

電車線コネクタの水平振動試験の検討

小原 拓也* 山下 主税 (鉄道総合技術研究所)

Study on Horizontal Vibration Test for Connector of Overhead Contact Line
Takuya Ohara*, Chikara Yamashita, (Railway Technical Research Institute)

For the catenary system, fatigue of the connector is a major problem. Therefore, establishment of vibration test methods that can properly evaluate the connector fatigue is required. In this paper, the horizontal vibration test is proposed as vibration test for fatigue caused by connector resonance and result of examination of the test conditions by using catenary structural analysis are presented.

キーワード：電車線コネクタ，疲労，振動試験，共振，構造解析
(Connector of overhead contact line, fatigue, vibration test, resonance, structural analysis)

1. はじめに

電車線コネクタ (以下、コネクタとよぶ) は、電車線の線条間を電氣的に接続する金具である。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電線が用いられているが、列車通過時の電車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路金具の振動耐久性評価は JIS^{(1),(2)}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 の振動試験は正確にはボルトの緩みを確認するための試験で、疲労試験として規定されたものではなく、コネクタの振動疲労耐久性を適切に評価できていないおそれがある。このような状況から、鉄道事業者からはコネクタの振動疲労耐久性を適切に評価するための振動試験の確立が求められている。

筆者らは、コネクタの疲労形態が、①コネクタがつなぐ電線間の振動変位の差による疲労、および②コネクタの共振による疲労であることに着目し、新たなコネクタ振動試験として、各疲労形態に対応する 2 種類の振動試験とする方針としている⁽³⁾。①電線間の振動変位の差による疲労に対応する試験は、従来の JIS 試験と同様にトロリ線を鉛直方向に繰り返し押し上げる形式だが、コネクタの振動特性に応じた加振条件を設定した⁽⁴⁾。

本稿では、上記 2 種類の振動試験のうち、②コネクタの共振による疲労に対応する試験の概要、および加振条件について検討した結果を述べる。なお本稿では、共振による疲労断線がしばしば発生している新幹線高架橋区間の M-T コネクタを対象とする。

2. まくらぎ方向の振動とコネクタの共振

コネクタは、加振する方向によって発生する振動の形態

が異なる。図 1 に、整備新幹線用コネクタの構造解析モデルに鉛直方向、およびまくらぎ方向の振動を与えた際の、リード線最大ひずみの周波数特性⁽⁵⁾を示す。この解析では、鉛直方向、まくらぎ方向ともに複振幅 10mm、10 秒間の正弦波振動変位を与えている。図 1 より、まくらぎ方向加振のひずみのピークが 3Hz に存在し、このとき鉛直方向加振に比べてひずみが数倍大きいことがわかる。これはコネクタの 1 次振動モードがまくらぎ方向にたわむ形態であり、同モードの固有周波数が 3Hz 付近に存在するためである。また、従来のコネクタ振動試験のような鉛直方向の加振では、まくらぎ方向にたわむ 1 次振動モードが発生しないことがわかった。なお、これまでに実施したコネクタ構造解析⁽⁶⁾の結果、1 次振動モードがまくらぎ方向にたわむ形態であることや、1 次固有周波数が 10⁰Hz のオーダーであることは、多くの一般的なコネクタに共通している。

コネクタの共振を引き起こす架線振動は、列車通過後の残留振動や、高架橋や電柱が共振した場合の振動など、ある程度の時間継続する振動であると考えられる。これらの振動の周波数は、架線や電柱の固有周波数⁽⁷⁾を考慮すると 1~

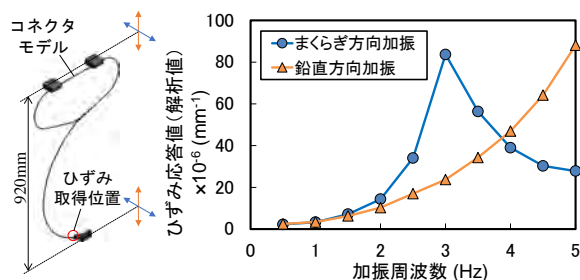


図 1 加振方向に対するコネクタひずみの周波数特性⁽⁵⁾

Fig. 1. Frequency characteristics of the connector strain for excitation direction

