

実働応力ひん度分布による台車枠溶接止端部の疲労強度評価

織田 安朝* 八木 毅*
 沖野 友洋* 石塚 弘道**

Fatigue Life Estimation of Welds on Truck Frames for Rolling Stock Based on Stress Frequency Distribution Caused by Service Loads

Yasutomo ODA Tsuyoshi YAGI
 Tomohiro OKINO Hiromichi ISHIDUKA

The allowable fatigue strength of weld on truck frames has been judged according to the fatigue limit diagram stipulated in JIS E 4207, General Rules for Design of Truck Frames for Railway Rolling Stock. However, it is not possible to predict actual fatigue life by using this diagram. This study demonstrates the possibility of fatigue life estimation for welds on truck frames based on a modified Miner's rule. In order to estimate fatigue life, three factors are taken into consideration in our study, namely the S-N diagram assumed from the allowable fatigue stress stipulated in JIS E 4207 or the JSSC fatigue design curve, the relationship between crack occurrence and running distance, and stress frequency distribution caused by service loads.

キーワード：台車枠，応力ひん度，溶接，疲労，寿命予測

1. はじめに

鉄道車両用鋼製溶接構造台車枠の溶接部表側の疲労強度評価は、JIS E 4207-2004¹⁾「鉄道車両—台車—台車枠設計通則」（以下、JISと呼ぶ）にある応力限界図を用いて行われてきた。強度評価に必要な平均応力および変動応力に、設計時にこの規格に基づき見積もられた各種動荷重の最大値の荷重時に発生する応力から算出される合成値（以下、設計応力と呼ぶ）、若しくは、変動応力については現車走行試験等によって得られた実働応力の最大値が使われている。

JISの応力限界図の対象とする溶接部は、非仕上げおよび仕上げであるが、台車枠損傷の多くは非仕上げの止端部から発生することから、本報では、非仕上げの溶接止端部を対象とする（図1参照）。非仕上げの溶接部の疲労に対する許容応力振幅は平均応力が0の場合70MPaであり、これは、損傷破壊確率0.1%の 2×10^6 回強度とされている²⁾。

JISによる評価は実働応力最大値が限界応力を超えるか否かによって判定するものであり、実台車枠の損傷を比較的良好に評価しているものの³⁾、寿命を推定できな

いという問題点を有しているため、これまでに、実働応力の応力ひん度分布を考慮した寿命評価法に対する検討はほとんどなされてこなかった。

内外の鋼構造物の疲労設計に関する基準^{5)~8)}の多くは、日本鋼構造協会の疲労設計曲線⁴⁾をはじめ、溶接継手構造毎に作成されたS-N曲線に基づく疲労設計線によって、変動応力の発生回数を考慮した寿命評価を行うのが一般的である。また、これらの中には、疲労損傷が生じる局部応力として定義されるホットスポット応力により溶接継手種別に関らず一定の設計曲線が与えられる評価法がある^{4)~6)}。JISの応力限界図より溶接止端部を評価する方法は、止端部に貼付けた歪ゲージで測定された応力により評価されるもので、S-N曲線に基づく疲労設計線は与えられていないが、疲労に対する許容応力は溶接継手種別に関らず一定である点においてホットスポット応力による評価法と類似している。

本報告では、過去の台車枠非仕上げ溶接部の損傷事例調査から明らかになっている損傷部位相当位置³⁾の現車走行試験より得られた実働応力および次のようなS-N曲線に基づき、実働応力の無効とする応力振幅 σ_{cut} を設定して、修正マイナー則により台車枠の非仕上げ溶接部の寿命評価を試み、その結果を走行距離等の損傷実績データと比較した。用いたS-N曲線は、JISの溶接部の疲れ許容応力振幅（ 2×10^6 回強度）を基準として新た

