

# 剛体電車線のしゅう動面凹凸とその低減手法

網干 光雄\* 清水 政利\*\* 沖本 文男\*\*\*

## Unevenness of Sliding Surface of Overhead Rigid Conductor Line and its Reduction Method

Mitsuo ABOSHI Masatoshi SHIMIZU Fumio OKIMOTO

Rigid conductor lines are used in many subways, because there is little accident and the space required for installation is small. However, as the unevenness of sliding surface of the rigid conductor lines is very influential in the contact force fluctuation between a pantograph and a contact line, it is necessary to decrease the unevenness in both the construction and the maintenance stage. In order to investigate the installation accuracy of overhead rigid conductor lines, we have developed a device to measure the unevenness of the sliding surface accurately and continuously. Using this measuring device, we have confirmed that the unevenness of the sliding surface comes from various elements such as the sag between the support points, the curve of the aluminum-base or the conductive-rail with long wave length, the fine unevenness between the bolts of the long ear, and the undulating wear. This paper describes the actual conditions of the unevenness and the technical methods to decrease the unevenness of overhead rigid conductor lines.

キーワード：集電，剛体電車線，凹凸，接触力変動，架台

### 1. はじめに

剛体電車線は、断線の恐れが少なく保安度が高く、また架設空間が小さいことから、主に地下鉄などで用いられている。剛体電車線は一般的に保守が容易とされているが、しゅう動面の凹凸がパンタグラフの接触力変動に大きな影響を及ぼすことから、パンタグラフの離線やこれに伴う剛体電車線の波状摩耗が問題となる場合も少なくない<sup>1) 2)</sup>。このため、工事や保全において剛体電車線のしゅう動面の凹凸(以下、剛体電車線の凹凸あるいは単に凹凸という)をできるだけ小さくすることが求められるが、対象の凹凸振幅が小さいため正確で広範囲の把握が難しく、また凹凸低減対策も十分とは言えない状況である。

そこで、剛体電車線の凹凸を精度良く連続的に計測できる装置を開発し、その実態を明らかにするとともに、凹凸低減のための対策について研究を進めてきた。本論文では、剛体電車線の凹凸の実態とそれを低減するための対策手法について述べる。

### 2. 剛体電車線の凹凸

#### 2.1 剛体電車線の構造

図1に、我が国で使用されている主な剛体電車線の断

\* 電力技術研究部  
 \*\* 電力技術研究部(電車線構造)  
 \*\*\* 東海旅客鉄道(株)(元 電力技術研究部)

面例を示す。剛体電車線として最も一般的な構造はT型アルミ架台方式であり、各都市の地下鉄に広く採用されている。腐食環境下における耐食性向上の観点から、銅製の架台を用いた方式も使用されている。またトロリ線を用いない方式として導電鋼レール方式がある。

一本の架台またはレールの長さは約10mであり、これらは溶接または継目板で接続される。T型架台の場合の

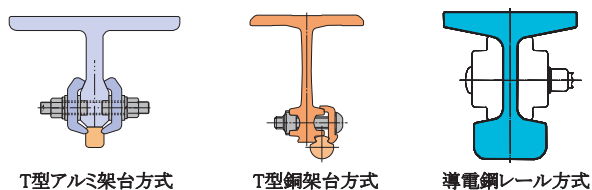


図1 各種剛体電車線の断面例

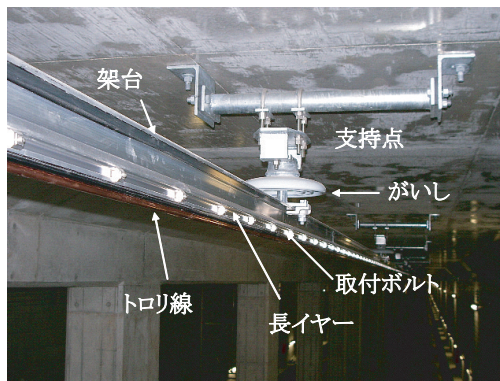


図2 剛体電車線の架設状況(T型アルミ架台方式)

特集：電力技術

トロリ線は、長イヤーを用いてボルトで固定される。架台またはレールはがいしで支持され、その間隔は5m前後である。1本の剛体電車線の長さは200m前後で、その端部は、パンタグラフが支障なく移行できるようにエキスパンションジョイント（平行区間）で構成される。図2に、T型アルミ架台方式の剛体電車線の架設状況を示す。

2.2 剛体電車線の凹凸による接触力変動解析

図3に、電車線・パンタグラフ間の接触力変動の解析モデルを示す。波長 $\lambda$ 、振幅 $A$ の正弦波状の電車線凹凸下をパンタグラフが速度 $v$ で走行した際の接触力変動 $F$ は

$$F = -i\omega \frac{Z_p Z_t}{Z_p + Z_t} A \exp(i\omega t), \quad \omega = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (1)$$

