

# 電車線コネクタの疲労対策

山下 主税\* 小原 拓也\* 小林 樹幸\*\*

Measures for Fatigue Damage Reduction of Electrical Connection of OCL

Chikara YAMASHITA Takuya OHARA Shigeyuki KOBAYASHI

Electrical connections between the contact wire and the messenger wire are always subject to fatigue damage due to vibrations caused by the passage of pantographs. Therefore it is required to clarify fatigue mechanism of the electrical connection and suggest measures for damage reduction. In this paper, the authors focus on the resonance of the electrical connection and relative vibration displacement between the contact wire and the messenger wire considering them as major fatigue factors. As a result of OCL (Overhead Contact Line)-pantograph simulation, the authors clarified the conditions under which fatigue damage of the electrical connection can occur. In addition, the authors newly proposed an electrical connection which has the fatigue life of more than 10 million cycle.

キーワード：コネクタ，疲労寿命，設置位置，相対変位，共振，固有振動数

## 1. はじめに

電車線コネクタ（以下、コネクタ）は、電車線のトロリ線やちょう架線などの線条間を、電氣的に接続する金具であり、一般的に軟銅より線を用いたリード線とイヤーおよびクランプから構成されている。これらのうち、リード線は電車線の振動によって疲労し、断線に至る場合があるため、抜本的なコネクタ疲労対策が求められている。

筆者らは、前報<sup>1)</sup>において、より線であるリード線と同じ動特性をもつ仮想的な単線を用いた振動解析によって、リード線の曲げひずみを推定する手法を提案するとともに、リード線の疲労試験から求めた疲労寿命曲線と推定した曲げひずみ推定値より、コネクタの疲労寿命を推定する手法を提案している。

本稿では、コネクタの疲労要因として、トロリ線とちょう架線の振動変位およびコネクタの共振に着目し、これらの要因をふまえたコネクタの設計指針を提案する。さらに、同設計指針に基づいて耐疲労性を向上させたコネクタを試作し、これを現地試験に供してその耐疲労性向上効果を確認したので、報告する。

## 2. コネクタの疲労要因と対策方針

### 2.1 コネクタの疲労要因

本稿で対象とするコネクタは、在来線用のトロリ線とちょう架線を接続する「MT コネクタ」（図1）である。

\* 電力技術研究部 集電管理研究室

\*\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

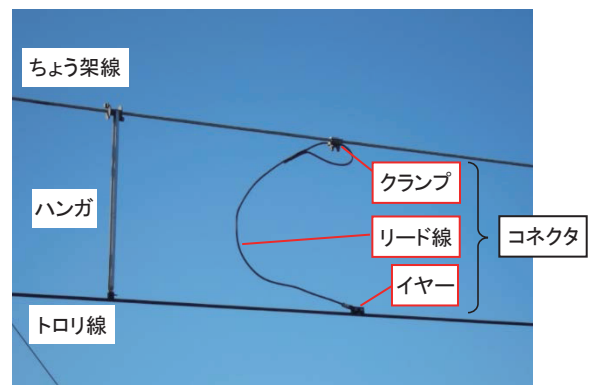


図1 MT コネクタの例<sup>2)</sup>

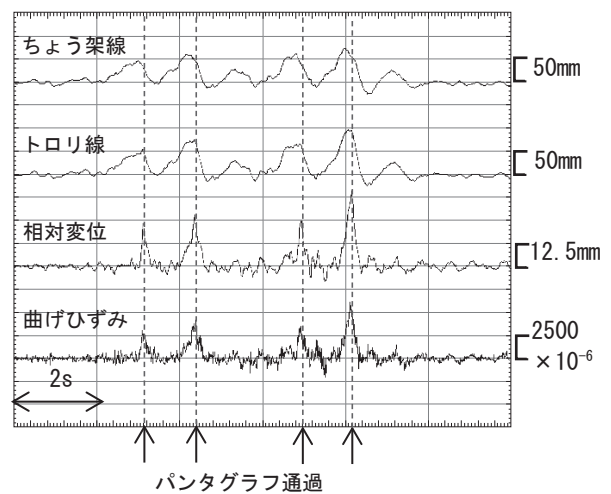


図2 電車線振動波形およびコネクタリード線の推定ひずみ波形

これまでの研究<sup>1) 2)</sup>によって、コネクタの疲労要因の一つは、パンタグラフ通過時におけるトロリ線とちょう

特集：電力技術

架線の振動変位の差（以下、相対変位）であることが明らかとなっている。図2は、営業線における電車線の振動変位の実測結果とリード線曲げひずみの推定結果である。相対変位のピークとひずみのピークの発生時刻が一致しており、相対変位の大きさがリード線の疲労に大きな影響を与えていることがわかる。