* 車両構造技術研究部（車両強度）

** 車両構造技術研究部

特集：車両技術

に仮定した、勾配の逆数の絶対値 m が3および5.5の継手種別に関らない単一のS-N曲線、また、継手種別に対応した $m=3$ の日本鋼構造協会の疲労設計曲線および $m=5.5$ の1974年版の同設計曲線⁹⁾を参考に作成したS-N曲線である。

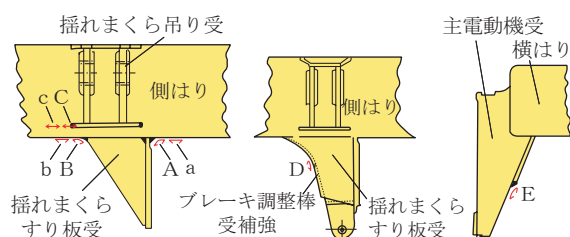
2. 実働応力ひん度分布特性と等価応力値

2.1 応力測点

本報告において対象とした応力測点を以下に示す(図1, 赤矢印)。これらの測点は、過去に損傷実例のある非仕上げの溶接部^{3) 10)}の中から、現車走行試験により実働応力とそのひん度分布の得られている起点相当位置とその周辺母材部を選定した。なお、車両は1958～65年頃に設計、製造されたものである。

各応力測点の詳細は次のとおりである。

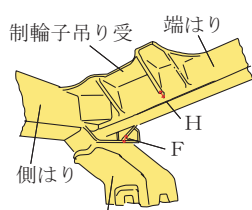
- 測点A：揺れまくらすり板受溶接止端部
 - a：揺れまくらすり板受溶接部近傍母材平滑部 【垂直，左右力】
- B：揺れまくらすり板受支え溶接止端部
- b：揺れまくらすり板受支え溶接部近傍母材平滑部 【垂直，左右力】
- C：揺れまくら吊り受補強溶接止端部
- c：揺れまくら吊り受補強溶接部近傍母材平滑部 【左右力】
- D：ブレーキ調整棒受補強溶接止端部 【ブレーキ力】
- E：主電動機受補強溶接止端部 【主電動機の振動による荷重】
- F：軸箱支持装置受(端はり側)補強溶接



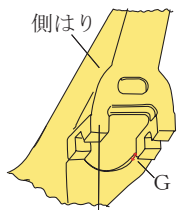
測点A,a,B,b,C,c

測点D

測点E



測点H,F



測点G

図1 過去に損傷実例がある台車枠諸部位の溶接止端部起点相当位置等の応力測点

止端部【左右力】

- G：軸箱支持装置受(台車中心側)溶接止端部 【垂直力，主電動機の振動による荷重，駆動装置のトルクによる荷重】
- H：制輪子吊り受補強溶接止端部【ブレーキ力】

【 】内は、応力の発生に対し、主として影響を受ける力，荷重を表す。

溶接継手形状は，A，Gが両側直交T溶接継手，B，C，F，Hが片側斜交T溶接継手，D，Eが重ね溶接継手であり，全ての測点とも，日本鋼構造協会の疲労設計曲線の等級FまたはG(2×10⁶回許容応力範囲は65, 50MPa)に該当すると考えられる。ここで，A～Hの歪ゲージの貼り付け位置は，JISに従いゲージ長さの1/2～1/3を止端部にかけた。また，溶接部近傍のゲージ位置は，止端からゲージ中心まで20～30mmで，使用したゲージ長さはともに5mmである。

2.2 JISの応力限界図による強度評価

JISの応力限界図の縦軸(変動応力)および横軸(平均応力)の切片は材料(対象はSS400, SM400, SM490等)の降伏に対する許容応力で，本報の台車枠の鋼種はSS400およびSM400なので205MPaである。溶接止端部で応力測定を行った測点A～Hについて，実働応力の最大値 σ_{max} を応力限界図にプロットした結果を図2に示す。

