

支持点の構造改良によるトロリ線局部摩耗低減

清水 政利* 小林 武弘** 早坂 高雅*

Methods of Reducing Local Wear of Contact Wires at Support Points

Masatoshi SHIMIZU Takehiro KOBAYASHI Takamasa HAYASAKA

In the vicinity of supporting points of overhead contact lines, local pulling-up of contact wires caused by pull-off arms can cause excessive contact force on pantographs, thus increasing the likelihood of occurrence of local wear of contact wires. Therefore, we have developed a new type of fitting that can reduce the pulling-up amount of contact wires down to the order of 60% of that of the conventional fitting. Tests in commercial lines have revealed that the maximum value of bending stress generated in contact wires when a pantograph passes can be reduced. According to the results, it can be predicted that it will be possible to reduce wear rates of contact wires because of the high correlation between bending stress and wear rate.

キーワード：電気鉄道，集電，トロリ線摩耗，トロリ線応力，支持点

1. はじめに

電車線設備の信頼性向上やメンテナンス軽減のためには、パンタグラフとトロリ線間の接触力変動を抑制し、過大な応力の発生や局部的な摩耗の進行を防止することが重要である。新幹線におけるトロリ線の局部摩耗は、オーバラップ等の特殊箇所のほか、一般区間では支持点近傍で発生し易い傾向があり、これらは高速域のみならず低速域の曲線区間等でも発生が確認されている。

これらの原因として、支持点高さの不整や横張力によるトロリ線の引き上げ等が起因となって発生する過大な接触力が考えられるが、現状の支持点構造では、その原因を緩和することが難しい。また、新幹線の300km/h超域への速度向上に伴い、これらがより顕在化する可能性がある。このため、支持点高さの不整を容易に調整できる機構を備え、引き角度を低減してトロリ線の引き上げを緩和した支持点構造を開発し、営業線における検証試験等によりその効果を確認した。

2. 支持点箇所のトロリ線局部摩耗の特徴

2.1 局部摩耗の特徴

図1に新幹線のヘビーコンパウンドカテナリ区間における支持点付近のトロリ線摩耗状況の一例を示す。この区間はR=8000m程度の曲線区間であり、支持点の構造は同一で曲線引金具は全ての支持点に設備されている

* 電力技術研究部 電車線構造
 ** 元電力技術研究部 電車線構造
 現三和テッキ株式会社 技術部

が、トロリ線偏位の偏りを緩和するためトロリ線を外方に引いている支持点は2径間毎としている。

図1のように、トロリ線を外方に引いている支持点付近(①, ③, ⑤)では摩耗が進行しているが、外方に引いていない支持点付近(②, ④)では摩耗の進行が見られない。これらの支持点に設備上の違いはないことから、摩耗の進行要因は、支持点を外方に引いていることであると推測される。支持点①では、トロリ線の引き上がりが見られるとともに、曲線引金具の前方より後方での摩耗進行が大きくなっており、トロリ線が引き上がりによりパンタグラフとの接触力が支持点後方で過大となることが摩耗進行要因の一つであると推察される。

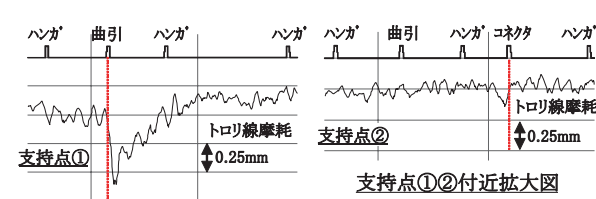
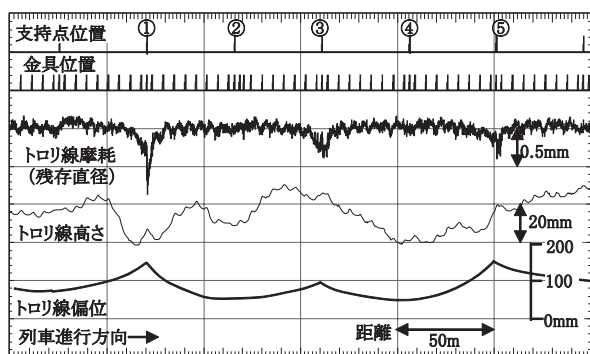


