

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

振動加速度を用いて 台車枠の荷重を推定する

鉄道車両の台車枠は、車体を支える重要な部品です。そのため、荷重が繰返し作用し、疲労破壊で折損してしまうと、走行安全性は保てません。台車枠に疲労き裂が発生しないようにするためには、走行時に台車枠各部に繰返し作用する荷重等を適切に捉えて強度評価を行うことが重要です。そこで、比較的簡易に測定できる振動加速度を用いた、台車枠強度評価のための荷重推定法を開発しましたので紹介します。



八木 毅

Tsuyoshi Yagi

車両構造技術研究部
車両強度研究室
主任研究員

【専門分野】台車枠の強度評価、材料強度物性学

鉄道車両の台車枠

鉄道車両の台車枠(☞参照)は、図1のように車輪・車軸(輪軸)と車体の間にあり、車体等の荷重をすべて支えています。走行安全性を確保するためには、台車枠の一生を通じて、疲労破壊(☞参照)による折損が発生しないように設計する必要があります。そのため、新製時の運用計画等に基づき、台車枠に作用する荷重を想定し、静荷重試験や走行試験により台車枠強度評価が行われています。

一方、使用線区を変更する場合には、走行時に台車枠各部に作用する荷重(以下「台車枠荷重」といいます。)が設計時

☞ 台車枠

一般的な台車枠は、圧延鋼板、鋼管等の鉄鋼材料を用いた溶接構造になっています。台車枠には、車体等による静的な荷重に加えて、走行時には振動、駆動、制動等による動的な荷重が作用します。

☞ 疲労破壊

一度に破壊してしまわない程度の荷重が繰返し負荷されることによって、徐々にき裂が進展して破壊することを疲労破壊といいます。

に想定された値を上回る場合も考えられます。その場合には、台車枠に疲労き裂が発生しないようにするため、台車枠荷重または応力(☞参照)を把握し、あらかじめ強度評価を行う必要があります。

台車枠強度評価

従来の台車枠強度評価は、JIS E 4207:2004「鉄道車両-台車-台車枠設計通則」(以下「JIS」といいます)に基づき行われてきました。

まず、過去の疲労き裂発生事例等を考慮しながら、あらかじめ台車枠に対する有限要素法等で応力解析を行い、試験荷重を負荷したときに高い応力が発生する箇所等に着目して、図2のようにひずみゲージ(☞参照)を貼付します。JISによる静荷重試験では、台車枠に上下、左右、前後等に負荷し、さらに主電動機やギアケース等の取付部品の受(うけ)にも負荷します。各荷重により発生する応力をひずみゲージ

