

# 台車枠溶接継手構造の 累積被害度を用いた疲労強度評価方法

八木 毅\*      山本 勝太\*  
加藤 祐貴\*    高垣 昌和\*\*

Fatigue Strength Evaluation Method for the Welded Joint Structure of the Truck Frame by Cumulative Damage

Tsuyoshi YAGI      Masataka YAMAMOTO  
Yuki KATO          Masakazu TAKAGAKI

For the prevention of damage, the explication of the cause of crack initiation and the appropriate fatigue strength evaluation of the truck frame, we discussed the fatigue strength evaluation method for the welded joint structure of the truck frame by advanced numerical analysis and fatigue testing. As a result of the discussion, a fatigue strength evaluation method using the cumulative damage was proposed by making new route-judgment-curved lines using the F calibration factor related to the stress intensity factor. Therefore, we could make the fatigue strength evaluation more appropriately so that fatigue fracture may not be initiated from the route part in the welded joint structure of the truck frame.

キーワード：台車枠，溶接，継手，疲労強度

## 1. はじめに

台車枠の損傷は脱線につながる危険性があり，損傷防止は重要な課題である。累積被害度を用いた台車枠の疲労強度評価方法<sup>1)</sup>では単純な溶接継手構造について検討されたが，損傷の防止および損傷原因の解明ならびに台車枠の適切な強度評価のためには，溶接継手構造の深度化された強度解析と新たな強度評価方法の検討が必要である。

本研究では，台車枠に用いられる溶接継手構造について疲労強度評価の方法を検討し，数値解析および疲労試験を行って，台車枠溶接継手構造に対するより使いやすい強度評価方法を提案する。

## 2. 従来の台車枠の強度評価方法

2.1 JIS E 4207:2004「鉄道車両—台車—台車枠設計通則」<sup>2)</sup>

### 2.1.1 概要

本JISは，台車枠の設計に対する共通的な条件を規定しており，JIS E 4208:2004「鉄道車両—台車—荷重試験方法」<sup>3)</sup>とともに，日本国内で広く用いられている。強

度設計条件として，静荷重による平均応力および動荷重による変動応力を求め，応力限界図<sup>2)</sup>(図1)の限界内を許容応力としたものである。

応力限界図による強度評価はわかりやすいことに加え，1984年の制定以来，日本国内の多くの台車枠の強度評価に用いられてきた実績がある。ただし，本法では寿命評価は不可能である。

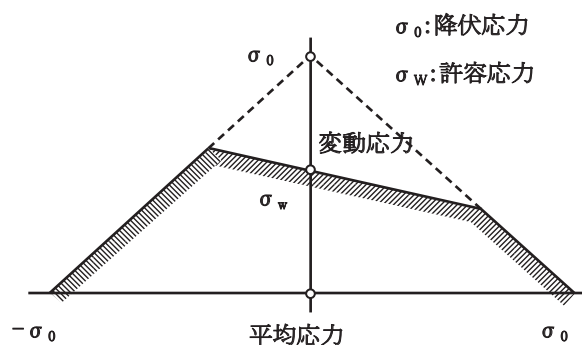


図1 応力限界図<sup>2)</sup>

### 2.1.2 検討すべき事項

(1) 応力限界図の非仕上げ部の許容応力の根拠

文献3)によれば，応力限界図に用いる応力は，長さ5mmのひずみゲージで測定することになっている。特に，溶接止端部の応力測定では，機械加工による曲面の始まりまたは溶接ビードの止端位置がゲージ長さの1/2

\* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

\*\* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

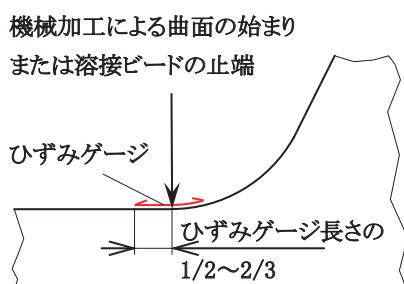


図2 ひずみゲージの貼付位置の例<sup>3)</sup>

～2/3となるように貼付する。曲面の半径が小さい場合（いわゆる非仕上げ部）には、半径3mm程度の曲面に仕上げ、ひずみゲージを貼付する（図2）。しかしながら、3.1で記述するように、応力集中を含む局所的な応力を強度評価の対象とする例は、特殊な評価方法であったと考えられる。また、溶接部（非仕上げ部）の許容応力については、本JISの解説に「破損率0.1%の線図の $2 \times 10^6$ 回時間強度に近いことを検証した例がある。」と記述されているものの、明確にされていない。したがって、本JISの応力限界図については、非仕上げ部の許容応力の検証が必要と考えられる。なお、応力限界図は制定当時以前に行われていた多数の疲労試験結果を参考に決められたと考えられ、当時の溶接品質に依存している。現在の溶接品質は均質性等において進歩しており、現行品の疲労強度は当時求められたレベルを超えていると考えられる。

(2) 新材料への適用可能性

構造設計条件としての材料は、JIS改正時の使用実態に合わせてSM400、SM490等があり、これらの許容応力<sup>2)</sup>が表1のように示されている。しかしながら、例示されていない新材料等を適用して本JISにより台車枠を設計するためには、それぞれの許容応力を提示しなければならない。一般的には、これらのことは受渡当事者間で取り決める事項であるが、新材料等の適用方法例を示すことが重要と考えられる。

表1 応力限界図の許容応力等<sup>2)</sup> MPa

項目		材料の種類	
		SM400	SM490
材料の引張強さ		400	490
材料の降伏に対する許容応力		205	305
疲労許容応力	材料	135	155
	溶接止端部	70	
	非仕上げ部 グラインダ仕上げ部	110	

2.2 判定曲線による強度判定法

2.2.1 概要

応力限界図による強度評価は、ひずみゲージ貼付位置の評価であり、母材の応力集中部、表側溶接止端部等の

台車枠表側からの疲労き裂の発生を対象としている。一方、文献<sup>2)</sup>の附属書に記述されているように、溶接ルート部、部材の裏側溶接止端部等から疲労き裂が発生する事例がある。これらに対する評価は、溶接部周辺の平坦母材部のひずみゲージ応力（この場合は公称応力に相当）を走行試験で測定して、累積被害度を用いた判定曲線による強度判定法<sup>1)</sup>（以下「現判定法」という。）としてまとめられており、鉄道総研では多くの評価実施例がある。

ルート溶接金属判定曲線諸数値およびルート溶接金属判定曲線<sup>1)</sup>は、溶接ルート部に2mmの溶込み不良が存在することを仮定し、溶込み不良周りの応力拡大係数範囲 $\Delta K$ を見積もることにより、溶込み不良からの疲労き裂の発生および進展を評価するものである。応力拡大係数範囲 $\Delta K$ は継手の補正係数 $F$ に依存し、継手の断面形状、拘束状態等によって変化する。応力範囲 $\Delta\sigma$ 、溶込み不良深さ $a$ のとき、

$$\Delta K = F \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (1)$$

と表わされる。

判定曲線を作成するに当たり、補正係数 $F$ は2次元モデルの有限要素法（FEM）により求められている<sup>1)</sup>。なお、実際の損傷例、使用方法の簡略化等を考慮し、溶接継手に関する応力範囲と繰返し数の関係として、ルート溶接金属判定曲線が提案されている。

2.2.2 検討すべき事項

累積被害度を用いた判定曲線による強度評価を実施してきた中で、走行距離と損傷発生状況が合致しない例が見られるようになった。例えば、横はり取付部品の溶接ルート部（低角度の斜交T溶接継手）において、極端に寿命が短く評価される例が確認されている。この場合、低角度の斜交T溶接継手を構造的な裏当て金付き片側開先溶接継手と見なせば、完全溶込みとなって溶接ルート部が存在しなくなり、裏境界として止端部等判定曲線<sup>1)</sup>による適切な評価が可能となる。一方、より適切な評価を行うためには、ルート溶接金属判定曲線の深度化も必要と考えられる。

3. 応力限界図の検証

3.1 溶接継手の強度評価方法

疲労強度評価は、試験片に繰返し応力を与え、破断に至るまでのS-N曲線を求め、これに基づいて行うことが多い。一方、実構造物においては、溶接継手の疲労強度が重要であり、鋼橋梁を主対象とする疲労設計指針<sup>4)</sup>、溶接構造物の疲労照査方法<sup>5)</sup>等がまとめられている。鋼構造物等は台車枠にくらべて大きな部材により構成されており、これまで疲労照査に用いられてきたのは局所的な応力集中を含まない公称応力<sup>4) 5)</sup>であった。これに対して近年は、ホットスポット応力<sup>4) 5)</sup>、有効切欠き応

