

# 架線振動解析に基づく電車線コネクタの振動試験方法

小原 拓也\* 山下 主税\*

Vibration Test Method for Connectors of Overhead Contact Line Based on OCL Vibration Analysis

Takuya OHARA Chikara YAMASHITA

Electrical connectors connecting contact wires and messenger wires are sometimes subject to fatigue-failure due to vibration caused by train passage. It is therefore desirable to establish a method for evaluating the fatigue resistance of the connectors. Therefore, the authors proposed a test method consisting of two types of vibration tests that take into account the two fatigue factors of the connectors: the relative displacement of the contact wire and their resonance. The test conditions were determined by analyzing overhead contact line vibration using an OCL-pantograph simulation. Furthermore, the authors carried out vibration tests on real connectors and confirmed that the test results were consistent with the actual failure status of the connectors.

キーワード：電車線コネクタ，軟銅より線，振動試験，疲労，架線相対変位，共振

## 1. はじめに

電車線コネクタ（図1。以下、「コネクタ」）は、架線の線条間を電氣的に接続し、電位差を解消することで電線や金具に不要な電流が流れることを防ぐ金具である。コネクタを構成するリード線には軟銅より線などの曲がりやすい線条が用いられているが、列車通過時の架線振動によって疲労断線する場合があります。コネクタを使用する上で長年の課題となっている。

コネクタを含む電車線金具の疲労耐久性評価はJIS<sup>1) 2)</sup>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の振動試験は主にボルトの緩みの確認試験として定められたものであり、同試験に合格したコネクタであっても現場では疲労断線が発生している。また、その加振条件は1968年に旧JRS（日本国有鉄道規格）として制定されて以来変更されておらず、現在の列車高速化

に伴う設備仕様の変更などは反映されていない。このような状況から、コネクタの疲労耐久性を適切に評価するための試験方法の確立が求められている。

そこで、コネクタの疲労耐久性を適切に評価する試験方法として、コネクタの疲労形態に着目した2種類の試験方法である鉛直振動試験と水平振動試験を提案した。これら試験の加振条件は、架線振動解析の結果を基に設定した。本稿では、シンプル架線においてちょう架線とトロリ線を接続するM-Tコネクタを例として、具体的な試験方法について述べる。なお、以降の文中では、「ハンガ」を「H」と略して表記する。

## 2. 試験の種類

コネクタの振動試験方法を定めるためには、実設備におけるコネクタの疲労形態を考慮する必要がある。図2に、架線の鉛直振動波形例と、過去の研究で報告された2種類のコネクタ疲労形態<sup>3)</sup>を示す。なお図2に示すようなM-Tコネクタは、各形態ともリード線のイヤー際において最大ひずみが生じる。

1つ目の疲労形態は、コネクタが接続する線条間の鉛直方向の振動変位の差（以下、「架線相対変位」）によるリード線の変形に起因する疲労である。これは主にパンタグラフ通過の瞬間に発生する。図3に、ある営業線における架線の鉛直方向の振動変位の実測結果と、そこへコネクタを取り付けた場合のリード線ひずみの構造解析結果<sup>3)</sup>を示す。架線相対変位とひずみの波形が一致していることから、架線相対変位がリード線の疲労に大きく影響していることがわかる。

