

走行条件が台車枠溶接部の実働応力 ひん度分布に及ぼす影響

織田 安朝* 八木 毅*
沖野 友洋* 石塚 弘道**

Effect of Vehicle Running Conditions on Stress Frequency Distribution of Welds on Truck Frames

Yasutomo ODA Tsuyoshi YAGI
Tomohiro OKINO Hiromichi ISHIDUKA

It is important to obtain the stress frequency distribution caused by service load in order to estimate the fatigue life of 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 analysis of the effect of running conditions, which include running distance, speed and payload. The study results will be used to estimate the stress frequency distribution in the stage of design or modification of operating conditions of the vehicle truck frame.

キーワード：台車枠，応力ひん度，溶接，疲労，実働荷重，寿命予測

1. はじめに

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 4207²⁾（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付加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、①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する。②走行条件（速度、区間、積載質量）を変更した場合の10km当たりの等価応力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比較することにより、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する。

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

* 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

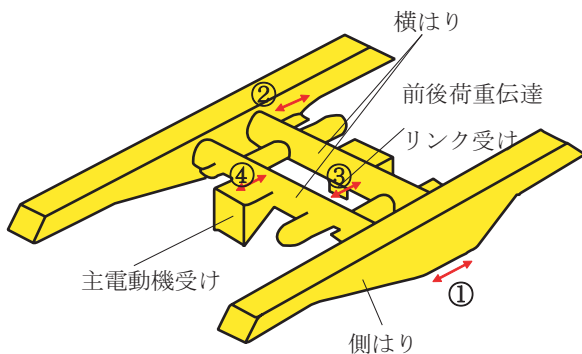
実働時の動的付加係数を求める方法は、以下による。

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。

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。

図中の○は高速車両が高規格の軌道を走行した場合、△は一般車両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重状態で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。



- ① 垂直荷重算出用測点
- ② 左右荷重算出用測点
- ③ 前後荷重算出用測点
- ④ 主電動機荷重算出用測点

図1 台車各部荷重算出用測点の例

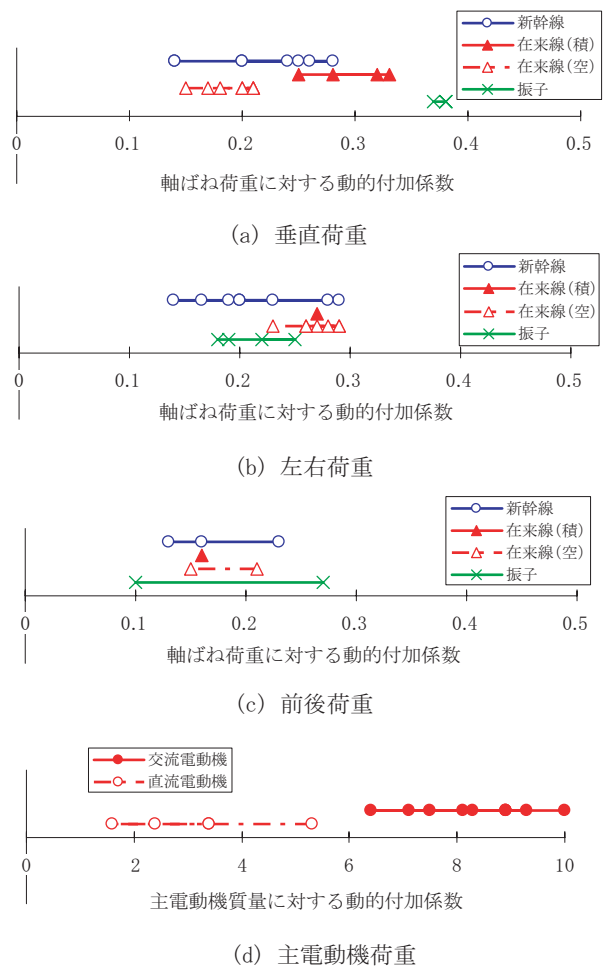


図2 JIS E 4207の動的付加係数で表示した実働荷重最大値

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程度に小型軽量化され、それに伴い主電動機重心と横はりの距離が伸び主電動機受けの断面形状も小さくなったこと等が原因として考えられる。なお、図2に示す例は、どれもJISにおける各荷重の動的付加係数、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の妥当性がうかがえる。

3. 走行条件が応力ひん度分布に及ぼす影響

走行条件が変更された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。

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

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、本報告の特集論文「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」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に関しては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

