

トロリ線の振動測定によるすり板段付摩耗の検出

鉄道力学研究部 集電力学研究室

主任研究員 臼田 隆之

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、局所的な摩耗は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損、舟体溶断、架線切断などの架線・パンタグラフの障害につながることもあり、今までにも様々な対策が行われてきた。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考えられているが、まだ不明な点も多い。

そこで鉄道総研では、架線に取り付けたセンサにより、すり板段付摩耗を検知する手法についての研究を進めてきた。段付摩耗のあるすり板がトロリ線と摺動する際には、トロリ線に上下方向や左右方向の特徴的な振動が励起される。この振動波形に着目すればすり板段付摩耗が検知できると考えられる。本発表では、すり板段付摩耗の検知法について報告する。

2. 試験概要

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、架線側に取付けた加速度計や変位計などのセンサによりトロリ線の振動測定を行い、その測定波形から段付摩耗を検知可能かどうか試験を実施し確認した。本試験は鉄道総研の集電試験装置において実施し、最高速度は130km/hとした。架線はシンプルカテナリ架線とし、ハンガ間隔5m、スパン長は50mとした。架線の左右偏位は2スパン半サイクルとし、計測区間の左右偏位を図1に示すように11号柱、21号柱でそれぞれ進行方向左側100mmおよび右側380mmに設定した。なお、詳細は後述するが、測定区間の架線の最も低次の振動モードの固有振動数を上下方向と左右方向で異なる値とするために16号柱には曲線引金具は取り付けしていない。トロリ線の加速度を計測するため、図1の①～⑤の箇所には加速度計取り付け用イヤーを介して、上下・左右の加速度計を各1個ずつ取付けた。さらに、16号・21号柱間の第5ハンガの高さ中央付近にワイヤ式の変位計を水平に取り付け、ハンガの架線偏位方向の変位を測定した。また、図1に示す位置に位置マーカを設置し、パンタグラフが当該個所を通過する際に出力される信号を測定した。

パンタグラフはシングルアームパンタグラフを使用し、営業線において段付摩耗が発生したすり板が取付けられている舟体と、摩耗していない新品すり板の取付けられた舟体とを使用した。いずれのすり板もカーボン系すり板である。

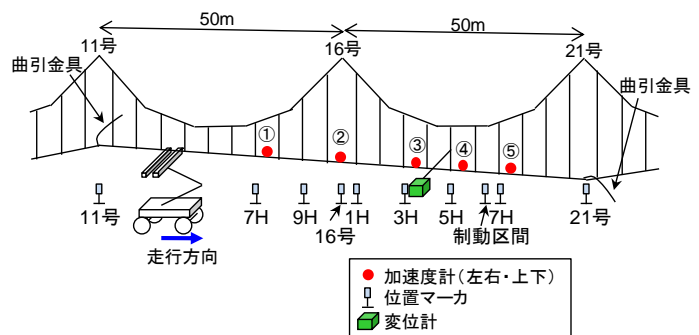


図1 試験概要図

3. 段付摩擦検知方法

すり板に段付摩擦のあるパンタグラフを走行させた時に観測したトリ線振動波形の代表例を図 2 に示す。この例のように、段付摩擦のあるすり板のパンタグラフが測定区間を通過する際に観察されるトリ線挙動には以下の特徴が見られることがわかった。

- ①トリ線がすり板摺面の上部から段付摩擦底部へ移行する際には、トリ線上下加速度とトリ線左右加速度にインパルス状の信号が観察される(図 2(a))。
- ②トリ線がすり板摺面上を段付摩擦底部から上部に移行した直後に、トリ線は左右方向に大きく自由振動する(図 2(b))。