2つ目の疲労形態は、コネクタの共振に伴うリード線の変形に起因する疲労である。コネクタの共振は、列車

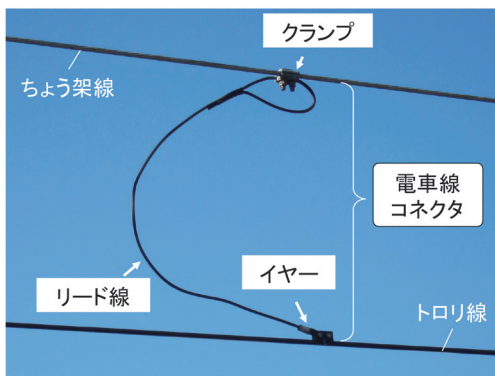


図1 電車線コネクタ

\* 電力技術研究部 集電管理研究室

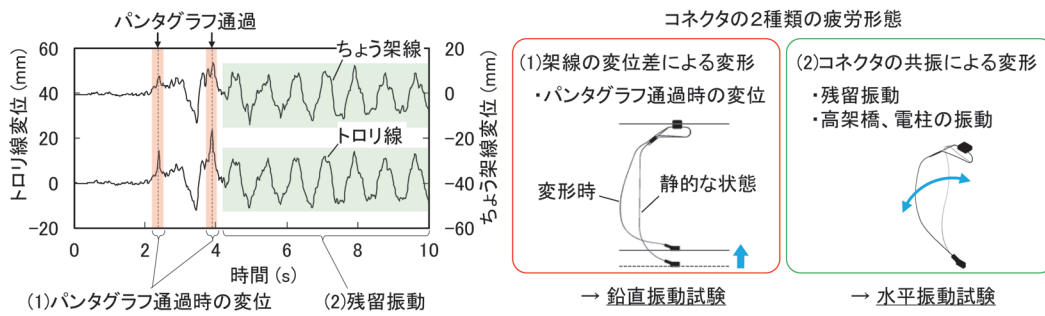


図2 コネクタにおける2種類の疲労形態と対応する振動試験方法

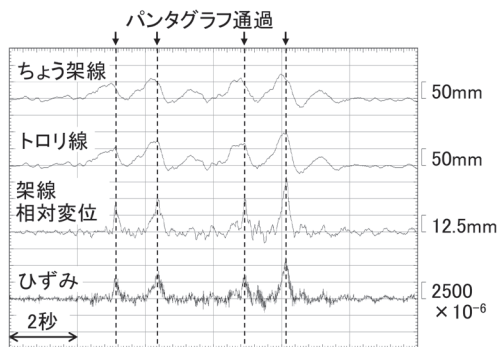


図3 架線振動波形およびコネクタ推定ひずみ波形<sup>3)</sup>

通過後の架線の残留振動や、高架橋桁や電柱が振動する場合に、架線の線条が水平方向に振動し、その周波数とコネクタの固有振動数が一致することで発生する<sup>4)</sup>。共振が発生するとリード線に著大な曲げひずみが多数加わるため、疲労により短期間で断線に至るおそれがある。

本研究では、それぞれの疲労形態に対応する2種類の振動試験を以下のように提案した。

- (1) 鉛直振動試験（架線相対変位による疲労に対応）  
コネクタのちょう架線側を固定し、架線相対変位を模擬してトロリ線側を鉛直方向に繰り返し押し上げた際の疲労耐久性を評価する。
- (2) 水平振動試験（コネクタの共振による疲労に対応）  
M-Tコネクタの1次振動モードを考慮して、コネクタに水平方向（まくらぎ方向）の振動を与えた際の疲労耐久性を評価する。