相対変位以外の疲労要因として、コネクタの固有振動数と電車線の振動数が一致する「共振」がある。文献3)では、パンタグラフ通過時の電車線振動によってコネクタの共振が励起されて大きな振動が発生し、イヤ近傍のリード線が疲労破断したことが報告されている。パンタグラフ通過後の残留振動でコネクタの共振が励起される場合、著大な曲げ変形が複数回にわたってコネクタに生じるため、非常に短い期間で疲労断線に至る可能性がある。

以上よりコネクタの疲労に対して、以下の対策が有効と考える。

- (1) 著大な相対変位の発生を抑制する。
- (2) 相対変位が増大しにくい位置にコネクタを設置する。
- (3) 相対変位に対するリード線の曲げひずみを低減する。
- (4) コネクタの固有振動数と電車線振動の振動数を一致させない。

2.2 相対変位の発生メカニズムと対策

前述の対策のうち、(1) および (2) について詳細に検討するため、パンタグラフ通過時のトロリ線とちょう架線の相対変位をシミュレーションによって把握した。用いたシミュレーションは、有限要素法を用いた2次元の電車線-パンタグラフ系の数値解析プログラムであり、パンタグラフ通過時のトロリ線およびちょう架線の振動変位波形を算出できる。本シミュレーションでは、オイラー梁要素を用いて線条を要素分割し、電車線をモデル化している。線条の剛性は、線条に作用する張力の他に線条自体が有する曲げ剛性を考慮しており、線条の減衰には比例粘性減衰を仮定している。シミュレーションは在来線を想定し、表1に示す条件を組み合わせで実施した。

著大な相対変位が発生した算出結果例として、トロリ線張力が径間内の各位置における最大相対変位に与える影響について調べた結果を図3に示す。トロリ線の張力が低下すると、径間内のトロリ線押上量が増加し、相対変位も増加する。ここには示していないが、ちょう架線の張力が低下した場合にも相対変位が増加する。これはトロリ線上下振動に対するちょう架線の追随性能が低下するためである。トロリ線、ちょう架線の張力がいずれも9.8kNの標準条件の場合、相対変位はJIS E 2002<sup>4)</sup>の

表1 シミュレーション条件<sup>2)</sup>

電車線		シンプルカタナリ	
径間数		4	
径間長 (m)		50	
パンタグラフ通過速度 (km/h)		50, 75, 100, 125	
トロリ線	線種	GT110	GT170
	張力 (kN)	5.9, 9.8	9.8, 14.7
ちょう架線	線種	St90	St135
	張力 (kN)	9.8, 14.7	14.7, 19.6
パンタグラフ	静押上力 (N)	59	
	数	5	

