走行試験条件が実働応力ひん度分布に及ぼす影響* (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)

織 田 安 朝^{*1}, 八 木 毅^{*2}
沖 野 友 洋^{*3}, 石 塚 弘 道^{*1}

Effect of Vehicle Running Conditions on Stress Frequency (Fatigue Life Estimation for Welds of Truck Frames for Rolling Stock Using Stress Frequency in Service Load)

Yasutomo ODA^{*4}, Tsuyoshi YAGI,
Tomohiro OKINO and Hiromichi ISHIDUKA

^{**} Railway Technical Research Institute,
2-8-38 Hikaricho, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540 Japan

It is important to obtain the stress frequency distribution by service load in order to estimate the fatigue life in welds of vehicle truck frames. Although the stress frequency distribution by service load can be obtained by vehicle running test, it is difficult to estimate the distribution in the stage of design. Accordingly, the characteristics of stress frequency obtained by the past running test data were examined and analyzed together with its analysis of the effect of running conditions, which include distance, speed and payload. The study results will be used to estimate the stress frequency distribution in the stage of design or modification by operating conditions.

Key Words: Railway, Truck Frame, Welding, Stress Frequency, Fatigue, Service Load, Life Prediction

1. 緒 言

鉄道車両用鋼製台車枠の溶接部(以下、台車枠溶接部と呼ぶ)の寿命評価を行う上において、当該溶接部のS-N線図とともに実働応力ひん度分布を把握することが重要である。実働応力ひん度分布は現車走行試験によって得られるため、設計段階および使用条件を変更する際にこれを予測することは困難である。したがってその予測のためには、台車枠溶接部の実働応力ひん度分布の特性および応力ひん度分布に使用(走行)条件が及ぼす影響を明らかにする必要がある。

著者ら⁽¹⁾は、過去の走行試験によって得られた台車枠溶接部の実働応力ひん度分布の特性を明らかにし、予め設計段階において設計荷重から求まる最大変動応力(以下、設計応力と呼ぶ)に基づき、おおよそのひん度分布を推定できる可能性を得た。また、実働応力ひん度分布から求めた 10km 当たり等価応力による寿

命評価法について損傷事例に基づき検討を行い、その妥当性を検証した。

設計応力算定時の基準となる設計荷重は、JIS E 4207⁽²⁾(以下、JIS と呼ぶ)に動荷重条件として示されている各種荷重の動的付加係数に基づき決定される。JIS の動的付加係数はある幅を持った数値で示されているが、個々に適用する場合において、現車走行試験により得られる応力の最大値から、実働時における動的条件を考慮して動的負荷係数を把握することが重要と考えられる。

また、10km 当たりの等価応力⁽¹⁾⁽³⁾は、10km 区間の実働応力のひん度分布を一回の作用で等価な疲労被害を与える応力振幅に置換えるものである。過去の走行試験で得られた実働応力ひん度分布から、異なる使用条件毎に 10km 当たりの等価応力を計算し、その比を求め比較することにより、走行条件の変更に伴う実働応力ひん度分布の予測が可能になると考えられる⁽⁴⁾。

本報告では、台車枠溶接部について、設計段階および使用条件を変更する際の寿命評価を可能とするための基礎資料として、まず、設計段階において応力ひん度分布の予測のための基本となる設計荷重を決める時

* 原稿受付 2007 年 12 月 13 日。

^{*1} 正員、(財)鉄道総合技術研究所(〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38)。

^{*2} 前：(財)鉄道総合技術研究所。

^{*3} (財)鉄道総合技術研究所。

E-mail: yasutomo@rttri.or.jp

に必要な動的付加係数を、過去の走行試験で得られた実働応力最大値から算出した。また、走行条件を変更する際に必要な各条件（速度、区間、積載質量）毎の10km 当たりの等価応力の比較例を過去の走行試験で得られた種々の実働応力ひん度分布から計算した。

