

1703 走行線区の違いが台車枠強度に与える影響に関する研究

○鈴木 和馬 山之口 学 石原 鋼 (西日本旅客鉄道株式会社)

正 [機] 織田 安朝 八木 毅 (鉄道総合技術研究所)

Influence of Different-Grade Track Lines on Truck Frame Strength

Kazuma SUZUKI, Manabu YAMANOKUCHI, Tsuyoshi ISHIHARA (West Japan Railway Company)

Yasutomo ODA, Tsuyoshi YAGI (Railway Technical Research Institute)

Fatigue damages on truck frames of rolling stock running on local lines are sometimes detected. The cause of these fatigue damages is conceivable as stress values in service load exceed those estimated in design stage. We report the result regarding the measurement of service load and the influence of different-grade track lines on fatigue strength by the investigation on running tests.

Keywords: service load, truck frames, stress limit diagram, ratio of equivalent stress

1. はじめに

鉄道車両において台車が担う役割は、車体を支持しレールに案内されて安定して走行することであり、台車枠に求められる要件として、十分な強度を持ち損傷しないことが求められる。

しかし近年、JIS E 4207 設計通則 (以下、JIS) に準拠しているにもかかわらず、主にローカル線を走行する車両において、台車枠の損傷発生などの不具合が見られる場合がある。その原因として、台車枠に設計時の想定を超える荷重がかかることで、損傷を与えるような変動応力が発生している可能性がある。また、今後ローカル線へ転配される車両の台車にも同様のことが発生することも懸念される。

そこで本取り組みでは、走行線区の違いによる「台車枠にかかる荷重の実態」、および「疲労強度に与える影響」を調査した。これらの項目を整理することで、異なる線区を走行する車両にて、軌道状態と台車枠強度の関連性を明らかにすることを目的とする。

2. 台車枠強度の考え方

2.1 走行中の台車枠にかかる力

走行中の台車枠には、部品の振動等により各部に荷重が作用し、各部を構成する母材部や溶接部などに変動応力が発生する。そのため、台車枠の強度を考える際には、走行中の台車枠に作用する荷重について、あらかじめ想定される値を見積もっておく必要がある。

2.2 一般的な台車枠強度の考え方

台車枠に対して、走行を想定した変動荷重値を入力として加えることで応力が出力される。この応力が基準内にあることを確認する。台車枠強度の考え方として、一般的な流れを以下に示す。

- ① JIS に定められている変動荷重の範囲に基づき、事業者とメーカーにて負荷荷重を設定する
- ② FEM 解析等による強度設計を行う
- ③ 静荷重試験を実施し、発生する応力が JIS の応力限界図の基準内にあることを確認する

④ 本線走行試験を実施し、発生する応力が JIS の応力限界図の基準内にあることを確認する

2.3 実態を調査する必要があると考える点

これまで台車枠設計の際には、走行時の変動荷重を想定し、静荷重試験および本線走行試験により変動応力を測定して強度の確認を行ってきたが、荷重そのものの実態を調査したことはなかったため、走行線区の違いによる影響度と併せ、実態を把握する必要がある。また、これまでアーバン線区を走行していた車両がローカル線に転用される場合など走行線区や走行条件が変わる際に、疲労強度に与える影響についても調査を実施する必要がある。

3. 測定点の選定について

走行試験に先立って静荷重試験を実施し、目的に応じて荷重測定点、応力測定点の 2 種類のひずみゲージを貼付し、以下のように走行試験時の測定点を選定した。

3.1 荷重測定点

走行中の台車枠にかかる荷重を、測定するためには以下の 2 点を考慮してゲージを選定する必要がある。

- ① 荷重 - 応力がリニア特性となる
- ② 対象とする 1 方向のみの荷重に反応する

Fig. 1 に荷重 - 応力グラフの例を示す。ひずみゲージから得られる応力に、測定点ごとの係数をかけることで荷重が推定できる。

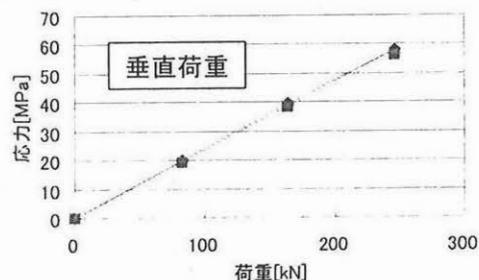


Fig. 1 荷重と応力の関係

3.2 応力測定点

台車枠の疲労強度を判定するため、高い応力が発生する箇所を選定する。

4. 変動荷重の実態把握

4.1 付加係数

変動荷重の大きさを表す指標として、付加係数を用いる。付加係数とは、車両が走行している状態で台車枠各部に作用する変動荷重を静止状態における荷重との比で表した値であり、その大きさは発生が予想される振動による荷重の大きさを考慮し、事業者とメーカーとの協議によって決める。なお、JIS にその範囲が示されている。

