

コンパウンド架線の減衰能把握に向けた自由振動試験

小林 樹幸* 小山 達弥 真柄 勇
長尾 恭平 池田 充 山下 義隆 (鉄道総研)

Free Vibration Testing of Compound Catenary for Evaluation of Damping Characteristics

Shigeyuki Kobayashi*, Tatsuya Koyama, Isamu Makara

Kyohei Nagao, Mitsuru Ikeda, Yoshitaka Yamashita, (Railway Technical Research Institute)

Free vibration testing was carried out using a heavy compound overhead contact line at the Railway Technical Research Institute, in order to identify its damping characteristics. The free vibration was measured using displacement transducers attached to the cantilevers. In this paper, the damping characteristics is identified by minimizing the difference between measured and simulated power spectrum density of the displacement, as a fundamental survey.

キーワード：電気鉄道，架空電車線，コンパウンドカテナリ架線，減衰，自由振動

(Electric railway, overhead contact line, compound catenary, damping, free vibration)

1. はじめに

著者らは，集電系の性能評価のさらなる効率化に貢献する技術である架線・パンタグラフシミュレータ⁽¹⁾や，集電系 HILS (Hardware-in-the-loop simulation) ⁽²⁾の開発を行っている。これらの手法において，架線の減衰特性は，質量・剛性などのパラメータと同様に，集電系の性能を決定づける重要なパラメータである。一般的に，線条の剛性・質量は，線条に印加される張力や材料物性値に基づいて比較的容易に決定することができる。一方で，架線の減衰は，線条の内部減衰の他に，曲線引金具の運動に伴う尻手部分における摩擦の影響等が重畳することに起因した特性のため，その値を実験的に同定する必要がある。

本研究の目的は，ヘビーコンパウンド架線の減衰特性同定に向けた自由振動測定試験を実施すること，および架線の減衰能把握の基礎検討として，線条の減衰係数を同定することである。

2. コンパウンド架線の自由振動測定試験

〈2・1〉 概要 本試験では，鉄道総研の集電試験装置に仮設されたヘビーコンパウンド架線の自由振動測定を行った。集電試験装置は，実物のパンタグラフを搭載した走行台車がリニアモーター駆動により走行し，その時の架線とパンタグラフとの間の集電にともなうさまざまな現象を観測することのできる装置である⁽³⁾。ただし，本試験では走行台車は使用せず，後述するように人力で架線の自由振動

を発生させた。

〈2・2〉 架線条件 本試験では，表 1 に示す 2 通りの架線条件で自由振動測定を実施した。各架線条件の概要を以下に記す。

条件 1：補助ちょう架線とトロリ線の張力が，それぞれ 1.5tf ずつの 5.5tf 系のヘビーコンパウンド架線において，曲線引金具を用いて試 11 から試 21 の偏位を 0mm とする直線状の構成とした上で，自由振動測定を行う試験である。条件 1 の電車線路平面図を図 1 に示す。

条件 2：条件 1 と同様に 5.5tf 系のヘビーコンパウンド架線において，曲線引金具を用いて試 11・試 16・試 21 の偏位をそれぞれ L10mm・R80mm・L10 mm にするジグザグ上の構成とすることで，試 16 の曲線引金具の運動にともなう尻手部分の摩擦の影響を比較的大きくした上で，自由振動測定を行う試験である。ここで，L・R は起点を背とした左側および右側への偏位を意味する。条件 2 の電車線路平面図を図 2 に示す。

表 1 自由振動測定の架線条件

条件	張力 (上段：目標値，下段：実測値)			偏位 (試11, 16, 21)
	ちょう架線 ST180	補助ちょう 架線 PH150	トロリ線 GT170	
1	2.50tf (24.5kN)	1.50tf (14.7kN)	1.50tf (14.7kN)	全て0mm
2	2.54tf (25.0kN)	1.58tf (15.5kN)	1.63tf (16.0kN)	試11：L10mm 試16：L80mm 試21：L10mm

