3707 トロリ線加速度を使用したすり板段付摩耗検出法の検討

正 [機] ○臼田 隆之 (鉄道総研) 正 [機] 池田 充 (鉄道総研)

Detecting method of step-shaped wear on contact strip by acceleration of contact wire

Takayuki Usuda, Railway Technical Research Institute, Hikari-cho 2-8-38, Kokubunji-shi, Tokyo Mitsuru Ikeda, Railway Technical Research Institute

Some factors such as arc between contact wire and contact strips of a pantograph cause local wear on the contact strips. Once the local wear occurs, the local wear is highly likely to grow to a step-shaped wear. The contact strip with the step-shaped wear may lead to accidents such as contact wire breaking. For preventing such accidents, authors have developed a contact strip step-shaped wear detecting method using acceleration of contact wire. In this paper, this new method and experimental test results are reported.

Keywords: step-shaped wear on contact strip, contact wire, pantograph, monitoring method, kurtosis

1. はじめに

パンタグラフのすり板はトロリ線と摺動しながら集電する。異常なアークの発生など何らかの要因により、一度すり板に局所的な摩耗が発生すると、すり板上面におけるトロリ線のスムーズな左右移動が阻害され、局所的な摩耗が段付摩耗として更に発達することがある。このすり板の段付摩耗は凹凸の形状次第ではすり板破壊、舟体溶断、架線切断などの架線・パンタグラフの事故につながることがあり、今までも様々な対策が行われている。また、段付摩耗の生成メカニズムの基礎検討を行った研究によれば、離線アークの頻発する環境下などにおいて段付摩耗が発生しやすいと推測されているが、まだ不明な点も多い。

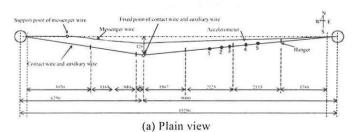
本研究は、このすり板段付摩耗をトロリ線に取り付けたセンサにより検知し、地上設備によるすり板の異常モニタリングを実現することを目的とするものである。段付摩耗のあるすり板とトロリ線が摺動する際には、トロリ線に上下方向や左右方向の振動が励起される。そこで本論文では、段付摩耗のあるすり板を取付けたパンタグラフを架線に摺動走行させて、架線側のセンサにより段付摩耗の検知が可能か検討を行った。

2. 試験概要

図1に試験概要図を示す。試験用模擬架線はヘビーコンパウンド架線が架設されており、西端から 2.5m の箇所に吊架線の支持点がある。本試験架線は元々、全ての箇所で左右方向の架線偏位は 0mm であるが、本試験のために西端から 6.25m の箇所において補助吊架線偏位を設定し、この偏位設定箇所の東側を試験区間とした。なお、吊架線の支持点は偏位 0mm のままとした。試験区間のトロリ線の偏位方向の傾斜は、45m スパンで±300mm の偏位を設定している条件とほぼ一致する。試験区間のトロリ線の 5 箇所に、上下方向と左右方向の加速度計を各1 個ずつ設置した。また、パンタグラフ舟体に作用する衝撃の確認をするため、前後の舟体のすり板上面偏位中央にも、それぞれ上下方向と左右方向に加速度計を接着した(図 2)。

本試験においては営業線ですり板に段付摩耗が発生し

た舟体をパンタグラフに取付けた。本論文ではこの段付 摩耗を段付摩耗 A とする。また、2 種類の人工的な段付 摩耗をグラインダと棒ヤスリによって作成し、それぞれ を段付摩耗 B、段付摩耗 C とした。試験実施後にすり板 の摩耗プロフィールを測定した結果を図 3 に示す。なお、 各舟体ともに段付摩耗 A の試験を実施するときには、紙 面手前側が東に向くように舟体をパンタグラフに取付け、 段付摩耗 B および C の試験を実施する際には、紙面手前 側が西に向くようにパンタグラフに取付けた。表 1 に架 線張力、線密度、波動伝搬速度を示す。