図1 支持点箇所の摩耗特性例(ヘビーコンパウンド架線)

特集：電力技術

方、支持点②では支持点後方での摩耗進行は見られない。また、支持点後方にあるコネクタ箇所では、金具の前方で摩耗が進行しており、金具の質量によりトロリ線の垂下していることなどが要因として考えられる。

図2に、支持点①の前後1径間内における偏位と摩耗率の関係を示す。ここでの摩耗率は、このドラムの平均値を1とした相対値（摩耗断面積の比）である。支持点の前方、後方ともに偏位150mm程度から摩耗率が上昇し、支持点の前方では最大2.4倍、後方では最大4.1倍となっている。トロリ線の摩耗進行度は、しゅう動面の潤滑状態などの差により偏位150mm程度以上で大きくなることが知られており¹⁾、支持点①付近では、2倍程度までが偏位が大きいことによる影響であり、前後の最大値である2.4倍と4.1倍の差が接触力増大による影響であると推測される。

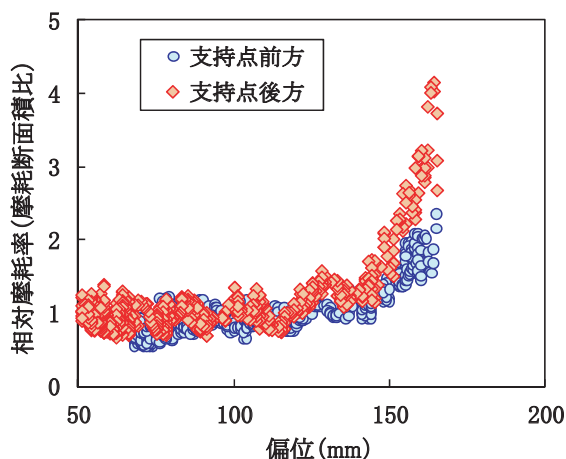


図2 支持点①付近の偏位と摩耗率の特性例
(ドラムの平均値を1とした相対値)

2.2 新しい支持点構造のねらい

一般に、接触面の摩耗は固体同士の微少な接触面に生じる凝着結合が、接触面の移動時にせん断されることにより起こる凝着摩耗であるとされている。また、凝着摩耗において、接触面の荷重、固さ、移動距離、比例定数をそれぞれ、 W 、 H 、 L 、 K とすると、摩耗体積 V は式(1)で表されるとされており²⁾、摩耗量は接触面の荷重、すなわち接触力に比例すると考えられる。

$$V = K \frac{W}{H} L \quad \dots\dots(1)$$

偏位が150mm程度より大きい箇所は、一般箇所比べて式(1)中の比例定数が大きい場合に相当するため、接触力の大きさが同じでも摩耗進行度が大きくなると考えられる。支持点箇所の摩耗進行は、偏位が大きいことにより一般箇所より平均的な摩耗率が大きいことに加え、トロリ線の引き上がりなどによる過大な接触力が発生しやすいため引き起こされると考えられる。

また、支持点に高さの不整があると支持点付近での接触力変動を助長するため、トロリ線の引き上がりを抑制する等の対策を実施しても本来の効果が得られないことが懸念される。実設備における調査結果から、支持点高さ不整を修正するためには±30mm程度の調整量が必要であると考えられる³⁾。

以上の観点から、新しい支持点構造は、支持点におけるトロリ線の引上量を緩和することを主目的として開発し、その効果を確実に発揮出来るように、高さと偏位を精密かつ容易に調整出来る機構を付加することとした。なお、高さと偏位の調整は、必要により線区条件等を考慮して実施可能な場合に行うものである。

3. 集電特性の検討

3.1 検討条件

支持点における引上力の影響や新しい支持点構造に必要な仕様を検討するため、架線・パンタグラフ系のシミュレーション⁴⁾により、曲線引金具の引角度や質量が集電特性に与える影響を検討した。

