

有限要素法を用いた電車線コネクタの疲労寿命推定手法

山下 主税* 小原 拓也* 松村 周*

Fatigue Life Estimation Method of Connector by using Finite Element Method

Chikara YAMASHITA Takuya OHARA Itaru MATSUMURA

Connectors between the contact wire and the messenger wire are always subject to fatigue damage due to vibrations caused by the passage of pantographs. However, in the conventional evaluation method of the vibration durability of the connector, actual vibration wave forms of overhead lines such as the contact wire and the messenger wire are not reproduced, and the dynamic characteristics of the connector depending on the shape and type of lead wire are not considered. The authors estimated the strain of the lead wire of connector by the finite element vibration analysis, and obtained the fatigue property curve of the lead wire by the rotary bending fatigue test. From these results, a fatigue life estimation method of connector against the actual vibration wave forms of over head lines has been newly developed.

キーワード：電車線コネクタ，疲労寿命，ひずみ波形，有限要素法，実働振動波形

1. はじめに

電気鉄道の電車線設備において、トロリ線やちょう架線などの線条間を電氣的に接続するコネクタは、一般的に銅より線を用いたリード線とイヤーおよびクランプで構成されている。現場におけるコネクタの主な不具合は、パンタグラフ通過時の電車線振動に伴うコネクタリード線の疲労断線であり、抜本的なコネクタ疲労対策や耐疲労性を有するコネクタの開発が求められている。

従来、コネクタを含む電車線金具の振動耐久性評価は、JIS E 2002¹⁾ や JIS E 2201²⁾ に規定される振動試験に準拠して実施されてきた。JIS 規格では、コネクタのトロリ線側のみを正弦波加振し、その条件は加振回数 2×10^6 回、振動数 3 ~ 5Hz、両振幅 20mm と定められている。ただし、コネクタの動特性はリード線取り回し形状や線種に依存した周波数特性を有するため、JIS 規格のように特定の振幅・周波数での正弦波加振試験で、パンタグラフ通過時の実働振動波形に対する振動耐久性を的確に評価できるかは不明である。さらに、現場ではトロリ線のみならずちょう架線も振動しているため、トロリ線側のみを加振する JIS 規格では、現場の振動条件を再現していないことになる。

そこで、トロリ線とちょう架線間に設ける MT コネクタを対象に、有限要素法を用いて現場の電車線振動状況

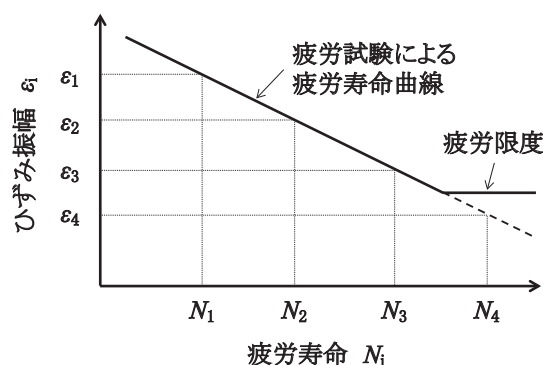


図1 累積疲労損傷度評価法

やコネクタの動特性を再現した振動解析を行い、実働振動波形に対するコネクタ疲労寿命の推定手法を開発したので報告する。

2. 累積疲労損傷度評価手法

パンタグラフ通過時に、コネクタリード線に発生するひずみ波形は正弦波ではなく、様々な周波数や振幅が重畳したいわゆる実働波形である。実働負荷を受ける疲労寿命を推定する一般的な手法として、累積疲労損傷度評価法がある³⁾。この手法は、図1に示すような部材の疲労寿命曲線と部材に発生するひずみ頻度を用いて、当該実働波形に対する疲労寿命 N_f を次式で計算するものである。

* 電力技術研究部 集電管理研究室

$$N_f = \sum N_i/n_i \quad (1)$$

ここで、 N_i は振幅 ε_i のひずみに対する疲労寿命、 n_i は当該実働波形に含まれるひずみ振幅 ε_i の発生頻度である。非鉄金属のように疲労限度が明確でない材料に対して、図1に示す破線のように疲労限度以下まで疲労寿命曲線を延長する手法を「修正マイナー則」という。修正マイナー則を用いて電車線コネクタの疲労寿命を推定するためには、①パンタグラフ通過時のリード線に発生するひずみ波形、②コネクタリード線の疲労寿命曲線が必要となる。