(b) Side view Fig.1 Sensor array and experimental apparatus

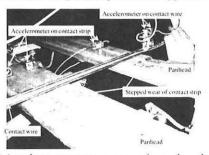
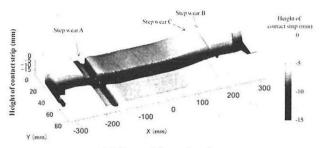
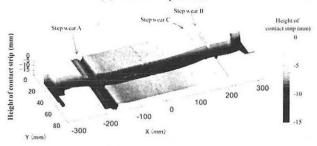


Fig.2 Accelerometers on contact wire and panheads

[No.09-65] 日本機械学会第 16 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2009-12.2~4. 東京]



(a) Front side panhead



(b) Rear side panhead

Fig.3 Measurement results of contact strip wear

Table.1 Catenary condition

	Tension (kN)	Line density (kg m)	Wave propagation velocity (m/s)
Msssanger wire	22.5	1.45	125
Auxiliary wire	13.1	1.38	98
Contact wire	17.6	1.51	108
Catenary system	53.2	4.34	111

3. 段付摩耗検知方法

3.1 段付摩耗すり板摺動時の現象

段付摩耗が生じたすり板がトロリ線と摺動する時の模式図を図4に示す。段付摩耗のあるすり板のパンタグラフが試験区間を通る際に観察されるトロリ線の加速度波形には以下の特徴が見られる。

- ①トロリ線がすり板摺面の上部から段付摩耗底部へ移行する際(図 4(a))には、トロリ線の上下方向と左右方向の加速度にインパルス状の信号が観察される。
- ②トロリ線が段付摩耗底部から上部に移行する際(図4(b))には、トロリ線がすり板から受けていた左右方向の拘束が解放されるため、弦をはじいた時のようにトロリ線は左右方向に低次の振動モードを中心として自由振動する。

そこで上記2つのケースについて、それぞれ観測される加速度波形の特徴をとらえることによって、段付摩耗 の通過を検知する方法の検討を行った。

3.2 段付摩耗底部へのトロリ線移行の検知

トロリ線がすり板摺而の上部から段付摩耗底部に移行する際に、トロリ線上下加速度にインパルス状の信号が観察されることに着目してすり板段付摩耗の検知を行う。ここでは以下の方法でトロリ線上下加速度のクルトシス(波形の尖鋭度)を計算し、クルトシスの値を評価した。この値が一定の閾値を超える場合に段付摩耗が発生しているものと判定する。

あるサンプリング点jでのトロリ線の加速度を a_j とすると、そのサンプリング点近傍のN点のサンプリングにおけるトロリ線加速度の平均値 $\overline{a_j}$ は

$$\overline{a}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{j-N/2} a_i \tag{1}$$

となる。また同様に、あるサンプリング点j 近傍のN点のサンプリングにおけるトロリ線加速度の標準偏差 σ_j は

$$\sigma_{i} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1,-N,2+1}^{i+N/2} \left(a_{i} - \overline{a}_{i} \right)^{2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$
 (2)

となる。この拡張として、あるサンプリング点j近傍の クルトシスは次式により定義される。

$$K_{j} = \frac{1}{\sigma_{j}^{4}} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i \in j - N/2 + 1}^{j + N/2} \left(a_{i} - \overline{a}_{j} \right)^{4} \right\}$$
 (3)

本論文では5個の上下方向の加速度計からそれぞれの クルトシスを算出するとともに、これら全ての上下加速 度の加算波形からもクルトシスを算出し、これら合計 6 個のクルトシスの値を N=100 として算出し、すり板段付 摩耗の判定に使用した。また、判定に用いる閾値は個々 の加速度計に対しては18を、これらの加算波形に対して は10をそれぞれ用いた。最終的な判定処理については 4.2節に示す。

3.3 段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行の検知

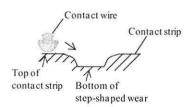
トロリ線がすり板摺面上を段付摩耗底部から上部に移行した直後に、トロリ線は左右方向に低次の振動モードを中心として自由振動する。本現象に着目してすり板段付摩耗の検知を行う。ただし、すり板に段付摩耗がない場合でも、摺動に伴って生じるトロリ線の上下振動が左右振動を励起する。このトロリ線左右振動と段付摩耗によって生じる左右方向の自由振動とを区別して認識する必要がある。