(1) 支持点における横張力と引上力

支持点の曲線引金具や補助アームは電車線の偏位を維持するために設けられており、金具に加わる横張力 P は直線区間では式(2)、曲線区間では式(3)で表され、引上力は式(4)で表される。

$$P = 4TD/S \quad \dots\dots(2)$$

$$P = ST/R \quad \dots\dots(3)$$

$$P_v = P \tan \theta \quad \dots\dots(4)$$

P ：横張力 (N)、 T ：線条の張力 (N)、 D ：偏位 (m)、 S ：径間長 (m)、 R ：曲線半径 (m)、 P_v ：引上力 (N)、 θ ：引角度

(2) シミュレーション条件

表1は、シミュレーションを実施した電車線条件であり、高速区間で用いられているヘビーコンパウンドカタナリの定数を用いた。表2は、この電車線条件で発生する横張力と引上力の計算例である。偏位150mmは直線区間での標準値であり、 $R=3000m$ は曲線路での速度制限がほぼ無くなる最小の半径である。これらを前提として、シミュレーションにおける引角度(引上力)と曲線引金具の等価質量を表3のように変更して特性差を調べた。等価質量は、イヤ一点を上下加振した場合の等価的な質量値で、現状品は1.2~1.0kg程度である。その他の電車線条件は表1の通りである。パンタグラフ数は1個とし、定数は、すり板を微動ばねで支持しているタイプの新幹線用シングルアームパンタグラフの平均的な値を用いた。

表1 電車線条件

項目	条件
ちょう架線（張力）	St180 (24.5kN)
補助ちょう架線（張力）	PH150 (14.7kN)
トロリ線（張力）	GT170 (19.6kN)
径間長	50 m

表2 想定した線路条件と引上力

線路・偏位条件	横張力 (N)		引角度	引上力 (N)	
	曲線引金具	補助アーム		曲線引金具	補助アーム
直線区間 1 径間半サイクル 偏位 150mm	235	176	16°	67.4	50.5
			12°	50.0	37.4
			9°	37.2	27.9
曲線区間 曲線半径 R=3000m	327	245	16°	93.8	70.3
			12°	69.5	52.1
			9°	51.8	38.8

表3 特性を比較した引上力と等価質量の条件

曲線引金具と補助アームの引上力条件	曲線引金具等価質量
(1) 曲線：半径3000m, 引角度16° 相当	(a) 1.2 kg
(2) 直線：偏位150mm, 引角度16° 相当	(b) 1.0 kg
(3) 直線：偏位150mm, 引角度12° 相当	(c) 0.8 kg
(4) 直線：偏位150mm, 引角度9° 相当	

3.2 検討結果

(1) 電車線構造とパンタグラフの接触力，軌跡の特徴

図3に、引上力が作用した場合の電車線構造図とパンタグラフの接触力，軌跡の一例（直線，引角度16° および9°，速度270km/h）を示す。コンパウンドカタナリではハンガ長さが一定であり，トロリ線の高さ調整はドロップ長さの調整で行われるため，ハンガ点におけるトロリ線高さを水平となるようにドロップ長さを設定しても，曲線引金具と補助アームによる引上力により支持点とその前後のハンガ点では標準高さからの引上量が発生する。引上力の条件が表3の直線，引角度16° の場合は，構造計算により支持点で7.2mm，第1ハンガ点で5.3mm引き上がると計算される。同様に直線，引き角度9° の場合は支持点で2.2mm，第1ハンガ点でも2.2mmの引上量となる。引角度16° のように引上量が多い場合には，図4のように支持点の後方で接触力変動が生じやすい。

(2) 引上力と等価質量の影響

図4は、曲線引金具の等価質量を1.0kgとし，引上力の条件を変更した場合の接触力最大値特性である。引上力が大きい角度16° の条件では最大接触力が大きくなり速度による変動も大きい。これに対して直線12° および9° の条件では最大接触力が比較的小さく，速度による変動も小さい。表3のように，直線12° の引上力は曲線9° と同等の値であり，引角度を9° 程度とすれば，直線，曲線ともに比較的安定した接触力特性が得られる。