〈2・3〉 自由振動の励起方法 トロリ線の鉛直下向きに所望の静的荷重が作用するように人力でトロリ線を押下させた後に、瞬間的に荷重を除荷することで架線の自由振動を励起させた。静的荷重の目標値は 400N とした。支持点である試 16 および径間中央である試 18-1 のそれぞれに静的荷重を与える試験を、1 回ずつ、各架線条件において実施した。トロリ線に印加する静的荷重は、ロードセルを用いて測定した。自由振動を励起させる方法の概要図を図 3 に示す。

〈2・4〉 自由振動測定方法 トロリ線の鉛直方向変位を、試 16 および試 18-1 において測定した。ポテンショメータを内蔵した巻込型変位計をブラケットに取り付け、変位計から伸ばしたワイヤをトロリ線に固定することで、トロリ線の変位測定を行った。

3. 減衰能把握に関する基礎検討

〈3・1〉 減衰能把握方法の概要 本研究では、架線の減衰能把握の基礎検討という位置付けで、以下に述べる方法で線条の減衰係数を同定する。

集電試験装置に仮設したヘビーコンパウンド架線の力学モデルを構築して、加振試験と同等の静的荷重をモデルに与えた後で除荷して時刻歴応答シミュレーションを行い、自由振動を計算する。測定とシミュレーションで得られたトロリ線の鉛直方向変位の、載荷点における PSD (Power spectrum density) の誤差が最小となるような減衰係数を探索することで、減衰係数を同定する。本研究では PSD の誤差 f を、次式で定義した。

$$f = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^N \frac{X_k(\omega_i)}{\bar{X}_k(\omega_i)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\bar{X}_k(\omega_i)$ は載荷点 k に静的荷重を与えた際の同位置での周波数 ω_i における変位の PSD の測定値であり、 $X_k(\omega_i)$ はシミュレーションから計算された PSD である。誤差を計算する際の対象周波数範囲を 0~5Hz とし、対象周波数点を N で表す。

なお、測定データのフーリエ変換を行う際は、サンプリング点数を 8192 点とし、オーバーラップを行わず、平均化回数を 5 回とし、窓関数にハンニング窓を用いた。

〈3・2〉 シミュレーション方法 本研究では、ヘビーコンパウンド架線の各線条を弦としてモデル化し、図 4 に示すように質点を用いて線条を空間的に離散化した。さらに、隣り合う質点同士を、ばね・ダッシュポットの並列要素で接続した。ばね要素は、線条に印加される張力に起因した剛性を表現する。また、ダッシュポットは、線条の内部減衰を表現する。さらに、本研究では、曲線引金具の尻手部分の摩擦等に起因した減衰など、架線のモデル化において省略した各部の減衰も、このダッシュポットを用いて表現する。