そこで本節では、段付摩耗に起因して生じるトロリ線の左右方向の自由振動を選択的にとらえることが可能か確認を行い、段付摩耗検知方法の提案を行う。

3.3.1 架線振動測定試験

トロリ線の上下方向振動による連成の影響を受けずに、 段付摩耗に起因して生じる左右方向の振動だけを測定可 能か検討するため、加速度計 1 から東へ 190mm の地点 のトロリ線を手で上下方向と左右方向にそれぞれ引っ張 った状態から放し、自由振動をさせて、トロリ線の上下 方向と左右方向の加速度測定を行った。なお、振動試験 中はパンタグラフは折り畳み、トロリ線とは接触してい ない状態とした。

前記条件でトロリ線加速度のパワースペクトルを測定した。図5はトロリ線を下に引いた状態から手を離した時のトロリ線の自由振動を測定した結果、図6はトロリ線を水平に引いた状態から手を離した時のトロリ線の自由振動を測定した結果である。各図とも、加速度計1の



(a) Fall to the bottom of step-shaped wear



(b) Getting out of bottom of step-shaped wear
Fig.4 Movement of contact wire sliding on the contact strip
with step shaped wear

左右方向と上下方向のパワースペクトルを示した。

トロリ線の上下方向の自由振動を測定した図5の結果からトロリ線の上下方向の固有振動数を求めると3.9、9.5、12Hz などが確認できる。また、トロリ線の左右方向の自由振動を測定した図6の結果からトロリ線の左右方向の固有振動数を求めると、5.4、7.3、10.3Hz などが確認できる。

このように、トロリ線に初期変位を与えた方向以外にも連成振動が観測される。しかし、本試験条件では 5~8Hz のバンドパスフィルタを適用することにより、トロリ線の上下方向の連成振動の影響を受けずに、トロリ線の左右方向の低次モードの自由振動を選択的に観測できることがわかる。

なお、トロリ線の上下方向の固有振動数のうち、最も 低次の3.9Hz は吊架線支持点より東側のスパン長12.75m の架線全体が半波長となる周波数にほぼ一致している。

$$111(m/s)/25.5(m)=4.4Hz = 3.9Hz$$
 (4)

また、トロリ線の左右方向の固有振動数のうち、最も 低次の 5.4Hz は試験区間の東側端部からシメラによる偏 位固定箇所までの長さ 9m のトロリ線に半波長の定在波 が発生する周波数にほぼ一致している。

$$108(m/s)/18(m)=6.0Hz = 5.4Hz$$
 (5)

なお、加速度計 1 以外の他の測定点でも 10Hz 以下の周波数帯ではほぼ同様の結果が得られたが、周波数が高くなるにつれて測定点によりパワースペクトルの傾向が大きく異なるケースも見受けられた。この理由としては低周波数域では架線が一体として揺れるモードが卓越しているが、周波数が高くなるにつれて波長が短い複雑な振動モードとなり、測定点の位置による影響が大きくなるためと推測される。

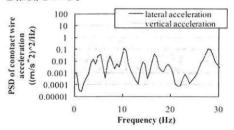


Fig.5 PSD of contact wire acceleration in vertical direction free vibration test

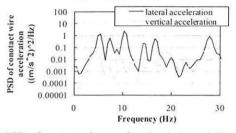


Fig.6 PSD of contact wire acceleration in lateral direction free vibration test

3.3.2 トロリ線の左右方向自由振動の検知方法

3.3.1 節での結果から、本試験条件では5.0~8.0Hz のバンドパスフィルタを適用することにより、すり板の段付摩耗に起因して生じるトロリ線の左右方向振動を正常なすり板が通過する際に現れるトロリ線左右加速度信号と分離して観察可能である。そこで、このフィルタを適用した波形に対して、標準偏差を式(2)により計算し、計算した標準偏差が閾値を超えるものをすり板の段付摩耗として検知した。本論文ではNを800として式(2)を用いて、

