

銅架台剛体電車線における1パンタグラフ走行対策

早坂 高雅* 山下 義隆** 畠山 孝昭*
清水 政利* 池田 充**

Measures for Running of Train with One Pantograph in Copper Rigid Conductor Equipment

Takamasa HAYASAKA Yoshitaka YAMASHITA Takaaki HATAKEYAMA
Masatoshi SHIMIZU Mituru IKEDA

Trains running at the section of rigid conductor equipments collect power current through two pantographs connected with high voltage bus-line for preventing contact losses. But trains running at the catenary section do not use two pantographs but one pantograph. If these trains are operated interoperable at the both sections, number of the pantographs used has to be changed. This paper reports the measures for running of train with only one pantograph regardless of the sections.

キーワード：銅架台剛体電車線，1パンタグラフ走行，パンタグラフ改良，集電性能

1. はじめに

剛体電車線区間では、多くの線区で離線の影響を考慮して2つのパンタグラフを高圧母線で連結し、集電（以下、2パンタグラフ走行）している。一方、カテナリ区間では1つのパンタグラフだけで集電（以下、1パンタグラフ走行）する線区もあり、このようなカテナリ区間と剛体電車線区間を有する線区で車両が乗り入れを行うと、剛体電車線区間の前後の駅において、1パンタグラフ走行から2パンタグラフ走行またはその逆への切り替えが行われることになる。このような場合、車両運行の効率化が損なわれるだけでなく、他線区からの車両の乗り入れの障害ともなる。

剛体電車線区間における離線対策の例として、トロリ線に生じる波長60mmのすり板間隔に起因した波状摩耗にはしゅう動面の切削が、波長200mmの伸直器の使用に起因した凹凸ならびに波長400mmのイヤールト間隔に起因した凹凸には横巻きトロリ線の使用がある¹⁾。またこれらの効果をより高める方法としてすり板の固形潤滑剤に純カーボンを使用する場合もある。剛体電車線区間の1パンタグラフ走行において、電力供給の観点から懸念されることは、比較的長い継続時間の離線が発生することによる車内停電である。このような継続時間の長い離線は、径間長程度の波長（5m）の凹凸で発生すると考えられる。

本論文は、自重によるたわみから径間長程度の波長の凹凸が大きくなりやすい既設の銅架台剛体電車線区間に

おいて1パンタグラフ走行の実現を目標として、銅架台剛体電車線区間を車両が走行した場合の離線発生状況や剛体電車線の架設状況の測定、それを基にした1パンタグラフ走行に向けた対策方法の検討ならびにその対策の効果について報告する。

2. 集電性能ならびに剛体電車線架設状況の測定

2.1 試験条件

銅架台剛体電車線区間における現状の離線発生状況を調査するために、1編成に2つのパンタグラフが搭載され、それが高圧母線で結合されている車両を2編成（A編成ならびにB編成）連結して走行試験を実施した。なお、このA編成とB編成の連結は、既設区間の営業車と同じ構成である。この試験では、2つのパンタグラフを高圧母線で結合して電力をユニットへ供給する場合を2パンタグラフ走行、高圧母線を切り離して走行する場合を1パンタグラフ走行と呼ぶことにする。なお、A編成には舟体が舟支えと微動ばねで結合され、2本の舟体がそれぞれ独立して動くことのできる構造（独立舟構造）で、金属すり板を有するパンタグラフ（以下、パンタグラフA）が搭載されている。またB編成には2本の舟体が剛な枠で結合されている構造（一体舟構造）でカーボン系すり板を有するパンタグラフ（以下、パンタグラフB）が搭載されている。カーボン系すり板は金属すり板に比べてトロリ線の摩耗低減効果があるが、集電電流が大きい車両に使用できない。この試験に用いた営業車両も、トロリ線の摩耗低減のためにB編成でカーボン系すり板を使用しているが、集電電流が大きいA編成には金