☞ 応力

様々な形の物体の強さを評価するときには、物体の形状に依存しないように、単位断面積当たりの力で検討します。これを応力といいます。

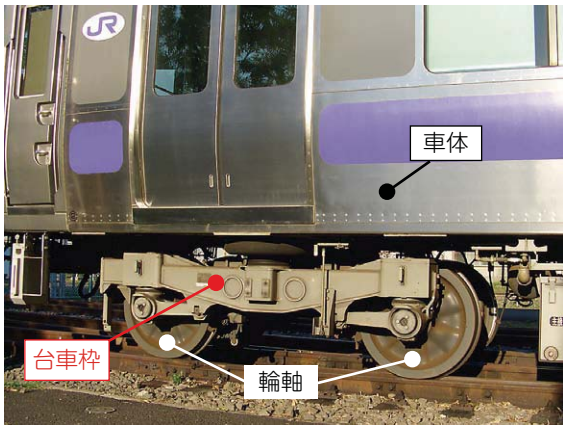


図1 鉄道車両の台車枠

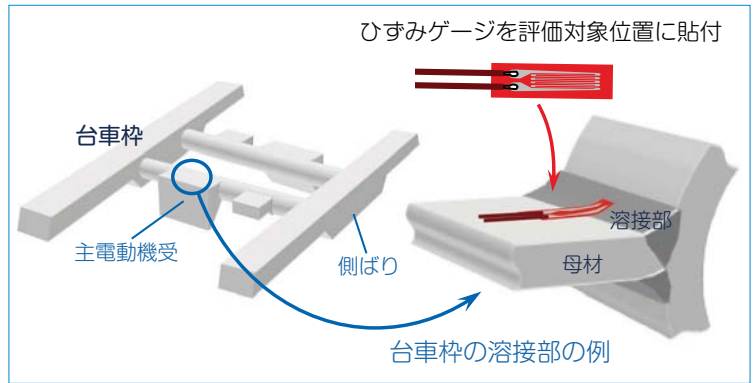


図2 ひずみゲージの貼付

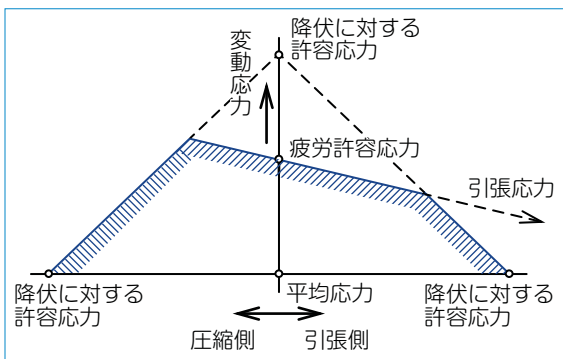


図3 JIS E 4207の応力限界図

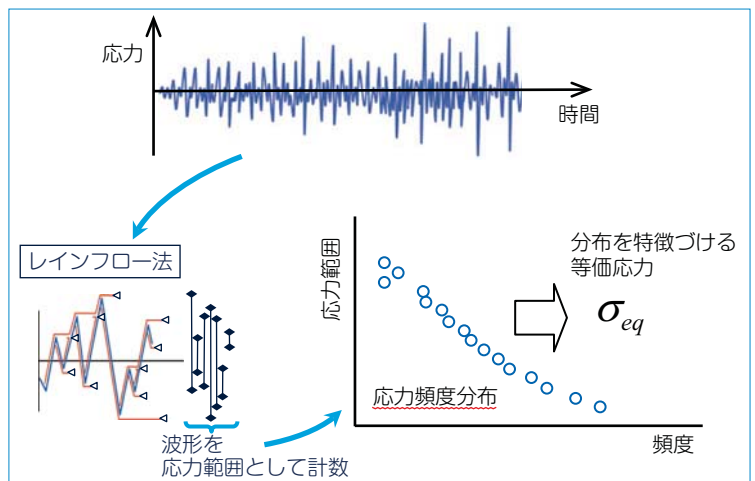


図4 応力頻度分布

により求め、台車枠に平均的に発生すると考えられる平均応力、および振動、駆動、制動等により動的に発生すると考えられる変動応力をJISの計算法に従って算出します。そして、JISの応力限界図(図3)にプロットすることにより台車枠強度評価を行っています。

また、走行試験において走行時に発生する変動応力を実測し、静荷重試験で求めた平均応力と合わせて応力限界図にプロットし、同様に台車枠強度評

価を行います。静荷重試験では、走行時の負荷荷重を推定して行いますが、走行時を再現しているとは限りませんので、必ず走行試験を行うべきです。

ここで、静荷重試験における負荷荷重は設計条件の一つであることから、台車枠強度評価において台車枠荷重に着目することは重要と考えられます。

等価荷重とは

走行時の台車枠に発生するひずみゲージで測定した応力波形は、図4上のようにランダムな波形です。通常は、応力波形の最大応力振幅を変動応力として応力限界図にプロットします。一方、この波形に一般的な計数法であるレインフロー法という方法を用いれば、図4下のようにそれぞれの応力範囲成分の発生回数を示す応力頻度分布が求まります。つまりひずみゲージを貼付

した部位は、応力頻度分布で示されるような応力範囲がその発生回数だけ作用し、き裂が発生していても、目に見えないような損傷が蓄積されている状態と考えられます。分布を特徴づける値として、一回の作用で上記の損傷状態となる応力振幅(以下「等価応力」といいます。)に置き換える方法¹⁾²⁾があり、過去の研究¹⁾から、10km走行あたりの等価応力を応力限界図にプロットすることにより強度評価を行うことができると考えられています。さらにひずみゲージで測定した応力と台車枠荷重が比例関係にある場合には、10km走行あたり等価応力に相当する荷重を等価荷重として台車枠強度評価に利用できると考えられます。つまり、使用線区を変更する場合には、新たな線区等での等価荷重を推定すればよいことになります。

ひずみゲージ

物体が伸縮変形する場合、もとの長さに対する伸縮量の比をひずみといいます。ひずみゲージは、その伸縮時の電気抵抗変化を計測することにより、貼付した物体のひずみを捉えることができます。主な貼付手順は、①塗装等の除去、②研磨、③脱脂、④けがき、⑤接着、⑥結線、⑦コーティング、等となります。ひずみに縦弾性係数を乗じて応力が求まります。

