

架線の振動波形に基づいて 電車線コネクタの疲労を評価する



小原 拓也
Takuya Ohara
電力技術研究部
集電管理研究室
副主任研究員



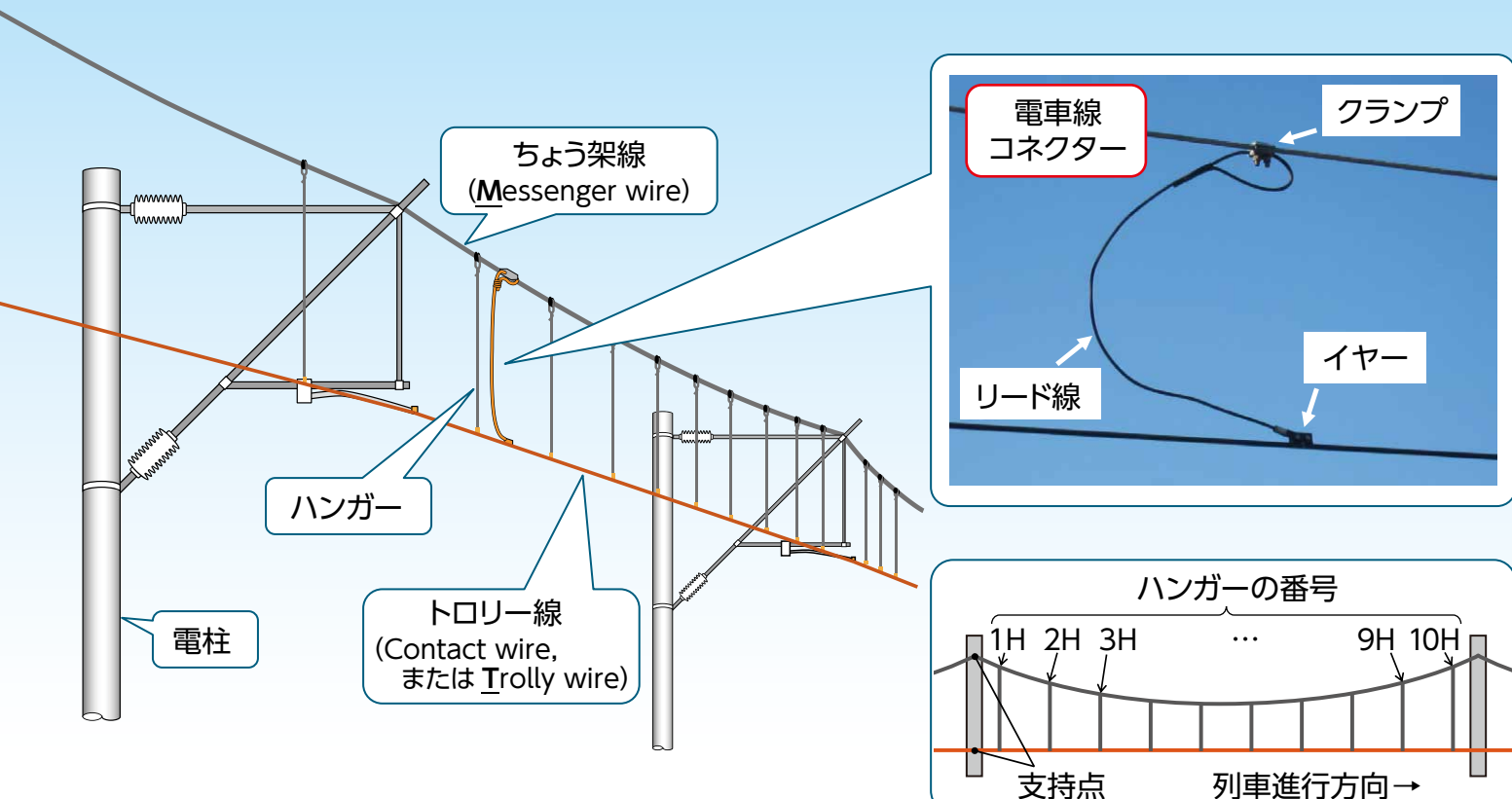
山下 主税
Chikara Yamashita
電力技術研究部
集電管理研究室長

