

電車線コネクタの疲労寿命推定手法

電力技術研究部 集電管理研究室

副主任研究員 山下主税

1. はじめに

電気鉄道の電車線設備において、線条間を電氣的に接続す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には、コネクタの疲労特性を評価することが必要不可欠である。

従来、コネクタを含む電車線金具の振動耐久性評価は JIS E2002¹⁾や JIS E2201²⁾に規定される振動試験に準拠して実施されてきた。ただし、JIS 規格では電車線金具の緩みに対する評価試験という意図が強く、コネクタリード線の疲労試験を意図したものではない。また、コネクタはリード線の形状や線種に依存する周波数特性を有するため、特定の振幅・周波数での加振試験結果で実際の振動耐久性を的確に評価できるとは限らず、事実として JIS 規格を満足するコネクタのリード線疲労破断が発生している。

そこで、本発表では疲労試験によるコネクタリード線の疲労寿命特性把握、および有限要素法解析によるコネクタの振動特性を考慮した曲げひずみ推定に基づいた電車線振動波形に対するコネクタ疲労寿命の推定手法を紹介する。

2. 累積疲労損傷度評価手法

コネクタ設置箇所に発生する実際の電車線振動は正弦波ではなく実働波形である。実働応力を受ける部材の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(修正マイナー則)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応力頻度を用いて、当該実働波形に対する疲労損傷度 D を次式で計算するものである。

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

ここで、 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、 N_i はひずみ振幅 ε_i が一定に発生した場合の疲労寿命であり、この D 値の逆数が疲労寿命となる。

電車線コネクタに修正マイナー則を適用し疲労寿命推定を行うためには、①コネクタリード線の疲労寿命曲線、②パンタグラフ通過時のリード線に発生するひずみの実働波形が必要となる。

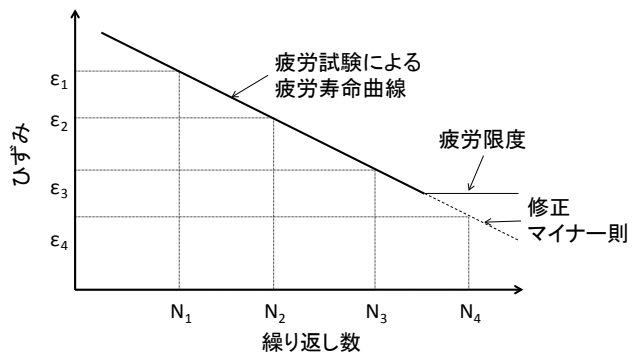


図1 疲労寿命曲線と修正マイナー則

3. 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軟銅素線のより線であり、コネクタの疲労寿命とはコネクタリード線の素線切れが発生した時に他ならない。そこで、コネクタリード線に一定の曲げを与え、かつ素線切れを検知できる疲労試験機として、図2に示す「ハンター式回転曲げ疲労試験機」を新たに導

入した。この試験機はリード線に一定の曲げを与えながら回転させることでリード線に均一な繰返し曲げひずみを負荷することができ、素線の破断個所を中央に限定することができる。また、リード線を高速回転させることで、素線切れが発生すると遠心力で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本が疲労破断した時の疲労寿命が得られる。図3に一般的にコネクタリード線として使用されている40mm²軟銅より線について、疲労試験で得られた疲労寿命曲線を示す。