構築した力学モデルの静構造計算結果を図 5 に示す。ト

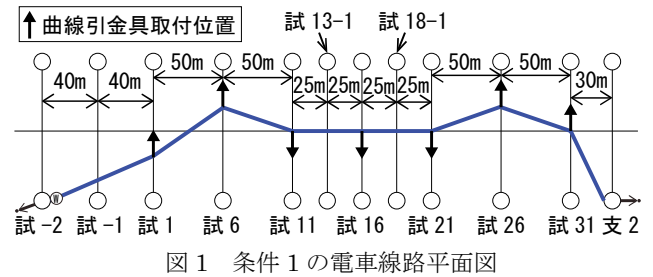


図 1 条件 1 の電車線路平面図

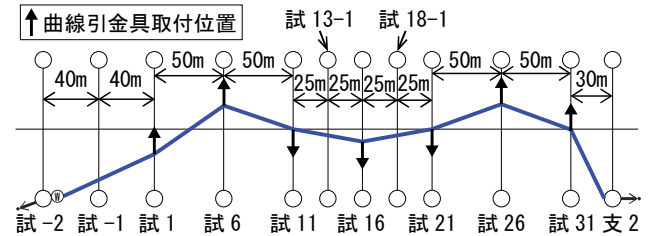
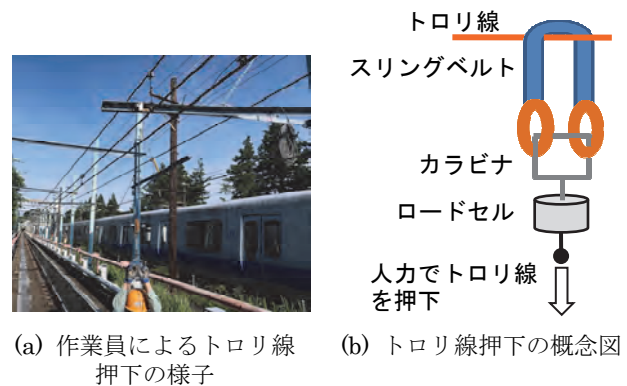


図 2 条件 2 の電車線路平面図



(a) 作業員によるトロリ線 押下の様子 (b) トロリ線押下の概念図
図 3 トロリ線を押下して自由振動を励起させる方法

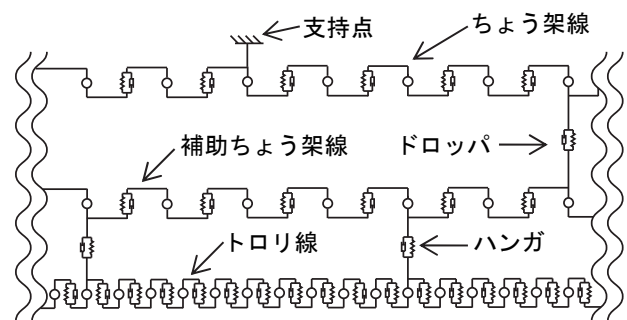


図 4 ヘビーコンパウンド架線の力学モデル

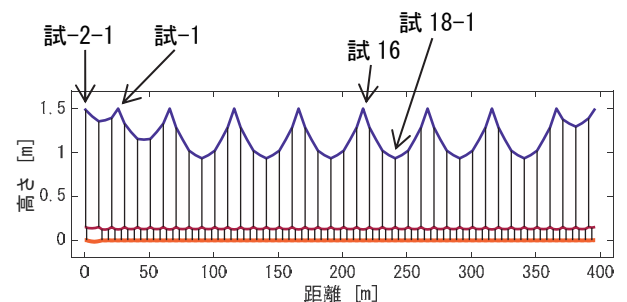


図 5 ヘビーコンパウンド架線の力学モデルの静構造計算結果

ロリ線、補助ちょう架線とちょう架線の質点間隔は、それぞれ 0.5m, 2.5m, 5.0m を標準とし、試-2-1 から試-1 のようにハンガ及びドロップの間隔が一定ではない場合には、ハンガ点及びドロップ点に質点が位置するように質点間隔を適宜調整した。

各線条の線密度は、トロリ線が 1.51 kg/m, 補助ちょう架線が 1.37 kg/m, ちょう架線が 1.45 kg/m であり、線密度に質点間隔を乗じた値が、図 4 に示す各質点の質量である。また、図 4 に示す線条のばね要素のばね定数は、線条に印加される張力を質点間隔で除した値である。

力学モデルの自由振動を計算する時刻歴応答シミュレーションは、Matlab/Simulink を用いて時間刻みを 0.5 ms として行った。

〈3・3〉 減衰のモデル化方法 本研究では、力学モデルの減衰に比例粘性減衰系を仮定し、減衰行列[C]は質量行列[M]と剛性行列[K]の線形和によって次式で表される。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \dots\dots\dots (1)$$

ここで α と β は比例粘性減衰係数(以下、減衰係数)であり、本研究ではこれらの減衰係数を各線条について同定する。

〈3・4〉 減衰係数の同定結果 減衰係数を同定するために、表 2 に示す減衰係数の組み合わせで時刻歴応答シミュレーションを実施した。この減衰係数の組み合わせを設定するにあたり、事前に減衰係数を変更してシミュレーションを実施することで、実験結果とシミュレーション結果が比較的良好に一致する減衰係数の範囲を把握した。