設計時において「想定した付加係数」と、測定した実働荷重から求めた「実働付加係数」について実態把握を行った (Fig. 2)。

$$\begin{aligned} \text{設計時の変動荷重} &= \text{想定した付加係数} \times \text{部品質量} \times g \\ \text{実走行中の変動荷重} &= \text{実働付加係数} \times \text{部品質量} \times g \end{aligned}$$

g: 重力加速度

試験で実態を把握する

Fig. 2 付加係数の実態比較

4.2 測定条件

測定は、在来線試験車 U@tech Mzc の台車 (軸はり式) にて行った。荷重および車体・台車枠・軸箱の加速度の測定部位について、Fig. 3 に示す。

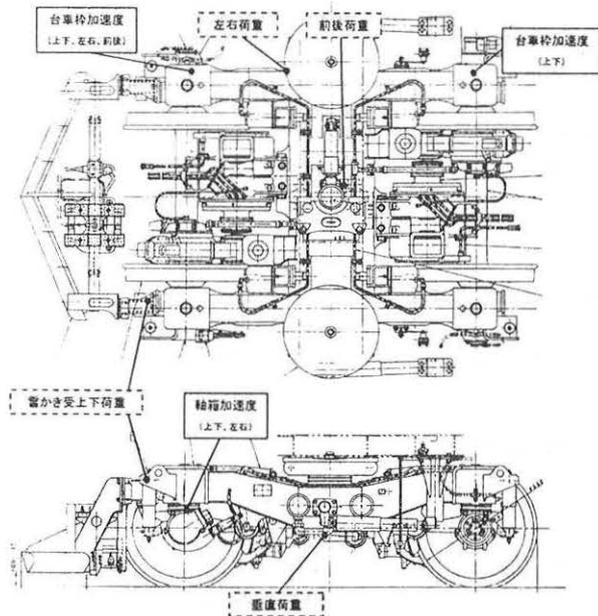


Fig. 3 荷重および加速度測定部位

4.3 走行条件

走行条件を Table 1 に示す。線路等級の異なる 3 線区を走行した。

Table 1 走行条件

| 線路等級 | 線区 | 走行区間 | 最高速度 |
|------|-----|--------|---------|
| 4級線 | 小浜線 | 敦賀～小浜 | 85km/h |
| 3級線 | 奈良線 | 京都～木津 | 90km/h |
| 1級線 | 神戸線 | 網干～大久保 | 130km/h |

4.4 結果

(1) 実働付加係数

荷重の実態把握に関して、実働付加係数と JIS の付加係数を比較した結果を Table 2 および Fig. 4 に示す。

車体の振動による垂直・左右・前後荷重の実働付加係数については、JIS で示されている範囲内であった。雪かき受上下荷重については、JIS の範囲を超える値が測定された。

Table 2 線区ごとの実働付加係数

| 荷重種類 | 実働付加係数 | | | 付加係数 (JIS範囲) |
|--------|--------|-------|-------|--------------|
| | 4級線 | 3級線 | 1級線 | |
| 垂直 | 0.25 | 0.22 | 0.19 | 0.2~0.5 |
| 左右 | 0.31 | 0.24 | 0.28 | 0.2~0.4 |
| 前後 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.2~0.4 |
| 雪かき受上下 | 16.40 | 11.41 | 12.57 | 5~10 |