で表される<sup>3)</sup>。ただし、 $i$ 、 $t$ はそれぞれ虚数単位、時間であり、 $Z_p$ 、 $Z_t$ はそれぞれパンタグラフ、電車線の機械インピーダンスである。なお機械インピーダンスは作用力と運動速度の比で表され、言わば動き難さを表す指標である。

上式から、接触力変動 $F$ の大きさは、凹凸振幅 $A$ に比例するとともに、電車線とパンタグラフを直列配置した場合の総合機械インピーダンス

$$Z = \frac{Z_p Z_t}{Z_p + Z_t} \quad (2)$$

に比例することがわかる。カテナリ式電車線の場合、トロリ線を弦と仮定して、 $\rho$ 、 $T$ をそれぞれ線密度、張力とすれば、トロリ線の機械インピーダンスは

$$Z_t = 2\sqrt{\rho T} \quad (3)$$

で表わされる。一方、剛体電車線の場合には

$$Z_t = \infty \quad (4)$$

と仮定すれば、(1)式は次式のように表される。

$$F = -i\omega Z_p A \exp(i\omega t), \quad \omega = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (5)$$

図4に、あるパンタグラフの振動特性の実測値に基づいて算出した電車線の無離線限界凹凸例を、カテナリ式電車線と剛体電車線とで比較して示す。無離線限界凹凸とは、パンタグラフが離線しないで走行できる電車線の最大凹凸振幅のことである。例えば、周波数50Hzは、波

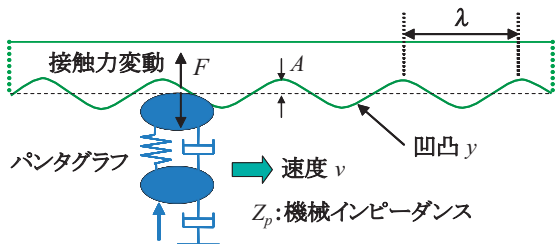


図3 電車線凹凸による接触力変動解析モデル

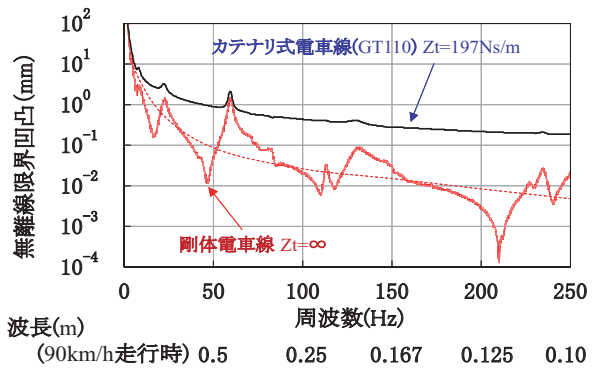


図4 無離線限界凹凸の比較例

長0.5mの凹凸下を速度90km/hで走行した場合に相当するが、カテナリ式電車線の場合は凹凸振幅が約1mm以下であれば離線しないが、剛体電車線の場合は約0.1mm以下とする必要がある。つまり、剛体電車線の場合はカテナリ式電車線に比べて、概数で言えば凹凸振幅を約1/10に低減する必要がある。剛体電車線の場合は、カテナリ式電車線が有する追従性が期待できないためである。

2.3 剛体電車線凹凸精密測定器の開発

前節の解析から、剛体電車線の凹凸は、実用上は少なくとも0.1mm程度の精度で計測する必要がある。そこで、2組の非接触変位計を用いてこれらの変位差を積分することで、高精度で連続的に測定できる精密測定器を開発した<sup>4)</sup>。

図5に、測定原理を示す。位置 $x$ における電車線しゅう動面凹凸（基準点からの電車線高さ）を $y(x)$ 、測定車の上下振動を $n(x)$ 、非接触変位計の取付間隔を $\Delta x$ とすれば、変位計1、2の出力 $y_1$ 、 $y_2$ は、

$$\begin{aligned} y_1 &= y(x) - n(x) \\ y_2 &= y(x + \Delta x) - n(x) \end{aligned} \quad (6)$$

で表される。この関係から、剛体電車線の凹凸 $y(x)$ は、

$$y(x) \cong \int_{x_0}^x \frac{y(x + \Delta x) - y(x)}{\Delta x} dx + y(x_0) = \int_{x_0}^x \frac{y_2 - y_1}{\Delta x} dx + y(x_0) \quad (7)$$