そこで上記 2 つのケースについて、それぞれ波形の特徴をとらえることによって、段付摩擦の通過を検知する手法を検討した。

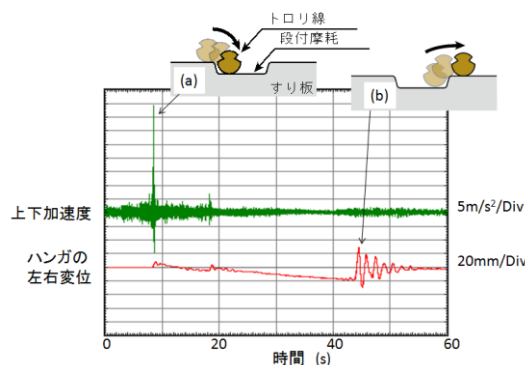


図 2 段付摩擦とトリ線との位置関係

3.1 段付摩擦底部へのトリ線移行の検知

本節ではトリ線がすり板摺面の上部から段付摩擦底部に移行する際に、トリ線上下加速度と左右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たすり板段付摩擦の検知法について検討を行う。ここでは、以下に示すトリ線上下加速度のクルトシス(波形の尖鋭度)を評価した。

ある時刻 j でのトリ線加速度を a_j 、その時刻近傍の N 点のサンプリングにおけるトリ線加速度の平均値を \bar{a}_j 、トリ線加速度の標準偏差を σ_j とした時、ある時刻 j 近傍のクルトシス K_j は次式により定義される。

$$K_j = \frac{1}{\sigma_j^4} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=j-N/2+1}^{j+N/2} (a_i - \bar{a}_j)^4 \right\} \quad (1)$$

クルトシスは平均値のまわりの 4 次モーメントを標準偏差の 4 乗で正規化したもので、波形の尖鋭度を表す指標である。例えば a_j が正規分布関数であるとき、そのクルトシスは 3 となる。正規分布関数よりもとがった波形では 3 より大きく、正規分布よりも鈍な波形では 3 より小さくなる。ここではトリ線上下加速度と左右加速度のクルトシスの計算結果が一定の閾値を超える場合にすり板段付摩擦が発生したと判別した。

3.2 段付摩擦上部へのトリ線移行検知

本節ではトリ線がすり板摺面上を段付摩擦底部から上部に移行する直後(図 2(b))に、トリ線が左右方向に大きく自由振動することに着目したすり板段付摩擦の検知法について検討を行う。高周波数のトリ線振動は測定場所による影響が大きいため、検知対象とするトリ線左右振動モードは低い周波数領域に限定する。トリ線上下振動の最も低次の固有振動数より低い周波数で、なおかつトリ線左右振動の固有振動数である周波数を透過するフィルタをトリ線の左右加速度信号に適用することにより、トリ線上下振動による連成の影響を受けずに、段付摩擦によって生じたトリ線左右方向の自由振動のみを効率良く検知可能と考えられる。

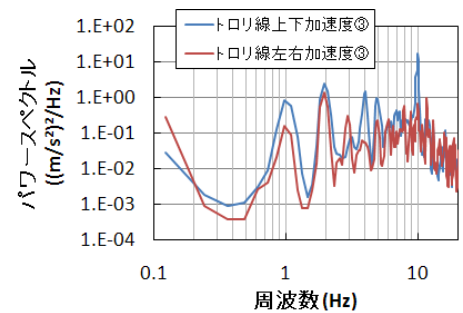
そこで、検知対象とする周波数範囲を決定するため予備試験として、試験区間のトロリ線に対し上下方向と左右方向の2種類の加振試験を実施した。図1の加速度測定点③におけるトロリ線振動加速度のパワースペクトルを一例として図3に示す。この結果から、当該トロリ線の上下方向の固有振動数のうち、最も低次の周波数は1.1Hzであることが確認できた。また、当該トロリ線の左右方向の固有振動数のうち、最も低次の固有振動数は0.7Hzであった。この周波数の違いは2章にて測定区間中央の支持点に曲引きを設置しなかったことによる効果である。以上の予備試験結果から、本試験条件では0.5~0.8Hzのバンドパスフィルタを適用することにより、トロリ線の上下方向の自由振動の影響を受けることなく、左右方向の自由振動だけを抽出することが可能であることがわかる。このフィルタを適用した波形に対して、標準偏差を計算し、計算した標準偏差が閾値を超えるものをすり板段付摩耗と検知した。