2. 実働応力最大値から求めた動的付加係数

現車走行試験により得られる応力振幅最大値 σ_{max} から、実働時の動的付加係数を求めるには、以下の方法による。

まず、静荷重試験において、注目する荷重に反応するが他の荷重の影響をほとんど受けない（多くの場合5%未満であるが、やむを得ない場合は10%程度のものを含む）応力測点（図1）を選定し、その荷重と発生する応力の関係を予め求めておく。これに基づいて、走行試験により得られた各応力の最大値を荷重値に換算し、動的付加係数を計算する。ここで、走行中に車両の動揺により台車枠に動的に作用する荷重として、垂直、左右、前後荷重があり、主に軌道の上下方向不整通過時、曲線等通過時、加減速時にそれぞれ発生する。垂直、左右、前後荷重は1台車当たりとする。また、主電動機の振動により台車枠の主電動機受け部に作用する荷重（以下、主電動機荷重と呼ぶ）は1箇所当たりとする。

- ① for calculating vertical load
- ② for calculating lateral load
- ③ for calculating longitudinal load
- ④ for calculating load which act on bracket supporting main motor

Fig.1 Example of stress measurement positions of truck frames for calculating load

図2は、垂直、左右、前後荷重および主電動機荷重について、過去の走行試験で得られた多数の応力最大値から求めた動的付加係数の例を示す。ここで、各動的付加係数は、台車の垂直、左右、前後荷重では軸ば

ね荷重に対する比、主電動機荷重では主電動機の重量に対する比として求めた。なお、軸ばね荷重とは、静的に軸ばねが負担する荷重であり、ここでは、最大積載質量を積載した時で考える。

Fig.2 Examples of dynamic additional factor in service load

図中の○は高速車両が高規格の軌道を走行した場合、△は一般の旅客車が一般の軌道を走行した場合、▲は△と同じ場合で、軸ばね荷重で空車の1.8倍程度まで質量を積載した場合、×は振り車両のような車体傾斜機能を持つ車両が一般の軌道を走行した場合である。なお、○と×については、最高速度を向上する際に測定したものを含む。

台車の垂直荷重については、振り車両のような車体傾斜機能を持つ場合の動的付加係数は0.4に近く、一般の車両においては積車状態で0.3を超える場合が見られる。また、台車の左右、前後荷重とも概ね0.3を超えない傾向が見られる。

主電動機荷重では、従来の直流電動機の場合の動的付加係数が5強程度までであるのに対し、最近用いられる交流電動機の場合は6~10になる例が見られる。これは、交流電動機の質量が直流の場合に比べ最も軽いもので1/2程度になる場合があり、このことが一因として考えられる。なお、図2に示す例は、何れもJISにおける各荷重の動的荷重係数、垂直0.2~0.5、左右および前後0.2~0.4、主電動機3~10の範囲内にあり、JISの妥当性が伺える。

3. 走行条件が応力ひん度分布に及ぼす影響

走行条件を変更する際の寿命予測を行うためには、変更後の適切な実働応力ひん度分布を推定する必要がある。そこで、走行条件が実働応力ひん度分布に及ぼす影響を把握するため、過去の走行試験で得られた多数の実働応力ひん度分布から10km当たり等価応力を計算し、種々の走行条件毎に変更前後の比を求めることにより比較検討を行う⁽⁴⁾。

3・1 10km 当たり等価応力および応力測点

3・1・1 10km 当たり等価応力 一般に等価応力とは、変動応力と同じ総繰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一回の作用で等価な疲労被害を与える応力振幅に置き換える方法を示す。これは、後述する異なる走行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用いるもので、実働応力ひん度分布から、マイナーの線形被害則に基づいて計算する。計算式は以下による。

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

σ_{eq} : 等価応力

σ_i : 各スライスレベルの応力値

n_i : σ_i の発生ひん度

m : S-N線図における勾配の逆数の絶対値

ここで、等価応力 σ_{eq} は10km 当りに換算して求める。この場合、寿命までの累積走行距離を $1 \sim 2 \times 10^7$ km とすると等価応力の繰返し回数が $1 \sim 2 \times 10^6$ 回となり、疲労寿命を検討する上で都合がよい⁽¹⁾⁽³⁾。

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、前報⁽¹⁾で示したように、発生応力ひん度の分布状況と損傷事例による寿命評価の検討結果から指数 m は鉄道車両の台車枠を評価するうえにおいて実情に合っている数値として5.5とする⁽¹⁾⁽⁵⁾。