5 個の左右方向の加速度計からそれぞれの標準偏差を算出するとともに、5 個の左右方向の加速度の加算波形からも標準偏差を算出し、これら合計 6 チャンネル分の標準偏差を判定に使用した。

また、判定に用いる閾値は個々の加速度計に対しては $0.5(m/s^2)$ を、これらの加算波形に対しては $2.0(m/s^2)$ をそれぞれ用いた。最終的な判定処理については 4.2 節に示す。

なお、本試験条件ではトロリ線の左右方向と上下方向 の固有振動数が異なり、通常時のトロリ線の左右方向振 動と段付摩耗すり板通過時のトロリ線の左右方向振動の 分離が可能であったが、トロリ線の左右方向と上下方向 の固有振動数が近接する可能性もある。そこで、実設備 条件での検討を行う。トロリ線の上下方向の支持点間隔 を一般的な値である 50m とし、偏位の半周期を 100m と 仮定し、3.3.1節の議論に基づいて最も低次の固有振動数 を試算すると、トロリ線の上下方向振動の場合は 1.0Hz、 トロリ線の左右方向振動の場合は 0.5Hz となり、ローパ スフィルタにより段付摩耗すり板通過時のトロリ線の左 右方向振動の分離測定が可能である。また、抽出可能な 振動の次数も低く、測定位置による検知精度低下の影響 を受けにくいため本試験での条件よりも有利な点もある。 なお、上記計算ではトロリ線および架線系全体の波動伝 搬速度を 100m/s、測定区間は偏位端部以外の曲引きはな いものと仮定して計算した。

4. 走行試験

4.1 試験方法

段付摩耗のあるすり板あるいは段付摩耗の無いすり板を取付けたパンタグラフを速度 1~4km/h で走行させ、トロリ線と舟体に取付けた加速度計の信号を測定した。全ての信号は 2kHz のサンプリング周波数で A/D 変換を行った。

また、パンタグラフの離線検出の目的で、中間ヒンジ側ではない舟体(以下、後舟とする)とトロリ線との間に離線検出回路を構成した。なお、中間ヒンジ側の舟体(以下、前舟とする)と後舟とは電気的に絶縁し、後舟が機械的に離線すると約 0.8V の信号が出力される回路とした。

4.2 複数個のセンサの出力の処理方法について

3.2 節と 3.3 節で述べたすり板段付摩耗検知法では、複数個のセンサ出力から統合して判断する必要がある。この方法としては複数個のセンサの出力からそれぞれ算出される検知結果の全ての論理積や、全ての論理和を計算する方法などが考えられる。前者の場合は段付摩耗の発生を見逃す可能性が高くなり、後者の場合は誤検知の可能性が高くなる可能性がある。また、実使用時には測定区間が 50m 以上となりセンサの配置範囲が広くなるため、検知結果の全ての論理積を用いる方法では、センサから離れた箇所で発生した段付摩耗による振動を全てのセンサが確実に検知できるか疑問である。

そこで、本検討では加速度計 5 個のうち、2 個以上の加速度計において算出した値が閾値を超え、なおかつ 5 個の加速度計の加算波形に対する算出結果も閾値を超えた場合に異常と検知した。