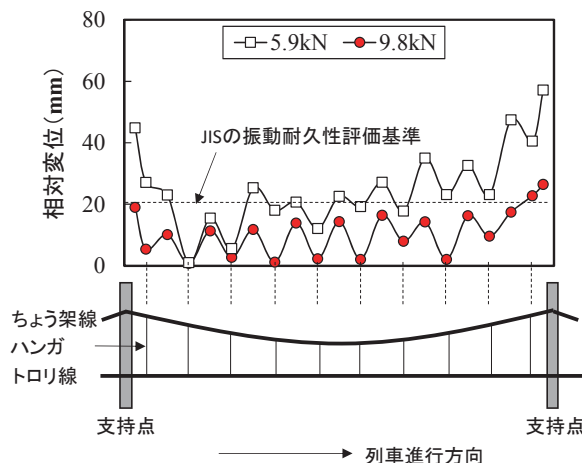


図3 相対変位に対するトロリ線張力の影響

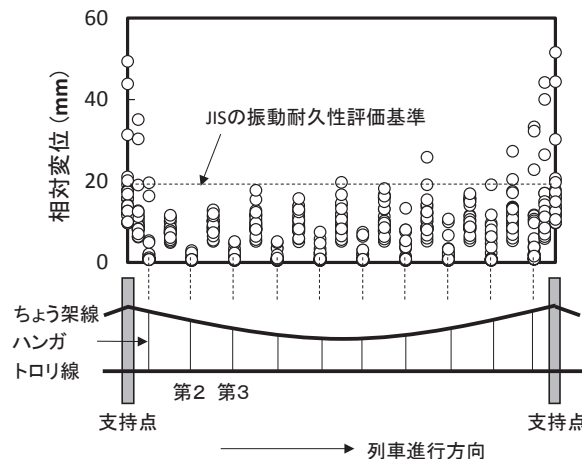


図4 径間内の相対変位推定結果

振動耐久性試験条件である20mm以内となるため、トロリ線張力を適正に保つことで著大な相対変位を抑制できると考える。

全計算条件に対する径間内の最大相対変位を図4に示す。全体的な傾向として、支持点近傍におけるちょう架線は鉛直方向に動きにくいいため、ちょう架線がトロリ線の押上に追随せず、相対変位は大きくなっている。また、列車進行方向に対して、支持点手前の相対変位が大きくなる。これは、パンタグラフの接触力が支持点手前で大きくなるためである。

このように、従来のコネクタ設置位置である支持点近傍は、相対変位が大きくなる位置であり、コネクタの疲労損傷を低減するには、最も相対変位が小さくなる第2または第3ハンガの近傍に設置することが望ましいといえる。

また図4より、相対変位はハンガ位置で小さく、ハンガ間で大きくなるのがわかる。これは、ハンガ位置では、ハンガ浮きが発生しない限りトロリ線とちょう架線の押上量が一致するが、ハンガ間では、パンタグラフによるトロリ線の変形に対して、ちょう架線の変形が小さいためである。ハンガ長さの不整や季節の温度変化による架線伸縮などで、常時ハンガが浮いている状態では、実質的なハンガ間隔が長くなり、相対変位も増大する。そのため、コネクタ近くハンガが常時浮くことのないように電車線の高さを調節することも、相対変位を抑制する対策となる。

### 2.3 大きな相対変位に起因するリード線の曲げひずみの低減法

コネクタに相対変位が加わったとき、リード線が全体的に変形すればよいが、局所的に曲げ変形が集中すると、疲労が蓄積する。特にリード線の長さが短い場合は、リード線の固定部近くに曲げ変形が発生しやすい。

また、コネクタの形状によってもリード線の変形は異なる。図5に示す一般的に使用されている各コネクタについて、図2の電車線振動が作用したときに生じる曲げひずみの解析結果を図6に示す。C型コネクタは、他の形状と比較してリード線が全体的に曲がりやすいため、曲げ変形の集中が少なく、曲げひずみも小さくなっている。

また、別の対策として、可とう性の高いリード線を使用することが挙げられる。リード線が曲がりやすくと、固定部近くの曲げ変形が少なくなるためである。

### 2.4 コネクタの共振抑制法

コネクタの共振を抑制するには、電車線の振動の周波数とコネクタの固有振動数を一致させないことが重要である。一般にパンタグラフが通過する前にはおおむね3～6 Hzの前駆振動、パンタグラフが通過した後はおおむね1～2 Hzの残留振動が電車線に発生する。

図5に示す各コネクタについて、コネクタ高さ（トロリ線とちょう架線の距離）に対する固有振動数の解析結果を図7に示す。この図より、固有振動数はコネクタ形状にはあまり依存せず、主としてコネクタ高さに依存することがわかる。特にコネクタ高さが1500mmに近づくと、電車線の残留振動で共振する可能性があることがわかる。