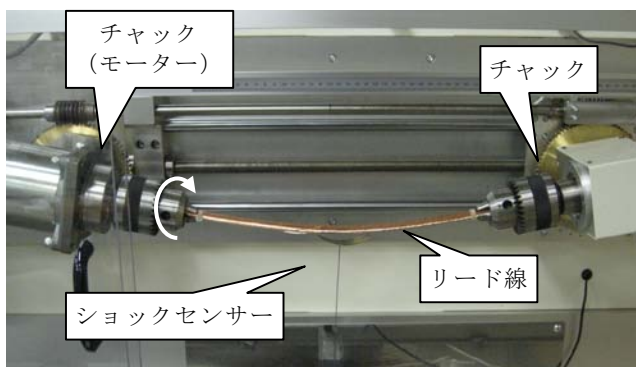


図2 ハンター式回転曲げ疲労試験機

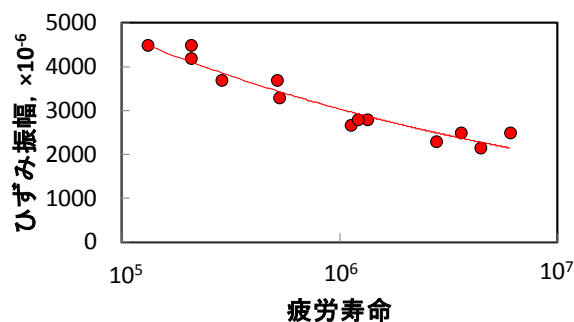


図3 40mm²リード線疲労寿命曲線

4. 有限要素法解析によるコネクタリード線の疲労寿命推定

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実働波形を推定する手法として、有限要素法解析によるコネクタ振動シミュレーションを行うこととした。この手法ならば、コネクタの試作をせずともシミュレーションの中でリード線の形状や線種変更が容易にでき、コネクタの試作・試験期間とコストを大幅に削減できる。また、トロリ線のみならずちょう架線の振動波形も容易に入力することができる。

4. 1 より線を単線に置換した有限要素コネクタモデル

より線の有限要素モデルを作成し、各素線間の摩擦などを模擬することは非常に困難である。そこで、より線を単線と仮定した模擬リード線を用いて図4のように有限要素モデルを作成することとした。また、図4と同じ形状の供試体を用意し、静的負荷試験および加振試験を行い、静的負荷試験からは各供試体のばね定数、加振試験からは各供試体の1次共振周波数および対数減衰率を求めた(表1)。ここで、供試コネクタのリード線公称断面積は3章で使用したのと同じ40mm²であり、対数減衰率は片持ち梁試験体のみ算出した。

図4の各種モデルについて模擬リード線のヤング率を銅の123GPaとし、その半径を変更した線形静解析を実施し、負荷された荷重とたわみの関係よりばね定数を求めた。解析より求めた各モデルの模擬リード線半径とばね定数の関係を図5に示す。この図より、各モデルで表1のばね定数と同じ値となるよう模擬リード線半径を同定すると、モデルの形状によらずほぼ一定の値(平均値=1.55mm)となった。この結果を受け、図4の各種モデルについて模擬リード線の密度を変更した調和解析を実施し、1次共振周波数を求めた。解析より求めた各モデルの模擬リード線密度と1次共振周波数の関係を図6に示す。この図より、各モデルで表1の共振周波数と同値となるよう模擬リード線密度を同定すると、モデルの形状によらずほぼ一定の値(平均値=45.3g/cm³)となった。最後に、図4(d)の片持ち梁モデルについて、レイリー減衰係数 β を変更して減衰動解析を実施した。動解析より求めたレイリー減衰係数と対数減衰率の関係を図7に示す。この図より、

表 1 の対数減衰率と同値となるようレイリー減衰係数 β を同定すると、0.0045 となった。これら模擬リード線のパラメータはコネクタの形状に依存せず、リード線の線種に依存するため、同種リード線を使用するのであればシミュレーション上で任意のコネクタ形状をモデリングできる。