なお、ここでいう「疲労耐久性」とは、各試験後のリード線素線切れの有無を指す。以降の章で、評価の考え方と具体的な試験方法を述べる。

### 3. 架線振動の分析

本章では、鉛直および水平振動試験の加振条件の根拠となる架線振動について周波数や振幅の分析結果を示す。

#### 3.1 架線相対変位

架線相対変位の周波数は、図4中の式(1)に示すよう

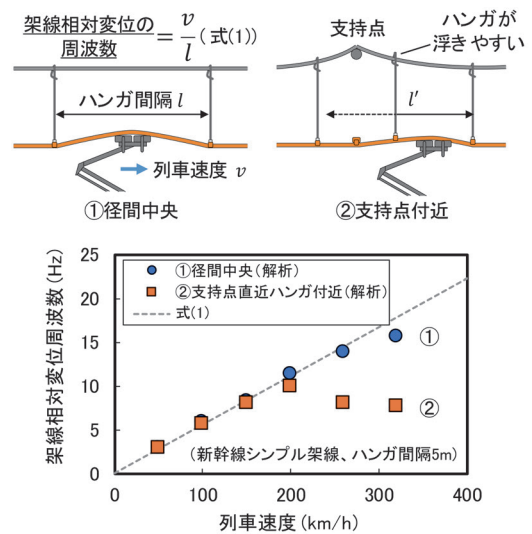


図4 列車速度と架線相対変位周波数の関係

に、列車速度  $v$  とハンガ間隔  $l$  からなる式  $(v/l)$  で表される<sup>5)</sup>。

図4中のグラフは、上記の式と整備新幹線用シンプル架線の振動周波数を解析した結果の比較であり、径間中央については両者が概ね一致する（図4のグラフ中の①）。しかし、シンプル架線の支持点付近では、ハンガがちょう架線に対して浮きやすいため、実質的にハンガ間隔が増加し、架線相対変位の周波数が低くなる傾向がある（図4のグラフ中の②）。

架線相対変位の振幅も径間内位置によって異なることが報告されている<sup>3)</sup>。図5は、整備新幹線用シンプル架線における径間内位置と架線相対変位の振幅および周波数の関係を示したものである。架線相対変位の振幅は、周波数とは逆に支持点付近で増加する傾向がある。これは、支持点でちょう架線が固定されているため、ちょう架線の振動変位が小さくなり、トロリ線とちょう架線の振動変位の差が大きくなるためである。このように、径間内位置によって架線相対変位の周波数や振幅の大きさが異なるため、鉛直振動試験の加振条件はコネクタを取り付ける位置ごとに設定する必要があると考えられる。

図6は、現在国内で使用されている新幹線用シンプル

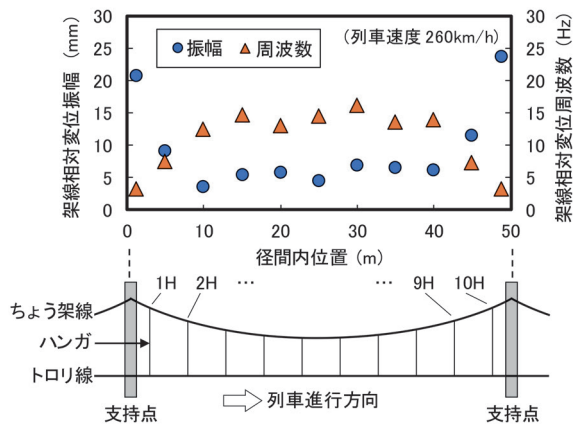


図5 径間内位置と架線相対変位振幅・周波数の関係

架線における架線相対変位の周波数と振幅を架線-パンタグラフ系シミュレーションにより算出した結果である。第5章では同図を用いた鉛直振動試験の試験条件設定手順を述べる。ここで、鉛直振動試験における加振振幅は、安全側に考えて架線に生じうる最大の架線相対変位振幅を考慮して設定する必要があると考えられる。過去の研究<sup>3)</sup>で、架線相対変位の振幅が大きくなる条件として「列車速度の増加」と「電車線張力の低下」が報告されており、図6におけるシミュレーション条件の列車速度は営業最高速度を、張力は気温変化等により生じ得る張力低下(-10%)を考慮している。同図から、先述のとおり、支持点近くでは周波数が低く振幅が大きい傾向が、また径間中央では周波数が高く振幅が小さい傾向が確認でき、グラフ全体では右肩下りの分布となることがわかった。表1に、図6から抽出したコネクタ取り付け位置ごとの架線相対変位の周波数範囲を示す。