力 (Effective Notch Stress)<sup>5)</sup>等が用いられるようになってきた。特に有効切欠き応力での評価は、実際には不整形形状である溶接止端部等を仮想的な半径 1mm の有効切欠きにおける応力で評価するものであり、有効切欠き応力は FEM 等により求められ、単一の S-N 曲線で評価される。なお、溶接止端部を仕上げて、その半径が 1mm を超える場合は、測定された半径を用いて有効切欠き応力を求めることとされている。有効切欠き応力は、溶接止端部の応力集中係数を用いて、疲労試験結果を局部応力による統一的な S-N 曲線で整理できる<sup>6)</sup>という考え方にも矛盾しない。

一方、応力限界図による台車枠溶接止端部（非仕上げ部）の強度評価においては、2.1.2 (1) に記述したように、半径 3mm 程度に仕上げた溶接止端部の応力をひずみゲージにより測定している。これは半径 3mm の有効切欠き応力を求めていると考えることができる。ただし、台車枠におけるひずみゲージによる測定は、図 2 に示すように、ひずみゲージ長さ 5mm のすべてに亘って半径 3mm の曲率になっているわけではない。

一般的な形状の溶接止端部について、その半径と応力集中係数の関係を溶接止端部の応力集中係数推定式<sup>7)</sup>により求めると、半径が大きくなるにつれて、その傾きの絶対値は小さくなっており、応力集中係数の変化は小さい。さらに、実際の台車枠においては、ひずみゲージ長さ 5mm に亘る平均値を測定しており、再現性の高い評価となっている。

したがって、半径 3mm の有効切欠き応力を応力  $S$  とした S-N 曲線を求めることにより、応力限界図の許容応力の根拠および応力限界図の有効性を示すことができると考えられる。

### 3.2 溶接継手小型疲労試験片による疲労試験

#### 3.2.1 試験方法

台車枠溶接継手構造を模擬した小型疲労試験片を製作し、平均応力が 0MPa となる応力比  $R=-1$  で統計的疲労試験方法<sup>8)</sup>の 14S-N 試験法に準拠して疲労試験を行った。本試験では、当該試験片の疲労特性を得るため、疲労限度を求めるよりも、S-N 曲線の傾斜部（有限寿命領域）を決定することを目的とした。14S-N 試験法の傾斜部の決定では、4 応力段階各 2 個ずつ計 8 個の試験が基本となるが、破壊確率  $P$  をパラメータとして  $P=5 \sim 95\%$  の推定を行う場合には、必要最小限の試験片数は 14 個となる<sup>8)</sup>。これ以上に破壊確率の推定精度を上げるには、試験片数がさらに多くなるため、単一機関で対応するのは現実的ではない。

#### 3.2.2 試験片形状

本試験片は JIS Z 3103 に準拠した SM400 材の荷重伝達十字すみ肉溶接継手であり、溶接継手小型疲労試験片

の形状を図 3 に示す。試験片は台車製造会社 2 社が製作したもので、溶接品質、脚長、溶接止端部形状等は実台車枠と同等と考えられる。溶接止端部は非仕上げのままとし、角変形および目違いをできるだけ小さくするように施工されている。3.1 に記述したように、試験片の 4 箇所の溶接止端部の一部を半径 3mm に仕上げ、図 4 に示すように溶接止端部がひずみゲージ中央になるように貼付した。14S-N 試験法における繰返し応力は、破面の起点となった箇所の溶接止端部に貼付したひずみゲージで測定した。