各測点の値は概ね許容応力を超過しており，損傷実績から，現用JISの応力限界図の妥当性が確認できる。

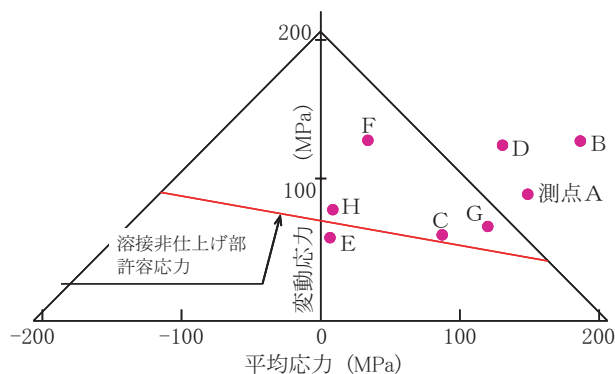
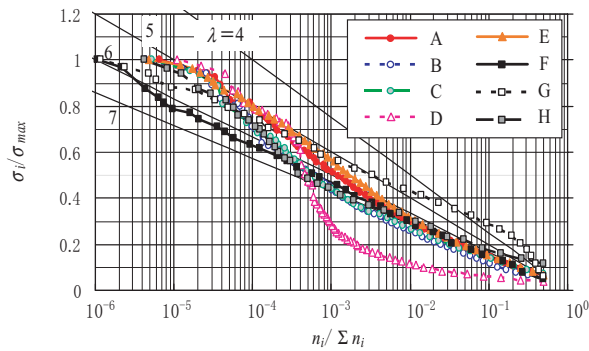


図2 応力限界図による強度評価例 (測点A～H)

2.3 実働応力ひん度分布特性

A～Hの各測点の応力ひん度分布をレインフロー法により計数した結果を図3に示す。ここで， σ_i は各スライスレベルの応力値で n_i は σ_i の発生ひん度である。縦軸は実働応力の最大値 σ_{max} に対する比 σ_i/σ_{max} とし，横軸は累積ひん度で発生ひん度の総数 $\sum n_i$ に対する比 $n_i/\sum n_i$ として表した¹¹⁾。

実働応力の発生ひん度は，主としてブレーキ力が作用しているときにのみ応力が発生する測定点Dを除く各測



測点	測定走行距離 (km)	σ_{cut} (MPa)	Σn_i
A	480	2.5	2.0×10^6
B	480	3.75	1.3×10^6
C	480	2.5	1.8×10^6
D	180	2.5	2.6×10^5
E	180	2.5	3.1×10^5
F	1060	3	6.8×10^5
G	1060	11	2.2×10^5
H	1060	10	1.2×10^5

図3 台車枠溶接部の実働応力ひん度分布例 (測点A～H)

定点について、概ね片対数グラフ上において直線近似した式 $\sigma_i/\sigma_{max} = -\log(n_i/\Sigma n_i)/\lambda$ の $\lambda = 5 \sim 7$ の線上に分布している。これにより、設計段階において予め最大応力値（設計応力など）を想定すれば、おおよそのひん度分布を推定できる可能性がある。

2.4 10km 当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$

一般に等価応力値とは、変動する応力と同じ繰り返し数で等価な疲労被害を与える一定振幅の応力値と定義されるが、ここでは、ある区間の実働応力ひん度分布を繰り返し数1回で等価な疲労被害を与える振幅の応力に置き換える方法を示す。これは、後述する疲労寿命の算定において、また、異なる走行区間、条件の応力ひん度分布を相対的に数値で比較する場合において、用いられるもので、実働応力ひん度分布から修正マイナー則に基づいて計算する。計算式は以下による。

$$\sigma_{eq} = (\Sigma n_i \sigma_i^m)^{1/m}$$

σ_{eq} : 等価応力値

m : S-N 曲線における勾配の逆数の絶対値

ここで、等価応力値 σ_{eq} は、10km 当りに換算して求めた10km 当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ とする。この場合、損傷が発生するまでの累積走行距離を $1 \sim 2 \times 10^7$ km とすると等価応力値の繰り返し回数が $1 \sim 2 \times 10^6$ 回となる。