### 3.2 架線水平振動

本節では、共振によるコネクタリード線の疲労断線<sup>4)</sup>が報告されている整備新幹線用シンプル架線区間かつ高架橋区間の架線振動を分析対象とする。

過去の研究<sup>6)</sup>で、高架橋へ入力される振動周波数は「走行速度 (m/s) / 車両長 (m)」が卓越し、この高架橋の振動が電柱や金具等に入力されることがわかっている。水平振動試験で考慮すべき架線の振動周波数範囲(以下、「架線周波数範囲」)は、走行速度を100~360km/hとし、車両長を25mとした場合、1.1~4.0Hzと算出できる。

架線水平方向の振動振幅は、構造解析プログラムを用いて算出した。図7に、構築した架線モデルを示す。本解析は、モデルの支持点箇所に電柱振動変位を入力して架線水平方向の振動変位を算出するものであり、所内架線設備における電柱加振試験を実施して解析結果の妥当性を確認した(図8)。解析結果の方がやや変位が大きくなる傾向があるものの、解析値と実測値が概ね整合す

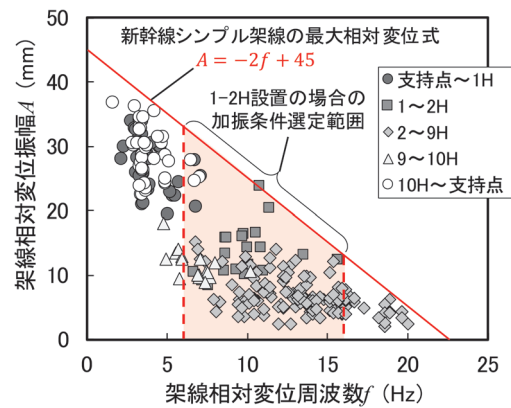


図6 架線相対変位の周波数と振幅の関係

表1 架線相対変位周波数範囲(新幹線シンプル架線)

コネクタ取り付け位置	周波数範囲 (Hz)
支持点~1H	2~7
1~2H	6~16
2~9H	7~20
9~10H	4~11
10H~支持点	1~7

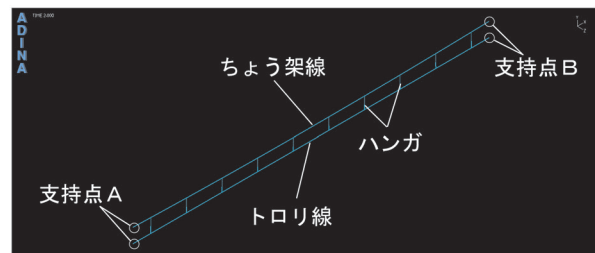


図7 架線構造解析モデル

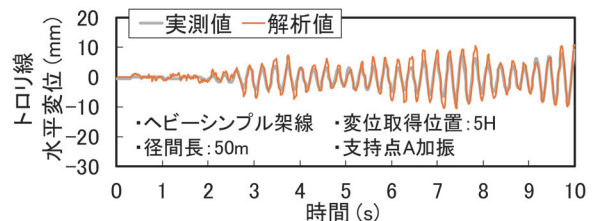
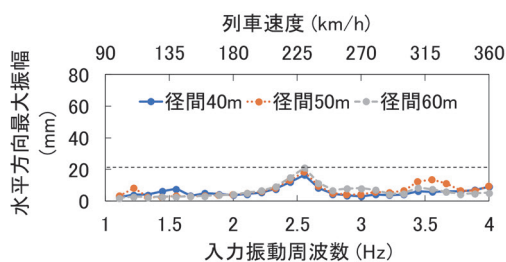


図8 架線構造解析の妥当性確認

ることから、本解析は妥当性があるものと判断した。図9に、高架橋区間の整備新幹線用シンプル架線における架線水平方向振動の解析例を示す。架線モデルに入力する電柱振動変位は、高架橋と電柱の連成モデルによる構造解析手法<sup>6)</sup>を用いて算出した。図9の各グラフ中に引いた破線は、それぞれのコネクタ取り付け位置における最大振幅である。図9より、架線水平方向振動は、ピークを示す振動数が電柱の固有振動数(2.5Hz)付近にあり、それ以外にも径間長に応じた架線の固有振動モード