* 電力技術研究部（電車線構造）

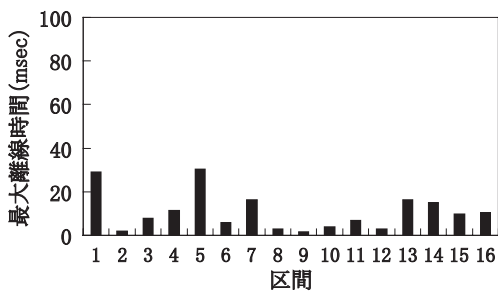
** 鉄道力学研究部（集電力学）

特集：電力技術

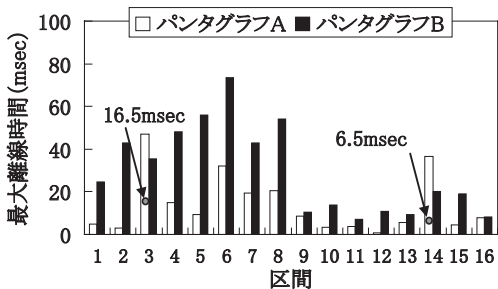
属すり板を使用している。本件ではそれぞれの編成で使用されているすり板の種類を変えない方法で集電性能を向上させる検討を進めた。

2.2 試験結果

図1に2パンタグラフ走行時と1パンタグラフ走行時の最大離線時間を示す。区間は駅間を示している。2パンタグラフ走行時の離線とは、2つのパンタグラフが同時に離線した場合を意味するため、1パンタグラフ走行時の離線より、離線率ならびに最大離線時間ともに小さくなる。この試験において2パンタグラフ走行は試験線区を走行する営業車両と同じ条件であり、現状で最大30msec程度の離線が発生しているものと考えられる。そこで1パンタグラフ走行の際の最大離線時間は30msec以内を目標とした。1パンタグラフ走行の結果から、試験線区の剛体電車線を1パンタグラフで走行すると、パンタグラフAで最大約50msec、パンタグラフBで最大約70msecの離線が発生する。ただし、パンタグラフAで発生している区間3における約50msecの離線、ならびに次に大きな区間14における約34msecの離線は、移動架線と呼ばれる単径間のオーバーラップ箇所が発生している。ここをパンタグラフが滑らかに移行できるように改修することで最大離線時間は大幅に低下する。例として、1パンタグラフ走行時の移動架線箇所を除いたパンタグラフAの最大離線時間を算出すると、図中に示したように区間3で16.5msec、区間14で6.5msecであった。一方で、パンタグラフBは多数の区間で30msecを超えていることがわかる。図2に1パンタグラフ走行時の区間6で観測された比較的長い離線とそこでの剛体電車線



(a) 2パンタグラフ走行時の最大離線時間



(b) 1パンタグラフ走行時の最大離線時間

図1 剛体電車線区間における最大離線時間

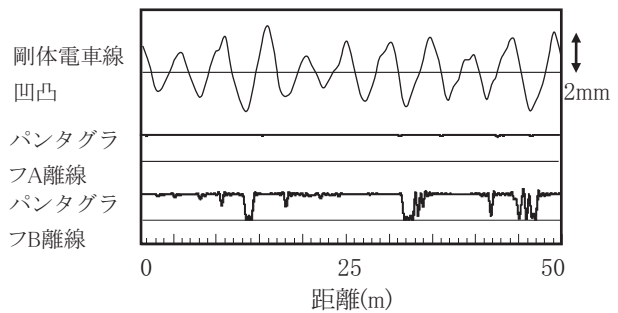


図2 離線結果と剛体電車線架設状況測定結果

の架設状況測定結果を示す。なお、この時の速度は70km/hである。パンタグラフBの比較的長い離線は、剛体電車線の径間長に相当する波長5m程度で凹凸の大きい箇所が発生する傾向にあった。