3Hz 程度の比較的低いものと考えられ、先述したコネクタの 1 次固有周波数 (10⁰Hz オーダー) と一致した場合にコネクタが共振する可能性がある。実際の現場においても、列車通過時の架線振動によってコネクタがまくらぎ方向に激しく振動し、疲労断線に至った事例が報告されている⁽⁸⁾。

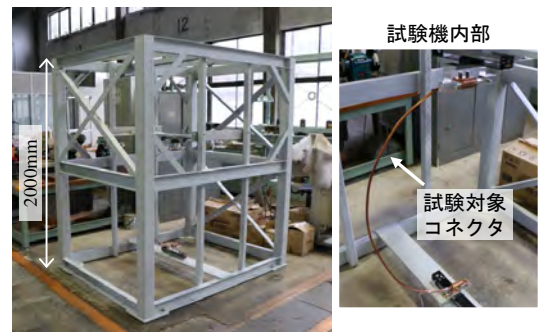
そこで本研究では、コネクタにまくらぎ方向 (水平方向) の振動を与えた際の疲労耐性を評価するものとした。以降、この試験を水平振動試験と呼ぶこととする。

3. 水平振動試験の概要

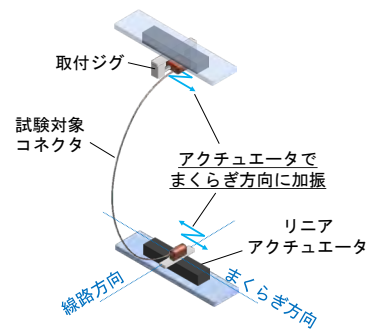
〈3・1〉 振動試験機 水平振動試験に用いる振動試験機は、実設備と同様にコネクタのちょうど架線側およびトロリ線側を同時に水平加振可能な試験機である必要があるため、本研究において新たに製作した。図 2 に試験機の外観、および加振部の模式図を示す。本試験機は、上下にアクチュエータを備え、これによりコネクタをまくらぎ方向に加振する。また、ちょうど架線側のアクチュエータ位置を鉛直方向および線路方向に変更することが可能で、任意の高さのコネクタ (150~1500mm) の取り付けや、電車線流れ (試験機中心から±500mm) を想定することも可能である。さらに、取付ジグを交換することで様々な種類のコネクタを取り付けることができる。

〈3・2〉 試験手順 水平振動試験は、まずコネクタの固有周波数を含む振動特性を調査し、その結果から使用時に最もリード線ひずみが大きくなる加振周波数で振動耐久試験を行うものとした。提案する水平振動試験の手順を以下に示す。

- 1) ひずみゲージを貼り付けた対象コネクタを水平振動試験機に取り付け、周波数を変化させながらコネクタを加振し、ひずみの周波数特性を取得する。ひずみゲージを貼る位置は、トロリ線イヤー付近など、加振時のひずみが最大になると想定される位置とする。
または、コネクタ構造解析手法⁽⁵⁾によりまくらぎ方向の振動に対するひずみの周波数特性を算出する。本稿では、2 種類のコネクタモデルのひずみ周波数特性を算出した例を示す (図 3)。
- 2) 取得したひずみ周波数特性と、次章で説明する架線で生じ得る周波数範囲 (以下、架線周波数範囲とよぶ) を比較する。図 3 には例として、後述する列車速度 100~300km/h に対応する 1.11~3.33Hz の架線周波数範囲を示した。対象コネクタの固有周波数が架線周波数範囲内にある場合、固有周波数を振動耐久試験の加振周波数とする (図 3(a))。対象コネクタの固有周波数が架線周波数範囲内がない場合、同範囲内においてひずみ最大となる周波数を振動耐久試験の加振周波数とする (図 3(b))。