(a) 支持点～1H



(b) 1H～2H

図9 架線水平方向振動解析例

表2 水平振動試験の加振振幅

最高列車速度 (km/h)	周波数範囲 (Hz)	加振振幅 (mm)			
		支持点 ～1H	1H ～2H	2H ～3H	3H ～4H
260	1.1～2.9	25	35	60	80
320	1.1～3.6		45		
360	1.1～4.0				

に起因するピークが多数確認された。

これら全てのピークに対応するため、各速度に応じた架線周波数範囲内の水平方向加振振幅を、最大振幅で一律に設定することとした(表2)。

#### 4. コネクタのひずみ周波数特性

従来のJISの振動試験では、設置するコネクタの高さについては記載がない。しかしながら、コネクタの高さによって周波数特性が異なることを考慮する必要がある。図10は、高さの異なるコネクタにトリ線押し上げによる加振を与え、発生するリード線ひずみと周波数の関係を構造解析により求めた結果である。図10より、ひずみのピークの周波数や大きさが、コネクタ高さによって変化することがわかる。これは、リード線の長さや傾き方によってコネクタの変形のしやすい周波数が変化するためである。よって、振動試験で安全側の評価を行うためには、想定されるコネクタ高さに対して、最もひずみが大きくなる加振周波数を設定する必要がある。

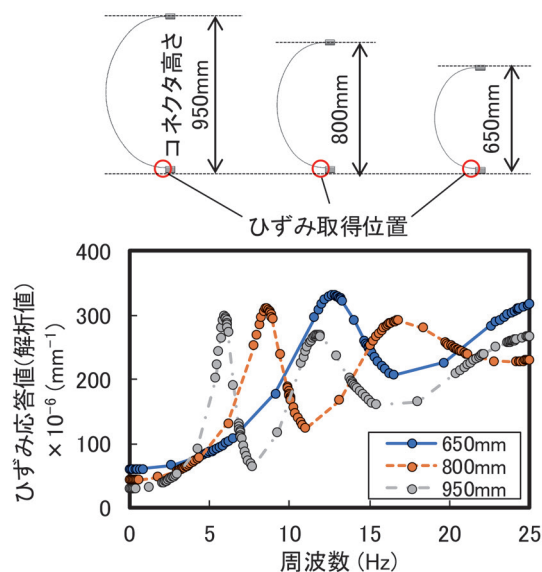


図10 コネクタ高さとしずみ周波数特性

#### 5. 試験条件設定手順

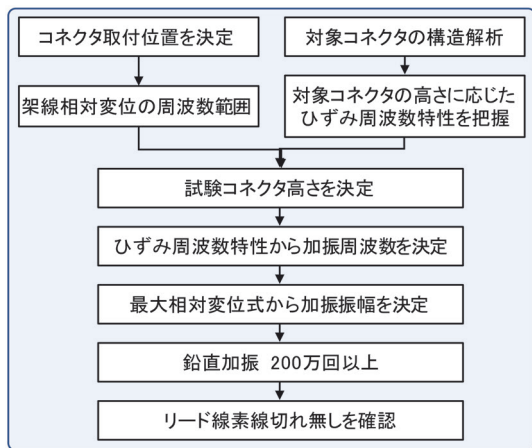
図11に、提案する鉛直振動試験および水平振動試験の実施フローを示す。ここでは例として、整備新幹線用コネクタを1H～2H間に取り付けることを想定し、両試験の試験条件設定手順を述べる。なお、整備新幹線用コネクタを1H～2H間(オーバーラップ箇所含む)に取り付ける場合、コネクタ高さの選択範囲は825～1475mmである。