現場において、パンタグラフ通過時にコネクタが共振

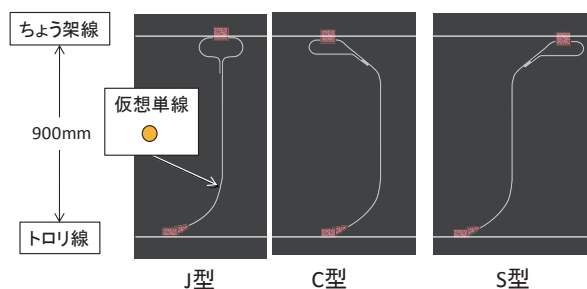


図5 解析したコネクタ形状

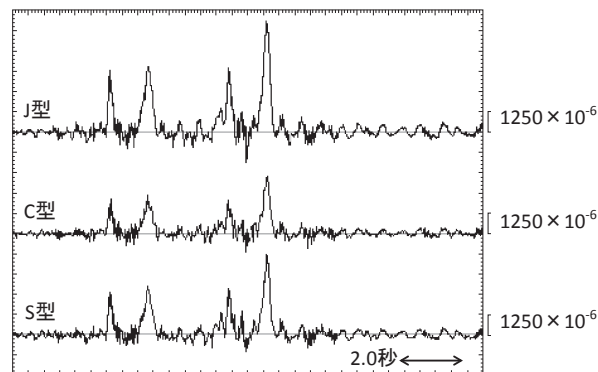


図6 各コネクタの曲げひずみ波形<sup>1)</sup>

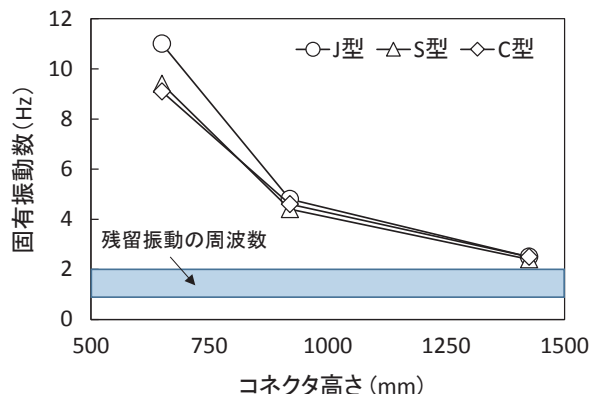


図7 コネクタ高さとの固有振動数の関係

している場合は、コネクタ設置位置の変更によってコネクタの高さを低くし、リード線の長さを短くすることが対策の一つとなる。ただし、2.2節に述べたように、リード線の長さが短くなると、大きな相対変位が発生したときに曲げひずみが増大しやすくなることに注意が必要である。

以上、コネクタの疲労対策について検討した結果をまとめると次のようになる。

- (1) 電車線の張力を適切に保つとともに、コネクタ近傍のハンガが常時浮くような状態を避けることで、著大な相対変位の発生を抑制する。
- (2) 相対変位が小さくなるよう、コネクタを第2ハンガおよび第3ハンガ近傍に設置する。
- (3) 可とう性の高いリード線を使用することで、相対変

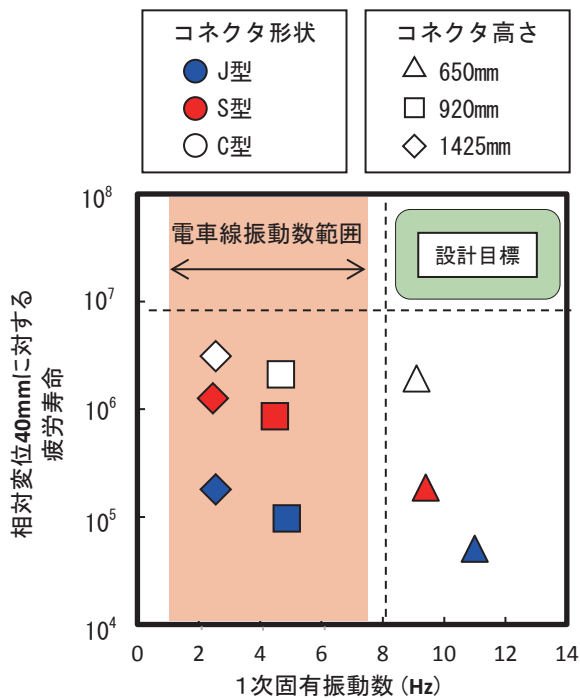


図8 コネクタの耐疲労性評価マップ<sup>2)</sup>

位に対するリード線ひずみを低減する。

- (4) 電車線振動によってコネクタが共振している場合には、リード線の長さを短くすることで、コネクタの固有振動数を向上させ、電車線振動の振動数とコネクタの固有振動数が一致しないようにすることで共振を防ぐ。