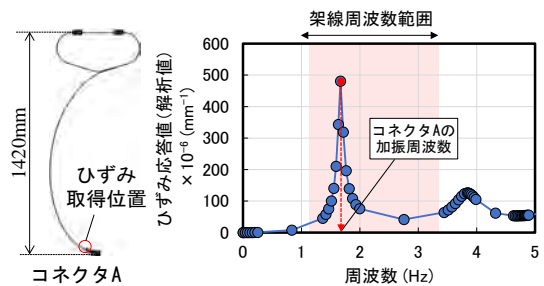
(a) 試験機外観



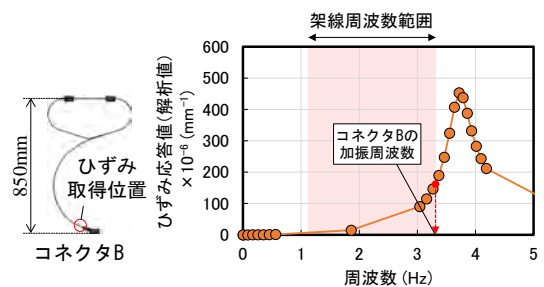
(b) 加振部模式図

図 2 コネクタ水平振動試験機

Fig. 2. Horizontal Vibration Testing Machine for the Connector



(a) コネクタの固有周波数が架線周波数範囲内にある場合



(b) コネクタの固有周波数が架線周波数範囲内がない場合

図 3 加振振動数の設定方法

Fig. 3. Setting method of excitation frequency

3)2)で定めた加振周波数で水平振動耐久試験を実施する。このときの加振振幅については次章で説明する。

以上の手順により、架線のまくらぎ方向振動に対してコネクタに生じ得る最大ひずみを考慮した振動試験が実施可能になると考えられる。

4. 試験条件の検討

本章では、3.2 節の手順 2)で使用する架線周波数範囲、および手順 3)で使用する振動耐久試験の加振振幅について検討した結果を述べる。

〈4・1〉 架線周波数範囲 これまでの研究⁹⁾で、高架橋へ入力される振動は車両の輪軸到来周期に依存する振動数成分「走行速度(m/s)/車両長(m)」が卓越し、この高架橋の振動によって電柱や金具等に振動が入力されることがわかっている。図 4 に、列車走行速度と高架橋の卓越振動数の関係を示す。

水平振動試験に用いる架線周波数範囲は、図 4 の関係を用いて設定することとした。今回の検討では PHC シンプル架線区間を想定し、対象列車速度は同区間における営業最高速度 260km/h を考慮して 100~300km/h とした。この場合の架線振動数範囲は、図 4 より 1.11Hz~3.33Hz となる。

〈4・2〉 加振振幅 水平振動耐久試験の加振振幅は列車通過時に発生する架線のまくらぎ方向の振幅を基準に設定する。本研究では、構造解析プログラム ADINA Structures (ニュートンワークス社)を用いて架線モデルを構築し、構造解析により架線振動変位を算出することとした。図 5 に架線モデルの例を示す。架線線条およびハンガは梁要素とし、トロリ線とハンガの接続は固定支持、ちょう架線とハンガの接続は回転支持とした。また、ちょう架線はより線であるが、文献¹⁰⁾の手法に基づいて単線モデル化した。

上記解析の妥当性を検証するため、鉄道総研内の架線設備に対して加振実験を行い、それを模擬した解析結果との比較を行った。表 1 に、加振実験および解析条件を示す。本検証では径間長 50m、1 径間の架線を対象とした。加振実験では 2 つの支持点のうち片方の支持点をまくらぎ方向に加振し、第 5 ハンガ位置のトロリ線まくらぎ方向変位を測定した。解析では片側の支持点(トロリ線およびちょう架線モデルの端点)にまくらぎ方向の強制変位を入力し、もう片方の支持点は固定として、加振実験と同様に第 5 ハンガ位置のトロリ線まくらぎ方向変位を算出した。解析に用いた入力波形を図 6(a)に示す。入力波形は、加振実験で測定した支持点のまくらぎ方向変位波形とした。実測および解析結果を図 6(b)に示す。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ることから、本解析手法は妥当性があるものと判断した。

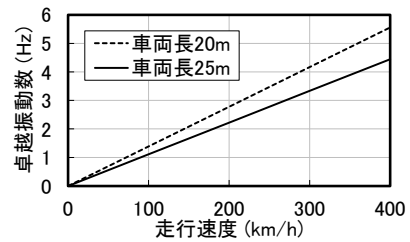


図 4 列車走行速度と高架橋桁中央変位の卓越振動数の関係⁹⁾

Fig. 4. Relationship between train speed and predominant frequency of displacement at center of viaduct girder