マイナーの線形被害則に基づいて等価応力を計算する場合、また、寿命評価する場合において、指数 m の数値

が重要となる。日本鋼構造協会の構造物の疲労設計指針（1993）にある疲労設計曲線では $m = 3$ を使用する⁴⁾が、同協会が1974年に発表した旧指針（案）においては5.5が使用されていた⁹⁾。また、鉄道車両台車枠の寿命を評価するうえで、 $m = 3$ では低応力の影響が大きくなり、最大値をはじめとする発生回数は少なくとも高応力の影響を重視するなら $m = 5.5$ がよいと考えられてきた¹²⁾。

図3のような応力ひん度分布を用いて等価応力値を計算する際、無効とする低応力 σ_{cut} が計算結果に及ぼす影響を調査した結果例を図4に示す。 $m = 5.5$ の場合はこの影響をほとんど受けないのに対し、 $m = 3$ の場合、無効とした低応力と最大応力値の比 $\sigma_{cut}/\sigma_{max}$ が、0.20～0.25では等価応力値の無効とする振幅設定がない場合との比 $\sigma_{eq-cut}/\sigma_{eq0}$ が0.9～0.8に、0.4では0.6にまで低下し、無効とする低応力の影響を受けやすいことがわかる。ここでは、以下の10km 当たり等価応力値を計算する際、無効とする低応力値を、 $m = 3$ の場合における等価応力振幅の低下が $\sigma_{eq-cut}/\sigma_{eq0} = 0.9$ の時の $\sigma_{cut}/\sigma_{max} = 0.2$ と設定した。

図5はJISの応力限界図による評価に用いられる実働応力の最大値 σ_{max} と上記の方法で計算した10km 当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ を比較したものである。 $m = 5.5$ においては $\sigma_{eq/10km}$ と σ_{max} が比較的良好に一致する。一方、 $m = 3$ では $\sigma_{eq/10km}$ は σ_{max} よりかなり大きい。

ここで、JISの応力限界図の許容限度は前述のように 2×10^6 回強度としている。想定される寿命走行距離を 2×10^7 km とすれば、10km 当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ の想定される繰り返し数は 2×10^6 回となるが、 $m = 5.5$ と仮定した場合、10km 当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ を最大値 σ_{max} に置き換えることが可能となることから、応力限界図の最大値による評価と関連づけることができる。例えば、疲労試験などにおいて 2×10^7 km 走行相当の試験を考える場合、想定される最大値 σ_{max} を 2×10^6 回負荷すればよいことになる。

また、ブレーキ調整棒受部の測点Dのように、ブレーキ時の最大値 σ_{max} 近傍の比較的高い応力値以外は低い応力分布となる（図3参照）測点においては、 $m = 5.5$ で計算した等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ の $m = 3$ との差が他に比べ

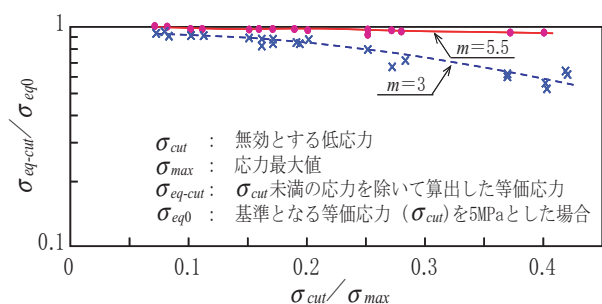


図4 無効とする低応力の等価応力値への影響

特集：車両技術

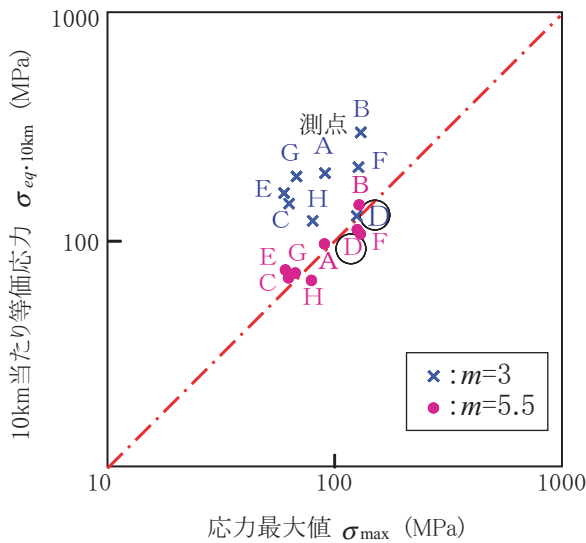


図5 10km当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ と実働応力最大値 σ_{max} との関係(測点A～H)