で近似的に求めることができる。この測定方法は、電車線しゅう動面の傾斜を測定しこれを積分することにより剛体電車線のしゅう動面凹凸を求める方法であり、測定車の上下振動の影響を受け難く精度の比較的高い連続測定が可能である。また電車線自体の振動による測定誤差を避けるため、測定器と電車線とは非接触で測定する。なお、2点間の変位差から傾斜を近似的に算出するため、凹凸波長による誤差を補正している。これにより、センサヘッド取付間隔程度の波長まで測定することが可能である。

図6に、剛体電車線専用として開発した凹凸測定器<sup>5)</sup>

の外観を示す。非接触変位計にはレーザラインセンサを用いており、また剛体電車線の比較的大きな高さ変化に対しては、自動追従できる機構を備えている。図7に、同一箇所の剛体電車線の凹凸を4回繰り返して測定した結果を示す。この図には、全波長を含む凹凸と波長1m以下の凹凸のみを選択して拡大した波形を比較して表示している。波長1m以下の波形を比較すると0.1mm程度の範囲内で良く合致しており、再現性が高いことがわかる。またこの測定器には、電車線の偏位や支持点位置を同時に計測するための超音波センサや、測定器の前後傾斜による測定誤差を補正するための加速度計が取り付けられている。この測定器を保守用車等の作業台に設置し、速度5～10km/h前後で走行しながら連続的に測定を行う。これにより、従来測定が困難であった短波長で微小な剛体電車線凹凸が、長区間にわたって正確にしかも効率的に把握することができる。

### 2.4 剛体電車線凹凸の特徴

図8に、上記の剛体電車線用凹凸測定器による剛体電車線新設直後の凹凸測定例を示す。図中には、全波長を含む凹凸（高さ）のほか、波長1m以下および波長0.25m以下の成分も拡大して示している。凹凸評価値は、凹凸によるパンタグラフ走行時の接触力変動を示したもので、算出の詳細は後節で示す。

図9に、剛体電車線凹凸のスペクトル分布の例を示す。波数は1mあたりの波の数を表し、波長の逆数に相当する。この例の場合、剛体電車線の凹凸には、支持点間隔に相当する波数約0.2 (1/m) (波長約5m) のたわみ凹凸(図中①)や、架台長さに相当する波数約0.1 (1/m) (波長約10m) の凹凸(図中②)が見られる。また波数4 (1/m) (波長0.25m) 付近の凹凸(図中③)が見られるが、これはトロリ線を固定する長イヤーの取付ボルト間隔に相当する。また波数4.5 (1/m) (波長0.22m) 及びその倍波数9 (1/m) (波長0.11m) 付近の凹凸(図中④)は、トロリ線延線時の整直機使用により形成された凹凸である。なおこれらの波数は、電車線構造や使用する工具によっても異なる。この他にも、架台接続箇所の不整凹凸、エキスパンションジョイント部の構成不良等の凹凸などが見られる。

図10に、営業運転区間における剛体電車線凹凸の空間スペクトル分布例を示す。これは、しゅう動面凹凸波形に対して短時間フーリエ変換(STFT)を施したものであり、パワースペクトル密度の大きさを64階調の色で表示しており、赤色は大きく青色は小さいことを示している。なお図9に示されているように凹凸スペクトルは一般に-3乗則に従うと言われており<sup>6)</sup>、これに相当する右下がりの直線を基準として換算表示している。上述した新設時の凹凸のほか、パンタグラフの通過に伴い、特