はじめに

架空電車線（架線）方式の電気鉄道では、パンタグラフとトロリー線の接触や、列車通過に伴う高架橋の振動などが加振源となって架線を振動させます。そして、その振動は波として架線を伝わり、架線に取り付けられている金具を振動させます。電車線コネクタ（図1。以下

、「コネクタ」）は架線を電氣的に接続して、電線や金具に不要な電流が流れることを防ぐ金具です。コネクタのリード線には軟銅より線などの曲がりやすい電線が使用されていますが、上記の架線振動によって疲労し、最悪の場合は断線してしまうこともあります。しかし、コネクタの疲労を評価するための試験方法はこれ

図1 シンプル架線と電車線コネクタ



※本記事では列車進行方向に沿って1H→10Hの順に定義します。

コネクターの2種類の疲労形態

までに確立されていませんでした。

そのような背景から、鉄道総研ではコネクターの疲労に及ぼす振動波形の影響解明¹⁾、振動波形に対応した振動試験方法²⁾に関する研究に取り組んできました。本記事では、コネク터를疲労させる2種類の振動波形について解説し、それぞれに対応した振動耐久試験方法を紹介します。なお、本記事で扱う架線は**シンプル架線**[®]として、ちょう架線(M)とトロリー線(T)を接続するM-Tコネクターの試験方法について述べます。また、「H」の表記はハンガーを示します。

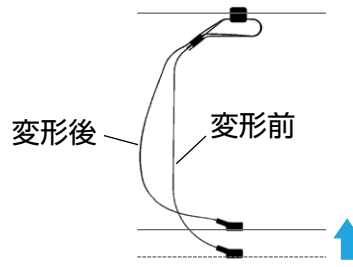
コネク터를疲労させる振動波形と対応する試験方法

列車がコネクター設置位置を通過するとき、コネクターが接続するちょう架線やトロリー線には**図2**のような振動が発生します。このうち、パンタグラフが通過する瞬間と通過した後の2種類の振動によりコネクターは変形して各部位にひずみが発生し、ひずみの大きさと回数によってはリード線が疲労断線します。ここでは、振動波形のどの要素がコネクターの疲労に関わっているかを解説します。