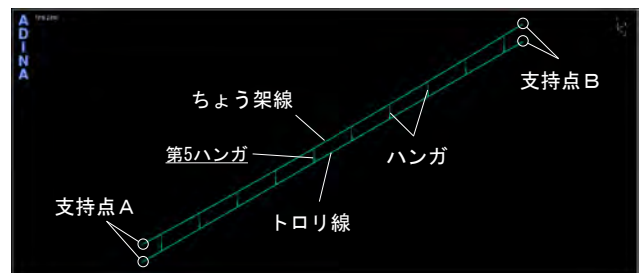


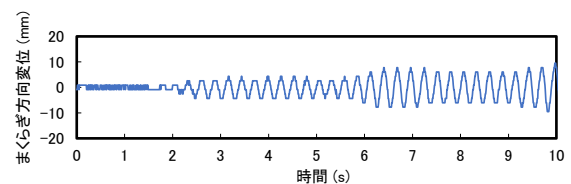
図 5 架線構造解析モデル

Fig. 5. Structural analysis model of catenary

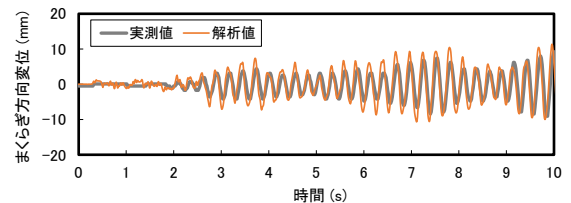
表 1 加振実験および解析条件

Table 1. Vibration experiment and analysis conditions

| 架線構造 | シンプル架線 |
|---------|----------------------|
| ちょう架線 | St135 (張力 2t) |
| トロリ線 | GT-M170 (張力 1t) |
| 径間長/径間数 | 50m/1 径間 |
| 変位入力位置 | 支持点 A (支持点 B は固定) |
| 入力波形 | 図 6(a)参照 |
| 変位測定位置 | トロリ線の第 5 ハンガ位置 |



(a) 支持点への入力波形



(b) 実測および解析結果

図 6 架線モデルの妥当性検証

Fig. 6. Validation of the catenary model

続いて、同架線構造解析手法を用いて、営業線の架線に生じ得るまくらぎ方向の振幅を算出した。過去の研究^{(9),(11)}で、高架橋と電柱の連成モデルによる構造解析手法が確立されており、列車が高架橋を通過する際の電柱振動変位の算出が可能となっている。図 7 に、上記高架橋-電柱連成モデルを用いて算出した、高架橋振動による電柱支持点のまくらぎ方向最大振幅を示す。図 7 は、高架橋桁間長や電柱種類など、一般的な高速鉄道橋において想定される設備条件を組み合わせた解析結果のうち、支持点のまくらぎ方向振幅が最大となる結果をまとめたものである。また図 7 の横軸は、図 4 の関係から求めた周波数を示した。本検討では、コネクタを共振させるまくらぎ方向の架線振動を、高架橋および電柱振動に起因するものと仮定し、図 7 の振幅をもつ振動を先述の架線モデルの支持点に入力して振幅を算出した。表 2 に解析条件を示す。列車速度 (100~300km/h) は 25km/h 刻みとし、列車通過時の高架橋の卓越振動数が今回の架線の固有振動数計算値⁽¹²⁾と一致する列車速度 113km/h も条件に追加した。また図 7 より、列車速度 175~275km/h では電柱が共振していると考え、この条件の解析では架線振幅が定常状態に至るまで加振した。それ以外の条件では列車通過に相当する時間 (編成長(m)/列車速度(m/s)) の加振を行い、架線振幅の過渡応答を算出した。振幅算出位置は、一般的なコネクタ設置位置である、第 1~第 2 ハンガ間とした。

解析結果を図 8 に示す。今回の条件では第 1~第 2 ハンガ間に最大 30mm 程度の振幅が発生する可能性があることから、同条件の区間に設置するコネクタの水平振動耐久試験の加振振幅は±30mm と設定すればよいと考える。