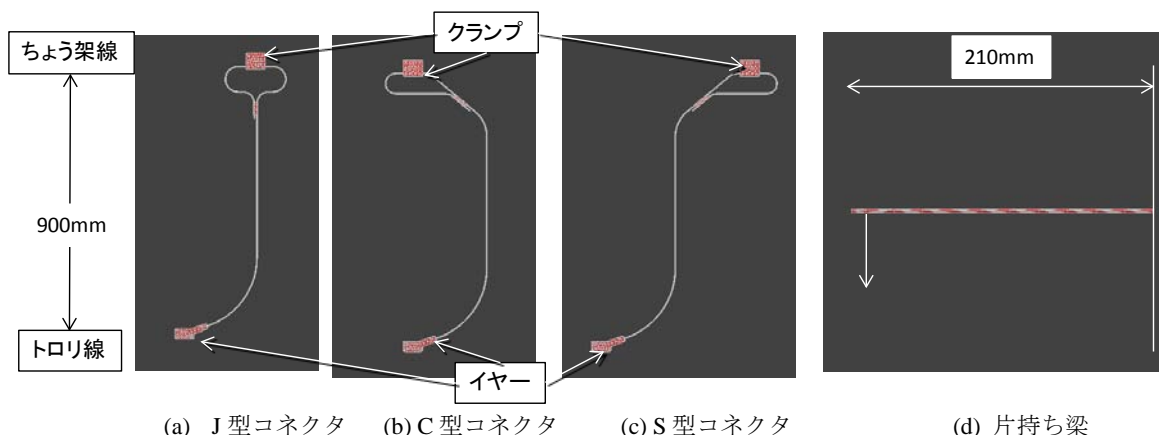


図 4 コネクタおよび片持ち梁モデル

表 1 実験で得られた諸特性

	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	9.96	9.95	5.72	15.15
対数減衰率	—	—	—	1.34

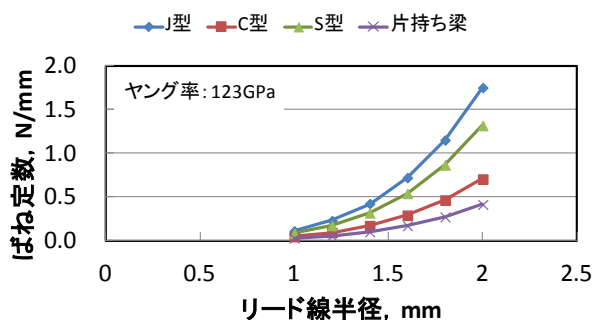


図 5 リード線半径とばね定数の関係

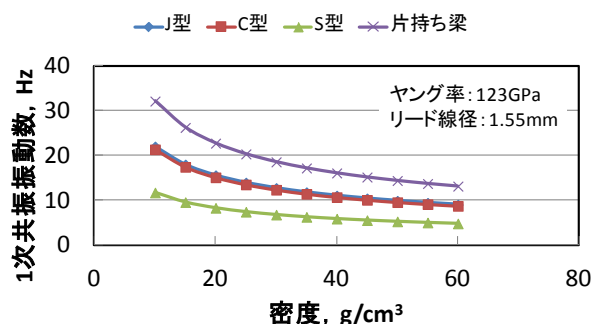


図 6 密度と 1 次共振周波数の関係

4. 2 振動解析によるコネクタ疲労寿命推定

前節で作成したコネクタモデルについて、トロリ線およびちょう架線の振動波形を入力した動解析を実施することで、コネクタリード線に発生するひずみ波形を推定した。振動波形は鉄道総研が所有する架線 - パンタグラフシミュレーションプログラムより求めた波形を用いた。架線 - パンタグラフシミュレーションの条件として、電車線はシンプルカテナリ 10 径間、トロリ線およびちょう架線の張力は 9.8kN とし、パンタグラフは PS16 形を想定したばね質量モデルである。電車線の第 5 径間内第 1~2 ハンガ間にコネクタが設置されているものとして求めたトロリ線およびちょう架線振動波形例を図 8 に示す。この振動波形を図 4(a)の J 型コネクタの上下端に入力し、振動解析を実施した結果得られたコネクタリード線の圧縮イヤー近傍のひずみ実働波