3. 有限要素法を用いたコネクタ振動解析

パンタグラフ通過時のコネクタリード線に発生するひずみ波形を推定するため、有限要素法による振動解析を実施した。有限要素法解析によって、トロリ線およびちょう架線の振動波形をコネクタに与えることが可能となり、またリード線の取り回し形状や線条特性の変更が容易となる。ただし、コネクタリード線であるより線をモデル化し、素線間の摩擦などを再現することは非常に困難である。

そこで、より線を仮想的に中実単線に置換し、図2に示す4種類の有限要素モデルについて、以降に述べる定置試験および解析により、仮想単線の特性を求めた。図2(a), (b), (c)は一般的に使用されているJ型、C型およびS型コネクタである。モデル作成および振動解析に用いたソフトウェアはSolidworksであり、リード線は細長い線条の曲げ解析に適した梁要素、その他金具はソリッド要素で作成した。解析時間を短縮するため、解析で扱う梁要素およびソリッド要素のサイズは10mmとした。

解析に先立ち、一般にコネクタリード線として使用される断面積40mm²の軟銅より線で、図2と同じ形状の実物供試体を製作し、静的負荷試験および加振試験を行った。振動試験機は鉄道総研が所有する「線条・金具振動試験機」を用いた。表1に静的負荷試験から求めた各供試体のばね定数、加振試験から求めた各供試体の1次共振周波数および対数減衰率を示す。なお、対数減衰率は片持ち梁試験体のみ算出した。

3.1 仮想単線のヤング率および半径

有限要素モデルにおける仮想単線のヤング率および半径を変化させることで、仮想単線の曲げ剛性が変化し、コネクタ全体のばね定数が変化する。そこで、仮想単線のヤング率を銅の123GPaで固定し、半径を1～2mmの間で0.2mm刻みで変えながら線形静解析を実施し、半径とばね定数の関係を求めた。解析条件として、図2(a), (b), (c)のコネクタモデルに対してはちょう架線

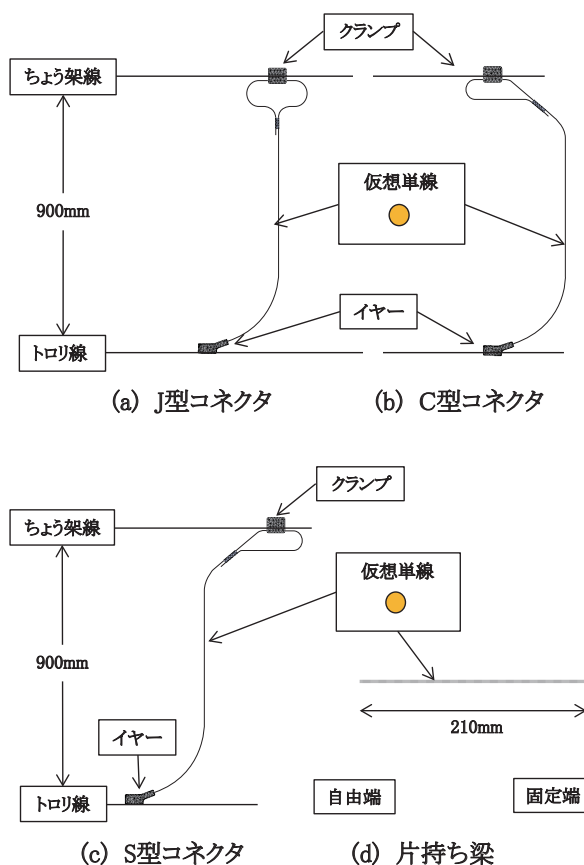


図2 コネクタおよび片持ち梁の有限要素モデル

表1 実物供試体の諸特性試験結果

	J型 コネクタ	C型 コネクタ	S型 コネクタ	片持ち梁
ばね定数 (N/mm)	0.58	0.29	0.45	0.14
1次共振 周波数 (Hz)	10.0	10.0	5.7	15.1
対数減衰率	—	—	—	1.34

を完全固定し、トロリ線を静的に2～5mm押し上げ、反力を解析することでばね定数を求めた。図2(d)の片持ち梁モデルに対しては、固定端を完全固定し、自由端から10mmの箇所には荷重0～4Nを負荷し、たわみを解析することでばね定数を求めた。