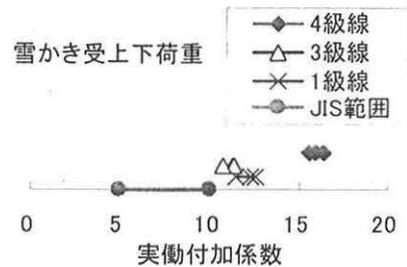


Fig. 4 雪かき受上下荷重の実働付加係数

(2) 著大値の発生状況による分類

想定値よりも大きい変動荷重 (著大荷重) の発生について、雪かき受上下荷重に着目してその発生時の状況を示したチャートを Fig. 5 に示す。軸箱上下加速度 1, 2 位および雪かき上下荷重を示す。

走行中にレール継目等を通じた際に、衝撃的に軸箱が上下に振動する。この振動は、台車枠や車体に伝わり、さらにその後周期性を持った振動として継続する場合がある。この軸箱振動継続区間および単発の継目振動に着目し、以下のように分類した。

- (A) … 周期的な軸箱振動の持続によるもの
- (B) … 単発の軸箱振動によるもの
- (AかつB) … A 区間における、B によるもの

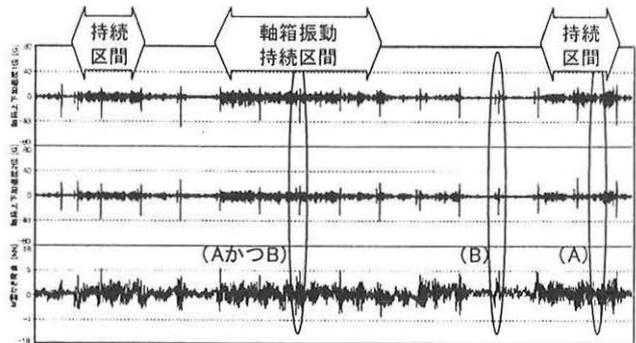


Fig. 5 雪かき受上下荷重の発生状況による分類

(3) 著大荷重の発生状況について

4 級、3 級、1 級の各線区での、著大荷重の発生回数および箇所について、Fig. 6 に示す。4 級線での発生が非常に多く、等級が上がるにつれて発生回数は少なくなっている。発生原因としては、雪かき受は周期的な軸箱振動の持続によるものが多い。

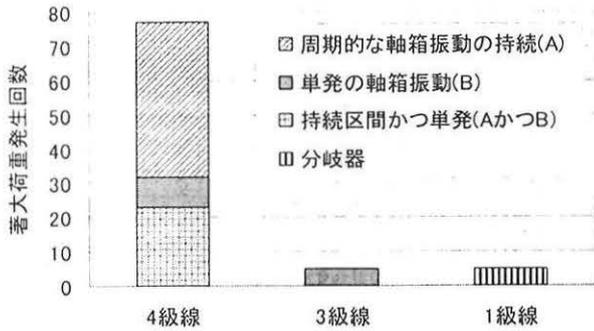


Fig. 6 雪かき受上下荷重の発生状況

(4) 周波数の影響について

雪かき受上下荷重について、周期的な軸箱振動が顕著である区間について周波数解析した結果を Fig. 7 に示す。ピークが 34Hz 付近に見られ、これは事前に行った打撃試験によるピーク周波数と一致したため、固有周波数であると考えられる。また、軸箱の上下加速度のピーク周波数ともほぼ一致した。

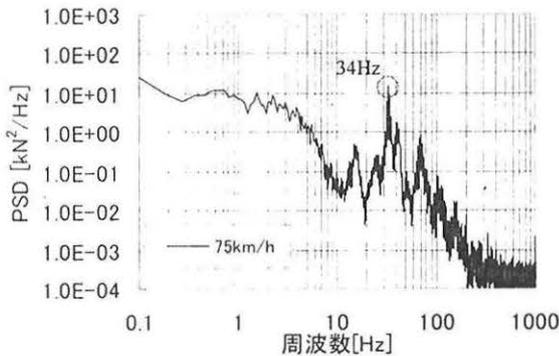


Fig. 7 雪かき受上下荷重の周波数解析

4.5 考察および今後の展開

雪かき受上下の実態荷重は JIS の範囲を上回っている。その発生状況としては固有振動数による周期的な振動で、走行することにより軌道を加振源とする軸箱の振動と一致する。

今後は発生状況と地上条件を照らし合わせて、発生原因の推定と対策について検討していく必要がある。また、加速度との関連性を調査することにより、車両の加速度を測定することで荷重を推定する手法の可能性についても検討する。