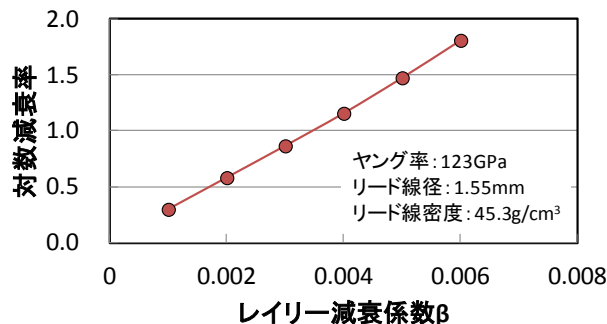


図 7 レイリー減衰係数と対数減衰率の関係

この振動波形を図 4(a)の J 型コネクタの上下端に入力し、振動解析を実施した結果得られたコネクタリード線の圧縮イヤー近傍のひずみ実働波

形を図9に示す。この図より、ひずみ波形は図8の振動波形と異なり鋭いピークを持つことが分かる。

このひずみ波形について、「どの程度の振幅が何回作用したか」をカウントするレインフロー法⁴⁾を用いてひずみ振幅を計数することで、式(1)および図3より疲労損傷度 D を求めることができ、 D の逆数を以て疲労寿命を推定することができる。図10に列車速度50~150km/hにおけるJ型コネクタの推定疲労寿命を示す。この結果より、架線-パンタグラフシミュレーションで得られた振動波形に対するコネクタの疲労寿命は 10^7 オーダーであり、疲労破断の懸念は少ないことが分かる。一方で、現場では実際にコネクタの疲労断線が発生しており、現場の電車線振動やコネクタ形状の評価が必要と考える。

今後の展望として、本研究で作成した疲労寿命推定手法は様々な条件についてシミュレートすることが可能であり、現場における振動波形に対する疲労寿命評価を行い、実際にコネクタが疲労断線する原因を追究することで、疲労対策や耐疲労性を有するコネクタの開発に貢献できるものと考えている。

5. まとめ

コネクタの疲労対策や開発には、電車線の実働振動波形やコネクタリード線の線種、およびコネクタ形状を考慮した疲労評価が必要であり、本研究では以下に示すコネクタ疲労寿命推定手法を提案した。

- (1) 回転曲げ疲労試験機により、コネクタリード線の素線切れの疲労寿命曲線を求めた。
- (2) より線であるリード線を等価な特性を有する単線と仮定することで、実働波形や種々形状について容易に解析できる有限要素モデルを作成し、振動解析によりひずみ波形を求めた。
- (3) (2)で得られたひずみ波形をレインフロー計数処理し、(1)で得られた疲労寿命曲線より修正マイナー則を適用して疲労寿命を推定した。

文献：

- 1) 日本規格協会：「電車線路用金具試験方法」, JIS E2002 (2010)
- 2) 日本規格協会：「電車線路用架線金具」, JIS E2201 (2013)
- 3) 日本材料学会：「疲労設計便覧」養賢堂, pp. 220-223 (1995)
- 4) 遠藤達雄, 井上肇：「レインフロー法の考え方とその応用」, 日本造船学会誌, No. 706, pp. 204 (1988)



図8 トロリ線およびちょう架線振動波形例 (列車速度：50km/h)

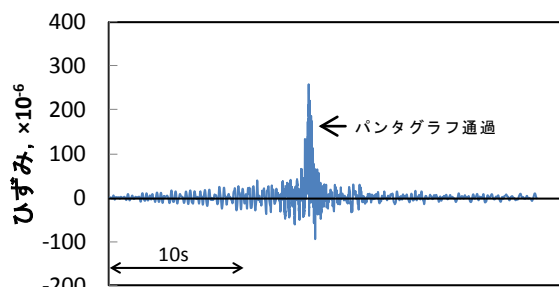


図9 コネクタリード線ひずみ実働波形

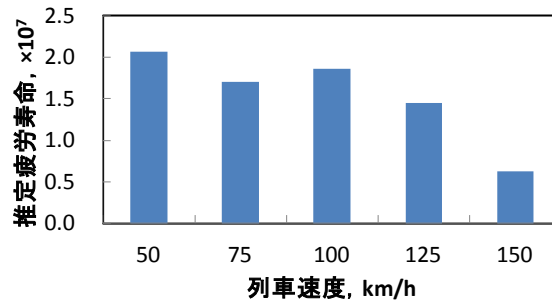


図10 J型コネクタ推定疲労寿命