ただし、本処理方法が最適な処理法であるかについて はまだ十分に検証できておらず、センサの配置間隔など の検討とともに、今後詳細検討が必要である。

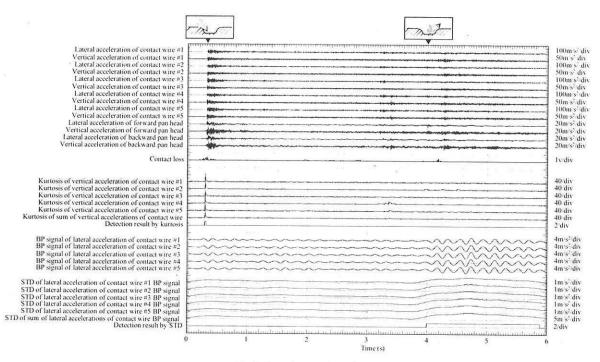


Fig.7 Experimental result

なお、複数の上下方向の加速度計のクルトシスによる 検知結果の論理積を使用する際には、センサ設置位置に より波動の入射のタイミングに時間差が生じる。しかも クルトシスによる検知はインパルス的な入力を検知する ため、1 箇所のセンサ信号からクルトシスよって異常が 検知される時間は非常に短い。したがって、センサの設 置間隔をトロリ線の波動伝搬速度で割った時間の範囲で 時間軸上の検知タイミングのずれを許容した。今回の検 討ではトロリ線の波動伝搬速度が 108m/s、最大センサ間 隔が 2m (加速度計 1 と加速度計 5 との距離) であるた め、検知タイミングの許容ずれ時間を±0.01secとした。 4.2.2 節のトロリ線の左右方向自由振動の検知の際に は 5~8Hz のバンドパスフィルタを使用しているが、こ の周波数帯は試験区間のトロリ線が同相で振動するモー ドであり、1 箇所のセンサにおいて異常を検知している 時間も比較的長いため、前記処理は適用しない。

4.3 走行試験結果

図7に試験時の時刻歴データ例を示す。本データでは走行路を東から西へ時速3.4km/hで走行した試番の測定データおよび解析結果である。架線偏位が段付摩耗Aよりもすり板中央側(図3 x=140mm付近)の地点から走行を開始した。トロリ線は0.25secで図3の段付摩耗A底部に移行し、4.0secで段付摩耗A底部からすり板上部(図3 x=220mm付近)へ移行した。

本図は上段から、トロリ線左右・上下加速度計 1~5の生波形、パンタグラフの前舟の左右・上下加速度、パンタグラフの後舟の左右・上下加速度、離線検知電圧、トロリ線上下・左右加速度計 1~5の波形に対してクルトシスを計算した結果、全トロリ線上下加速度の加算波形に対してクルトシスを計算した結果、クルトシスによるすり板段付摩耗の検知結果、トロリ線左右加速度計 1~5に5.0~8.0Hzのバンドパスフィルタを適用した結果、トロリ線左右加速度計 1~5と全トロリ線左右加速度の加算波形にそれぞれ前記のバンドパスフィルタを適用した波形の標準偏差を計算した結果、標準偏差によるすり板

段付摩耗の検知結果である。段付摩耗検知結果の波形は 通常時は 0、段付摩耗検知時は 1 とした。

本結果から、「段付摩耗底部へのトロリ線移行時の検 知」と「段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行時の検 知」が正確に行われていることが確認できる。

また、他の段付摩耗や段付摩耗の無い条件において、 速度や進行方向を変えて約 10 試番ずつ試験を実施し本 手法の有効性の確認を実施した。その結果、以下のこと がわかった。

- ○段付摩耗のない試番において誤検知は発生しなかった。 ○段付摩耗 A および段付摩耗 B の試番において、14%の 段付摩耗の見逃しと 9%の段付摩耗の誤検知が発生し ていた。しかし、「段付摩耗底部へのトロリ線の移行」 と「段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行」の両者 同時の誤検知、もしくは両者同時の見逃しは発生しな かった。
- ○段付摩耗 C の検知率は 33%と非常に低かったが、段付 摩耗 C は 1mm 程度のわずかな凹みであり、走行時の 離線も一切検知されていないため、この形状の段付摩 耗が進展する可能性は低いと推測されるため、検知で きなくても大きな問題にはならないと考えられる。

5. おわりに

本論文ではすり板の段付摩耗をトロリ線に取り付けた 加速度計により検知する手法を提案し、実験結果から本 手法の有効性を示した。今後は実架線での確認を含め、 検出精度の向上をはかり、地上設備によるパンタグラフ 異常のモニタリングシステムとして構築していく予定で ある。

また、今回の検討では低速域の確認しか実施していないが、本手法はパンタグラフの速度により影響を受けると考えられるため、通過速度に応じて閾値を変更するなどの処理についても今後検討進めていく予定である。

さらに、架線種別が変わった場合や複数パンタグラフ が連続で通過する場合にも本手法が適用できるのかといった点についても検討を進めていく予定である。