### 3. 耐疲労コネクタの開発

#### 3.1 耐疲労コネクタの設計指針

まず、過酷な条件でも耐疲労性を発揮できるようにするため、図4の相対変位解析結果より40mm以上の相対変位は電車線張力の確保やコネクタ設置位置の適切な選択により回避できることを前提として、40mmの相対変位に対しても工業的に無限とされる $10^7$ 回以上の疲労寿命を有することを目標とした。また、電車線の前駆振動や残留振動に対するコネクタの共振を防ぐため、コネクタの1次固有振動数を8Hz以上とすることを目標とした。

図5の各コネクタについて、コネクタ高さを変えた場合の疲労特性を図8に示す。同図の横軸はコネクタの1次固有振動数、縦軸は40mmの相対変位に対する疲労寿命である。本図からわかるように、既存のコネクタでは設計目標を達成することはできないことから、前章に基づき①リード線を短くする、②リード線の可とう性を向上させる、の2つの設計指針に基づいて新しいコネクタを提案することとした。

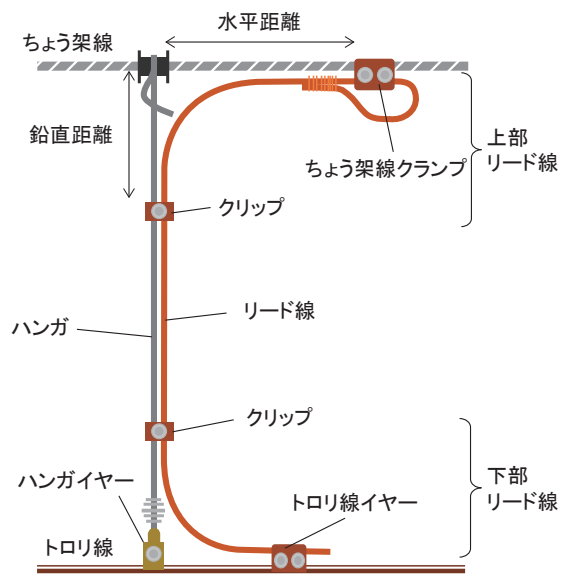


図9 耐疲労コネクタの概略図<sup>2)</sup>

表2 各リード線種に対する仮想単線半径<sup>2)</sup>

線種	素線径 (mm)	1束あたりの素線数	束数	仮想単線半径 (mm)
37/1.2	1.2	37	1	1.55
61/0.9	0.9	61	1	1.2
19/4/0.8	0.8	4	19	1.1
19/6/0.67	0.67	6	19	1.0

#### 3.2 耐疲労コネクタの構成

耐疲労コネクタの構成を図9に示す。本コネクタは、リード線を金具（以下、クリップ）でハンガに固定する構造とした。これにより、自由振動できるリード線長が短くなり、高い固有振動数を得られる。

また、トロリ線側のイヤー、ハンガイヤー、クリップの位置は相対的に移動しないため、パンタグラフ通過時でも下部のリード線は変形せず、ちょう架線クランプとクリップ間の上部リード線のみが変形する。

#### 3.3 リード線種の選定

相対変位により変形が生じる上部リード線のリード線長は短いため、リード線の可とう性を向上させることで、相対変位に対する耐疲労性を確保した。

表2に示す素線径およびより方の異なる4種類の軟銅より線を対象とし、前報<sup>1)</sup>の手法を用いてリード線を仮想的な単線に置換した場合の半径を求めた。なお、素材は全て軟銅であり、37/1.2は一般的にコネクタリード線に用いられているものである。その結果も表2に示す。仮想単線の半径が細いほど、リード線の可とう性が高いことを意味しており、素線径が細いほど可とう性が高いことがわかる。