以上から現状の設備状態で1パンタグラフ走行を実施すると、パンタグラフA、Bともに最大離線時間が長くなるものの、移動架線の改修によってパンタグラフAは最大離線時間を30msecに抑えることが可能である。しかし、パンタグラフBは多くの区間で最大離線時間が30msecを越えており、特に剛体電車線の径間長程度で凹凸の大きい箇所において大きな離線が発生する傾向にある。したがって、剛体電車線の凹凸低減とパンタグラフBの集電性能向上を検討する必要がある。

3. 銅架台剛体電車線側の対策の検討とその効果

3.1 剛体電車線の凹凸低減方法の検討

剛体電車線の自重によるたわみ量は(1)式で与えられる。

$$\delta(x) = \frac{1}{24} \frac{wx^2}{EI} (L-x)^2 \quad (1)$$

$\delta(x)$: 支持点からの距離 x におけるたわみ量 (m), w : 単位長さあたりに加わる荷重 (N/m), L : 支持点間の距離 (m), E : ヤング率 (Pa), I : 断面二次モーメント (m^4)

この式を銅架台剛体電車線に適用すると、たわみ量は2.2mmと求められる。図3に区間6の径間長4~5mにおける実測したたわみ分布を示す。この区間においてたわみの平均値は3.4mmであり、(1)式から得られる値に比べて1.5倍程度大きくなっている。またたわみのばらつきが大きいこと、比較的大きなたわみ(5~6mm)が

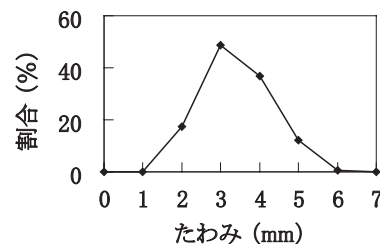


図3 区間6におけるたわみ分布

発生していることも特徴である。このような大きなたわみが存在する箇所では、パンタグラフの集電性能を向上させるだけでは十分でないことが予想されることから、剛体電車線のたわみ低減部材を開発した。

(1) たわみ低減部材の材質

たわみ低減部材は、剛体電車線に添わせて取り付けることで、その箇所の剛性を向上させるものである。したがって、たわみ低減部材の材料は、同じ断面形状で比較すると、軽量でかつヤング率の大きいものが望ましい。表1に銅とたわみ低減部材の材質として検討した材料のヤング率、密度ならびに密度/ヤング率（すべての材料を同じ形状、長さで製作した場合のたわみに寄与する値）を示す。これらから同じ形状、長さにおいて銅は他の材料より大きなたわみが発生しやすいことがわかる。また鋼やアルミニウムは銅に比べてたわみにくいこともわかる。

同じ形状、長さの鋼とアルミニウムのたわみ低減部材で比較した場合、アルミニウムの方が軽量であり、安価でもある。そこでたわみ低減部材の材料にアルミニウムを使用することにした。

(2) たわみ低減部材の取付け箇所・長さ・高さ

たわみ低減部材の取付け箇所は、支持点または径間中央が考えられる。しかし支持点は、支持金具ならびに碍子が取付けられており、たわみ低減部材の取付けが難しい。そこで、たわみ低減部材の取付け箇所は径間中央とした。たわみ低減部材の長さの検討では、0.5～4.5mのI型のたわみ低減部材を径間中央で剛体電車線の上側部に取付けたものと仮定して、たわみ量の計算値を比較した。図4にたわみ低減部材の長さとなわみ低減量の関係を示す。ここからたわみ低減部材の長さは、2.5～3.0mで十分な効果を得ることがわかった。そこでたわみ低減部材の長さは2.5mとした。たわみ低減部材の高さは、たわみ低減の観点から可能な限り高い方が望ましいものの、絶縁隔離の観点から40mm以下とした。