架線条件 1 および 2 において同定した減衰係数の値を、それぞれ表 3 および表 4 に示す。このように、架線条件 1 および 2 において同じ減衰係数の値が同定された。また、同定された減衰係数を用いて実施したシミュレーションによるトロリ線の変位と実験結果との比較を図 6~9 に示す。図 6 と図 7 は、架線条件 1 の実験結果とシミュレーション結果との比較を、それぞれ時刻歴と PSD について示す。図 8 と図 9 は、架線条件 2 の実験結果とシミュレーション結果との比較を、それぞれ時刻歴と PSD について示す。

減衰係数同定の基礎検討に関するまとめを以下に記す。

- ・ 同定された比例粘性減衰係数 α の値は、線条によらず同一の結果であった。一方、比例粘性減衰係数 β は、ちょう架線の方が他の線条より大きい値が同定された。
- ・ 変位の測定結果と、同定された減衰係数を用いたシミュレーション結果を時刻歴で比較すると、加振開始直後は振幅・位相ともに良好な一致が認められる。しかし、時間とともに両者の振幅・位相に乖離が見られるようになる。位相に乖離が生じる要因として、曲線引金具の尻手部分に生じる摩擦のように、力学モデルで考慮していない減衰要素の影響が考えられる。また、減衰能において振幅依存性等の非線形性を考慮していないことも、振幅・位相に乖離が生じる要因として考えられる。これらのモデル化については今後の課題である。

表 2 時刻歴応答シミュレーションにおける比例粘性減衰係数の組み合わせ

	ちょう架線	補助ちょう架線	トロリ線
α	5x10 ⁻⁴ から 5x10 ⁻⁴ 刻みで 5x10 ⁻³ まで		
β	2x10 ⁻³ から 1x10 ⁻³ 刻みで 5x10 ⁻³ まで	5x10 ⁻⁴ から 5x10 ⁻⁴ 刻みで 5x10 ⁻³ まで	

表 3 同定された比例粘性減衰係数(架線条件 1)

	ちょう架線	補助ちょう架線	トロリ線
α	5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴
β	2 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴

表 4 同定された比例粘性減衰係数(架線条件 2)

	ちょう架線	補助ちょう架線	トロリ線
α	5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴
β	2 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴

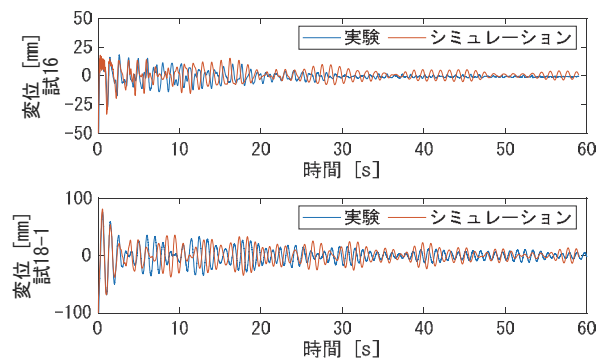


図 6 実験とシミュレーションにおけるトロリ線変位の時刻歴の比較(架線条件 1)

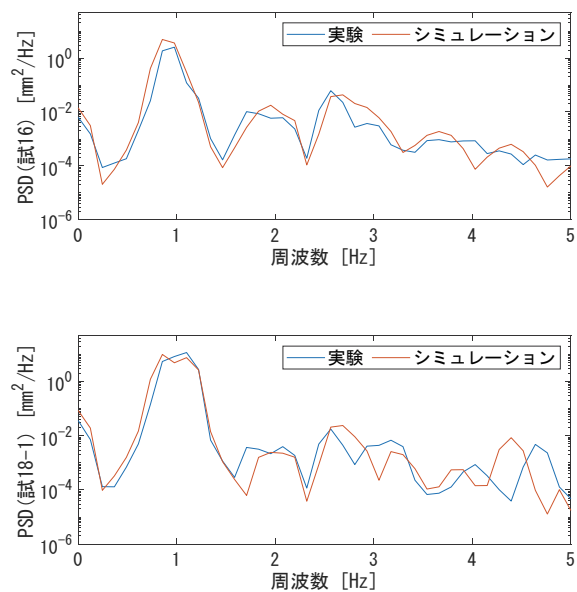


図 7 実験とシミュレーションにおけるトロリ線変位の PSD の比較(架線条件 1)