また、ハンガの左右変位からも標準偏差を計算し、計算した標準偏差が閾値を超えるものをすり板段付摩耗と検知した。

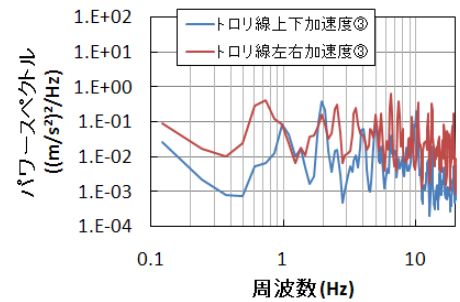
4. 試験結果

図4には段付摩耗すり板を取付けたパンタグラフを時速3.6km/hで走行させた時の測定結果および解析結果の時刻歴データを示す。本図は上段から、位置マーカ、トロリ線左右・上下加速度計③、④の生波形、ハンガの左右変位、トロリ線上下加速度計③、④の波形に対してクルトシスを計算した結果、トロリ線上下加速度の合計波形に対してクルトシスを計算した結果、トロリ線左右加速度計③、④の波形に対してクルトシスを計算した結果、トロリ線左右加速度の合計波形に対してクルトシスを計算した結果、クルトシスによる段付摩耗の検知結果、トロリ線左右加速度計③、④とトロリ線左右加速度の合計値のそれぞれに3.2節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③、④とトロリ線左右加速度の合計値のそれぞれにバンドパスフィルタを適用し標準偏差を計算した結果、標準偏差による段付摩耗の検知結果、ハンガの左右変位の標準偏差を計算した結果、およびハンガの左右変位による段付摩耗の検知結果である。なお、紙面の都合から加速度計①、②、⑤の波形は省略した。本試番は58sec付近でトロリ線が上部から段付摩耗底部へ移行し、80sec付近でトロリ線が段付摩耗底部から上部へ移行している。本結果は前記3種類の手法で段付摩耗の検知が可能であることを示している。

他にも様々な速度で同様の試験を100試番程度実施したが、「トロリ線左右加速度による段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行時の検知」および「ハンガの左右変位による段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行時の検知」の2種類の検出方法は段付摩耗の検知率が100%であった。しかし、「トロリ線加速度による段付摩耗底部へのトロリ線移行時の検知」では条件により段付摩耗の見逃し(段付摩耗すり板を正常なすり板と判断すること)が発生した。この主な理由としては、段付摩耗底部へのトロリ線移行時のパンタグラフ接触力が小さいと、トロリ線に作用する衝撃が小さくなることや、加速度計から距離がある箇所が発生した段付摩耗底部へのトロリ線移行



(a) 上下加振



(b) 左右加振

図3 トロリ線加振試験結果

は検知しにくいなどの理由が考えられる。本手法の実用化の際には段付摩耗形状に依存しないよう、様々な検出方法を組み合わせて検出精度を向上することが望ましいため、「段付摩耗底部へのトロリ線移行時の検出方法」については今後も検討を進めていく。なお、高速走行を含めて全ての判定項目について段付摩耗の誤検出（正常なすり板を段付摩耗すり板と判断すること）は発生しなかった。

5. まとめ

本研究はすり板の段付摩耗をトロリ線に取り付けた加速度計などにより検出することによって、地上設備で判別することを目的としたものである。集電試験装置において実架線での試験を実施した結果、4～130km/h の速度域でトロリ線の振動加速度やハンガの左右変位に基づいてすり板の段付摩耗発生を検知可能であることが確認でき、以下の結果が得られた。

- (1)「段付摩耗底部へのトロリ線の移行」はトロリ線上下加速度と左右加速度のクルトシスから検知可能である。ただし、一部の条件では検知できないケースもあった。
- (2)「段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行」はトロリ線左右加速度に含まれるトロリ線の左右方向の固有振動数成分の標準偏差と、ハンガの左右変位の標準偏差から検知可能であり、段付摩耗の見逃しも、誤検出も発生しなかった。
- (3)新品のすり板を取付けた試験において、段付摩耗の誤検出は発生しなかった。