シンプル架線

ちょう架線とトロリー線の2本の線条で構成された架線の方式のことです。

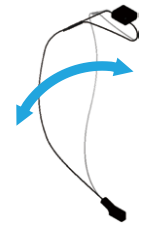
(1) 架線の変位差による変形 ・パンタグラフ通過時の変位



→ 鉛直振動試験

(2) コネクターの共振による変形

- ・残留振動
- ・高架橋、電柱の振動



→ 水平振動試験

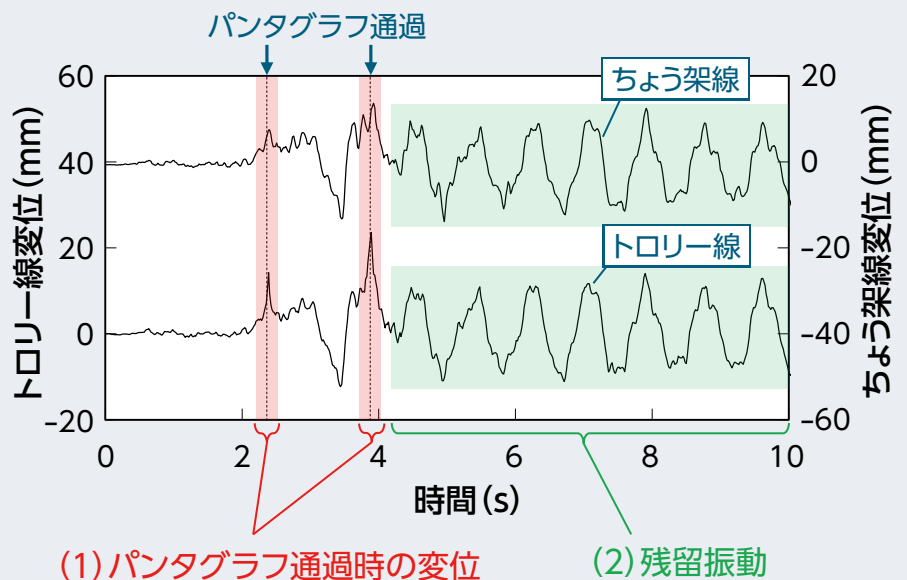


図2 2種類のコネクター疲労形態と対応する振動試験方法

パンタグラフがコネクター位置を通過する瞬間、トロリー線はパンタグラフによって直接押し上げられますが、ちょう架線はハンガーなどを介して間接的に押し上げられます。そのため、ちょう架線とトロリー線の変位には差が生じ、コネクターは鉛直方向に押しつぶされるように変形します**(図3)**。この振動変位の差を「架線相対変位」とよんでいます。架線相対変位による疲労では、コネクターに生じるひずみの大きさは架線相対変位の振幅やコネクター形状に依存し、ひずみの発生回数はパンタグラフの通

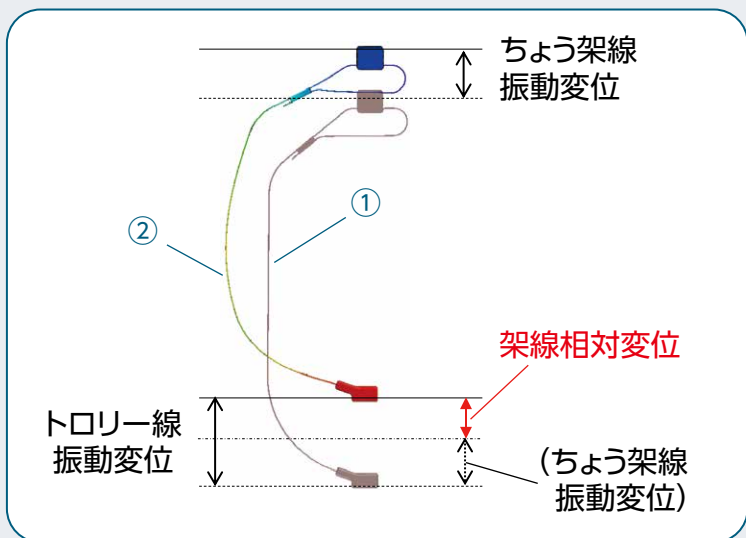
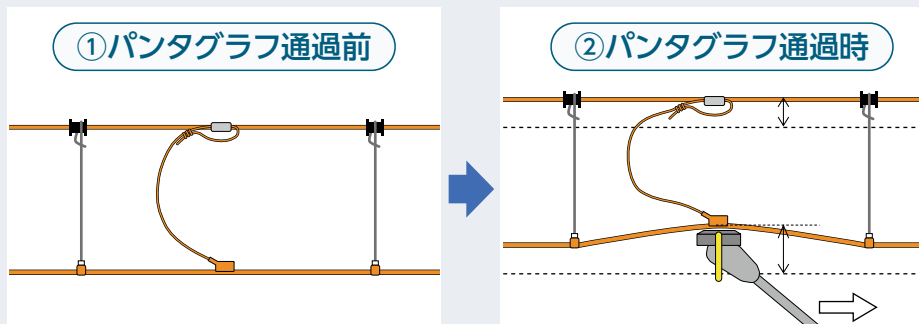


