 4 級のきずエコーが検出された。当該試験体に生じた欠陥の現出および強度の確認のため、1m スパン中央集中荷重による静的曲げ試験 (頭部上向き姿勢 (HU)) を実施した。図 15 に静的曲げ試験結果および試験後の破断面を示す。破断試験の結果、当該試験体は、破断荷重 481kN, たわみ量 4.7mm と 60kg 普通レールガス圧接部の曲げ基準値 (荷重 1,400kN, たわみ量 25mm) を大きく下回る結果となった。また、破断面上には、数値解析モデルで変形度が確保し難いと予測された頭頂面中央、頭部あご下および底面中央 (図中□部) に押抜き割れ破面が認められた。

以上の結果より、構築したレールガス圧接部の解析モデルを用いて変形度を計算することで、レールガス圧接部の欠陥発生予測が可能であることが示された。今後は、当該モデルを活用してガス圧接条件を抜本的に変更し、低コストで機動性の高い自動ガス圧接機の実現を目指す

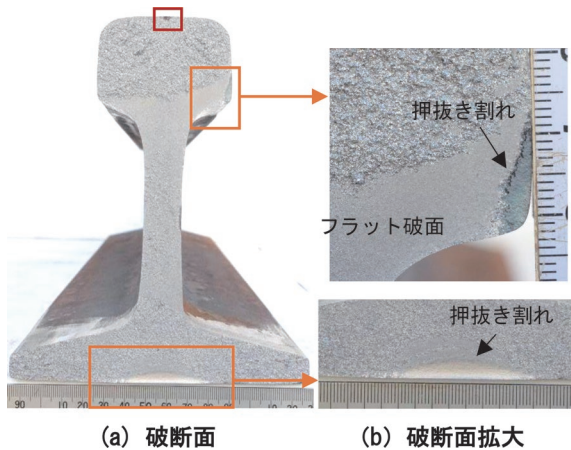


(a) 磁粉探傷試験でのきず指示模様



(b) 超音波探傷試験

図 14 試験体に対する各種探傷試験結果



(a) 破断面

(b) 破断面拡大

図 15 試験体の静的曲げ試験結果

予定である。

4. まとめ

レールガス圧接部の加熱変形解析モデルを構築し、ガス圧接部の変形挙動を定量的に把握した。結果は以下の通りである。

- (1) ガウス分布で近似した入熱モデルおよび高温時の材料物性値を考慮した材料モデルを用いたレールガス圧接部の加熱変形解析モデルを構築した。解析結果を実験結果と比較した結果、ガス圧接内部の温度および圧縮量はいずれも誤差3%程度であり、当該モデルによりレールガス圧接部の加熱・加圧プロセスを精度良く再現できることを確認した。
- (2) 当該モデルによる解析結果から、底面中央およびあご下部の変形度（塑性ひずみ）が他の部位に比べ小さいことが判明した。また、変形に不利となる圧接条件を用いた再現試験により、当該部位に押抜き割れが生じることを確認した。以上より、当該部位では変形度が小さいことに起因して押抜き割れが生じやすくなっているものと推定される。
- (3) 構築したレールガス圧接部の解析モデルを用いてレールガス圧接部の欠陥発生予測が可能であることが押抜き割れ再現試験により示された。今後は、当該モデルを活用してガス圧接条件を抜本的に変更し、低コストで機動性の高い自動ガス圧接機の実現を目指す予定である。

文 献

- 1) 山本隆一：レールの溶接技術，溶接学会誌，No.81，Vol.8，pp.641-649，2012
- 2) 大石橋宏次，上山且芳：ガス圧接部の品質と評価に関する基本的検討，溶接学会論文集，No.14，Vol.2，pp.422-428，1996
- 3) 辰巳光正，深田康人，上山且芳，山本隆一：レールガス圧接における加熱バーナの改良と加圧方式の変更，鉄道総研報告，Vol.13，No.5，pp.27-32，1999
- 4) 山本隆一，辰巳光正，伊藤太初，小溝裕一：レールガス圧接における酸化介在物低減に関する検討，溶接学会論文集，No.29，Vol.4，pp.258-266，2011
- 5) 望月正人，三上欣希，岡野成威，柴原正和：溶接変形・残留応力シミュレーション，溶接学会誌，Vol.84，No.1，pp.66-74，2015
- 6) 辻勇，奥村耕之：鋼材の線状加熱板曲げ加工に関する研究，西部造船会会報，No.76，pp.149-160，1988
- 7) 大石橋宏次，赤間誠，上山且芳：有限要素法による鋼ガス圧接時及び熱間せん断時の変形と変力の解析，溶接学会論文集，No.14，Vol.2，pp.435-442，1996