(3) たわみ低減部材形状の検討と低減効果の確認

たわみ低減部材の形状は、汎用品の中でも断面二次モーメントが大きくできる角管とした。また、たわみ低減効果の確認は、全長35mの模擬架線を実施した。図5にたわみ低減部材の取付け例を、図6に模擬架線においてたわみ低減部材を取付けた径間の試験結果を示す。図中の数値はたわみ低減部材の取付け前後での凹凸変化量

表1 各材料の諸定数

材料	密度 ($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)	ヤング率 (GPa)	密度/ヤング率
銅	8.65	103	0.084
鋼	7.86	206	0.038
アルミニウム	2.70	73	0.037

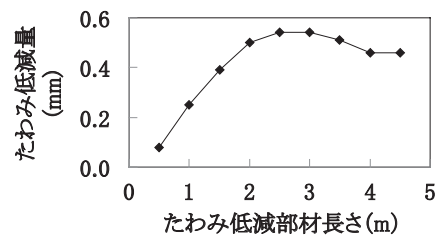


図4 たわみ低減部材長さとなわみ低減量の関係

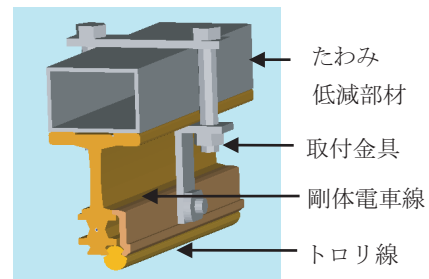


図5 たわみ低減部材取付け例

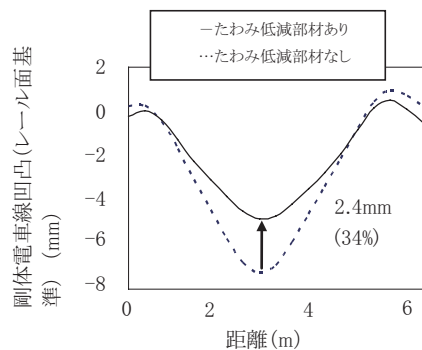


図6 たわみ低減部材を用いたたわみ低減効果

と割合である。この試験結果からたわみ低減部材は、約30%のたわみ低減効果があることが確認できた。

3.2 剛体電車線のたわみ低減部材の表面処理方法

前述のとおり、剛体電車線のたわみ低減部材の材質にアルミニウムを用いることとしたが、銅とアルミニウムの混用の場合、異種金属接触腐食の懸念が生じる。そこで、異種金属接触腐食を防ぐための金属表面処理方法について、中性塩水噴霧サイクル試験により検討した。

(1) 試験片ならびに試験方法

図7に中性塩水噴霧サイクル試験前の試験片A～Cの表面状態を示す。この面に銅板を接触させて試験を実施した。表2に各試験片の表面処理方法を示す。試験は中性塩化ナトリウム水溶液の噴霧、乾燥(湿度20～30%)、湿潤(湿度95%)を1サイクルとして、数十サイクル毎に試験片の質量を測定しながら、最大100サイクルまで繰り返した²⁾。

(2) 試験結果

図8に100サイクル後の試験片の外観と表面付近の断面を示す。試験片A, Bの表面付近の断面では、腐食によ

特集：電力技術

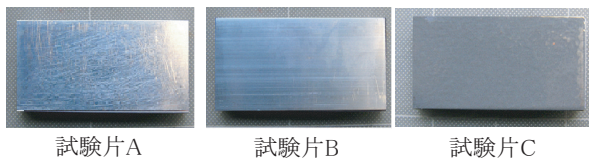


図7 試験前の試験片表面状態

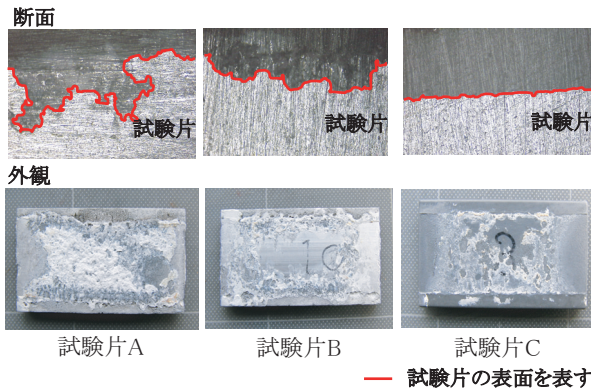


図8 100サイクル後の試験片腐食状況

表2 各試験片表面処理方法

サンプル名	表面処理方法
試験片A	表面処理なし
試験片B	アルマイト
試験片C	粉体塗装 (飽和ポリエステル)