$m=5.5$ を採用したものに、1974年に発表された日本鋼構造協会の構造物の疲労設計指針・同解説(案)の旧指針(案)⁽⁶⁾があり、その選定理由として、き裂が発生するまでの線図の勾配はき裂発生後も含めた線図の勾配ほど大きくなく5万回以下の応力が降伏点を超えないよう考慮したこと、非仕上げ突合せ継手の勾配がこれに近いこと、勾配を大きくすると疲労限以下の応力の繰返しによるき裂進展効果を過剰に見込むことになることなどを挙げ、また、応力が5割増加すると、繰返し数がちょうど一桁減少することになり便利であるとしている。

なお、本章で扱う応力は応力振幅 σ_a であり、応力ひん度分布を求める際に無効とした応力レベルは5MPaとした。

3・1・2 応力測点 本章では過去の走行試験で得られた多くの実働データを扱う関係上、全ての測点について記載することは困難であるため、代表的な測定位置の概略を図3に示す。

aは主に垂直、bは左右、cは前後、dは主電動機、eは駆動装置、fはブレーキの各荷重の影響を受ける測定位置であり、gは垂直、左右、前後の他に主電動機、駆動装置等のあらゆる荷重の影響を受ける測定位置である。

Fig.3 Example of stress measurement positions of truck frames

3・2 走行区間の影響

3・2・1 異なる線路等級走行の影響 垂直、左右、前後の他に主電動機、駆動装置等の全ての荷重の影響を受ける測定位置について、異なる線路等級の軌道を走行した時の応力ひん度分布の例を図4に示す。縦軸は設計応力 σ_{design} に対する比 $\sigma_i / \sigma_{design}$ とし、横軸は10km 当たりの累積ひん度 $n_i / 10$ km として表した。ここでいう設計応力 σ_{design} は、台車各部の測点毎に、設計時において、JISに記載される動的付加係数に基づいて算出した各種動荷重の最大値を個別に負荷し、各荷

重により発生する応力を合成したもので、多くの場合、静荷重試験において求められる。

線路等級は年間の通過トン数によって4段階に区分されており、トン数の多いほうから1級線, 2級線, 以下3, 4級線となる。因みに1級線は幹線に相当する。

Fig. 4 Examples of stress frequency distributions in different tracks

さらに各ひん度分布から 10km 当たり等価応力を求め、1 級線 (Class I track) 走行時の等価応力との比 $\sigma_{eq} / \sigma_{eq class I track}$ で表すことにより、異なる線路等級の軌道を走行した時の比較を図 5 に示す。この例の場合、等価応力は、2 級線 (Class II track) 走行では 1 級線走行の 1.1~1.2 倍、4 級線 (Class IV track) 走行では 1.3 倍程度である。

Class of track

Fig. 5 Examples of comparison between each track class

3・2・2 4級線走行時の荷重の影響 主に影響を受ける荷重別を選択した測定位置について、4 級線と 1 級線を走行した時の左右荷重、主電動機 (直流) 荷重の応力ひん度分布の比較例を図 6 に、さらに応力のひ

ん度分布から 10km 当たり等価応力を求め、1 級線走行時の等価応力との比 $\sigma_{eq} / \sigma_{eq class I track}$ で表すことにより、発生応力の比較を荷重毎に行った結果を図 7 に示す。

Fig. 6 Examples of stress frequency distributions in different tracks

Kind of load

Fig. 7 Examples of comparison between class I track and Class IV track for each kind of load

主に垂直、左右、前後、主電動機およびブレーキの各荷重の影響を受ける測定位置の等価応力は、4 級線走行で 1 級線走行の 1.5~1.6 倍、垂直、左右、前後の他に主電動機、駆動装置等のあらゆる荷重の影響を受ける測定位置 (図 7 中の*印) では 1.4 倍程度である。

3・2・3 走行区間長の影響 同一路線において、約500kmの全線と90kmあるいは50kmの一部区間を走行した時の応力ひん度分布の比較例を図8に示す。図8において、(a)と(b)の路線は異なる。

(a) A line

(b) B line

Fig.8 Examples of stress frequency distributions in different track length

これらの例においては、最大値近傍の高応力部がやや異なる程度で、ひん度分布の形状に大きな差は見られず、等価応力も全線の方が1%大きい程度である。

3・3 走行速度の影響 高速走行試験区間(概ね10km程度)における速度毎の台車枠各部の応力ひん度分布から等価応力を計算し、その速度効果を調査した。基準とする速度 $v_0=120, 130\text{km/h}$ および 240km/h の各速