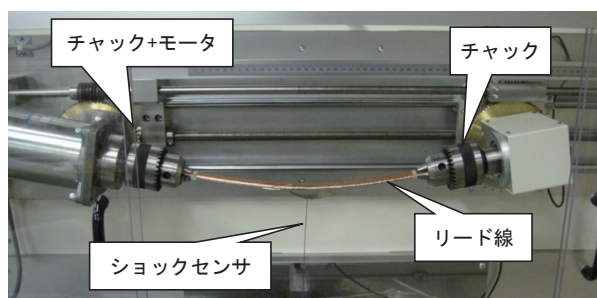


図 10 リード線の回転曲げ疲労試験機<sup>1)</sup>

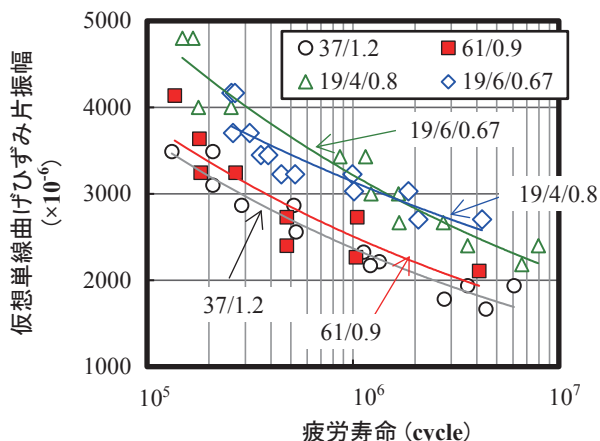


図 11 各リード線の疲労寿命特性<sup>2)</sup>

各リード線について、図 10 に示す回転曲げ疲労試験機による疲労寿命を求めた。ここでは、素線がショックセンサに触れた時に試験を停止し寿命とした。仮想単線に与えた曲げひずみの片振幅に対する疲労寿命特性を図 11 に示す。この図より、素線径が細いほど、曲げひずみに対する疲労寿命も増加することがわかる。

ただし、素線径が小さくなるほど、摩滅による素線切れ<sup>5)</sup>や、より線の表面積増大による耐腐食性の低下などが懸念される。そこで、一般的に用いられている 37/1.2 よりも仮想単線半径が小さい範囲において、最も素線径の大きな 61/0.9 を耐疲労コネクタのリード線として選定した。

### 3.4 耐疲労コネクタの形状設計

前述したように、リード線の可とう性は形状によっても変化する。そこで、図 9 の上部リード線について、有限要素解析を行い、上部リード線の鉛直距離および水平距離を変化させ、相対変位に対する曲げひずみ、および固有振動数を求めた。

相対変位 40mm を与えたときに上部リード線に生じる最大曲げひずみと、上部リード線の鉛直距離と水平距離との関係を図 12 に示す。図 12 中の一点鎖線は、図 11 においてリード線 61/0.9 の疲労寿命が  $10^7$  回となるひずみの両振幅を示す。