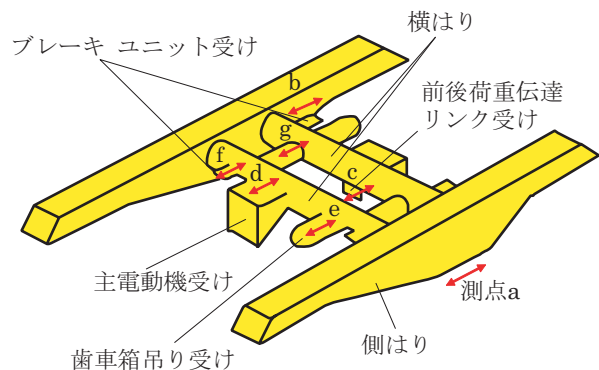


図3 応力測点の例

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。

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(図3のg)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 $n_i / 10km$ 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、通過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。

異なる線路等級の軌道を走行した時の比較のため、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) 走行時に対する2級線(class II track) ならびに4級線(class IV track) 走行時の等価応力の比 $\sigma_{eq class II track} / \sigma_{eq class I track}$ ならびに $\sigma_{eq class IV track} / \sigma_{eq class I track}$ を図5に示す。この例の場合、等価応力は、2級線走行では1級線走行の1.1~1.2倍、4級線走行では1.3倍程度である。

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に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級線走行時に対する4級線走行時の等価応力の比 $\sigma_{eq class IV track} / \sigma_{eq class I track}$ を荷重毎にまとめた結果を図7に示す。

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

特集：車両技術

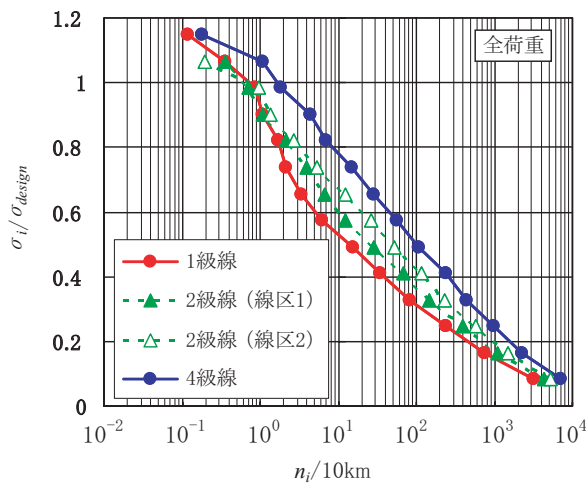


図4 異なる線路等級走行時の応力ひん度分布の例 (全荷重)

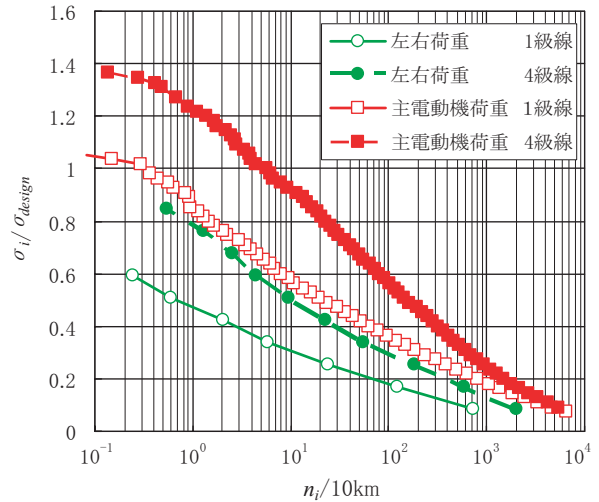


図6 異なる線路等級走行時の応力ひん度分布の例 (左右荷重, 主電動機荷重)

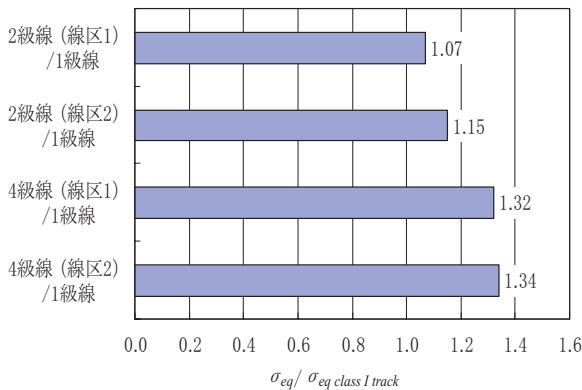


図5 1級線に対する2級線ならびに4級線走行時の等価応力の比

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, 50kmの一部区間を走行した時の応力ひん度分布の比較を行った結果を図8に示す。図8において, (a) と (b) の路線は異なる。

これらの結果から, 試験走行が一部区間であっても, 最大値近傍の高応力部がやや異なる程度で, 等価応力も全線の方が1%大きい程度であり, ひん度分布の形状に大きな差は見られないことがわかった。したがって, 走行試験の走行距離は50~100km程度で実施すれば充分であると言える。