て小さく、 $m=3$ において最大値 σ_{max} に最も近づく傾向にある(図5参照)。

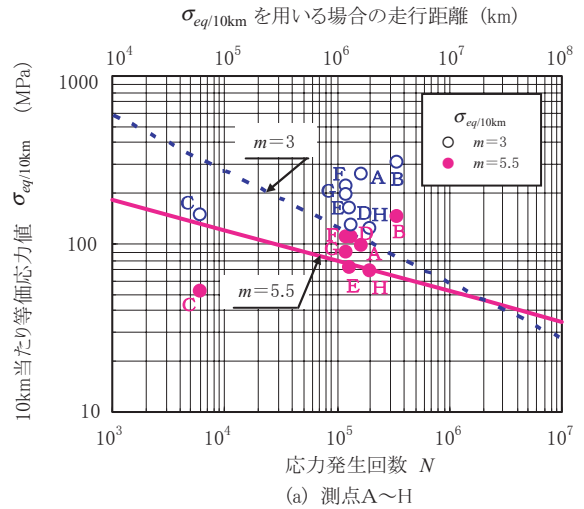
3. 損傷実例による寿命評価法の検討

3.1 10km 当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ による検討

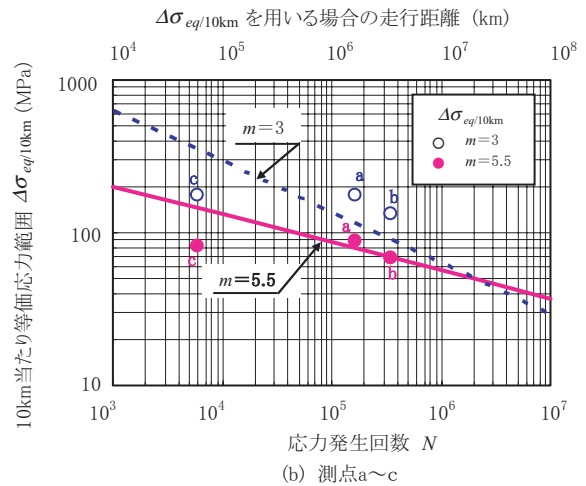
溶接止端部の応力測点A～Hおよび近傍母材部の測点a, b, cについて、実働応力ひん度分布とそれから計算した10km当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ および過去の損傷実例から得た損傷発生時の走行距離を用いて、寿命評価の可能性を検討した¹³⁾。ここで、損傷発生時とは磁粉探傷で容易に検出できる程度のき裂が発生した時を意味し、損傷発見時のき裂長さから損傷発生時の走行距離を推定したものである。

溶接止端部の応力測点A～Hに対し、本来、個々に平均応力を考慮したS-N曲線を作成しなければならないが、検討を容易に行うため、図3の試験結果の分布に基づき応力比 $R=0.5$ のS-N曲線1本に代表させることにした。JISの溶接部の応力限界図(2×10^6 回強度と仮定)における $R=0.5$ の場合の許容応力47MPaを基本として $m=3$ および5.5のS-N曲線を作成した。この線図上に、10km当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ を縦軸に、損傷発生時の走行距離を10kmで除した繰り返し数(10km当たり等価応力 $\sigma_{eq/10km}$ を用いるため)を横軸にプロットした結果を図6(a)に示す。なお、横軸に10km当たり等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ を用いる場合の走行距離を図の上側に併記した。