る侵食が確認できる。一方で試験片Cではそれが確認できなかった。

以上からアルミニウムの表面処理に粉体塗装を用いることで、銅との異種金属接触腐食を防ぐことが可能である。

4. 銅架台剛体電車線側の対策の検討とその効果

4.1 パンタグラフの集電性能の検討

剛体電車線の支持点間隔5mに起因するたわみを主要な架線凹凸と考える場合、パンタグラフBの追随振幅特性において追随振幅が極小値を取る周波数領域は、剛体電車線区間の走行速度域である80~90km/hにほぼ一致する。このことから、追随振幅のピーク周波数を変更することによって、剛体電車線区間の走行速度領域における追随振幅値を大きくさせることとした。具体的には、復元ばねの剛性を、80~90km/hに対応する周波数に追随振幅のピークが現れるように変更した。

図9にパンタグラフBの追随振幅を解析的に求めた結果を示す。図中には比較のために実験により得られた結果も示す。解析結果のうち、復元ばねの可動限界を考慮していない舟体可動限界なしについては従来の解析手法を用いて算出しており、これと実験結果を比較すると極小値ならびに極大値が大きく異なることがわかる。一方で舟体可動限界±5mmについては、舟体と舟支えに対応

する質点間の相対変位が可動限界を超える場合に離線が発生すると仮定して近似的に算出したものである。なお舟体可動限界はパンタグラフBと同様で±5mmとし、これ以外の諸定数は前述の解析結果と同じである。実験結果と舟体可動限界を考慮した解析結果が比較的近い特性を示すことから、パンタグラフBはピーク周波数付近において舟体の可動範囲の限界に達しているものと考えられる。そこで、舟体の可動範囲を拡大することとし、3元系であったものを2元系としてその可動スペースを確保した。しかし3元系のパンタグラフは2元系のパンタグラフよりも高周波域における追随性能が良いことが知られており、3元系から2元系への変更によって高周波域での追随性能の低下が懸念される。これを検証するための解析結果を図10に示す。図中には現状を模擬した舟体可動限界が±5mmの3元系パンタグラフおよび舟体可動限界が±5mm、±10mmの2元系パンタグラフの追随振幅を示している。2元系のパンタグラフは3元系と比較すると、14Hz付近以上の周波数帯で追随振幅が減少しているが、その差は微小である。パンタグラフAおよびBのように枠組と舟体の間に舟支えがあり、枠組・舟支え・舟体の間にばね(復元ばね・微動ばね)が導入されているパンタグラフに対して、舟支えおよび微動ばねの