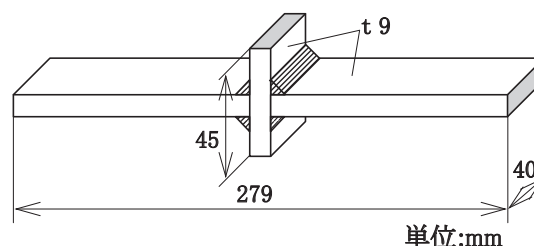


図 3 溶接継手小型疲労試験片

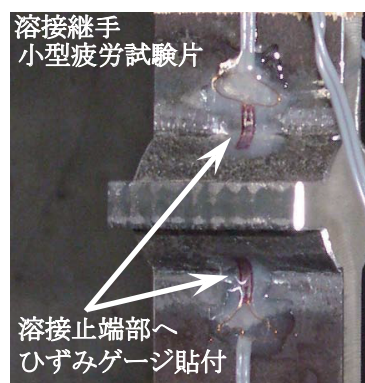


図 4 溶接止端部に貼付したひずみゲージ

### 3.3 試験結果

疲労試験結果を図 5 に示す。図中の点線がひずみゲージ応力による非仕上げ部の S-N 曲線であり、破壊確率は 50% を示している。図 5 より、200 万回強度は 96MPa であった。

2.1.2 (1) に記述したように、許容応力が 200 万回強度の破壊確率 0.1% の場合、3.2.1 に記述したように、統計的に有意となるには、試験片数が膨大になる。一方、母材の許容応力は疲労限度の 80%<sup>2)</sup>と記述されており、母材と同様に、時間強度に関連づけられれば、簡易的に許容応力が求められる。なお、この 80% という数値は、破壊確率から算出されており、本来は疲労試験結果の標準偏差から算出されるべきものである。

①本試験で 200 万回強度は 96MPa であったこと、②溶接止端部（非仕上げ部）では試験結果の標準偏差が母材の試験結果よりも大きくなると考えられること、③

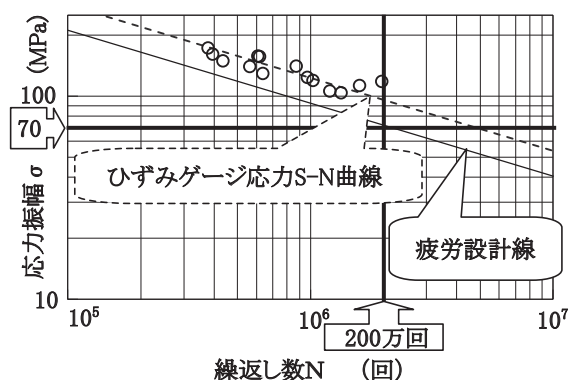


図5 疲労試験結果

2.1.2(1) に記述したように、本試験での 200 万回強度は当時の 200 万回強度よりも高い可能性が考えられること、等から、応力限界図における平均応力 0MPa の場合の許容応力 70MPa は、当時の溶接品質における 200 万回強度の 75% 程度に相当している可能性が考えられる。なお、現段階では、現在までの応力限界図による膨大な評価適用例との整合性を考慮し、表 1 に示した諸数値を変更する必要はないと考えられる。

### 3.4 応力限界図の作成方法および寿命評価方法の提案

2.1 で記述したように、文献 2) における溶接止端部の許容応力の根拠は明確にされていなかったが、3.3 で記述したように、この許容応力は S-N 曲線の 200 万回強度の 75% 程度であったと考えられる。一方、本試験方法のようにひずみゲージ応力をそのまま S-N 曲線とすることは、ひずみゲージ応力を有効切欠き応力と解釈することにより、その妥当性が示されている。

したがって、2.1.2(2) に記述したように、新材料等を適用する場合に溶接部（非仕上げ部）の許容応力を簡易的に求めるには、当該材料の溶接継手小型疲労試験片に対し、14S-N 試験法等により S-N 曲線の傾斜部を求め、200 万回強度の 75% 等を許容応力とすればよい。これにより、応力限界図の現在までの膨大な評価適用例と矛盾することなく、新材料等への適用も可能になると考えられる。

JIS の応力限界図は、許容応力による疲労限度設計とも考えられ、過去の実績から、累積走行距離 500 万 km 程度以上の使用に耐えることが明らかになっている<sup>9)</sup>。一方、3.1 で記述した疲労設計指針や疲労照査方法は、疲労設計線を用いた寿命評価の方法を示している。今後、軽量化等を検討する場合に、疲労限度設計から寿命評価（損傷許容設計）に移行する可能性がある。その場合には、本研究で検討したような S-N 曲線の 75% 線、統計的な考え方による破壊確率曲線、等を疲労設計線（図 5）として利用できると考えられる。