上部リード線の 1 次固有振動数と、上部リード線の鉛

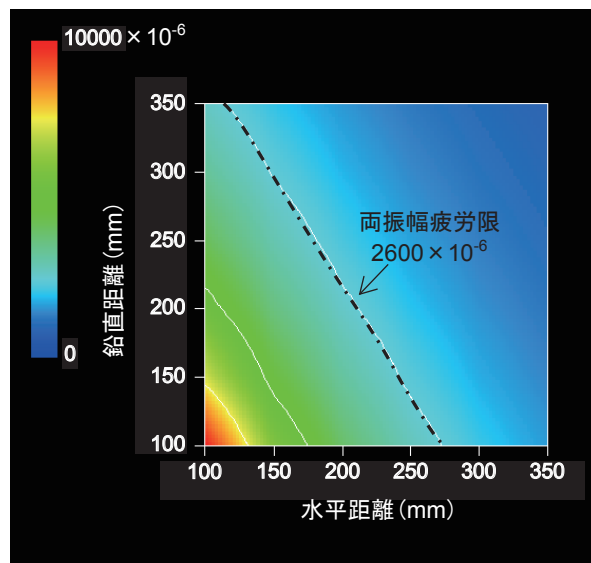


図 12 相対変位 40mm に対する上部リード線の最大ひずみ

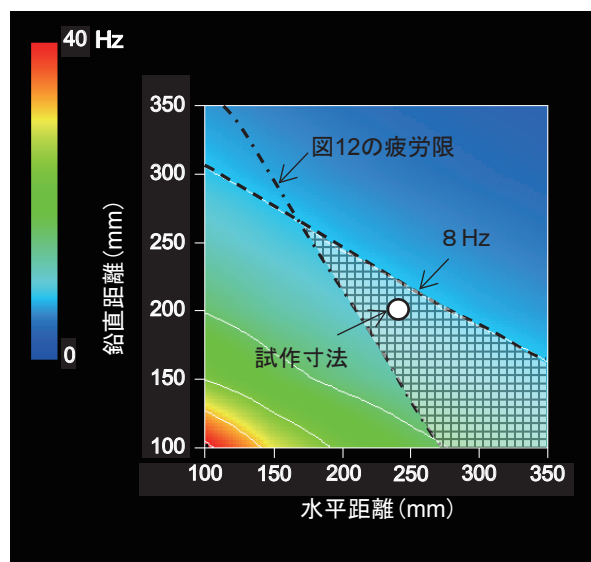


図 13 固有振動数と上部リード線寸法の関係

直距離と水平距離との関係を図 13 に示す。図中の破線は設計目標である固有振動数 8Hz を示し、一点鎖線は図 11 で得られた疲労限の条件を示している。したがって、図中網掛けの領域が設計目標を満たす寸法範囲となる。

図 13 の解析結果、およびちょう架線付近のハンガ構造とクリップの干渉を考慮し、鉛直距離 200mm、水平距離 250mm を試作コネクタの寸法として選定した。試作コネクタに期待される耐疲労性能は、相対変位 40mm に対する疲労寿命  $10^7$  回以上、固有振動数 8.6Hz である。

## 4. 現地試験による性能確認

前章で耐疲労性を向上させたコネクタを提案したが、コネクタに求められる他の性能として、トロリ線のコネ

特集：電力技術

クタ設置位置における摩耗を増大させないことが挙げられる。試作したコネクタはハンガにクリップを取り付ける都合上、その重量によって硬点となり、トロリ線の摩耗に影響を与える懸念がある。

そこで、試作したコネクタを営業線に190日間架設し、トロリ線の摩耗率を調査した。架設場所は、過去にコネクタリード線の疲労断線が発生した2か所の在来線駅構内（以下、A駅およびB駅）を選定した。

試作コネクタ位置と、その直近に設置されている既存C型コネクタ位置におけるトロリ線残存直径の測定結果と各近似式を図14に示す。なお、残存直径はマイクロメータで測定した。各近似式の傾きより、試作コネクタ位置の摩耗はほぼ進行しておらず、既存コネクタ位置と比較しても、トロリ線摩耗に大きな影響を与えないことを確認した。

なお、撤去後の試作コネクタについて、リード線を観察した結果、いずれの試作コネクタにおいても素線切れは確認されなかった。

5. おわりに

本稿では、電車線コネクタの耐疲労性を向上させるため、コネクタの疲労要因である相対変位と共振に対する対策を提案した。

また、コネクタの耐疲労設計目標として、相対変位40mmに対する疲労寿命を $10^7$ 回以上、1次固有振動数を8Hz以上と設定し、リード線の疲労試験や有限要素解析の結果を用いて、耐疲労性を向上させたコネクタを提案した。試作したコネクタについては、在来線営業線において190日間の現地架設試験を行い、リード線の素線切れがないこと、トロリ線の摩耗に大きな影響を与えないことを確認した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、西日本旅客鉄道株式会社の関