5. まとめ

本稿では、コネクタの共振による疲労に対応する振動試験として水平振動試験を提案し、使用する試験機、試験手順、および加振条件について検討した結果を述べた。

今後は、桁間長や架線構成などの条件を変えてさらに解析を実施し、コネクタに加わり得るまくらぎ方向振幅を求めたうえで、総合的な加振振幅を設定する。

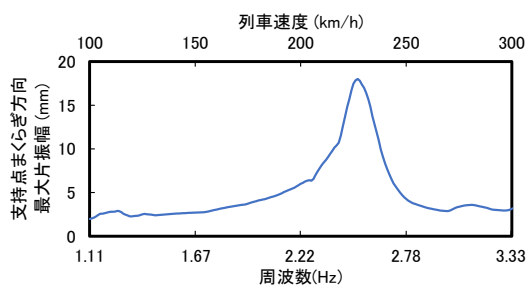


図 7 高架橋振動による支持点のまくらぎ方向最大振幅
Fig. 7. Maximum amplitude of catenary support points in the sleeper direction by viaduct vibration

表 2 解析条件

Table 2. Analytical conditions

| 架線構造 | シンプル架線 |
|-----------|---|
| ちょう架線 | PH150 (張力 2t) |
| トバリ線 | GT-PHC110 (張力 2t) |
| 径間長/径間数 | 50m/1 径間 |
| 変位入力位置/方向 | 両支持点/まくらぎ方向 |
| 列車速度 | ・ 100~300km/h (25km/h 刻み) ・ 113km/h |
| 車両長/編成両数 | 25m/12 両 |
| 入力振動波形 | 正弦波 |
| 入力振動振幅 | 図 7 参照 |
| 入力振動周波数 | 列車速度÷車両長 → 1.11~3.33Hz |
| 加振条件 | 175~275km/h : 定常振幅に至るまで加振 それ以外の条件 : 列車通過時間分、加振 |
| 振幅算出位置 | 第 1~第 2 ハンガ間 |

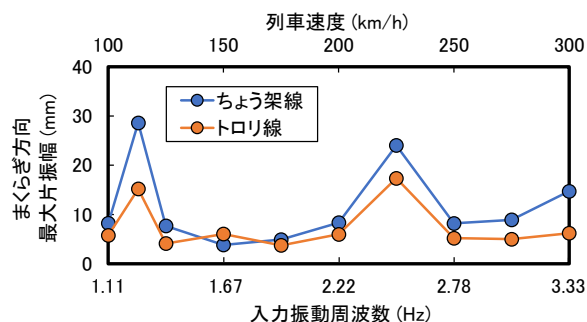


図 8 まくらぎ方向最大片振幅解析結果

Fig. 8. Analysis result of maximum half amplitude in sleeper direction

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) 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)
- (4) 小原拓也、山下主税：電車線コネクタの鉛直振動試験条件設定方法、2022 年電気学会産業応用部門大会講演論文集、5-8、pp.V-133-V-136 (2022)
- (5) 小原拓也、山下主税：電車線コネクタのひずみに対するまくらぎ方向振動の影響、第 21 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2014)講演論文集、S2-9-3 (2014)
- (6) 小原拓也、山下主税：電車線コネクタの耐疲労性評価マップの作成、平成 28 年電気学会全国大会講演論文集、5-183、pp.287-288 (2016)
- (7) 網干光雄、常本瑞樹：地震時における架線振動の影響解析:電柱固有振動数への影響、電気学会研究会資料(交通・電気鉄道研究会)、pp.27-32 (2009)
- (8) 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 回鉄道電気技術フォーラム論文集、pp.113-116 (2015)
- (9) 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)
- (10) 小原拓也、常本瑞樹、山下主税：ちょう架線用硬鋼より線の疲労特性、第 23 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2016)講演論文集、S2-1-3 (2016)
- (11) Matsuka K, Tsunemoto M, Tokunaga M: "Dynamic behaviour of railway pole built on bridges under train passage in high-speed railways and a simple evaluation method", Engineering Structures, Vol.257 (2022)
- (12) 鉄道総合技術研究所：電車線とパンタグラフの特性、研友社 (1993)