## 4. 新しいルート溶接金属判定曲線の提案

### 4.1 応力拡大係数 K

2.2 で記述したように、溶接ルート部の適切な評価を行うため、3次元モデルで補正係数  $F$  の計算を行った。国鉄の台車枠に使用されてきた主要な溶接継手構造を、溶接線長さと溶接継手角度に着目して整理したところ、横はりに取付部品の受が溶接されるような継手構造では、溶接線長さは 150mm ~ 220mm、溶接継手角度は 90° が多いことがわかった。溶接継手構造の例として、板厚 9mm の片側開先直交ならびに 30° および 60° 斜交 T 溶接継手に対し、溶接線長さ 180mm の簡易 FEM モデルを作成した（図 6）。なお、すみ肉溶接の脚長等は現判定法のモデルと同一とし、溶接ルート部に溶込み不良を設定した。実台車枠での溶接継手構造は、溶接線の端部にリブが溶接され、井桁構造や箱構造になっていることが多いことから、仮想的なリブにより変形が強く拘束された場合を検討した。

溶接ルート部の溶込み不良をき裂と仮定し、主板に引張負荷を与えた時の応力拡大係数  $K$  は、き裂面上の変位分布  $(u, v)$ 、き裂先端からの距離  $r$ 、横弾性係数  $G$  として、

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \frac{K}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{Bmatrix} 0 \\ \pm(\kappa+1) \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2)$$

と表わされるため、平面ひずみ状態 ( $\kappa = 3 - 4\nu$ ,  $\nu$  はポアソン比) としてき裂先端からの距離に対し応力拡大係数をプロットし、き裂先端へ外挿して求めた。さらに、(1) 式により、求められた応力拡大係数と基本形状の応力拡大係数との比である補正係数  $F$  を算出した。

図 7 に溶込み不良深さ 2mm の場合の補正係数  $F$  を示

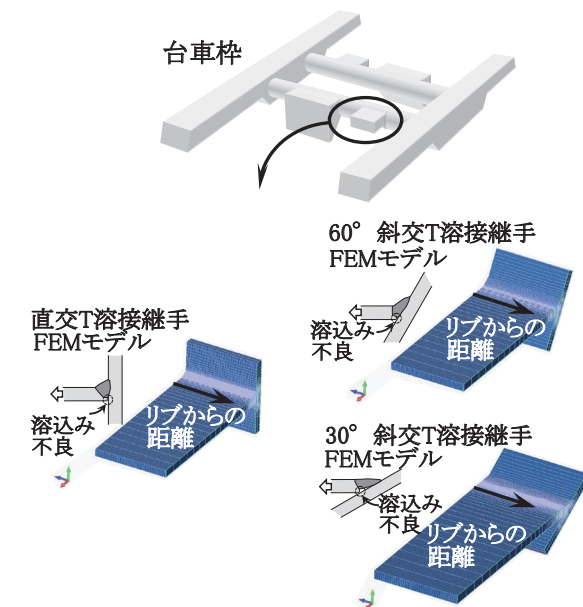


図6 FEM モデル

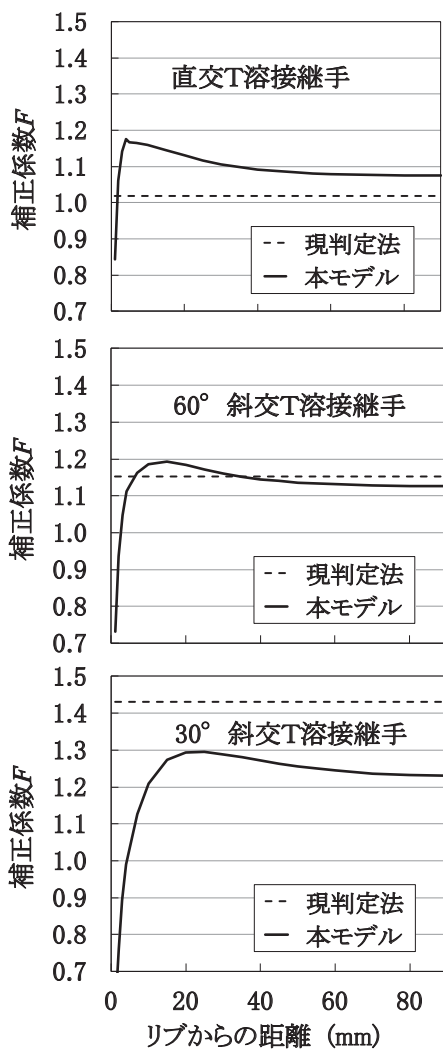


図7 補正係数  $F$  (溶込み不良深さ 2mm)