##### 5.1 鉛直振動試験

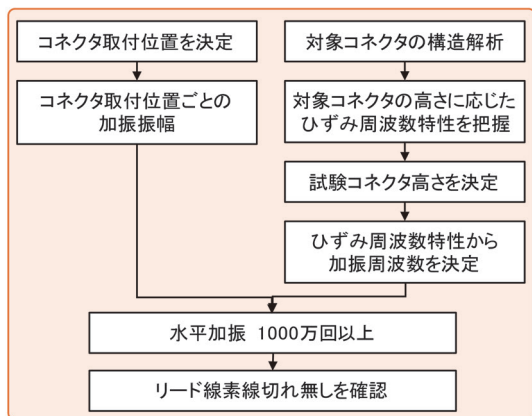
試験条件の設定では、図6に示した架線相対変位の周波数と振幅の関係を用いる。以下にその手順を示す。安全かつ実際の使用状況に即した加振振幅とするには、同一周波数のうち最大振幅を通る線(図6中の赤の実線)上から値を設定すればよいと考えられる。以降、この線の式を最大相対変位式と呼ぶ。

対象コネクタの取り付け位置(1H～2H)における架線相対変位の周波数範囲は、表1より6～16Hzである。第4章で述べたように、リード線ひずみの周波数特性はコネクタ高さによって異なるので、安全側の試験とするためには、上記の周波数範囲で最もひずみが大きくなるコネクタ高さ、およびそのときの周波数を選定する必要がある。図12は、選択範囲のコネクタ高さに対する最大ひずみの周波数特性の解析結果である。この場合、6～16Hzで最大ひずみとなるのは、高さ1225mmのコネクタ(周波数7.1Hz)であるので、試験用コネクタ高さは1225mm、加振周波数は7.1Hzと選定し、加振振幅は最大相対変位式から30.8mm(= -2×7.1+45)と定まる。

本試験の加振回数は、従来のJIS試験と同じく $2 \times 10^6$



(a) 鉛直振動試験



(b) 水平振動試験

図 11 試験実施フロー

回以上とした。2×10<sup>6</sup>回以上ならば一般的なコネクタの取替周期（8～15年程度）における通過パンタグラフ数を上回ると考えられる。

## 5.2 水平振動試験

水平振動試験では、実設備と同様にコネクタのちょう架線側とトロリ線側を同時に水平方向に加振することが必要であるため、新たに振動試験機を製作した（図13）。

対象コネクタの取り付け位置（1H～2H）における加振振幅は、表2より35mm（260km/hを想定）である。安全側の試験とするためには、鉛直振動試験と同様に、ひずみが最大となるコネクタ高さに加振周波数を選定する必要がある。図14は、コネクタモデルに対して水平振動試験を模擬した振動を入力した際の、最大ひずみの周波数特性の解析結果である。架線周波数範囲1.1～2.9Hz（表2参照）において最大ひずみとなるのは、高さ1425mmのコネクタ（周波数1.8Hz）であったので、試験用コネクタの高さは1425mm、加振周波数は1.8Hzを選定する。