3.3 走行速度の影響

高速走行試験区間 (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_{eqv_0} として, 速

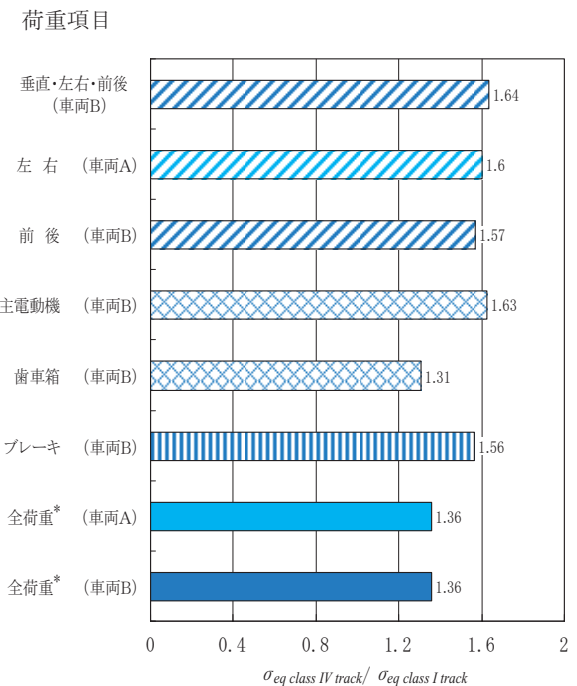


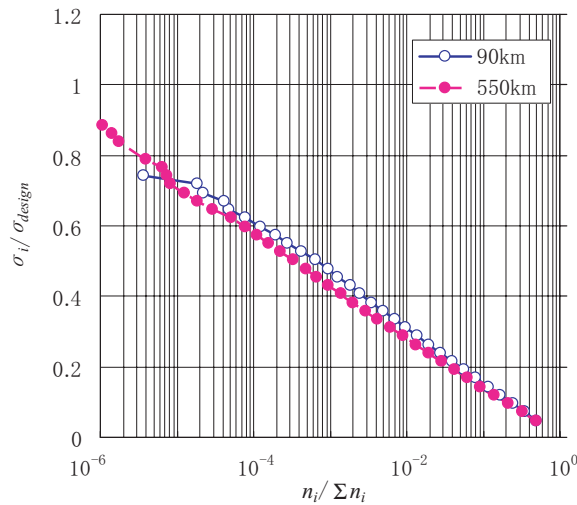
図7 荷重項目別の1級線に対する4級線走行時の等価応力の比

度の比 v/v_0 と等価応力の比 $\sigma_{eq}/\sigma_{eqv_0}$ の関係として図9および図10に示す。

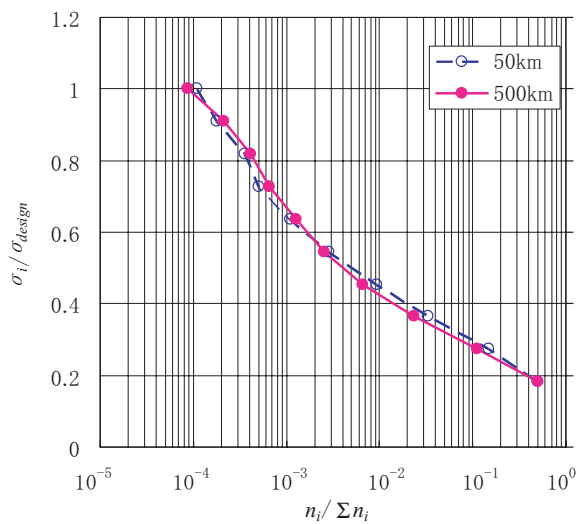
図中にプロットした各記号は応力測定位置の違いを示しており, 測定位置による違いはあるが, 等価応力の比は速度の比に概ね比例する傾向が見られる。ただし, 測定位置によって, 特に 240km/h 以上では速度の比の2乗に比例して増加する場合も見られる。

3.4 積載重量の影響

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程度まで荷重を積載した状態 (以下, 積車と呼ぶ) および空車で



(a) A線



(b) B線

図8 走行区間長の影響

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、積載重量の影響について荷重毎にまとめた結果を図12に示す。

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ものに対し、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、積載荷重によ

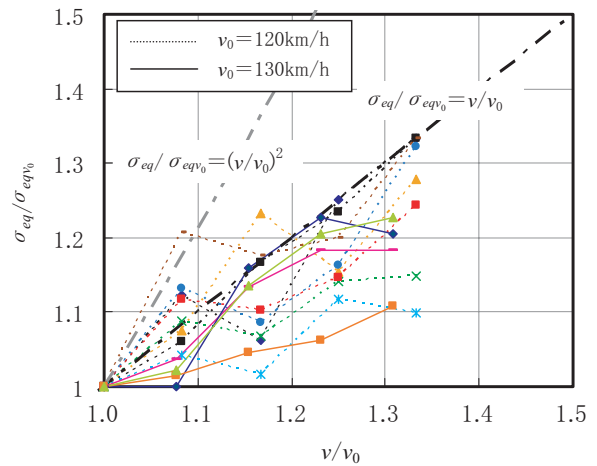


図9 走行速度の影響 ($v_0 = 120\text{km/h}, 130\text{km/h}$)