一方、近傍の平滑な母材部の測点から溶接止端部(測点A, B, C位置相当)を評価するため、測点a, b, cについて日本鋼構造協会の疲労設計線を用い、図6(a)と同様に表した結果を図6(b)に示す。近傍平滑部の公称



(a) 測点A～H

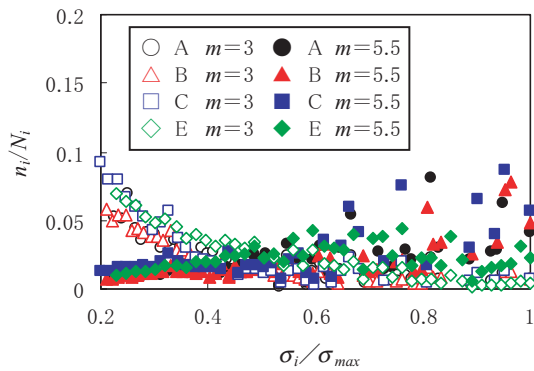


(b) 測点a～c

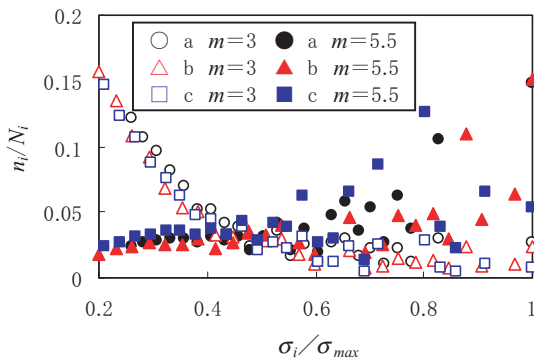
図6 損傷発生時に相当する回数における $\sigma_{eq/10km}$ および $\Delta\sigma_{eq/10km}$ とS-N曲線の関係

応力値を用いて溶接部を評価するもので、溶接継手の強度等級はGとし、S-N曲線として $m=3$ については強度等級Gの疲労設計曲線を用いた。 $m=5.5$ については、 2×10^6 回における等級Gの許容応力範囲 $\Delta\sigma=50$ MPaを通るS-N曲線を仮定したものである。なお、縦軸は日本鋼構造協会の疲労設計線に合わせて応力範囲 $\Delta\sigma$ とした。

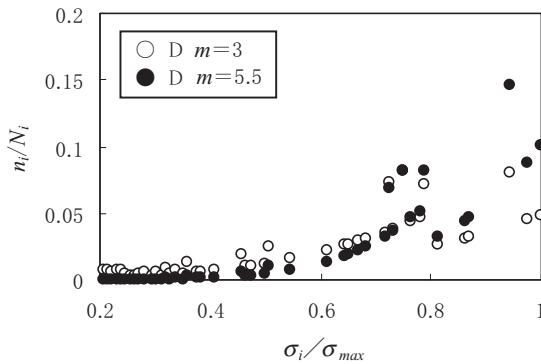
損傷発生時に相当する回数(損傷発生時の走行距離を10kmで除した繰り返し数)における $\sigma_{eq/10km}$ は測点Cを除いてS-N曲線をほぼ上回って分布している。これらのS-N曲線は20%程度の安全を考慮したもの(JISでは破壊確率0.1%、日本鋼構造協会の疲労設計線では実験データの下限値であることから平均 $-3 \times$ 標準偏差と考えられ、一般的なS-N曲線の変動率0.06程度を考慮して20%程度と推定した)である。実働応力測定の際の走行条件のばらつきおよび損傷発生時の走行距離の確かさを考慮すれば、時間軸で2倍程度、応力軸に直すと15～25%程度のばらつきがあると考えられ、損傷発生時に相当する回数において必ずしもこれを上回る必要はな