本手法では複数のセンサの出力を組合せることによってすり板異常の検出を行ったが、センサの設置間隔やセンサ出力の組合せ方法については更に検証が必要である。また、本手法はパンタグラフの通過速度の影響を受けると考えられるため、パンタグラフの通過速度により閾値を変更するなどの処理も今後の課題である。

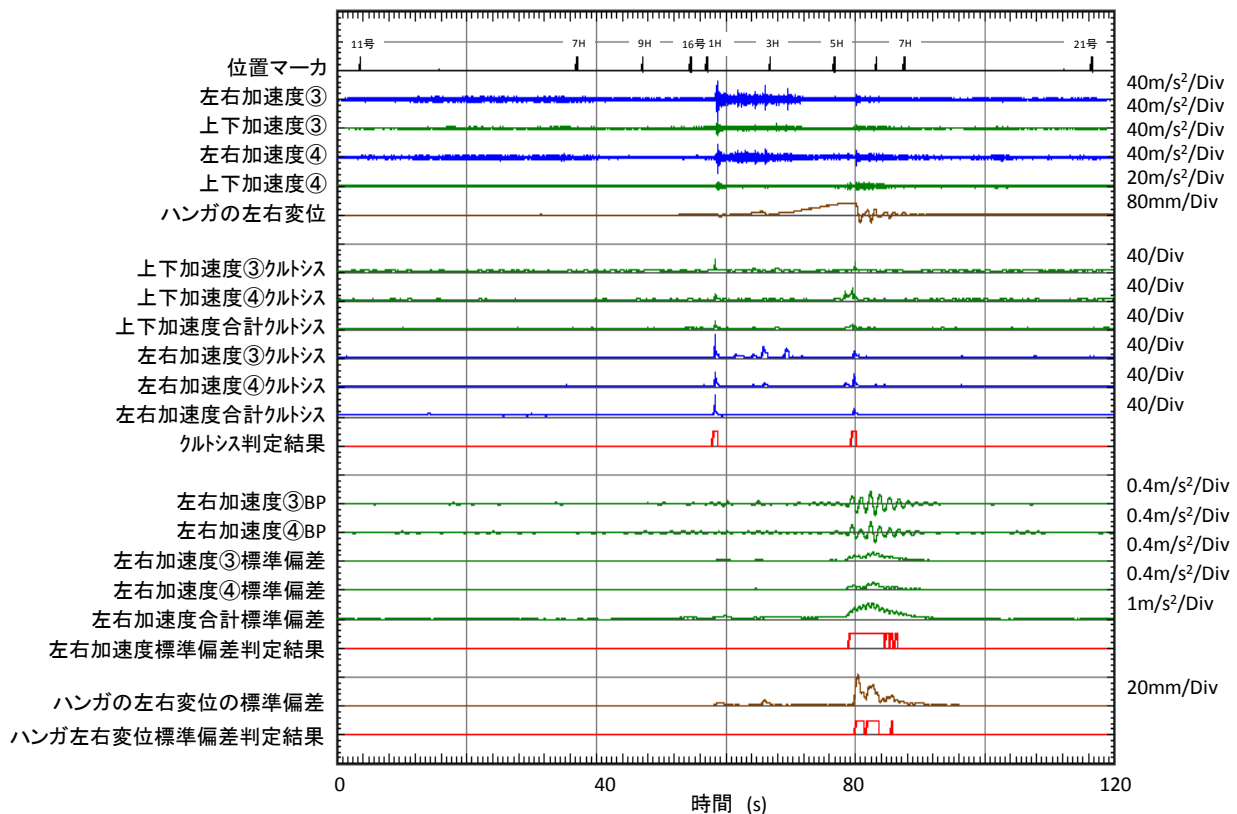


図4 走行試験結果(段付摩耗あり, 時速 3.6km/h)