解析より求めた各モデルの仮想単線半径とばね定数の関係を図3に示す。各モデルのばね定数が表1と一致する仮想単線の半径はモデル形状によらずほぼ同等であり、その平均値は1.45mmであった。

3.2 仮想単線の密度

有限要素モデルにおける仮想単線の曲げ剛性と密度を変化させることで、コネクタの共振周波数が変化する。そこで、図2の各モデルについて仮想単線のヤング率を123GPa、半径を1.45mmとし、密度を10～60g/cm³の

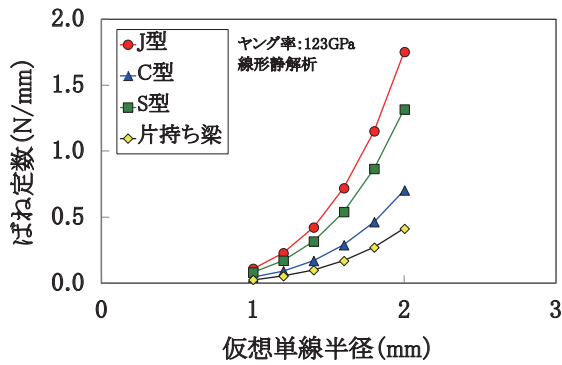


図3 仮想単線の半径とばね定数の関係

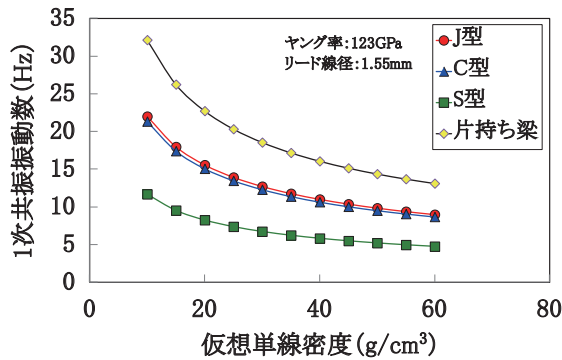


図4 仮想単線の密度と1次共振周波数の関係

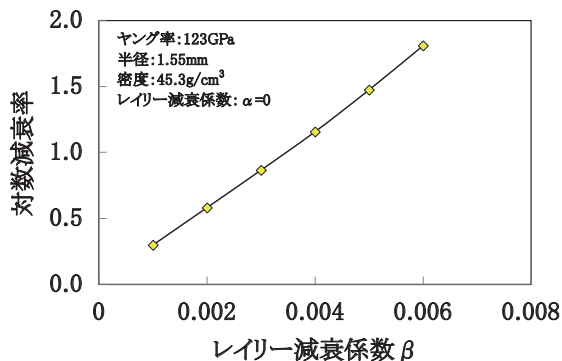


図5 仮想単線のレイリー減衰係数と対数減衰率の関係

間で 5g/cm^3 刻みで変えながら1次共振周波数を求めた。解析条件として、図2(a), (b), (c)のコネクタモデルに対してはちょう架線を完全固定し、トロリ線を振幅5mmで加振する調和解析を実施し、図2(d)の片持ち梁モデルに対しては固定端を完全固定するのみで共振解析を実施した。

解析より求めた各モデルの仮想単線密度と1次共振周波数の関係を図4に示す。各モデルの共振周波数が表1と一致する仮想単線の密度はモデル形状によらずほぼ同等であり、その平均は 45.3g/cm^3 であった。

3.3 仮想単線の減衰係数

コネクタリード線であるより線は、素線間の摩擦により大きな減衰特性をもつ。Solidworksではレイリー減衰

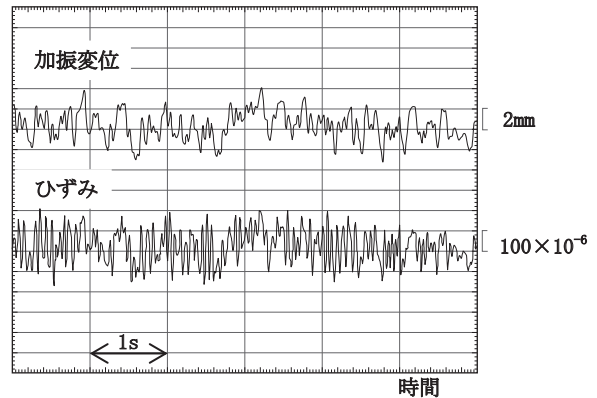


図6 疑似ランダム変位波形とリード線実測ひずみ波形

係数を用いて、実リード線の減衰を模擬する。図2(d)の片持ち梁有限要素モデルについて、仮想単線のヤング率を123GPa、半径を1.45mm、密度を 45.3g/cm^3 とし、解析上用いるレイリー減衰係数を $\alpha=0, \beta=0.001 \sim 0.006$ で変更して過渡解析を実施した。なお、片持ち梁試験体の共振周波数は表1に示すように約15Hzであり、1周期は0.067秒であるため、過渡解析は0.005秒刻みで実施した。