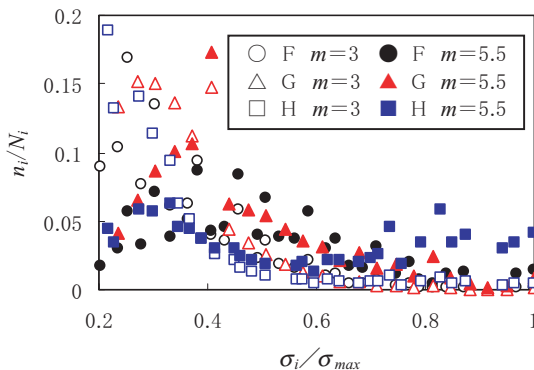
(a) 測点A,B,C,E



(b) 測点 a,b,c



(c) 測点 D



(d) 測点 F,G,H

図7 $\Sigma n_i/N_i = 1$ 時の損傷度 n_i/N_i の分布
(修正マイナー則による計算結果)

く、本S-N曲線付近に分布したことは妥当な評価が行えていると考えられる。また、図6 (b) の近傍母材部の応力測点では図6 (a) の溶接止端部の測点に比べばらつきが小さく、近傍母材部の公称応力を用いる方が安定した評価結果が得られることがうかがえる。

3.2 累積損傷度による検討

図7は、 $m = 3$ と 5.5 の場合について、損傷が発生するとされている累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ が1となる時の各応力 σ_i 毎の損傷度 n_i/N_i の分布を比較した結果である。損傷度 n_i/N_i の分布は、 $m = 5.5$ では、最大値をはじめとする応力が高く発生回数の少ない領域の影響が大きい傾向が認められるのに対し、 $m = 3$ においては、発生回数が多く応力の低い領域の影響がかなり大きいことが確認できる。

なお、測点Dについては、2.4節で述べたとおり最大値近傍の高応力の分布が大勢を占めるので、 m による分布の差はほとんど見られない。

累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ のほとんどが低応力で発生回数の多い領域によって占められる $m = 3$ より、発生回数は少ないが比較的高応力の領域が主となる $m = 5.5$ の方が、実働応力の最大値が 2×10^6 回強度に対して1.1~2.5倍程度あり、応力ひん度分布の繰り返し数の範囲が $10^3 \sim 10^{10}$ に及ぶような鉄道車両の台車枠の寿命を評価するうえで実情に合っていると考えられる。

各測点について損傷発生時の走行距離相当の応力ひん度分布を推定し、図6に示すS-N曲線を用いて累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ を計算した結果を表1に示す。累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ は、測点Cと $m = 5.5$ の一部を除いて1を超えている。近傍母材部の応力測点 a, b を用いた場合の累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ の計算結果は、溶接止端部の応力測点 A, B の場合に比べ、ばらつきが少なく、より損傷発生時の走行距離に近い安定した寿命評価結果を得ることができると考えられる。

表1 損傷発生時の走行距離における累積損傷度

測点	損傷発生時の走行距離における累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$		損傷発生時の走行距離 $\times 10^4$ (km)
	$m = 5.5$	$m = 3$	
A	4.83	6.84	164
a	1.62	2.73	164
B	86.8	49.5	347
b	1.01	3.33	347
C	0.03	0.10	6
c	0.04	0.13	6
D	8.38	1.49	134
E	0.79	2.91	128
F	7.06	6.67	120
G	0.76	4.62	120
H	0.76	1.62	200

特集：車両技術

4. 結 言

鉄道車両用台車枠溶接止端部について、過去の損傷事例のある車両の現車走行試験より得られた実働応力ひん度分布と、JISの溶接部の疲れ許容応力振幅を基準として新たに仮定したS-N曲線および日本鋼構造協会の疲労設計曲線を用いて、修正マイナー則により実働応力の無効とする応力振幅（最大値に対する比で0.2）を設定して寿命評価を試み、その結果について検討した。