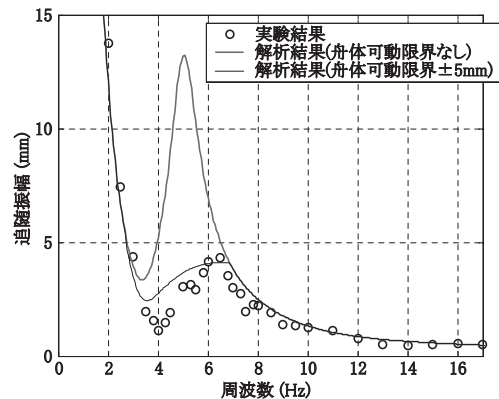


図9 パンタグラフBのストッパ当たりが追随振幅に与える影響

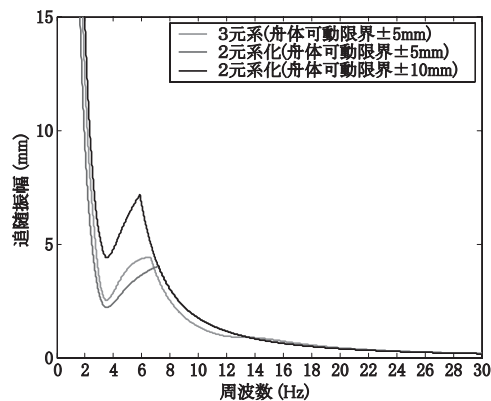


図10 3元系パンタグラフの2元系化による追随振幅への影響

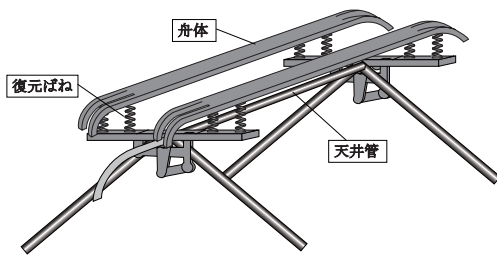


図11 改良パンタグラフ概略図

質点、ならびにばね要素を取り除いて2元系化しても前述のように高周波域での追従振幅の差異は小さくなる。これは、解析を行う際にモデル化される舟体の質量が2元系化しても変わらないこと、ならびに高周波域における追従振幅がほぼ舟体の質量のみによって決まることに起因する。この方法によって14Hz付近以上の追従振幅をわずかに低下させるものの、ピーク周波数付近における追従振幅を大幅に大きくすることが可能である。ただし、高速走行車両に用いられる、枠組・舟体・すり板の間にばねが導入されるような場合に対しては、舟体を取り除くことが不可能であるため、このような2元系化は適用できない。

上記した考え方を踏まえたパンタグラフを試作した(以下、改良パンタグラフ)。図11に改良パンタグラフを模式的に示す。現車試験結果より、一体舟構造(パンタグラフB)よりも独立舟構造(パンタグラフA)の方で最大離線時間が短かったこと、および今後の揚力調整として天井管の位置を上方へ変更する可能性を見込んで独立舟構造を採用することとした。後者は、舟体の可動範囲の拡大によって天井管と舟体の間隔が大きく開くことによる揚力低下が懸念されたための対策である。

4.2 改良パンタグラフの各種特性の確認

図12に改良パンタグラフの追従振幅特性を示す。比較のためにパンタグラフAおよびBの追従振幅特性も示す。改良パンタグラフの追従振幅特性は、パンタグラフBの極小値付近で大幅に改善されていることがわかる。

これらのパンタグラフに対しパンタグラフ総合試験装置の回転円盤との間のしゅう動試験を実施した。試験では、回転円盤を左右(架線の偏位方向に相当)に往復移動させながら上下にも振動させた。上下振動の周波数は、円盤の周速(パンタグラフの仮想的な走行速度)と同線区における剛体電車線の現状での支持間隔5mで決まる架線の凹凸周波数と一致するように決定した。円盤の左右動が2往復する間の離線率によってパンタグラフの追従性能を比較することとした。本試験では、架線を模擬した円盤が一定の周波数で上下するため、実際の剛体電車線のように様々な凹凸波長を含まず単一の凹凸波長を持つ剛体電車線を走行している状態を模擬してい

