

パンタグラフ接触力測定に基づくトロリ線の静高さ推定手法

鉄道力学研究部 集電力学研究室

室長 臼田 隆之

1. はじめに

架線設備のメンテナンスには多くの労力がかけられているが、今後の高齢化社会での労働人口の減少に向け、保守の省力化は非常に重要な課題となっている。そのため、検測車にて測定したデータを架線設備の保守に活用しようと、多くの研究が進められている。

保守要員による近接検査ではもっぱら架線の静的な架設状態が測定されており、架線の架設基準（トロリ線高さやその勾配、左右偏位、わたり線におけるトロリ線の相対位置、など）もまた、静的な状態を基準として許容値が定められている。そのため、検測車にて架線の静構造が測定できれば、架線保守上非常に有益である。また、連続的なトロリ線の静高さ情報が得られれば、架線の架設精度の良否判定やその改善方策を提案するシステムなどへの応用が可能である。

一方で、高速で走行する検測車から架線の静構造を直接測定することは容易ではない。例えば、従来の検測車ではパンタグラフ高さを測定しているが、パンタグラフ高さにはパンタグラフ通過時の動的なトロリ線押上量が含まれているため、トロリ線の静高さとは一致しない。

過去にはトロリ線静高さの推定箇所の架線・パンタグラフのシミュレーションを実施して、パンタグラフ接触力（以下、接触力とする）とパンタグラフ高さからトロリ線の静高さを推定する試みが行われているが、この手法は支持点位置やハンガ位置などの正確な情報が事前に得られている必要があり、その都度、比較的計算負荷の高い架線・パンタグラフの運動シミュレーションを実施する必要がある。また、列車先頭部に設置したステレオ画像などから架線の静構造を得ようとする研究も進められているが、高速走行時の測定精度などに課題が残されている。

そこで本発表では、検測車で取得可能な信号から比較的簡便なアプローチでトロリ線の静高さを推定する 2 種類の手法を提案し、シミュレーション、および実験データで検証を行った結果について報告する。

2. トロリ線静高さの推定手法

本章ではトロリ線静高さの推定手法として、以下の等価ばね定数法と伝達関数法の 2 種類の手法を提案する。

2.1 等価ばね定数法

トロリ線に鉛直方向の力を作用させると、架線はばねに近い特性を示す。ここではトロリ線に与えた力を、着地点におけるトロリ線の上下変位で除した値を、架線の等価ばね定数と称する。コンパウンドカテナリ架線をパンタグラフが 270km/h で走行した場合の、着地点における等価ばね定数を計算した結果を図 1 に示す。これは、架線・パンタグラフ系の運動シミュレーションにより計算した結果であり、 x 軸の 0, 50, 100m 点がそれぞれ架線の支持点位置となっている。また、図 1 に示した等価ばね定数の値をサンプリング周期 7.5m でリサンプリングした結果を、図 1 中に赤線で示す。本結果より、ハンガ周期よりも長い周期成分だけに着目すれば、270km/h で走行するパンタグラフから見た架線の等価ばね定数の変動はそれほど大きくないことがわかる。そこで、走行中に計測した接触力からトロリ線の静高さを次式により推定することが可能であると考

えられる。

$$y'_{0,LP}(x) = y_{pan1,LP}(x) - f_{1,LP}(x) / Stiff_{ave} \quad (1)$$

ただし、 $y'_0(x)$ は位置 x におけるトロリ線の静的な鉛直方向変位、 $y_{pan1}(x)$ は先頭パンタグラフが位置 x に到達したときのトロリ線の動的な鉛直方向変位、いいかえれば位置 x におけるパンタグラフ高さであり、 f_1 は先頭パンタグラフの位置 x における接触力である。また、下添え字 LP は、ハンガ周期より低い成分だけをローパスフィルタにより抽出することを意味する。

$Stiff_{ave}$ はパンタグラフが走行したときの着点における等価ばね定数の平均値であり、パンタグラフの走行速度に応じて値を与える。

なお、本手法は等価ばね定数が架線位置によって大きく変わらず、定数とみなせるという近似が前提となっているため、架線の等価ばね定数の不等率が大きくなるシンプル架線の条件における適用可能性については今後検討が必要である。

2.2 伝達関数法

前節では、ハンガ周期周波数よりも低い周波数を対象とし、架線の等価ばね定数を一定とみなせるものと近似した。本節ではハンガ周期周波数相当の架線の等価ばね定数の変動についても考慮した推定法について提案する。