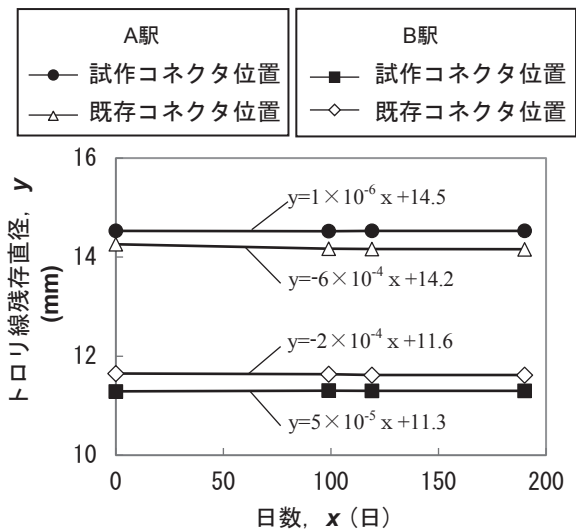


図14 トロリ線残存直径測定結果<sup>2)</sup>

係各位に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を申し上げます。

文献

- 1) 山下主税, 小原拓也, 松村周: 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, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 10, pp.23-28, 2014
- 2) 山下主税, 小原拓也, 小林樹幸, 宮口浩一, 近藤優一, 木村秀夫: 電車線コネクタの耐疲労性向上, 平成29年電気学会産業応用部門大会予稿集, pp.5-8, 2017
- 3) 米倉祐司, 西本朋幸: M-Tコネクタ破断対策の検証について, 第28回鉄道電気テクニカルフォーラム論文集, pp.113-116, 2015
- 4) 日本工業標準調査会: JIS E 2002 「電車線路用金具試験方法」, 2010
- 5) 井出澄人, 大内一成, 貴志俊英, 大瀧伸幸: TC型MTコネクタの経年劣化に関する研究, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-14, 16-26, pp.23-26, 2014

■ 2018年4月号（特集：電力技術）の訂正

特集論文の図中に誤りがありました。

以下のように訂正させて頂き、お詫び申し上げます。

【訂正箇所】

P. 21 図 11 中の一部表記

【誤】

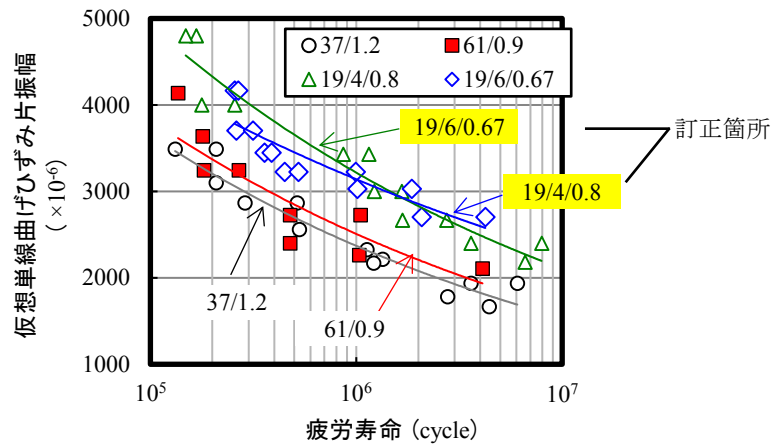


図 11 各リード線の疲労寿命特性<sup>2)</sup>

【正】

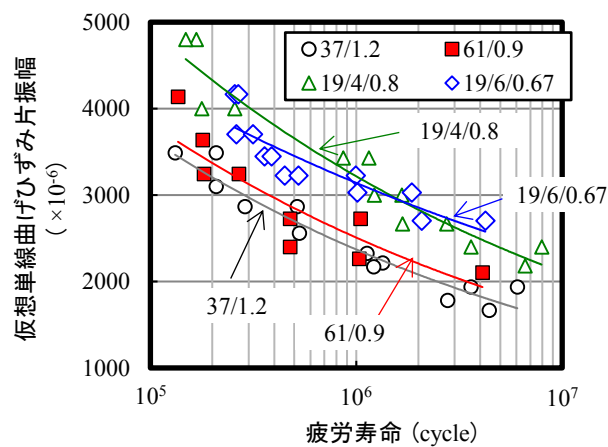


図 11 各リード線の疲労寿命特性<sup>2)</sup>