架線水平振動は、1回の列車通過によって、ある程度

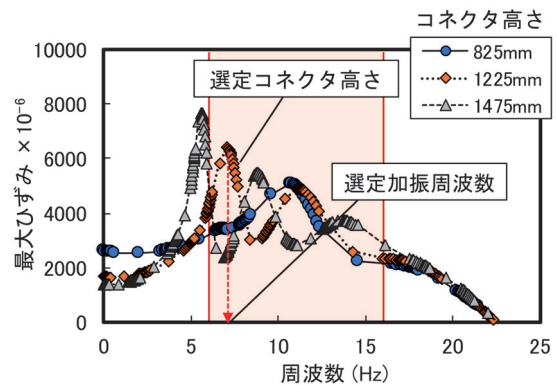


図 12 試験条件の選定（鉛直振動試験）

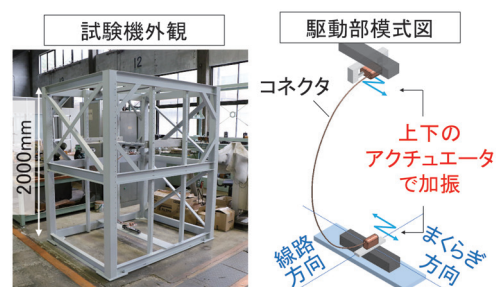


図 13 コネクタ水平振動試験機

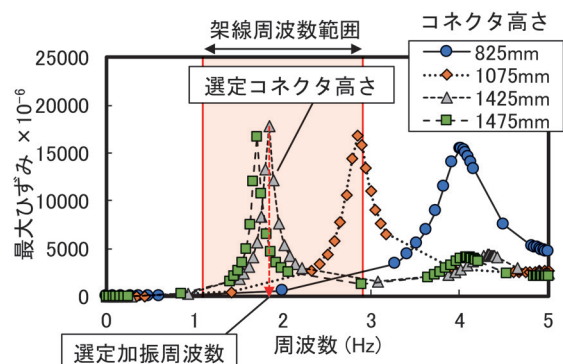


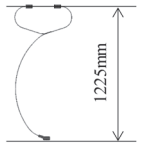
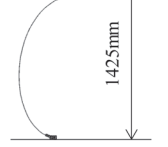
図 14 試験条件の選定（水平振動試験）

の時間、継続し振動回数は架線条件や列車速度などで異なるため、これを基準に加振回数を定めるのは困難である。そこで、水平振動試験の加振回数は、一般の振動試験において実用上十分な上限値と考えられている10<sup>7</sup>回以上とした。

## 6. 実際のコネクタを用いた提案試験方法の確認

本章では、上記で提案した試験を実際のコネクタに対して実施し、現場でのコネクタの断線状況と試験結果が整合するかを確認した結果を示す。ここでは、前章と同じく整備新幹線用コネクタを1H～2H間に取り付けることを想定し、図11の試験実施フローに従って振動試

表 3 試験条件

疲労要因	架線相対変位	共振
実設備の被害状況	破断例なし	破断例あり
対応する試験	鉛直振動試験	水平振動試験
加振周波数	6.3Hz	1.8Hz
加振振幅	32.4mm	35mm
ひずみが最大となるコネクタ高さ	 122.5mm	 142.5mm

験を実施した。表 3 に、前章で定めた試験条件を示す。なお、両試験とも、試験に使用したコネクタの個数は 1 個である。

まず、鉛直振動試験の結果を述べる。図 15 (a) に試験機に取り付けた状態のコネクタを、図 15 (b) に試験結果を示す。2×10<sup>6</sup> 回加振した結果、リード線に素線切れは発生しなかった。これより、対象コネクタを 1H～2H 間に取り付ける場合、同コネクタは架線相対変位によって疲労破断しないと考えられる。対象コネクタが架線相対変位で破断したという事例は、これまでに報告されておらず、今回の試験結果はこれと整合する。

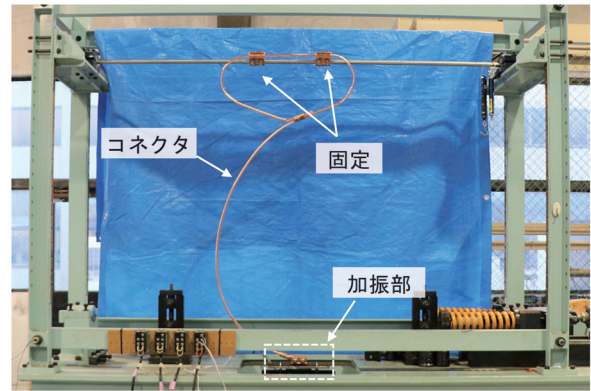
次に、水平振動試験の結果を述べる。図 16 (a) に試験機に取り付けた状態のコネクタを、図 16 (b) に試験結果を示す。水平振動試験の結果、対象コネクタは 10<sup>7</sup> 回の加振到達前 (68.7 万回) にリード線が全破断した。これより、対象コネクタを 1H～2H 間に取り付ける場合、同コネクタは列車速度やコネクタ高さの条件が合致したときに疲労破断する可能性があると考えられる。このことは、対象コネクタが共振で破断した事例<sup>4)</sup> が報告されていることと整合する。