図3 パンタグラフ通過時の架線相対変位

過数と一致します。

パンタグラフがコネクタ位置を通過した後、架線は一定時間揺れ続けます。この振動を「残留振動」とよびます。残留振動の周波数とコネクタの固有振動数[※]が一致すると、コネクタは共振という現象により水平方向（まくらぎ方向）に大きく揺れて変形します。残留振動は一定時間続くため、一度共振が発生するとコネクタには大きなひずみは何度も生じ、短期間で疲労断線に至るおそれがあります。

鉄道総研では、コネクタを疲労させる2種類の振動波形に対応する振動耐久試験方法を次のように提案しました。

※ 固有振動数

ある物体が自由振動するときの振動数のことです。物体をその固有振動数で加振すると大きく振動（共振）します。

(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ー線側を鉛直方向に繰り返し押し上げた際の疲労耐性を評価する。

(2) 水平振動試験（コネクタの共振による疲労に対応）

M-Tコネクタの共振の形態を考慮して、コネクタに水平方向の振動を与えた際の疲労耐性を評価する。

架線振動波形の分析と加振条件の選定

続いて、振動試験の具体的な加振条件（周波数、振幅）を、架線振動波形を分析することにより決めました。ここでは新幹線用シンプル架線を例に、

鉛直振動試験の加振条件の根拠となる架線相対変位と、水平振動試験の加振条件の根拠となる残留振動（特に、架線の水平振動）について分析した結果を述べます。

架線相対変位

図4は、架線－パンタグラフ系シミュレーションで求めた架線相対変位の周波数と振幅の関係図です。記号はコネクタの取付位置ごとに区別しています。図4より、支持点付近とそれ以外で周波数と振幅の大小関係が異なることがわかりました。

振動試験は安全側の評価をする必要があるため、実際に発生し得る最も厳しい条件で加振する必要があります。そこで、図4において振幅が最大となる点を通る線（赤の実線）を引きました。次に、コネクタの取付位置によって決まる架線相対変位の周波数範囲で赤実線を

区切りました (図4赤の破線)。表1に、図4から抽出した架線相対変位の周波数範囲と、それに対応する赤実線上の振幅範囲を示します。例えば、コネクターを1H～2H間に取り付ける場合、加振の周波数条件は6～16Hzで、振幅条件は13～33mmとなります。

架線水平振動

学会などでの疲労断線の報告や過去の研究³⁾によって、コネクターを共振させる架線の残留振動波形には、高架橋構造物の振動周波数成分が含まれていることがわかっています。高架橋区間を列車が通過する際、高架橋には「走行速度 (m/s) / 車両長 (m)」で表される周波数をもつ鉛直振動が発生しますが、電柱を介すると水平方向の振動となって架線に伝わります (図5)。例えば、車両長25mの列車が走行速度260km/h (72m/s) で通過すると、約2.9Hzの水平振動がコネクターに入力されます。