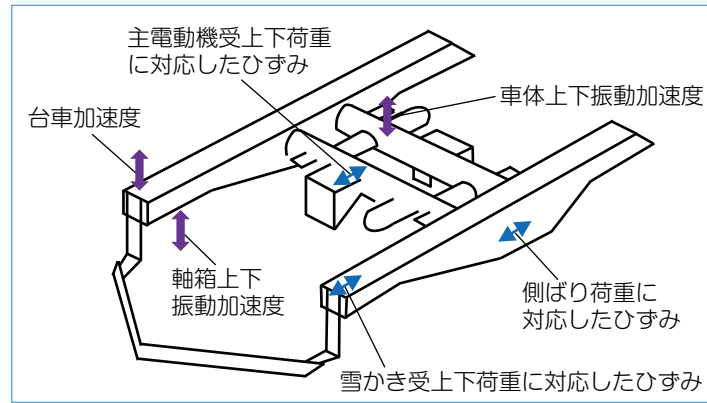


図5 測点図

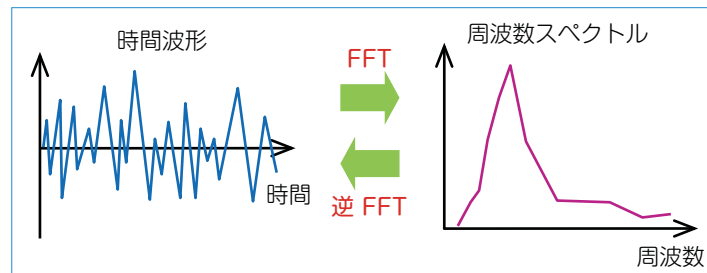


図6 FFTと逆FFT

簡易な測定

走行時の応力や台車枠荷重の測定は、図2のようにひずみゲージを台車枠に貼付して走行試験を行う方法なので、測定に多大な労力とコストがかかります。そこで、何度もひずみゲージを使った測定をせずに、比較的簡易に測定できる振動加速度を用いた台車枠強度評価のための荷重推定法³⁾について紹介いたします。

走行時に変動が大きい側ばり荷重、主電動機受上下荷重および雪かき受上下荷重、ならびに軸箱上下振動加速度、輪軸を支持するばね上部の台車枠上下振動加速度(以下「台車加速度」といいます。)および当該台車直上の車体上下振動加速度に着目し、在来線で走行試験を実施しました。各台車枠荷重が発生したときにひずみが顕著となる位置にひずみゲージを貼付し、測定されたひずみから荷重を求めました。ひずみおよび振動加速度の測点と測定方向を図5に示します。

一般的に、ひずみゲージは正確な位

置に貼付することが求められ、さらにひずみゲージの破損防止のためにコーティング等の後処理も必要です。また、着目する台車枠荷重にもよりますが、在姿のままでは貼付しづらい位置になることも多くなります。それに比べ、振動加速度計の取り扱いや設置は容易です。つまり、振動加速度の測定は比較的簡易に行うことができます。

振動加速度と台車枠荷重との関係

走行試験結果から振動加速度と台車枠荷重との関係を調査しましたが、同一時間の対応においては、明確な相関は見られませんでした。これは、本質的な相関がない可能性も考えられますが、むしろ振動加速度の測定位置とひずみの測定位置が異なることが一つの要因と考えられます。

一方、振動事象は、固有の周波数特性を持っていることが多く、時間領域での関係だけではなく、周波数領域での関係を検討することが重要です。

そこで、時間の関数である各振動加速度と各台車枠荷重に対し、図6のように高速フーリエ変換(以下「FFT」といいます。)により、周波数の関数となるそれぞれの周波数スペクトルを求め、1入力(振動加速度)1出力(台車枠荷重)モデルとして伝達関数を計算しました。この伝達関数は、周波数の関数であり、二つの周波数スペクトルの比を表しています。また、二つの周波数スペクトルの関連度を求めたところ、台車加速度と各台車枠荷重の関連が比較的深いことがわかりました。

振動加速度を用いた荷重推定法

例として、車両の使用線区を幹線(A線)からローカル線(B線)に変更する場合を想定しています。あらかじめA線で台車加速度と台車枠荷重との関係を求めておき、B線の台車加速度のみを測定することによって、B線での台車枠荷重を推定します。荷重推定法により台車枠強度評価を行う手順は以下のようになります。