以上より、本試験の結果は実設備におけるコネクタの被害状況と整合することが確認された。よって、本試験を実施することにより、コネクタの実用上の疲労耐久性を評価できると考えられる。

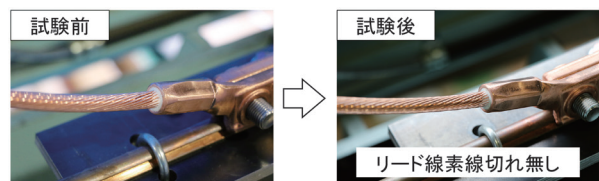
## 7. まとめ

コネクタの疲労耐久性を適切に評価するため、コネクタの 2 つの疲労要因である架線相対変位と共振に着目し、それぞれに対応する鉛直振動試験と水平振動試験からなる振動試験方法を提案した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 鉛直振動試験について、架線-パンタグラフ系シミュレーションを用いてコネクタ取り付け位置に

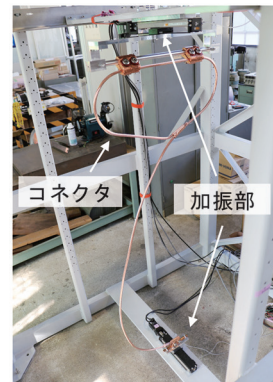


(a) コネクタを試験機に取り付けた状態

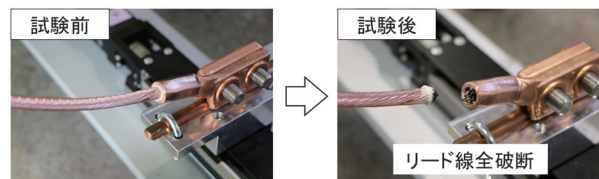


(b) 試験結果

図 15 鉛直振動試験の様子



(a) コネクタを試験機に取り付けた状態



(b) 試験結果

図 16 水平振動試験の様子

応じた架線相対変位の振幅と周波数の関係を把握し、加振条件を設定するための関係式を提案した。

- (2) 水平振動試験について、架線構造解析により水平方向の架線振動波形を把握し、径間内位置に応じた加振振幅および架線周波数範囲を提案した。
- (3) コネクタのひずみ周波数特性と架線周波数範囲を用いて、架線振動に対してひずみが最大になる試

験コネクタ高さの選定方法を提案した。

- (4) 上記試験方法の実施フローを作成した。さらに、実際のコネクタに対して同試験を実施し、学会等で報告されているコネクタの断線状況と試験結果が整合することを確認した。

## 文 献

- 1) 日本産業規格 JIS E 2002, 2020
- 2) 日本産業規格 JIS E 2201, 2013
- 3) 山下主税, 小原拓也, 小林樹幸: 電車線コネクタの疲労対策, 鉄道総研報告, Vol.32, No.4, pp.17-22, 2018
- 4) 米倉裕司, 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
- 5) 小原拓也, 山下主税: 電車線コネクタの鉛直振動試験の検討, 令和4年電気学会全国大会講演論文集, 5-142, pp.238-239, 2022
- 6) 常本瑞樹, 松岡弘大, 後藤恵一, 薄広歩, 以倉慶子: 列車通過時の高架橋振動による電車線路設備損傷の低減対策, 鉄道総研報告, Vol.34, No.9, pp.35-40, 2020