5. 線路等級の違いが疲労強度に与える影響の把握

5.1 疲労強度の考え方

(1) JIS の考え方

台車枠の疲労強度設計に対する考え方は、JIS に準拠して、発生応力が疲労限度の基準内に収まるようにすることである。すなわち、疲労により損傷させない設計である。

(2) 評価手法

台車枠の各部位が疲労損傷するかどうかを評価するには、JIS の応力限界図を用いる (Fig. 8)。これは、変動応力を縦軸に、平均応力を横軸にとって測定点ごとに値をプロットし、許容範囲内であれば疲労損傷しないとすものである。疲労許容応力 (疲労の基準となる応力)

が異なるため、母材部・溶接部 G 仕上げ・溶接部非仕上げの 3 種類に分類している。

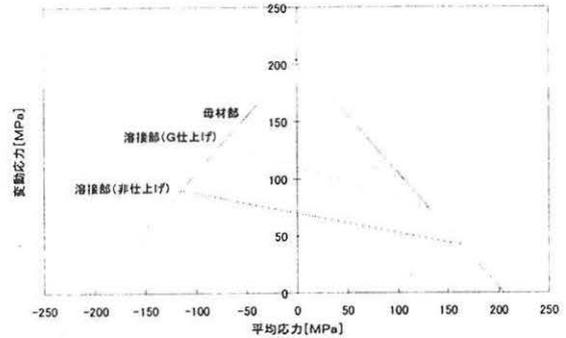


Fig. 8 応力限界図

5.2 走行線区の違いによる影響把握のための手法

(1) 考え方

2.3 でも述べたように、これまでアーバン線区を走行していた車両がローカル線へ転用されていくという実情を鑑みると、転配を行う前に机上にて強度検討を行うことが重要である。すなわち、要注意部位の変動応力が、走行線区が変わるとどの程度変わる可能性があるのか、またそれによって疲労許容応力を超えるかどうかを判定するための手法を検討する必要がある。線区が変わる場合の強度評価をするためには、実働応力の頻度を考慮することが重要である。

(2) 10km 当たり等価応力

10km 当たり等価応力 (σ_{eq}) とは、ある区間を走行した場合に発生する応力頻度分布を 10km 当りに換算して、単発で等価な疲労被害を与える応力に置き換えるものであり、式 (a) で表される。

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

ここで、 n_i : 10km 当たりの実働応力の頻度、 s_i : n_i に対応した実働応力、 m : S-N 線図の傾きの逆数の絶対値である。

応力頻度分布は、実働応力の時間軸波形にレインフロウ法により頻度を計数し、応力-頻度の関係を表したものである。等価応力は応力-頻度分布の指標であり、寿命の算定や異なる条件の応力頻度分布を相対的に数値で比較するのに用いられる。また鉄道総研の過去の研究結果¹⁾から、 $m=5.5$ とすることで 10km 当たり等価応力値が最大応力値とほぼ一致することから、応力頻度分布の指標である「等価応力」を「最大応力」に置き換えることが可能となるため、応力頻度分布を考慮した評価と、最大値に基づく応力限界図評価との関連付けができる。ここでは、等価応力の比を用いて、以下のような検討を行う。

(3) 等価応力比

等級の異なる線区ごとに 10km 当たり等価応力を求め、1 級線を基準として 3 級線、4 級線の等価応力比をそれぞれ部位ごとに算出する。

(4) 等価応力比の算出により可能となること

現状の基準となる応力頻度分布に等価応力比を乗じる

ことで、走行条件変更後の概ねの分布を得ることができ
る²⁾。即ち、Fig. 9において既存車の1級線走行データ
(A)があれば、等価応力比を乗じることで3、4級線に
転配される際の強度判定(B)が、応力限界図により可
能となる。疲労許容応力を超過しなければ、線区が変わ
っても強度は十分であると考えられる。