度での等価応力を σ_{eqv0} として、速度の比 v/v_0 と等価応力の比 $\sigma_{eq}/\sigma_{eqv0}$ の関係として図9および図10に示す。

Fig.9 Effect of running speed on stress of truck frames
 $v_0=120\text{km/h}, 130\text{km/h}$

Fig.10 Effect of running speed on stress of truck frames
 $v_0=240\text{km/h}$

図中にプロットした各記号は応力測定位置の違いを示しており、測定位置による違いはあるが、等価応力の比は速度の比に概ね比例する傾向が見られる。ただし、測定位置によって、特に 240km/h 以上では速度の比の2乗に比例する場合も見られる。

3・4 積載質量の影響 垂直荷重および主電動機荷重の影響を主に受ける測定位置について、軸ばね荷重比で空車の1.5~1.8程度まで質量を積載した状態

(以下、積車と呼ぶ) および空車で走行した時の応力ひん度分布の比較例を図 11 に示す。

縦軸は $\sigma_i / \sigma_{design}$ で設計応力に対する比とし、横軸は 10km 当たりの累積ひん度 $n_i / 10\text{km}$ として表した。さらに、影響を及ぼす荷重別の測定位置について、各ひん度分布から 10km 当たり等価応力 σ_{eq} を求め、積車時の $\sigma_{eqloaded}$ と空車時の $\sigma_{eqempty}$ との差を空車時の $\sigma_{eqempty}$ で除した値 γ_σ と軸ばね荷重 W について、積車時の W_{loaded} と空車時の W_{empty} との差を空車時の W_{empty} で除した値 γ_w との比 γ_σ / γ_w を用い、積車時と空車時の比較を荷重毎に行った結果を図 12 に示す。

Fig.11 Examples of stress frequency distributions of loaded vehicle and that of empty vehicle

Fig.12 Effect of payload on stress of truck frames

垂直、左右荷重の影響を主に受ける測定位置では、等価応力の積車時と空車時の比の増分 γ_σ は、軸ばね荷重の積車時と空車時の比の増分 γ_w の 54~78% で、軸ばね荷重の増大による影響が比較的大きいのに対し、前後、主電動機、駆動装置およびブレーキの各荷重の影響を受ける測定位置では 23~51% 程度で、積荷重による影響をそれほど受けない傾向が見られる。

以上、走行条件を変更した後の寿命推定をするために必要な実働応力ひん度分布の推定を行うには、総繰り返し数がほとんど変わらないとして、基準となる現状の走行条件における応力ひん度分布の応力値に上で述べた走行条件毎に比較した 10 km 当たり等価応力の比を乗じることにより、概ねの分布を得ることができると考えられる。

4. 結 言

鉄道車両用台車枠溶接部について、設計段階における寿命予測に必要な応力ひん度分布を推定する際に基本となる設計荷重を決定するための基礎資料として、過去の走行試験で得られた多数の実働応力最大値から動的付加係数を算出した例を示した。

また、走行条件を変更する際の寿命予測のための基礎資料とするため、走行条件(速度、区間、積載質量)毎に、過去の走行試験で得られた種々の実働応力ひん度分布から 10km 当たりの等価応力を計算し比較した例を示した。

文 献

- (1) Oda, Y. et al., Fatigue Life Estimation for Welds of Truck Frames for Rolling Stock Using Stress Frequency in Service Load, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 73, No. 734 (2007), pp. 67-72.
- (2) JIS E 4207-2004, Truck frames for railway rolling stock-General rules for design (2004).
- (3) Miyaishi, G. et al., Evaluation of Strength of Bogie Frames for High Speed Vehicles, *RTRI Reports*, Vol. 8, No. 7 (1994), pp. 19-24.
- (4) Oda, Y. et al., Characteristics of Stress Frequency in Welds of Vehicle Truck Frames by Service Load and Effect of Vehicle Running Conditions on Stress Frequency, *Proceedings of the 14th Transportation and Logistics Conference*, No.05-52 (2005-12), pp. 351-354.
- (5) Oda, Y. et al., Fatigue Life Estimation of Truck Frames Using the Case of Crack Occurrence and Stress Frequency in Service Load, *Proceedings of J-Rail2002*(2002-11), pp. 375-378.
- (6) JSSC Recommendation for Fatigue Design, *JSSC Vol.10 No.101*, (1974), Japan Society of Steel Construction.