架線水平振動の振幅は、有限要素法¹⁾を用いた架線の振動シミュレーションにより分析しました。事前に高架橋と

有限要素法

物体を小さな要素に分割し、各要素の特性を単純な数学モデルで近似して計算することで、物体全体の挙動を解析する手法です。

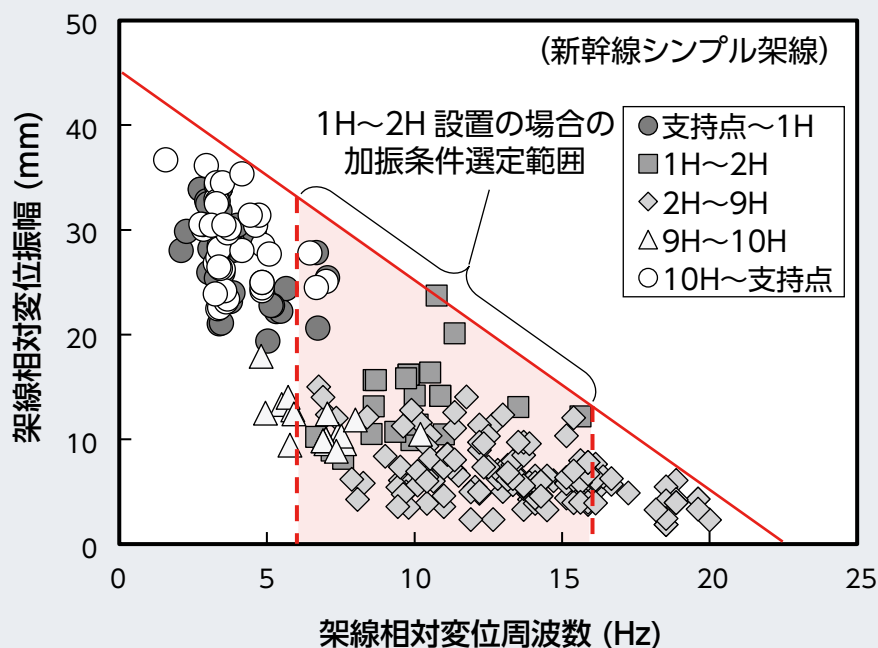
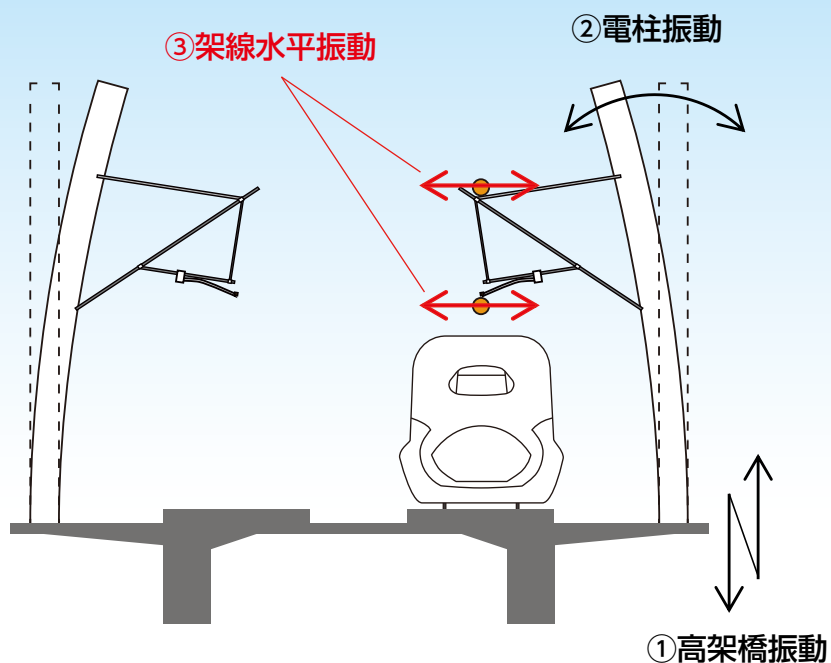


図4 架線相対変位の周波数と振幅の関係

表1 鉛直振動試験の周波数および振幅範囲 (新幹線シンプル架線)

コネクター取付位置	周波数範囲 (Hz)	振幅範囲 (mm)
支持点～1H	2～7	31～41
1H～2H	6～16	13～33
2H～9H	7～20	5～31
9H～10H	4～11	23～37
10H～支持点	1～7	31～43

図5 列車通過時の架線水平振動



電柱の連成解析²⁾により電柱の水平振動波形を求め、架線モデルに電柱の振動を入力するものです。電柱間の距離や列車走行速度を変化させ、コネクタの取付位置における振幅を計算しました。解析例として、1H～2H間に生じる架線水平振動の振幅を図6に示します。解析条件によってさまざまなピークが発生しますが、安全側の評価として全てのピークに対応できるように、加振振幅を表2のように決めました。