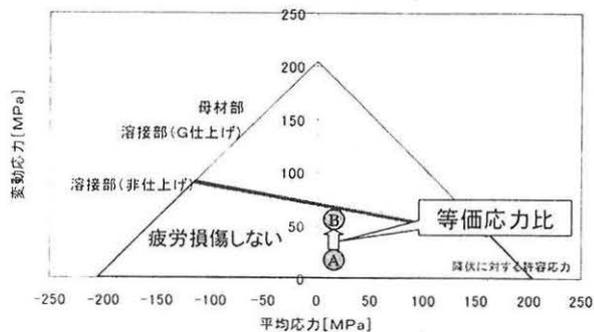


Fig. 9 等価応力比の適用による評価

5.3 測定条件

4.2の加速度測定条件に加え、各部の応力を測定した。
測定点についてFig.10に示す。

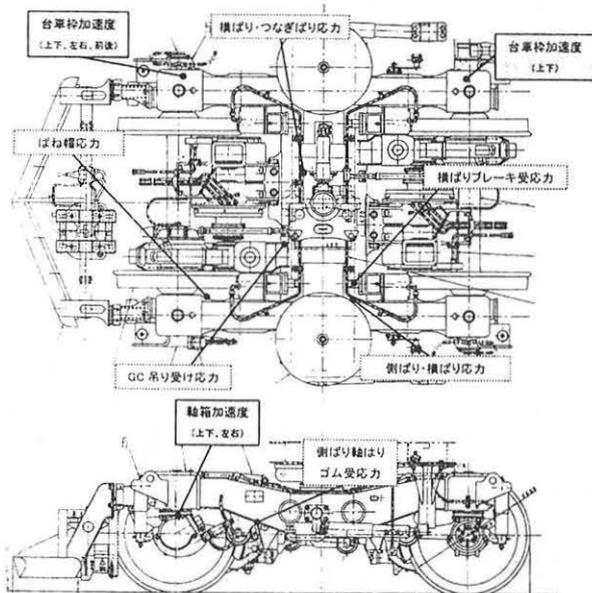


Fig. 10 応力および加速度測定部位

5.4 走行条件

4.3と同様、3線区を走行した。

5.5 結果

測定した結果を、Table 3に示す。全ての測定点におい
て、等価応力比は3級線よりも4級線の方が大きくなっ
ているため、4級線の方が疲労強度に対して厳しい条件
といえる。

Table 3 等価応力比の算出

| 部位 | 等価応力比 | |
|--------------|-------|-------|
| | 4級/1級 | 3級/1級 |
| 側ばり軸はりゴム受接合部 | 1.55 | 1.26 |
| ばね帽接合部 | 1.82 | 1.18 |
| 横ばり・つなぎばり接合部 | 1.89 | 1.21 |
| GC吊受歯車箱吊受接合部 | 1.87 | 1.27 |
| 側ばりばね帽接合部1位側 | 1.92 | 1.07 |
| 側ばり・横ばり接合部 | 1.52 | 1.20 |
| 横ばりブレーキ受接合部 | 1.56 | 1.20 |

5.6 考察および今後の展開

ばね帽部のように側ばり端部の部位は、4級線での等
価応力比が大きい。これは、JISの付加係数の範囲で示
されるように、側ばり端部ほど大きく加振されるため
であると考えられる。

得られた等価応力比を既存車に適用する際には、ゲー
ジ位置や構造の違いなどを見極めた上で行う必要がある。

6. まとめ

走行線区の違いによる「台車枠にかかる荷重の実態」、
および「疲労強度に与える影響」の調査を行った。

1) 雪かき受上下の実態荷重はJISの範囲を上回っており、
その発生状況としては固有振動数により周期的に振
動する。また、走行することにより軌道を加振源とする
軸箱の振動とも一致する。

このことから、発生状況と地上条件を照らし合わせて、
発生原因の推定と対策について検討していく必要があ
ると考えられる。さらに、加速度との関連性から、車両
の加速度を用いて荷重および応力を推定する手法の可能
性についても検討していきたい。

2) 全ての測定点において、等価応力比は3級線よりも
4級線の方が大きくなっているため、4級線の方が疲労
強度に対して厳しい条件であるといえる。なお、得られ
た等価応力比を既存車に適用する際には、ゲージ位置
や構造の違いなどを見極めた上で行う必要がある。

今後、軌道状態と台車枠強度の関連性について継続
的に取り組みを行い、境界問題の研究をさらに進めてい
く必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 織田安朝, 八木毅, 沖野友洋, 石塚弘道(2009)「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」『鉄道総研報告』23(4), 17-22.
- 2) 織田安朝, 八木毅, 沖野友洋, 石塚弘道(2009)「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」『鉄道総研報告』23(4), 23-28.