4. おわりに

ヘビーコンパウンド架線の線条の減衰特性同定に向けた自由振動測定試験を集電試験装置において実施した。また、架線の減衰能把握の基礎検討という位置付けで、架線の運動シミュレーションによる変位の PSD と、測定されたそれとの誤差が最小となるように線条の比例粘性減衰係数を同定した。

本研究のまとめを以下に記す。

- ・ 本研究では、偏位が異なる 2 通りの架線条件において、同一の減衰係数が同定された。
- ・ 同定された比例粘性減衰係数 α の値は、線条によらず同一の結果であり、比例粘性減衰係数 β は、ちょう架線の方が他の線条より大きい値が同定された。
- ・ 変位の測定結果とシミュレーション結果を比較すると、時間とともに振幅・位相に乖離が生じた。位相に影響を与える要因として、曲線引金具の尻手部分などに生じる摩擦に起因する減衰が考えられる。そのため、今後は、こうした摩擦に起因した減衰特性を詳細にモデル化することで、減衰特性の詳細な把握を行う予定である。

文 献

- (1) 小山達弥, 長尾恭平, 池田充:「架線・パンタグラフの三次元シミュレーション」, 鉄道総研報告, Vol.34, No.9 pp.5-10 (2020)
- (2) 小林樹幸, 小山達弥, 原田智:「高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション手法」, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12 pp.47-52 (2021)
- (3) 佐藤宏紀, 原田智:「電車線とパンタグラフの性能を評価できる集電試験装置」, RRR, Vol.74, No.12 pp.10-13 (2017)

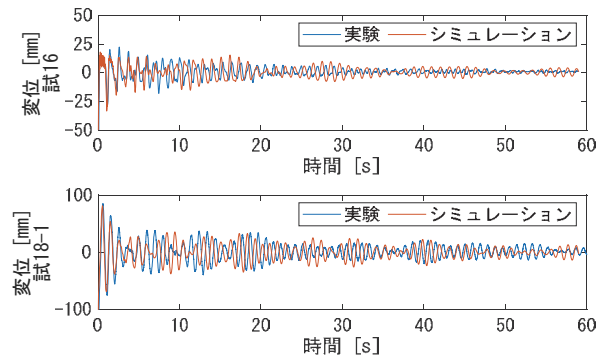


図 8 実験とシミュレーションにおけるトロリ線変位の時刻歴の比較 (架線条件 2)

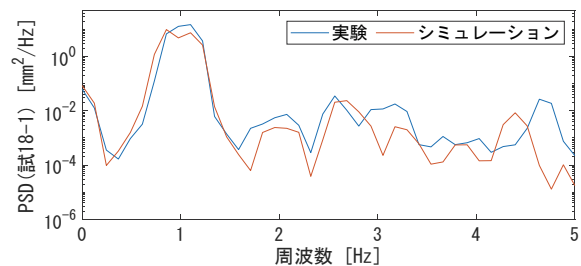
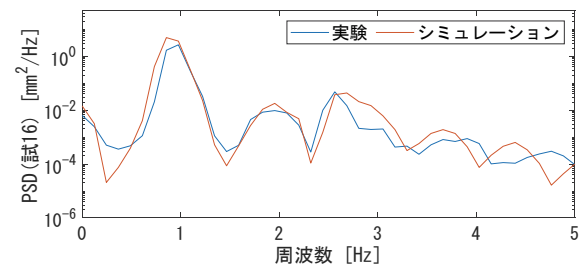


図 9 実験とシミュレーションにおけるトロリ線変位の PSD の比較 (架線条件 2)