結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 多くの台車枠応力の実働応力ひん度分布は、 $\sigma_i/\sigma_{\max} = -\log(n_i/\Sigma n_i)/\lambda$ の $\lambda = 5 \sim 7$ の線上に分布していることがわかった。これにより、予め設計応力を用い、おおよそのひん度分布を推定できる可能性がある。
- 2) 損傷発生時の走行距離相当の応力ひん度分布を推定し、安全を考慮したS-N曲線を用いて、損傷発生時に相当する回数における10km等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ により寿命評価を試みた結果、ほぼS-N曲線付近に分布したことから、妥当な評価が行えていると考えられる。
- 3) S-N曲線の勾配の逆数の絶対値 $m = 3$ と 5.5 の場合について、損傷が発生するとされる累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ が1となる時の実働応力の各応力 σ_i 毎の損傷度 n_i/N_i の分布を比較した結果、 $m = 5.5$ では、最大値をはじめとする応力が高く発生回数の少ない領域の影響が大きいのに対し、 $m = 3$ においては、発生回数が多く応力の低い領域の影響がかなり大きいことが確認できた。
- 4) 累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ のほとんどが低応力で発生回数の多い領域によって占められる $m = 3$ より、発生回数は少ないが比較的高応力の領域が主となる $m = 5.5$ の方が、実働応力の最大値が 2×10^6 回強度に対して1.1～2.5倍程度あり、応力ひん度分布の繰り返し数の範囲が $10^3 \sim 10^{10}$ に及ぶような鉄道車両の台車枠の寿命を評価するうえで実情に合っていると考えられる。
また、 $m = 5.5$ では10km等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ が最大応力値 σ_{\max} にほぼ一致することから、応力ひん度分布の指標としての10km等価応力値は最大値に置き換えることが可能となり、最大値に基づく従来の応力限界図による評価と応力ひん度分布を考慮した評価とに関連づけができる。

- 5) 損傷発生時の走行距離相当の応力ひん度分布を推定し、安全を考慮したS-N曲線を用いて、10km等価応力値 $\sigma_{eq/10km}$ および累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ を計算して寿命評価した結果、近傍母材部の応力（公称応力）を用いた場合は、JISの溶接止端部の応力測点による場合に比べ、より損傷発生時の走行距離に近い安定した寿命評価結果を得ることができると考えられる。

文献

- 1) JIS E 4207-2004：鉄道車両一台車一台車枠設計通則，2004
- 2) 田中眞一：日本機械学会435回講習会教材，p. 98，1976
- 3) 長瀬隆夫：溶接台車枠の強度と保守，研友社，1999
- 4) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂，1993
- 5) A. Hobbacher, “Recommendation for Fatigue Design of Welded Joints and Components”, IIW Document XIII-1539-96/XV-845-96, 1996.
- 6) BS7608, “Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures”, 1993.
- 7) JIS B 8821-2004：クレーン鋼構造部分の計算基準，2004
- 8) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002
- 9) 日本鋼構造協会：日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説（案），JSSC Vol.10 No.101, 1974
- 10) Miyaishi,G., Oda,Y.and Ariyama,K. , “Endurance of the Bogie Frames of Shinkansen Vehicles”, Quarterly Reports of RTRI, Vol. 32, No. 2, pp. 96-104, 1991.
- 11) 織田安朝，八木毅，沖野友洋：台車枠溶接部の実働応力ひん度分布特性と走行条件の影響，日本機械学会第14回交通・物流部門大会講演論文集，No.05-52, pp. 351-354, 2005
- 12) 宮石源基，野見山隆広，織田安朝：高速鉄道車両用台車の強度評価，鉄道総研報告，Vol. 8, No. 7, pp. 19-24, 1994
- 13) 織田安朝，八木毅，山口慎一郎：台車枠溶接部の損傷事例と実働応力に基づく寿命評価法の検討，第10回鉄道技術連合シンポジウム，pp. 375-378, 2002
- 14) 織田安朝，八木毅，沖野友洋，石塚弘道：鉄道車両用台車枠溶接部の実働応力ひん度分布に基づく寿命評価法の検討，日本機械学会論文集（A編），Vol. 73, No. 734, pp. 1171-1176, 2007