本手法は、事前にシミュレーションなどにより架線の加振試験を実施し、その結果から得られた架線の動特性情報を使用して、先頭パンタグラフの接触力 $f_1(x)$ 、および先頭パンタグラフの舟体軌跡（パンタグラフ高さ） $y_{pan1}(x)$ からトロリ線静高さ $y'_0(x)$ を推定する手法である。以下、提案するトロリ線静高さ推定手法の詳細な流れについて説明する。

はじめに、ハンガ位置のトロリ線静高さが一定のモデル架線において、トロリ線を 10 秒間加振するシミュレーションを実施する。本検討では 200m の区間において $\Delta x=1m$ 毎に加振点を設定した。シミュレーションの時間刻みは 0.1msec とし、加振力は直流分による影響も加味出来るように 1N の DC 成分と、-100~100N のランダム波との合成波形を使用した。また、加振は加振点に力のみを入力することとし、トロリ線を下方向に引張る方向の加振力も作用させた。

以上のシミュレーションから得られたデータより、トロリ線静高さを基準とした観測点 j （列車進行方向の座標を x とする）のトロリ線変位のフーリエ変換結果 $Y_j(\omega)$ と、加振点 i に作用する加振力のフーリエ変換結果 $F_i(\omega)$ を算出し、加振点 i における加振力に対する観測点 j のトロリ線変位の伝達関数 $H_{ij}(\omega)$ を算出する。

$$H_{ij}(\omega) = \frac{Y_j(\omega)}{F_i(\omega)} \quad (2)$$

伝達関数を計算する際には、シミュレーションにより得られたサンプリング周波数 10kHz の時刻歴データに対して、サンプリング周波数を 75Hz にリサンプルして得られたデータを用い、データ点数 150 点のフーリエ変換を実施して伝達関数を求め、これに対して 16 回の平均化を行った。次に、 $H_{ij}(\omega)$ を逆フーリエ変換して、インパルス応答関数 $h_{ij}(t)$ を加振点 i 、観測点 j の位置毎に算出した。加振点 i を速度 v で走行する先頭パンタグラフの接触力 $f_1(i \cdot \Delta x / v)$ と、得られたインパルス応答関数を m 点で次式のように畳み込み積分することにより、位置 x におけるトロリ線押上量 $y_{up1}(x)$ を推定する。

$$y_{up1}(x) = \sum_{i=1}^m h_{ij}(x - i \cdot \Delta x / v) f_1(i \cdot \Delta x / v) \quad (3)$$

パンタグラフは走行により移動していくため、インパルス応答関数はそれぞれ当該時刻にパン

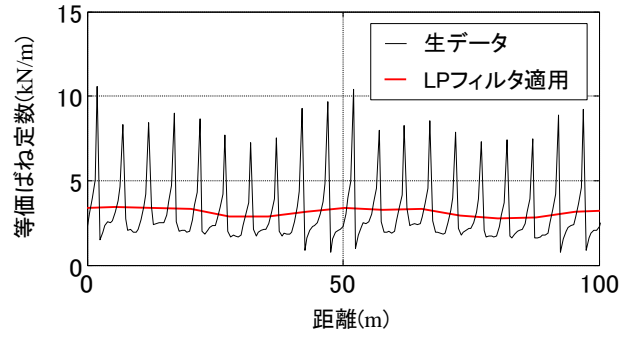


図1 架線の等価ばね定数

タグラフが存在していた位置を加振点とするトロリ線のインパルス応答関数を使用する。式(3)の h_{ij} を整理し、行列 \mathbf{h} （以下、インパルス応答行列と呼ぶ）で表現すると、式(3)は以下のように書きかえることができる。

$$\begin{aligned} & \left[y_{up1}'(x_m) \cdots y_{up1}'(x_{m+50}) \right]^T \\ & = \mathbf{h} \left[f_1(x_1) \cdots f_1(x_i) \cdots f_1(x_{m+50}) \right]^T \quad (4) \end{aligned}$$