る。図13に回転しゅう動試験における離線率測定結果を示す。円盤の上下振動の片振幅が1mmの場合、パンタグラフBおよび改良パンタグラフはどの速度においてもほとんど離線を起こさないが、パンタグラフAは100km/h、110km/hにおいて7%を超える離線を起こしている。この速度域における円盤の上下振動は、パンタグラフAの追従振幅特性の極小値とほぼ一致する。ただし、この試験では、パンタグラフに揚力は作用していない。このような理由から、パンタグラフAの離線率がこの速度域で大きくなったものと考えられる。一方、上下振動の片振幅が2mmの場合、70km/h以上でパンタグラフA、Bともに枠組の前後振動が徐々に大きくなるとともに離線が増加し始める。これらは80km/hおよび90km/hでさらに大きくなったため、それ以上の速度での試験は行っていない。これは、パンタグラフAおよびBの枠組の前後方向の共振であると考えられる。改良パンタグラフではこのように大きな共振は見られなかったが、80km/hにおける離線率が他の速度よりもわずかに増加していることがわかる。この試験結果より、単一の凹凸波長を持つ架線を一定の速度で走行し続ける場合、パンタグラフAおよびBともに架線の凹凸が大きくなると追従性能が悪化することがわかる。実際の走行状態では、上述のような単一の凹凸波長を持つ架線を一定の速度で走行し続けるような条件が重なった環境で走行することはほとんどないと考えられるが、注意が必要である。一方、改良パンタグラフは2mmの上下振動に対しても良好な追従性能を示しており、幅広い速度域で追従性能の改善がなされていることがわかる。

図14に風洞試験によって得られた改良パンタグラフの揚力特性を示す。今回の試作品はパンタグラフA程度の揚力特性を得ることができず、パンタグラフBの揚力特性よりも小さくなっていることがわかる。改良パンタグラフの追従性能を維持したまま揚力特性の改善を行うことが今後の課題である。なお、簡易的に天井管を模擬した円筒形状の部材を上方に取り付けることで揚力が増加することを風洞試験で確認済みである。

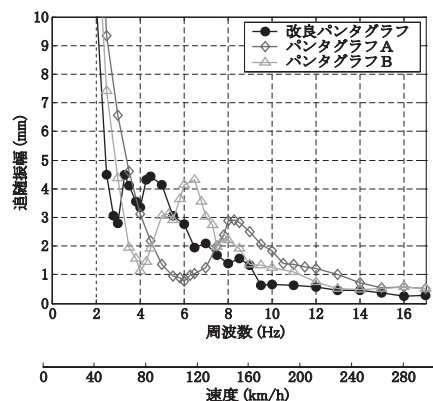
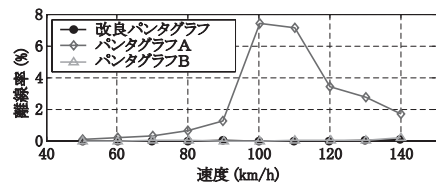
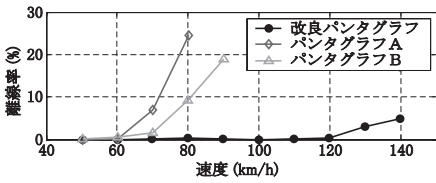


図12 追従振幅特性

特集：電力技術



(a) 片振幅1mm



(b) 片振幅2mm

図13 回転しゅう動試験結果 (離線率)

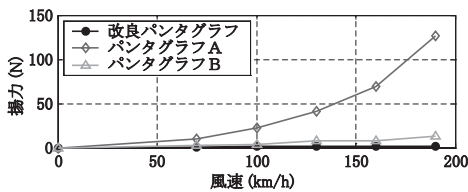


図14 改良パンタグラフの揚力特性

5. 銅架台剛体電車線側の対策の検討とその効果

集電試験装置においてカテナリ電車線ならびに剛体電車線におけるパンタグラフA, B, 改良パンタグラフの集電性能の比較, ならびに剛体電車線に凹凸を付加した状態における各パンタグラフの集電性能の比較を行った。