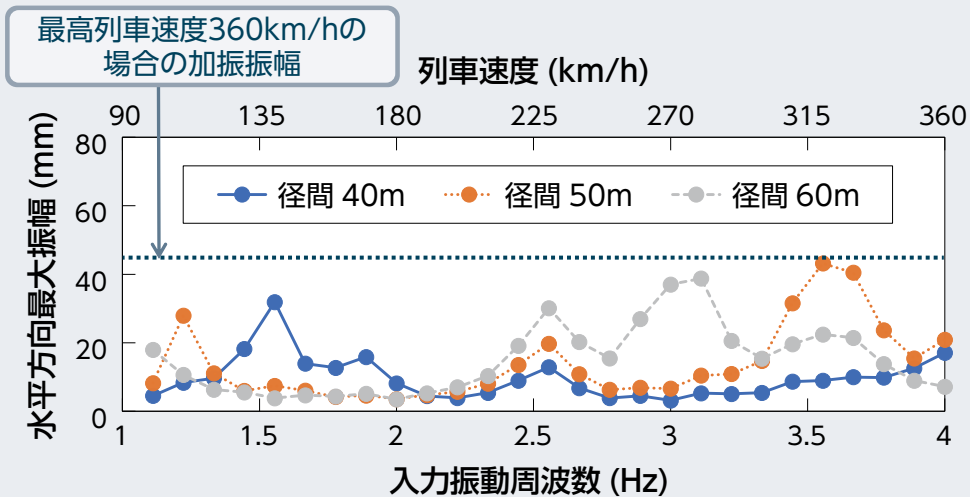


図6 架線水平振動解析例 (1H～2H)

表2 水平振動試験の加振振幅 (新幹線シンプル架線)

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

試験実施フローと実施例

架線振動波形の分析結果をふまえて、コネクタの振動耐久試験の実施フローを図7のよう

に提案しました。コネクタは高さ(ちょう架線～トロリー線間の距離)によって固有振動数に変化し、ひずみが最大になる加振周波数が異なります。そこで本試験では、上で紹介した加