インパルス応答行列 \mathbf{h} の計算例を図2に示す。なお、本図の底面を構成する2軸の原点は高さ推定区間の始点である支持点位置とした。インパルス応答行列 \mathbf{h} を列車速度ごとに事前に用意しておくことにより、パンタグラフ接触力の実測値を元に、式(4)から推定区間全体にわたってトロリ線の押上量を推定可能である。トロリ線押上量の推定値が得られれば、パンタグラフ高さ $y_{pan1}(x)$ から次式によりトロリ線静高さ y_0' を推定することが可能である。

$$y_0'(x) = y_{pan1}(x) - y_{up1}'(x) \quad (5)$$

3. トロリ線静高さの推定結果

3.1 シミュレーションによる検証結果（等価ばね定数法）

2.1 節において提案した等価ばね定数法によって、トロリ線静高さ推定の有効性検証を行った結果を図3に示す。速度270km/hにおける接触力とパンタグラフ高さ、ならびに等価ばね定数の平均値をもとに、式(1)によりトロリ線静高さを推定した値を、トロリ線静高さの真値、ならびにパンタグラフ高さに対してプロットしている。ただし、トロリ線静高さの推定においては、接触力波形ならびにパンタグラフ高さに対して、波長が7.5mより短い接触力成分をローパスフィルタで取り除いたうえで、式(1)を適用した。本結果から、等価ばね定数法により径間周期のおおよそのトロリ線静高さを推定可能であることがわかる。

3.2 シミュレーションによる検証結果（伝達関数法）

2.2 節において提案した伝達関数法によって、トロリ線静高さ推定の有効性検証を行った結果を図4に示す。図4(a)~(b)はそれぞれ接触力、およびトロリ線静高さの設定値（真値）と伝達関数法による推定結果を示す。なお、各図ともにx軸の250mと300mの点が支持点箇所に相当する。本結果から、約3mm程度の誤差でトロリ線の静高さを推定できることが確認できる。

3.3 集電試験装置での検証結果（伝達関数法）

実際の架線下にパンタグラフを12km/hで走行させる試験を実施し、前節と同様の手法を試験結果に適用し、有効性の検証を行った。インパルス応答行列は2.2節に記載した手法により、試験を実施した諸元の架線を加振するシミュレーションを実施し、得られたデータ（サンプリング周波数10kHz）を、3.3Hzにリサンプルし、データ点数20点のフーリエ変換を実施して算出した。また、接触力は舟体内部に実装したセンサにより測定し、パンタグラフ高さはパンタグラフ

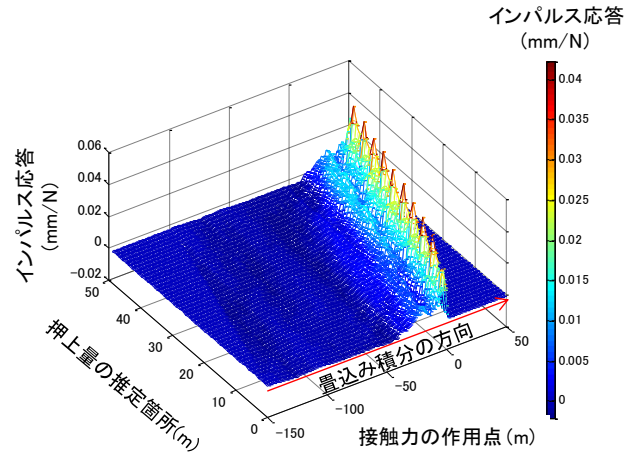


図2 インパルス応答行列の計算結果

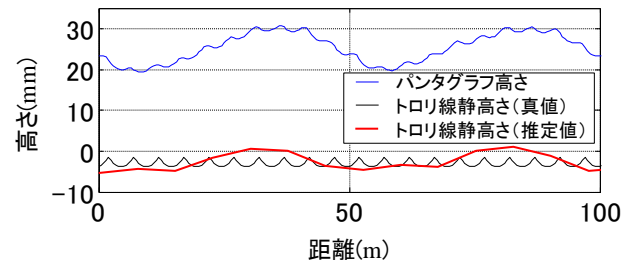


図3 トロリ線静高さの推定結果
(等価ばね定数法、シミュレーション結果)

台枠から舟体下面までの距離をレーザ変位計にて測定した。本試験におけるトロリ線静高さの推定結果を図 5 に示す。図 5(a)~(b)はそれぞれ接触力の測定値、およびトロリ線静高さの実測結果と推定結果を示す。なお、図 5(b)に示すトロリ線静高さの測定値は接触式のトロリ線高さの測定結果であるため、センサヘッドをトロリ線に押し当てることによる影響が若干含まれているが、ここではその影響は無視できるものとする。また、各図ともに x 軸の 50m, 100m, 150m 点が支持点箇所に相当する。図 5(b)から、提案した手法により、低速ではあるが、4mm 程度の精度でトロリ線の静高さを推定可能であることが確認できる。