過渡解析結果より求めたレイリー減衰係数 β と対数減衰率の関係を図5に示す。この図において、片持ち梁モデルの対数減衰率が表1と一致する仮想単線のレイリー減衰係数 β は0.0045であった。

3.4 疑似ランダム波に対する振動解析結果

仮想単線の各特性値同定結果の妥当性を検証するため、実物コネクタで測定したひずみ波形と、有限要素解析によって推定したひずみ波形を比較した。用いたコネクタは図2(a)に示すJ型コネクタである。実加振試験ではちょう架線を固定し、トロリ線側に図6上に示す疑似ランダム波形を入力した。同様の波形を図2(a)に示すJ型コネクタモデルのトロリ線側に入力し、ちょう架線側を固定した条件で過渡解析を実施した。

加振試験においてひずみゲージで実測したリード線ひずみ波形と、有限要素法解析により求めたリード線ひずみ波形を図7に示す。また、両ひずみ波形についてFFT解析を行い、ひずみとトロリ線変位の伝達関数を求めた結果を図8に示す。

これらの図より、解析値のひずみ絶対値は実測値よりも大きくなるが、その倍率はほぼ一定であることがわかる。これは、実測に用いたひずみゲージがより線の素線よりも大きいいため、複数の素線を跨いで貼り付けた影響と考える。したがって、ひずみゲージでは実リード線の定性的な曲げ傾向は測定できても、定量的な曲げひずみを測定することは困難であると考えられる。また、図8より伝達関数の傾向が一致していることから、本研究で提案