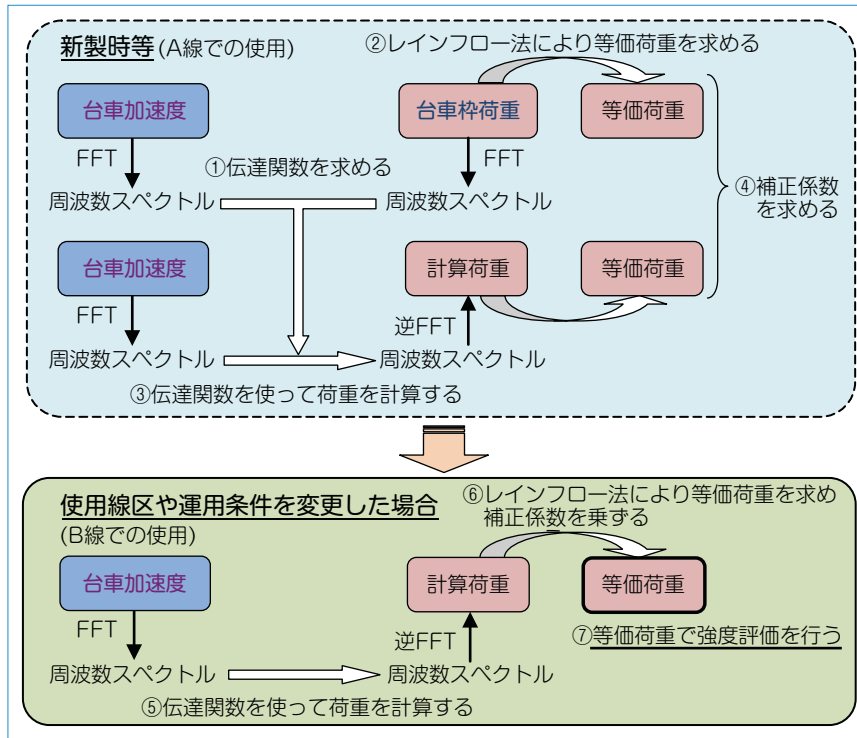


図7 荷重推定法の概要

- (1) 台車の新製時等に、A線での台車加速度と台車枠荷重の周波数スペクトルから伝達関数を求めておきます(図7①)。台車加速度と台車枠荷重の伝達関数は、それぞれの測定位置が決まれば、台車固有のものであります。
- (2) A線での台車枠荷重からレインフロー法により台車枠荷重頻度分布を求めて等価荷重(図7②)を計算します。
- (3) (1)の伝達関数を使って、A線における台車加速度の周波数スペクトルに伝達関数を乗じて台車枠荷重の周波数スペクトルを求め、逆FFTにより計算した台車枠荷重(以下「計算荷重」といいます。)(図7③)からレインフロー法により計算荷重頻度分布を求めて等価荷重を計算します。
- (4) (2)および(3)で求めた二つの等価荷重の比(以下「補正係数」といいます。)を求めておきます(図7④)。

- (5) 車両の使用線区をA線からB線に変更した場合、B線で台車加速度のみを測定します。
- (6) B線における台車加速度の周波数スペクトルに伝達関数を乗じて台車枠荷重の周波数スペクトルを求め(図7⑤)、逆FFTにより時間波形の計算荷重を計算します。
- (7) レインフロー法により計算荷重の頻度分布を求めて等価荷重を計算し、補正係数を乗じたものを強度評価に用いる等価荷重とします(図7⑥)。
- (8) B線の等価荷重に相当する等価応力を求め、応力限界図(図3)にプロットすることにより台車枠強度評価を行います(図7⑦)。

おわりに

評価対象台車枠の伝達関数を新製時等に求めておけば、車両の使用線区や運用条件を変更した場合に、振動加速度のみを測定することにより、台車枠強度評価のための等価荷重を推定する

ことが可能になると考えています。

走行安全性に支障を及ぼすような台車枠の折損等が起こらないように、ここで紹介した比較的簡易な方法による台車枠強度評価等で、少しでもお役に立ちたいと考えています。RRR

文献

- 1) 織田安朝, 八木毅, 沖野友洋, 石塚弘道: 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, Vol.23, No.4, pp.17-22, 2009
- 2) 織田安朝, 八木毅, 沖野友洋, 石塚弘道: 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, Vol.23, No.4, pp.23-28, 2009
- 3) 八木毅, 山本勝太, 沖野友洋, 高垣昌和, 瀧上唯夫, 富岡隆弘: 振動加速度を用いた台車枠の荷重推定法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.3, pp.29-34, 2012