4. まとめ

検測車で取得可能なデータからトロリ線静高さを推定する手法として、架線を定数が一定のばねと近似して、パンタグラフ高さとパンタグラフ接触力からトロリ線静高さを推定する手法（等価ばね定数法）と、事前に求めた架線の動特性を表現するインパルス応答行列を使用して、パンタグラフ高さとパンタグラフ接触力からトロリ線静高さを推定する手法（伝達関数法）の 2 種類の手法を提案した。また、伝達関数法についてはシミュレーションと実験データを用いてその有効性の検証を行った。本発表の結論を以下に示す。

- (1)等価ばね定数法は、ハンガ周期よりも長い周期成分（径間周期の高さの変動）だけに注目すれば、パンタグラフ高さとパンタグラフ接触力から、おおよそのトロリ線静高さの推定が可能である。ただし、シンプル架線などの条件においてはさらなる検証が必要である。
- (2)伝達関数法は、パンタグラフ高さとパンタグラフ接触力から、トロリ線静高さの推定が可能であることをシミュレーションおよび実験により検証した。今回検証を行った条件では、ハンガ周期を含めたトロリ線の静高さを約 3~4mm 程度の精度で推定可能であることを確認した。今後は提案した 2 種類の手法の改良による推定精度の向上について検討を進め、径間長が変化する箇所での推定方法などについても検討を進める。また、伝達関数法については高速走行データによる精度検証を行う予定である。

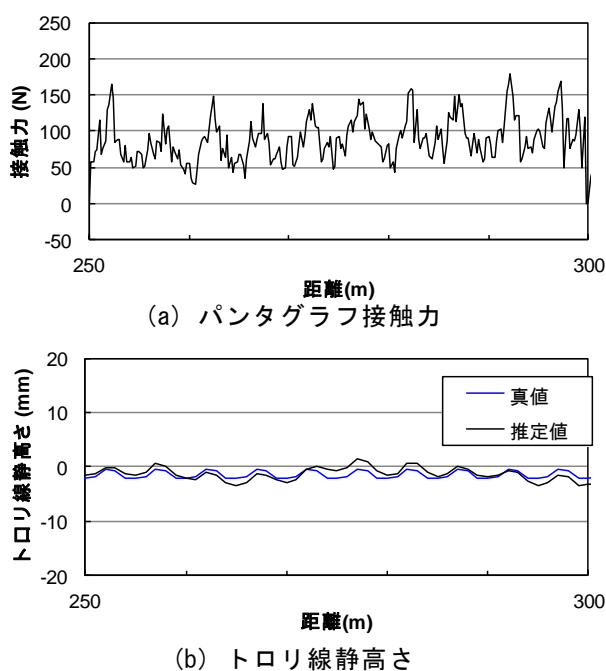


図 4 トロリ線静高さの推定結果
(伝達関数法, シミュレーション結果)

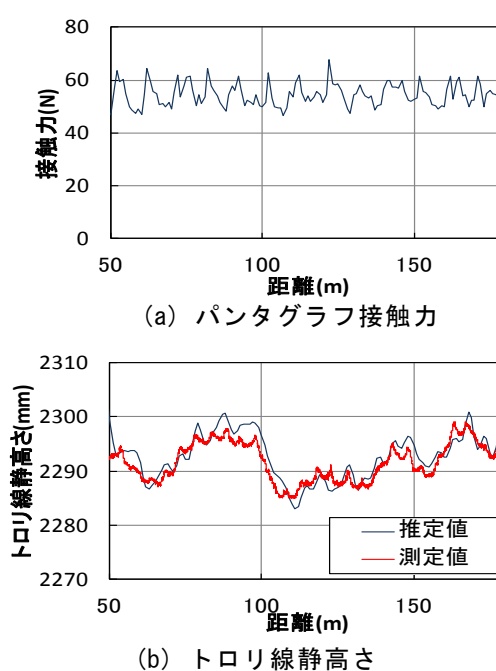


図 5 トロリ線静高さの推定結果
(伝達関数法, 実験結果)