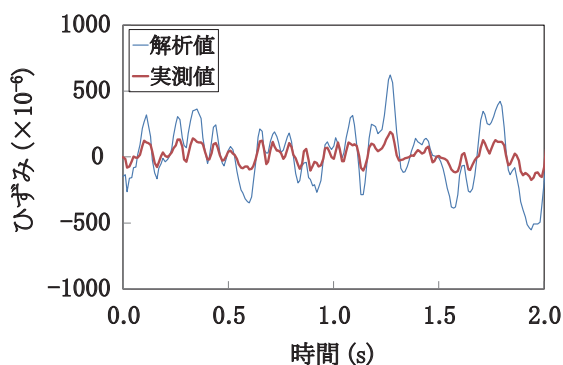


図7 リード線ひずみ波形比較

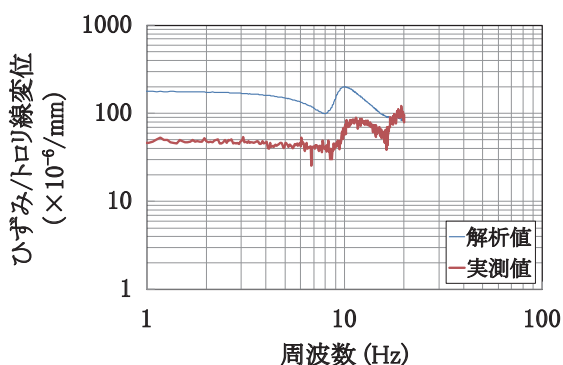


図8 伝達関数の比較

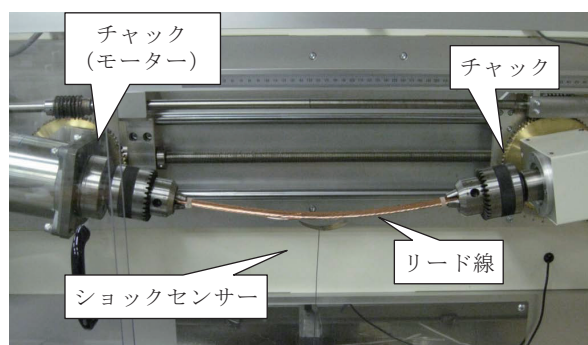


図9 リード線回転曲げ疲労試験機

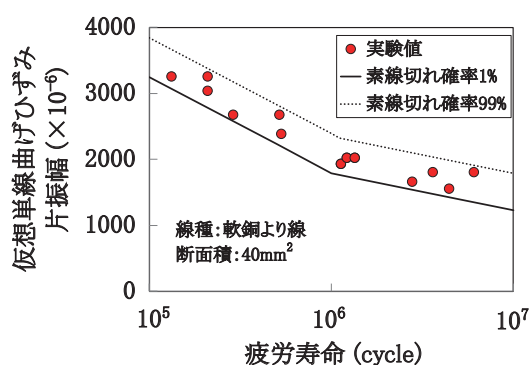


図10 疲労試験結果

する有限要素法によるコネクタの振動解析手法は、コネクタの曲げ傾向を解析するモデルとしては妥当なものと考えている。

本章で述べた手法で求めた仮想単線の各特性値は、リード線の線種だけに依存し、リード線取り回し形状に依存していなかった。このことより、同種リード線を使用する限り、仮想単線の特性を求めれば任意のコネクタ形状について、同定試験をその都度行わなくともモデル化が可能となる。

4. コネクタリード線の疲労寿命曲線

コネクタのリード線は銅より線であるため、コネクタの疲労寿命は素線切れが発生した時と考えるのが設備保安上適切と考える。そこで、コネクタリード線の素線切れを検知できる疲労試験機として、図9に示す回転曲げ疲労試験機を新たに導入した。リード線を高速回転させるため、素線切れが発生すると遠心力により素線がショックセンサーに触れて試験機を停止させるため、素線切れに要した負荷サイクルをカウントすることができ、素線1本が破断した時点の寿命が得られる。

ただし、実リード線と振動解析に用いる仮想単線では、線条としての半径が異なるため、同じ曲げ荷重に対する曲げひずみは合致しない。そこで、疲労試験時に実リード線に与えた曲げ曲率半径 $R[\text{mm}]$ に対して、次式を用

いて仮想単線のひずみ ε を算出した。

$$\varepsilon = \frac{r}{R} \tag{2}$$

ここで、 r は仮想単線の半径 [mm] である。

図10に断面積 40mm^2 の軟銅より線の疲労試験結果を示す。図中縦軸は式(2)で算出した仮想単線の曲げひずみである。実験値にはばらつきがあり、JISME S 002「統計的疲労試験法」⁴⁾より、統計処理を行い疲労破断確率1%および99%に対する疲労寿命曲線を作成した。作成方法は次のとおりである。

疲労寿命試験結果の回帰曲線は以下の式で表される。

$$\log N = \hat{\alpha} + \hat{\beta}\varepsilon \tag{3}$$

ここで、 N は疲労寿命、 ε はひずみである。 $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ は式(4)、(5)で与えられる。

$$\hat{\alpha} = \overline{\log N} - \hat{\beta}\bar{\varepsilon} \tag{4}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})(\log N_i - \overline{\log N})}{\sum(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \tag{5}$$

ここで、

$$\overline{\log N} = \frac{1}{n} \sum \log N_i \tag{6}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \varepsilon_i \tag{7}$$

ここで、 n はデータ数である。疲労寿命の対数標準偏差

$\hat{\sigma}(\log N)$ を用いて、素線切れ確率 1% および 99% を示す曲率は式 (8) で表される。

$$\log N = \hat{\alpha} + \hat{\beta}\varepsilon \pm 2.33\hat{\sigma}(\log N) \quad (8)$$

ここで、

$$\hat{\sigma}(\log N) = \left(\frac{1}{n-2} \sum \{ \log N_i - (\hat{\alpha} + \hat{\beta}\varepsilon) \}^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

式 (8) の複号は正が確率 99%，負が 1% に対応する。式 (8) より求めた曲線を図 10 に併記する。この図と、振動解析で求められるひずみ波形を用いることで、修正マイナー則を適用し、パンタグラフ通過時のコネクタ疲労寿命 N_f を推定することができる。