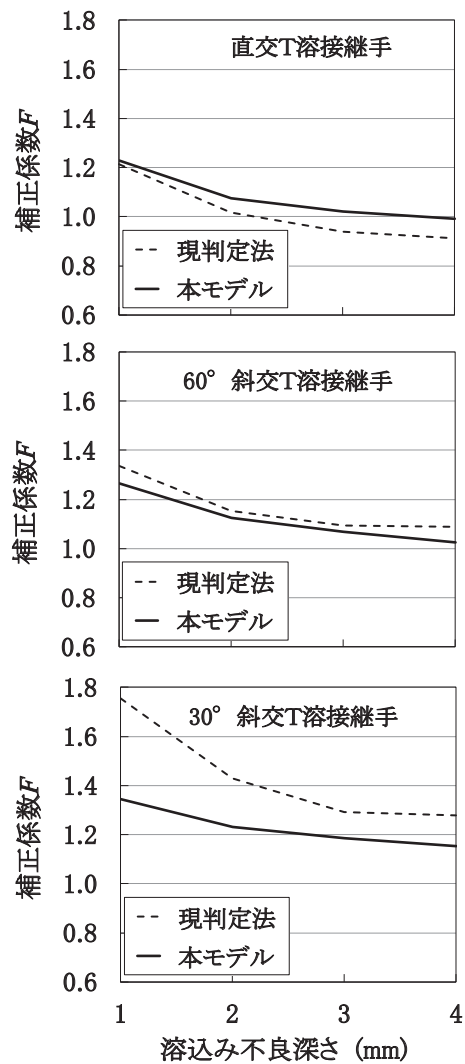


図8 リブ間中央部における補正係数  $F$

す。本モデルでの補正係数  $F$  は、リブからの距離に依存しており、リブから 20mm 程度の位置までで最大値となっており、リブ間中央に向けて減少し一定値に近づくことがわかった。

台車枠溶接継手近傍の応力実測例として、鉄道総研内にある実台車枠の横はりどと歯車箱吊受との溶接部に下方向に静荷重を負荷したところ、リブからの距離にしたがって応力が減少し、横はりに近い部位ほど、応力の減少割合が小さいことがわかった。これらの応力分布は構造や荷重方向等に依存することから、汎用性のある判定曲線を作成するため、補正係数  $F$  はリブの影響が小さいリブ間中央部（本 FEM モデルではリブからの距離 90mm）で求めることとした。

溶接ルート部の溶込み不良深さを 1～4mm に変化させ、補正係数  $F$  を求めた結果を図 8 に示す。特に 30° 斜交 T 溶接継手において、補正係数  $F$  は現判定法の補正係数  $F$  との差が大きかった。2.2.2 で記述したように、低角度の斜交 T 溶接継手において、走行距

離と損傷発生例が合致しない例が見られた理由の一つとしては、現判定法の低角度の補正係数  $F$  が過大に見積もられていた可能性が考えられる。したがって、補正係数  $F$  に基づく現判定法の判定曲線を改良すれば、より適切に強度評価ができると考えられる。

#### 4.2 新しいルート溶接金属判定曲線

本研究で求めた補正係数  $F$  (図 8) を用い、現行と同様の判定方法により新しいルート溶接金属判定曲線諸数値を求めると、表 2 および表 3 のようになる。ここで、判定曲線が多いと煩雑であることから、応力が近いものは統一した。現判定法との主な相違点は、低角度の斜交 T 溶接継手に対する rE 等級の諸数値が大きくなったことと、rD 等級を rE 等級に統合したことである。新しいルート溶接金属判定曲線を図 9 に示す。