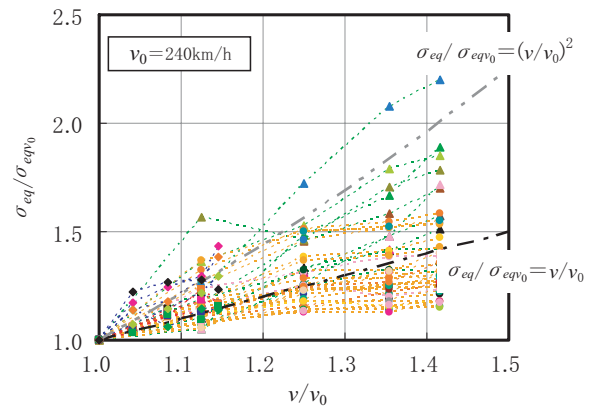


図10 走行速度の影響 ($v_0 = 240\text{km/h}$)

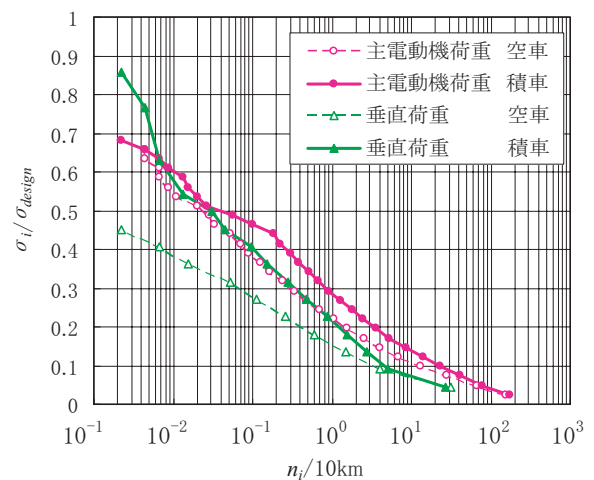


図11 積車と空車の応力ひん度分布の比較例

る影響をそれほど受けない傾向が見られる。

以上の検討結果を用いて、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

特集：車両技術

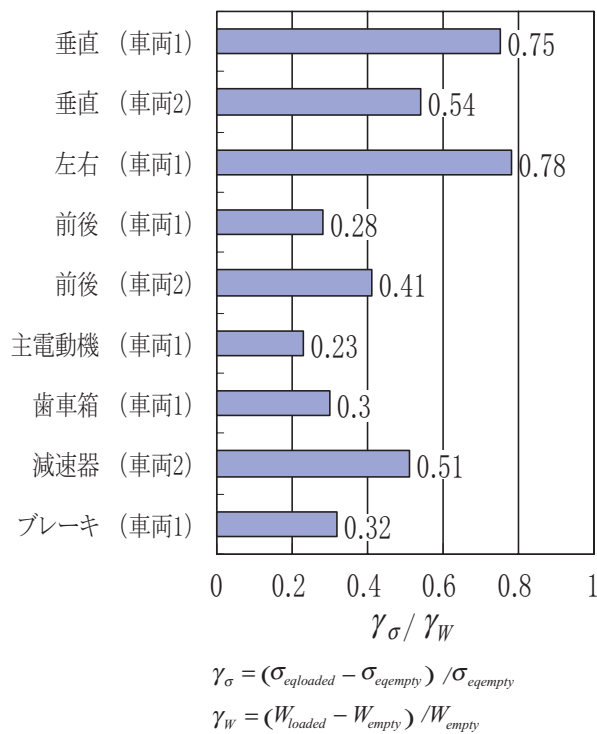


図 12 積載重量の影響

力値に走行条件毎に比較した10km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. まとめ

- (1) 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、その例を示した。

- (2) 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、積載重量）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。これらを用いて、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10km当たり等価応力の比を乗じることにより、概ねの分布を推定できるようにした。

文献

- 1) 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
- 2) JIS E 4207-2004, : 鉄道車両-台車-台車枠設計通則, 2004
- 3) 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
- 4) 織田安朝, 八木毅, 沖野友洋: 台車枠溶接部の実働応力頻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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 織田安朝, 八木毅, 沖野友洋, 石塚弘道: 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頻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. 74, No. 742, pp. 873-878, 2008