5. 実働波形に対するコネクタ疲労寿命推定結果

営業線において、C 型コネクタリード線に素線切れが発生した箇所について、パンタグラフ通過時のトロリ線およびちょう架線振動をビデオカメラで撮影し、鉄道総研が所有する画像処理装置で変位を求めた結果を図 11 に示す。同図にはトロリ線とちょう架線の相対変位の算出結果も示してある。相対変位に見られる 4 つのピークは、4 つのパンタグラフが通過したことを示す。この振動波形を図 2 (a) ~ (c) に示す各コネクタモデルのトロリ線およびちょう架線に入力し、振動解析を行うことで、仮想単線に発生するひずみ波形を求めた。各コネクタにおいて、最もひずみが大きくなった箇所のリード線ひずみ波形を図 12 に示す。ひずみ波形に見られるピークの位置は、相対変位のピーク位置と一致していた。

図 12 のひずみ波形についてレインフロー法⁵⁾を用いてひずみ振幅を計数し、式 (1) および図 10 を用いて素線切れ確率 1% および 99% に対する疲労寿命を推定した結果を図 13 に示す。この図より、図 11 の振動波形に対しては J 型が最も短寿命となり、C 型が最も長寿命となることがわかる。また、同図には営業線において実コネクタリード線 (C 型) の素線切れが発生するまでの累計通過パンタグラフ数を示してある。この図より、実際の C 型コネクタの素線切れは、1~99% の確率で同 C 型コネクタの素線切れが発生すると推定した範囲内で発生しており、本研究で提案するコネクタの振動解析による疲労寿命推定手法は妥当であると考えられる。