判定曲線による強度判定法では、走行試験時の応力測定値から応力頻度分布を求め、図 9 の判定曲線に対する累積被害度を算出する。累積被害度が 1 となる場合をそ

特集：車両技術

表2 新しいルート溶接金属判定曲線諸数値

N	rA	rB	rC	rE
$1 \times 10^5$	97	88	84	78
$1 \times 10^6$	57	51	50	46
$2 \times 10^6$	55	49	47	44
$1 \times 10^7$	52	47	45	42
$1 \times 10^8$	51	46	44	41

N：繰返し数（回） rA～rE：等級  
rA～rEの諸数値：応力範囲（MPa）

表3 継手の種類

等級	継手の種類
rA	直交T溶接継手（境界部）
rB	直交T溶接継手（一般部）
rC	55度以上80度未満斜交T溶接継手
rE	30度以上55度未満斜交T溶接継手

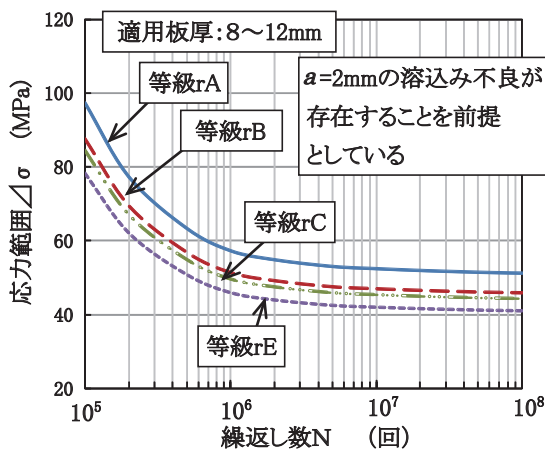


図9 新しいルート溶接金属判定曲線

の測定点での寿命とするものである。

本研究において、新しいルート溶接金属判定曲線を提案したことにより、台車枠溶接継手構造における溶接ルート部からの疲労破壊に対し、より適切な強度評価ができると考えられる。

5. おわりに

台車枠溶接継手構造に対する疲労強度評価方法を検討した。本研究により得られた結果は次のとおりである。

- (1) 台車枠溶接継手を模擬した小型疲労試験片の疲労試験を行い、ひずみゲージ応力により溶接止端部（非仕上げ部）のS-N曲線を求めた。JIS E 4207の応力限界図の許容応力70MPaは、200万回強度の75%程度に相当していると考えられる。ひずみゲージ応力S-N曲線の75%線等を疲労設計線とすることで、寿命評価に利用できると考えられる。
- (2) (1)により、JIS E 4207で規定されていない新材料に対しても、同様に溶接止端部（非仕上げ部）の許容応力を200万回強度の75%等として求めれば、応力限界図の許容応力を規定できる可能性が考えられる。
- (3) 溶接継手構造解析の例として、板厚9mmの片側開先直交および斜交T溶接継手に対し、溶接ルート部に一様に1～4mmの溶込み不良深さのある3次元FEMモデルを作成した。主板上に引張荷重を与えた時の応力拡大係数Kを求め、継手の補正係数Fと溶込み不良深さの関係を算出した。
- (4) 求めた補正係数Fにより、新しいルート溶接金属判定曲線および累積被害度を用いた疲労強度評価方法を提案した。これにより、台車枠溶接継手構造における溶接ルート部からの疲労破壊に対し、より適切な強度評価ができると考えられる。

文献

- 1) 長瀬隆夫：鋼製溶接構造台車枠の疲労強度，財団法人研友社，2010
- 2) JIS E 4207:2004 鉄道車両—台車—台車枠設計通則
- 3) JIS E 4208:2004 鉄道車両—台車—荷重試験方法
- 4) (社) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説—付・設計例— [2012年改訂版]，技報堂出版，2012
- 5) Hobbacher, A. F. :Recommendations on fatigue design of welded joints and components, IIW doc. IIW-1823-07; XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07, 2009.
- 6) 後川理，中山秀治：溶接継手部の応力集中係数，石川島播磨技法，Vol.23, No.4, pp.351-355, 1983
- 7) 辻勇：非荷重伝達型すみ肉溶接継手の止端部の応力集中係数の推定式，西部造船会会報，Vol.80, pp.241-251, 1990
- 8) 社団法人日本機械学会：日本機械学会基準 統計的疲労試験方法（改訂版）JSME S 002-1994, 1994
- 9) 長瀬隆夫：溶接台車枠の強度と保守，財団法人研友社，1999