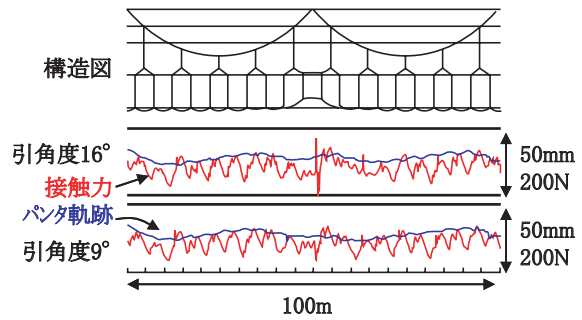


図3 支持点付近の集電特性例

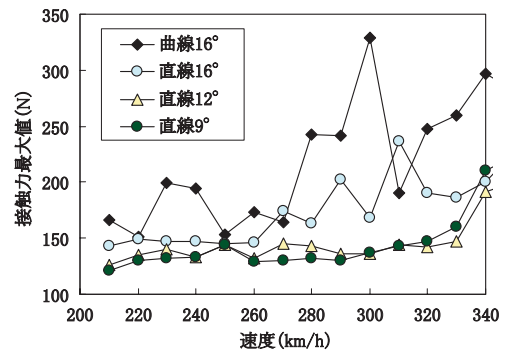


図4 接触力最大値の特性（引上力での比較）

図5に、引上力を直線16° および直線9° 相当とし，曲線引金具の等価質量を変更した場合の接触力最大値特性を示す。同様に，図6に支持点でのトロリ線応力特性（全振幅）を示す。直線16° の条件では，速度280km/h程度以上で等価質量の差による特性差があり，等価質量が小さい方が良好な特性を示している。これに対して，直線9° の条件では，速度320km/h程度以上では等価質量が小さい方が良好な特性を示しているものの，速度300km/h程度までは等価質量の差による特性差は大きくなく，比較的良好的な特性を示している。

(3) 新しい支持点構造における曲線引金具の仕様

以上の検討結果から，新たに開発する支持点構造の金具引き角度は9° とした。また，等価質量は300km/h超域での使用を前提とした金具は1.0kg程度を目標とした。これらは，一般的なブラケット構造に取付可能な寸法や部材の強度確保等の面も考慮している。