6. コネクタ振動耐久性評価手法の比較

図 11 および図 12 より、トロリ線とちょう架線の相対変位の増加に伴いリード線ひずみも増加していることから、コネクタ疲労損傷の支配因子のひとつにトロリ線と

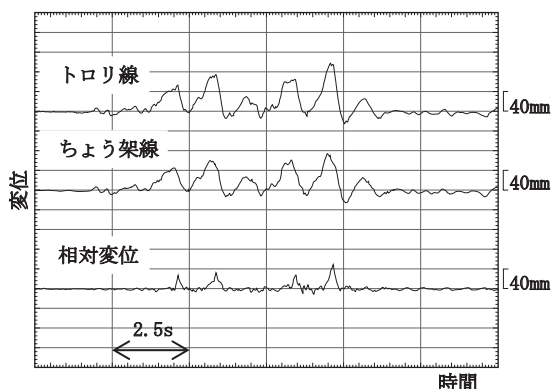


図 11 トロリ線およびちょう架線振動波形

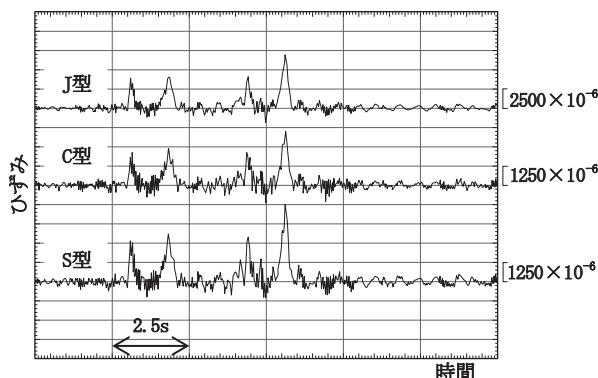


図 12 各コネクタモデルのリード線ひずみ波形推定結果

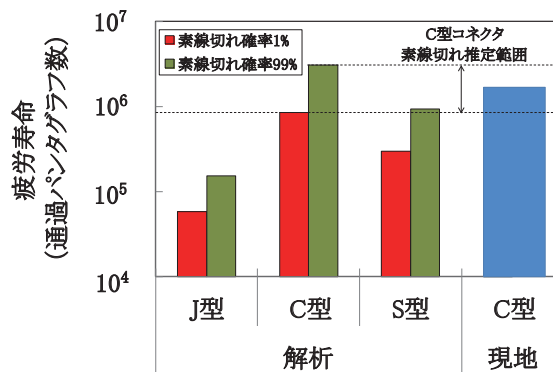


図 13 コネクタ疲労寿命推定結果

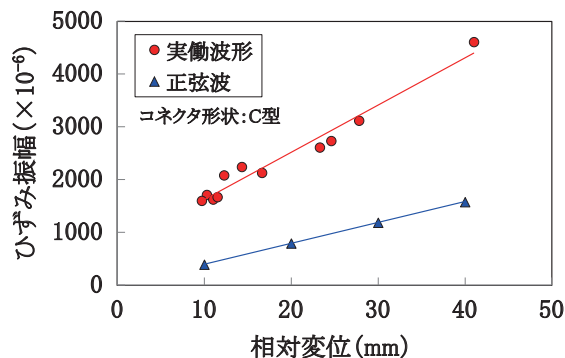


図 14 相対変位とひずみ振幅の関係

ちょう架線の相対変位が挙げられる。従来の振動耐久性試験である JIS E 2002¹⁾ や JIS E 2201²⁾ は、コネクタ

特集：電力技術

のちよう架線側を固定し、トロリ線側のみを正弦波加振するため、コネクタに相対変位を与えていることになる。この従来手法と本研究で提案する手法によるコネクタの振動ひずみについて比較を行った。

図2(b)に示すC型コネクタモデルのちよう架線側を固定し、トロリ線側に振幅10～50mm、周波数5Hzの正弦波を入力した振動解析を行い、リード線のひずみ振幅を求めた。一方、営業線で測定されたトロリ線とちよう架線の実働振動波形に対しても振動解析を行い、リード線のひずみ振幅を求めた。正弦波および実働波形について、相対変位とひずみ振幅の関係を図14に示す。

いずれの場合も相対変位とひずみ振幅は比例関係にあるが、同じ相対変位に対して正弦波に対するひずみ振幅は、実働波形に対するひずみ振幅よりも小さくなった。このことは、営業線でコネクタリード線に発生するひずみ振幅は、相対変位のみ依存しているのではなく、振動周波数やちよう架線の振動にも大きく左右されることを示唆している。

以上より、トロリ線側のみを正弦波加振するという従来の振動試験手法では、現場のひずみを再現できず、過小評価となる恐れがあることがわかった。

7. まとめ

本研究では、パンタグラフ通過時における電車線コネクタの疲労損傷を推定するため、実働振動波形に対するコネクタのひずみ波形に着目し、有限要素法による振動解析、コネクタリード線の回転曲げ疲労試験を行った。主な成果は以下の通りである。

- (1) 実コネクタの加振試験等により、コネクタリード線である『より線』と等価な動特性を有する『仮想単線』に置換し、有限要素モデルを作成した。仮想単線のヤング率、半径、密度、減衰係数は、コネクタリード線の取り回し形状に依存せず線種のみ依存するため、同種リード線を用いる限り任意の形状についてモデル化が可能である。
- (2) 実物と有限要素モデルのコネクタについて、疑似ラ

ンダム波加振した際のリード線ひずみ波形を比較した結果、共振周波数などの動特性は合致していた。

- (3) 回転曲げ疲労試験機を用いて、実コネクタリード線に一定の曲げ曲率を与えた場合の素線切れに対する疲労寿命曲線を作成した。疲労試験結果を統計処理することにより、素線切れ確率1%および99%に対する疲労寿命曲線を作成した。
- (4) トロリ線およびちよう架線の実働振動波形に対して、素線切れ確率1%～99%に対応する疲労寿命を推定した結果、実際に素線切れが発生したC型コネクタの寿命は、推定したC型コネクタの疲労寿命の推定範囲内であった。
- (5) トロリ線のみを正弦波加振した場合と、トロリ線およびちよう架線に実働波形を与えた場合に対して、相対変位とひずみ振幅の関係を求めた結果、同じ相対変位に対して正弦波に対するひずみ振幅は、実働波形に対するひずみ振幅よりも小さくなった。

8. 今後の取り組み

今回開発したコネクタ疲労寿命推定手法により、これまで不明確であったコネクタ形状と疲労寿命の関係や、実働振動波形と疲労寿命の関係を評価することができる。今後は、コネクタの素線切れが発生する箇所としない箇所の原因を究明し、コネクタ疲労損傷の支配要因を特定することで、疲労損傷を低減させる形状や取付け指針などを提案する予定である。

文献

- 1) JIS E 2002「電車線路用金具試験方法」, 2010
- 2) JIS E 2201「電車線路用架線金具」, 2013
- 3) 日本材料学会：疲労設計便覧, 養賢堂, pp. 220-223, 1995
- 4) 日本機械学会：統計的疲労試験法(改訂版), JISME S 002, 1994
- 5) 遠藤達雄, 井上肇：レインフロウ法の考え方とその応用, 日本造船学会誌, No. 706, pp. 204, 1988