図15にシンプルカテナリ架線の走行試験結果を示す。営業車のカテナリ区間における最高速度130km/h以下では、パンタグラフA, B, 改良パンタグラフは、ほぼ同等の集電性能であるといえる。図16に支持点間隔5mの剛体電車線区間における走行試験結果を示す。パンタグラフBでは、追従振幅の谷の周波数に対応する80km/h付近において離線率が非常に高くなっているのに対し、改良パンタグラフでは離線率が大幅に低減されている。90km/h以上ではパンタグラフBとほぼ同程度である。図17に剛体電車線へ鉛直下向きに荷重を加えて約2~8mmの凹凸を剛体電車線に付加した後に、改良パンタグラフを通過させて最大離線時間を測定した結果を示す。改良パンタグラフは、凹凸が6~8mm付近で30msec以上の最大離線時間が発生する。したがって、凹凸6mm以上の箇所たわみ低減部材を取付けることで、離線時間を低減させることが可能である。

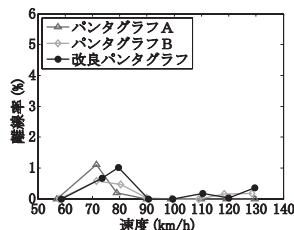


図15 シンプルカテナリ架線走行試験結果 (離線率)

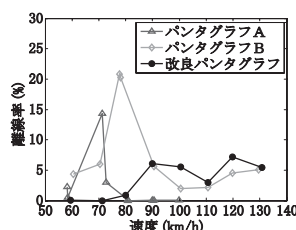


図16 剛体電車線走行試験結果 (離線率)

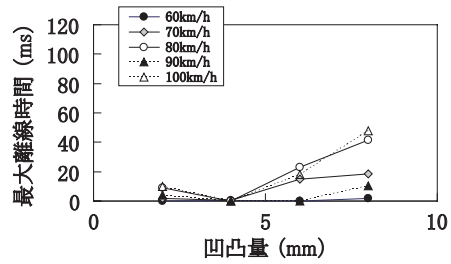


図17 凹凸付加時の改良パンタグラフの最大離線時間

6. まとめ

銅架台剛体電車線区間における1パンタグラフ走行に向けた検討を実施した。

(1) 走行試験による現状の集電状態

- ・試験区間における2パンタグラフ走行(営業車と同じ条件)での最大離線時間は約30msecである。
- ・現状の設備およびパンタグラフで1パンタグラフ走行をすると、パンタグラフAで最大50msec、パンタグラフBで最大70msecの離線が生じる。

(2) 架線およびパンタグラフの対策

- ・走行試験の結果からパンタグラフBの離線低減を目的に剛体電車線の凹凸低減ならびにパンタグラフBの集電性能向上が必要であることがわかった。
- ・剛体電車線の凹凸を低減する目的として、表面に粉体塗装を施したアルミニウム製の角管形状のたわみ低減部材を開発した。またこれを用いることで剛体電車線の凹凸は30%程度減少させることができる。
- ・パンタグラフBの集電性能向上のため、2元系の独立舟構造である改良パンタグラフを試作した。改良パンタグラフは、パンタグラフBと比較して約3.0~5.0Hzの追従振幅値を向上させることができる。

(3) 検討試験

- ・シンプルカテナリにおける走行試験において、改良パンタグラフの離線率は営業車の速度域である130km/h以下でパンタグラフAおよびBとほぼ同等であった。
- ・剛体電車線における走行試験において、改良パンタグラフの離線率は営業車の速度域である約90km/h以下でパンタグラフBよりも減少していることを確認した。
- ・改良パンタグラフは6~8mmの凹凸があると、現状の営業線区で生じている離線時間を上回る離線を生じるが、このような箇所たわみ低減部材を取付けることで改良パンタグラフの1パンタグラフ走行でも現状の営業線区と同程度の最大離線時間に抑えることが可能である。

文献

- 1) 清水政利, 原田智, 大矢明憲, 徳田浩一郎: 剛体電車線のしゅう動面凹凸低減による波状摩耗対策, 鉄道総研報告, Vol.20, No.9, pp.35~40, 2006
- 2) 日本規格協会: JIS H8502 めっきの耐食性試験方法, pp.12~14, 2000