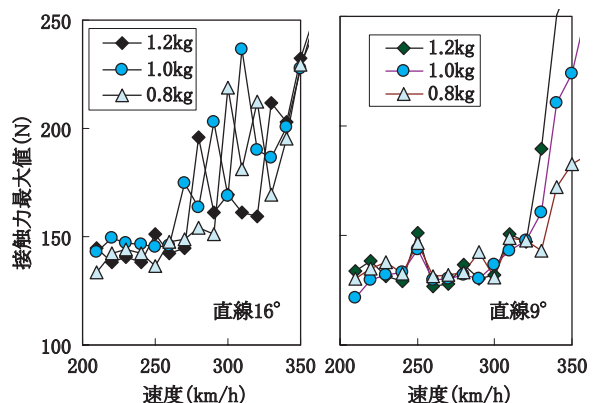


図5 接触力最大値の特性（等価質量での比較）

特集：電力技術

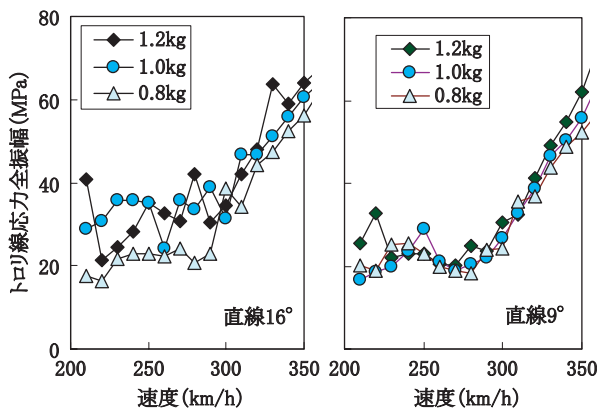


図6 支持点のトロリ線ひずみ特性

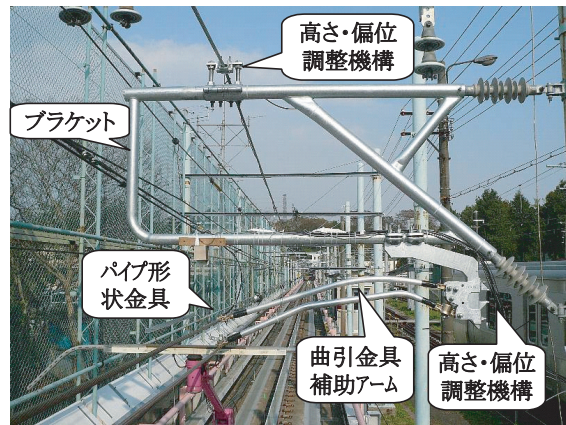
4. 支持点構造の試作と機能試験

試作した支持点構造の概観を図7に示す。試作試験は、ヘビーコンパウンドおよびシンプルカテナリ用のIタイプ（内方向引き）、Oタイプ（外方向引き）の合計4種類について行った。2～3章での検討結果により、曲線引金具および補助アームの引き角度は9°とし、ちょう架線支持金具とアーム支持金具に高さ・偏位を調整できる機構（±30mm）を設けている。支持点高さは主に支持点でのちょう架線高さに依存するが、架高を維持して引角度等を正規に設定するには、アーム支持金具も同時に調整する必要がある。ブラケットは従来品と大きな変更点は無いが、偏位方向の調整幅を設けるため、水平部分を従来品より拡大している。

表4に曲線引金具および補助アームの仕様を示す。試作は現状の営業速度で用いることを想定したパイプ形状と、300km/h超域での使用を想定したH型形状の2種類について行った。引き角度を9°に低減するため、長さは従来品より50～100mm程度長くしている。パイプ形状は、従来品と同様にアーム部にアルミパイプを用い、支持部とイヤータ取付部にアルミ青銅を用いており、強度向上のため等価質量増加が問題無い範囲でアルミパイプを太径化している。また、構成部材接合部の形状変更やアーム支持金具の形状変更等の強度向上対策も施している。

H型形状は、等価質量を1kg程度に軽減するため、アルミ合金の一体成形としてイヤータ取付部のアルミ青銅部分を不要とし、強度向上のため断面形状をH型としている。

これらの支持点構造について強度試験等を行い、JRの機能仕様として定められている規格を満足することを確認している⁵⁾。また、試作した曲線引金具はヘビーコンパウンドカテナリにおける強度上の規格値を満足しており、必要強度が小さい高速用シンプルカテナリにも用いることが出来る。






(a) タイプブラケットとパイプ形状金具



(b) OタイプブラケットとH型形状金具

図7 支持点構造の概観（コンパウンド用）

表4 曲線引金具と補助アームの仕様

仕様	現状品		開発品 (シンプル, コンパウンド共用)	
	シンプル	コンパウンド	パイプ形状	H型形状
材料・構成 (イヤータは全品同一品)	アルミパイプとアルミ青銅の組合せ		同左 アルミパイプを太径化	H型形状アルミ合金の一体成形
アーム部断面形状				
長さ (mm)	曲線引	1200	1150	1250
	補助アーム	-	1084	1200
等価質量 (kg)	曲線引	1.16	1.10	1.28
	補助アーム	-	0.73	0.94
引き角度 (°)		12	16	9
				9