図7 試験実施フロー

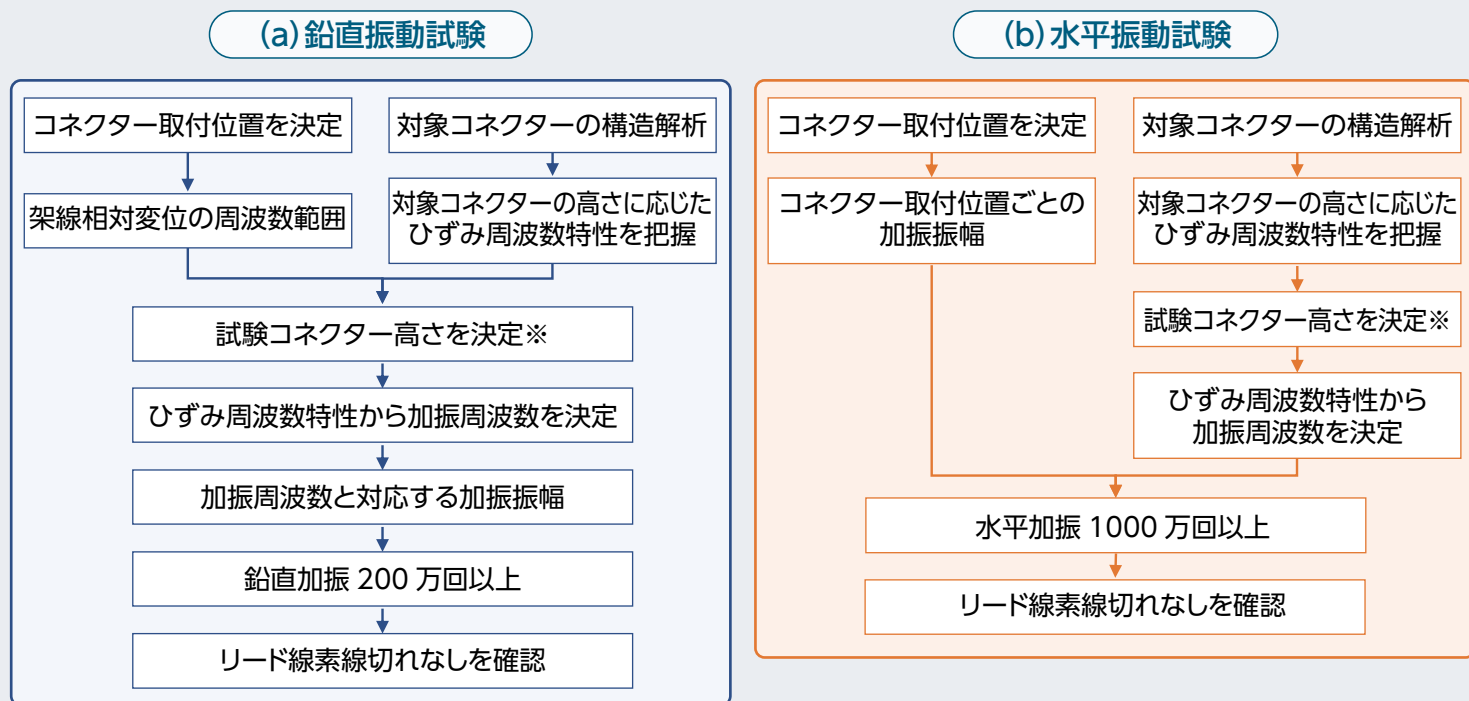

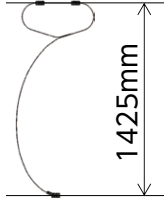

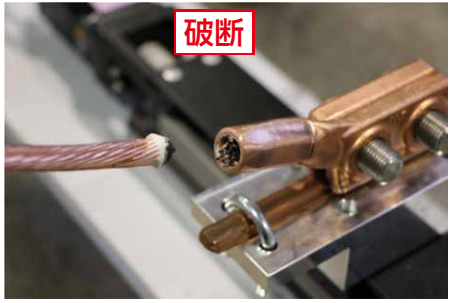


表3 実際のコネクターに対する試験の例

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／加振振幅	6.3Hz / 32.4mm	1.8Hz / 35mm
ひずみが最大となるコネクター高さ		
試験結果		

振条件に加えて、試験時のひずみが最大となるコネクター高さを選定するステップ(図7※印)を設け、より安全側の試験としています。

鉛直振動試験の加振回数は200万回以上としました。これは、200万回以上ならば一般的なコネクターの取替周期(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ためです。一方、列車通過時の架線水平振動の回数は架線条件や列車速度などで異なるため、これを基準に水平振動試験の加振回数を定めるのは困難です。そこで、同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1000万回以上としました。

次に、実際のコネクターに対して提案する試験を実施した例を紹介します。ここでは整備新幹線区間の1H～2H間にコネクターを取り付けることを想定しました。対象のコネクターは、共振による断線事例が学会などで報告されている一方、架線相対変位による断線事例は報告されていません。表3に、設定した加振条件と試験結果を示します。表3より、本試験の結果は

実設備の被害状況と整合することが確認されました。なお本試験で破断した場合には、コネクター高さは径間内の取付位置で異なるので、本試験を満足するコネクター高さとなるように取付位置を変更することも疲労断線対策として有効と考えられます。

おわりに

本記事ではコネクターの振動疲労耐久性を適切に評価する試験方法として、鉛直振動試験と水平振動試験を提案した取り組みを紹介しました。今後は、本試験方法の規格化を進める予定です。RRR

文献

- 1) 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
- 2) 小原拓也: 架線振動解析に基づく電車線コネクタの振動試験方法, JREA, Vol.66, No.12, pp.47513-47516, 2023
- 3) 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