5. 現地検証試験

5.1 試験条件

(1) 試験概要

4章で述べた新しい支持点構造（曲線引金具および補助アームはパイプ形状）を新幹線の営業線に試験架設して集電特性を確認した。試験条件を表5に示す。電車線はヘビーコンパウンドカテナリであり、現地の列車速度は直近駅停車の場合150km/h域、通過の場合230km/h域である。測定項目は支持点のトロリ線上下変位（押上量）とトロリ線の応力（小弧面上のひずみ測定による）であ

表5 現地検証試験における試験条件

電車線方式	ヘビーコンパウンドカタナリ
ちょう架線の線種（張力）	St180 (24.5kN)
補助ちょう架線の線種（張力）	PH150 (9.8kN)
トロリ線の線種（張力）	GT170 (19.6kN)
径間長・線形	約45m 曲線路:R=4000m
曲線引, 補助アームの引角度	従来品 16° 開発品 9°
列車速度	直近駅停車: 130 ~ 150km/h 直近駅通過: 200 ~ 230km/h
パンタグラフ条件	2個 間隔50mまたは100m

り、曲線引金具および補助アームが従来品の16°の場合と開発品である9°の場合で特性を比較した。

(2) 試験箇所の摩耗状況と支持点構造の変更経過

現地適用箇所の摩耗状況と支持点構造変更前後の高さ構成測定結果を図8に示す。試験箇所はR=4000m程度の曲線路であり、偏位を大きく設定する必要があるオーバーラップ近傍の支持点4, 5, 7で局部摩耗が顕著である。この3箇所について、可動ブラケットは既設のものをそのまま使用し、開発した高さ・偏位調整機構（ちょう架線支持金具, アーム支持金具）, 曲線引金具および補助アームを取り付けた。また、支持点構造変更前後の特性差を明確にするため支持点1~9間の高さを整正した。変更箇所は試験後に現状の支持金具に復帰する予定であるため、今回は新しい支持点構造の機能による高さ調整は行わず、ドロップ長さを変更することにより高さを整正することとした。集電特性の測定は以下の手順で行った。

- ① 支持点構造変更前：支持点構造、高さ整正とも行わず、現状の状態での測定
- ② 高さ整正後：ドロップ交換による高さ整正を行い、従来金具（16°）での測定
- ③ 支持点構造変更後：②の後、開発した金具（9°）に取り替えて測定

測定項目はトロリ線押上量と応力であり、支持点5に無線テレメータを取り付けて行った。支持点5のトロリ線には、曲線路に応じた横張力である220Nに加え、オーバーラップの構成上必要となる支持点6との偏位差（約0.3m）による130Nの横張力が生じるため、他の支持点より引上力が大きく、16°では101Nの引上力が、また、補助ちょう架線には50.5Nの引上力が生じる。このため、他の支持点より局部摩耗の進行度が大きいものと考えられる。引き角度を9°とすることにより、引上力は55%に低減され、支持点の引上量は16°の場合の11mmから6mm程度に軽減される。また、この区間のハンガ間隔は3.5mであり、引上力も加わるため、支持点前後のハンガ荷重は27N程度と計算される。図9にトロリ線応力の測定点を示す。支持点前後のハンガと曲線引金具イヤーの近傍、摩耗が進行している支持点後方のトロリ線小弧面にひずみゲージを貼付した。

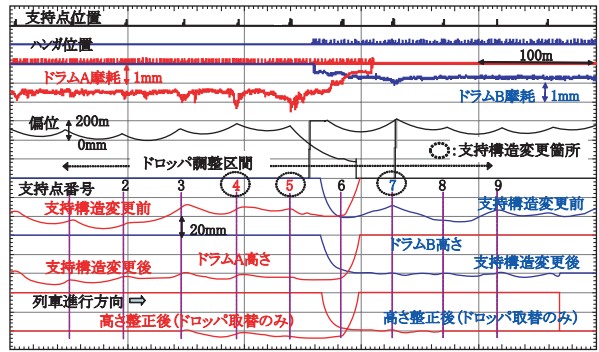


図8 現地試験箇所のトロリ線摩耗・高さ・偏位状況

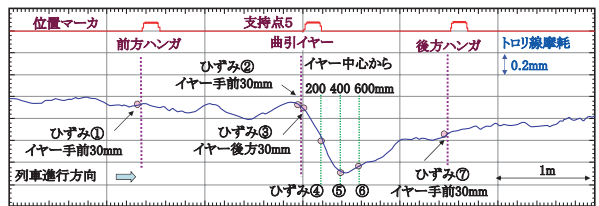


図9 支持点近傍の摩耗状況と応力測定箇所

5.2 測定結果

(1) 速度特性

図10にトロリ線の応力の速度特性例（第1パンタグラフ）を示す。各測定点とも速度の上昇とともに増加する傾向があるが、最大値は応力のプラス側で差があり、測定点⑤と⑥では支持構造変更前の値が大きく、変更後に低下している。支持点トロリ線押上量は最大20mm程度で条件による差は殆ど無かった。

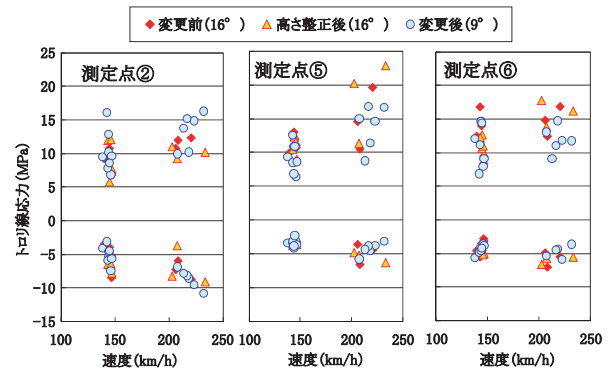


図10 トロリ線応力の速度特性（第1パンタグラフ）

(2) 測定位置毎の比較

図11は各測定位置における条件毎の応力の平均値をパンタグラフ毎に比較したものである（230km/h域）。また、図12は第1と第2パンタグラフの値を平均して速度域での比較を示している。プラス側の応力は各条件とも支持点の後方で最大値が発生しているが、速度150km/h域に比べて速度230km/h域の応力は増大し、最大値発生位置が支持点に近づく傾向がある。いずれの場合も支持点構造変更前および高さ整正後（引角度16°）に比べて、支持点構造変更後（引角度9°）には最大値が低下して

特集：電力技術

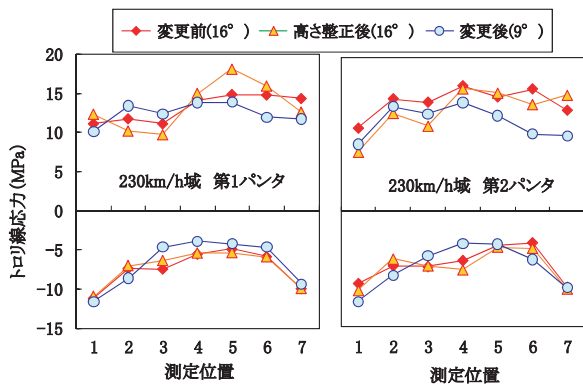


図 11 各測定位置における応力平均値の比較

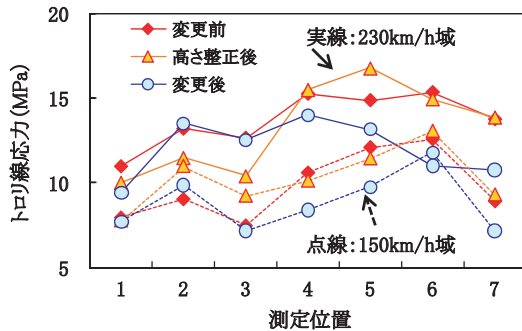


図 12 速度域での応力比較 (両パンタ平均)

平均化する傾向が認められる。マイナス側の応力は、比較的条件による差が少ない。

(3) 摩耗低減効果の予測例

式(5)は集電系の解析モデルの一つである弾性支床梁モデル⁴⁾により導出されたトロリ線の応力 σ を表す式で、 F 、 EI 、 Z 、 T 、 c 、 V はそれぞれ接触力、曲げ剛性、断面係数、張力、波動伝搬速度、列車速度である。

$$\sigma = \frac{F}{2Z} \cdot \sqrt{\frac{EI}{T}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(V/c)^2}} \quad \dots\dots(5)$$

式(5)のように、定性的にはパンタグラフの接触力が大きいほどトロリ線応力が大きくなることが示されている。また、2章で述べたように接触力と摩耗量の関係は式(1)で示されており、支持点近傍の狭い範囲では、トロリ線応力と摩耗率は比例関係にあるものと推定できる。なお、摩耗による断面形状の変化が与える応力値への影響を式(5)で計算すると、一定の接触力における最小摩耗点に対する最大摩耗点の応力値は1.02倍と計算され、実測値の比率である1.5倍程度より十分低い値である。

図13は、通過列車(230km/h域)と停車列車(150km/h域)の平均値に、それぞれ線区の列車本数の割合を乗じて算出した各測定点における1パンタ当たりの応力換算値と摩耗率の相関を示している。このように支持点変更前の応力値と測定点におけるトロリ線の摩耗率は強い相関がある。この回帰線により、支持点構造変更後の応力最大値から摩耗率を推定すると、今回の試験箇所では、20%程度摩耗率が改善するものと予測される。

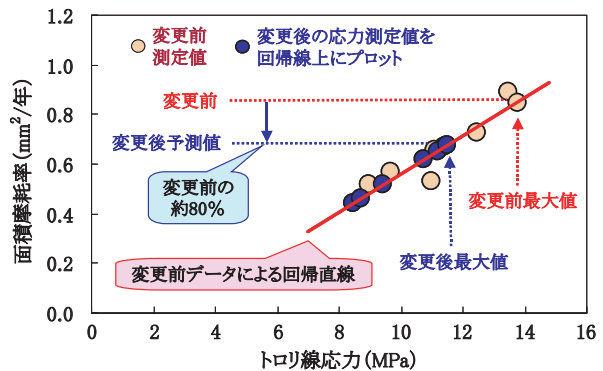


図 13 試験箇所の応力と摩耗率の相関

6. まとめ

新幹線の支持点近傍で発生し易いトロリ線の局部摩耗を低減するため、摩耗の進行要因や低減方法を検討して新しい支持点構造を開発し、営業線での検証試験等によりその効果を確認した。その結果は以下の通りである。

- (1) 支持点の後方で発生しているトロリ線の摩耗進行は、偏位が大きいことにより一般箇所より平均的な摩耗率が大きいことに加え、トロリ線の引き上がりなどによる過大な接触力が発生しやすいため引き起こされると考えられる。
- (2) 曲線引金具や補助アームの引き角度の低減が支持点近傍の集電特性の改善に効果があり、高速域ではそれに加えて金具の等価質量が小さいことが望ましい。
- (3) トロリ線の引き上げを緩和するため、支持点高さの不整や偏位を容易に調整できる機構を備え、引き角度を9°に低減した支持点構造を開発した。また、これらが営業線での使用に必要な機能仕様を十分満足することを確認した。
- (4) 開発した支持点構造を営業線に適用することにより、トロリ線に発生する応力が低減して摩耗率低減に効果があると推測されることを確認した。

最後に現地試験に際してご指導、ご協力頂きました皆様に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 清水, 他: 新幹線オーバーラップのトロリ線摩耗防止対策, 鉄道総研報告, 17巻7号, 2003
- 2) 田中久一郎: 摩擦のおはなし, 日本規格協会, 1985
- 3) 清水, 他: 電車線支持点近傍での集電特性改善に関する検討, 平成20年電気学会全国大会論文集, 5-094, 2008
- 4) 鉄道総合技術研究所編: 電車線とパンタグラフの特性, pp.58-64, pp.64-69, 研友社, 1993
- 5) 小林, 他: 硬点を軽減する電車線支持構造の検討, 平成20年電気学会全国大会論文集, 5-093, 2008