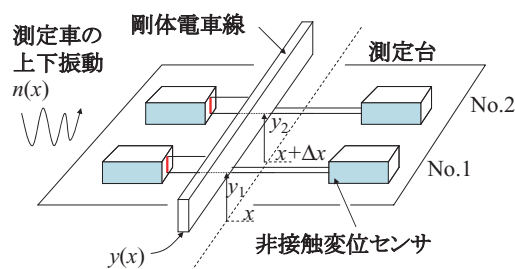


図5 電車線凹凸の測定原理

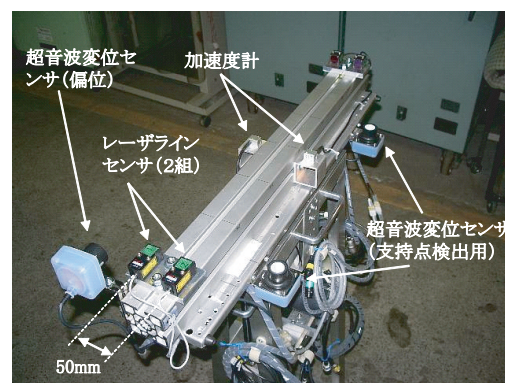


図6 剛体電車線用凹凸測定器

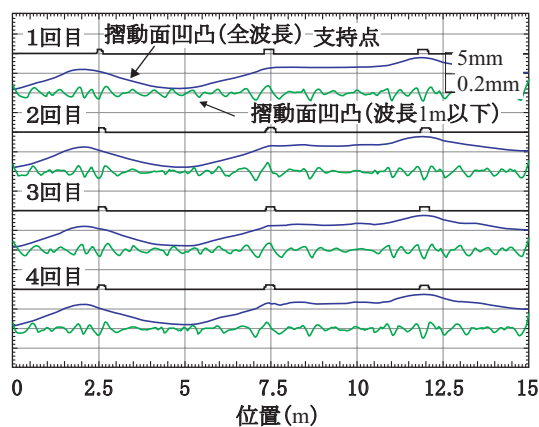


図7 測定の繰り返し精度

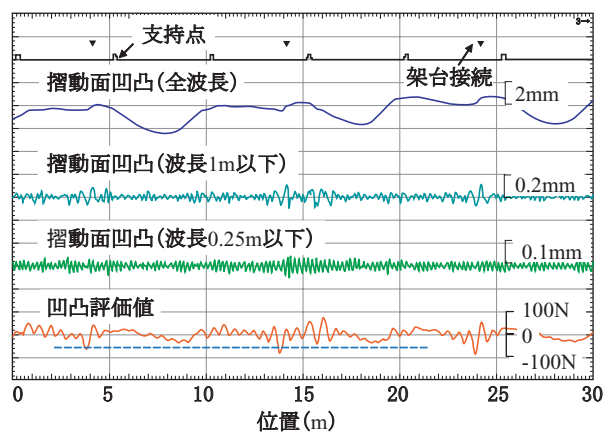


図8 剛体電車線凹凸の測定例 (T型アルミ架台方式)

特集：電力技術

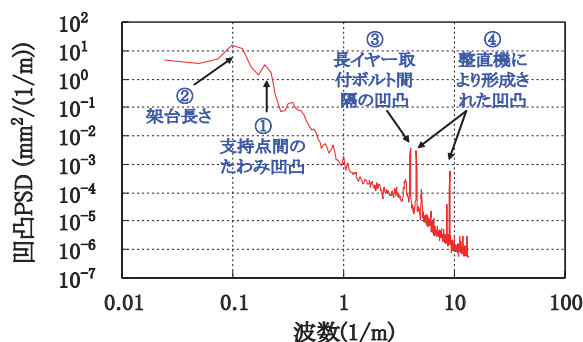


図9 剛体電車線凹凸のスペクトル分布例

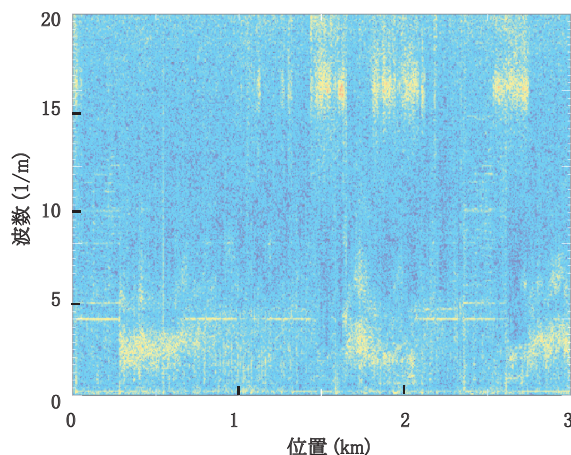


図10 剛体電車線凹凸の空間スペクトル分布例

定の波長が形成される波状摩耗凹凸が見られる。

2.5 剛体電車線凹凸の評価方法

実測した剛体電車線の凹凸が適正な範囲内かどうかについては、走行速度やパンタグラフ条件によって判断が異なる。実用的な評価のためには、計測した剛体電車線の凹凸からパンタグラフの接触力変動に換算して定量的に評価する方法が適切と考えられる。

剛体電車線の場合、電車線凹凸による接触力変動は上述の(5)式で表される。したがって、計測された凹凸に対して

$$H(\omega) = -i\omega Z_p \tag{8}$$

の周波数応答関数に対応するインパルス応答関数を用意し、電車線凹凸波形に対してこれを重畳積分することによって接触力変動を評価することができる。図8中の凹凸評価値は、これを表したものである。破線はパンタグラフ押上力の負値を表し、凹凸評価値がこれを下回る箇所で離線すると判定できる。

次に、剛体電車線の凹凸波長と接触力変動との定性的な関係について述べる。前述のように、凹凸スペクトルは一般に $-3$ 乗則に従うと言われており、

$$A \propto (1/\lambda)^{-3/2} \tag{9}$$

で表される。また(1)式から

$$\omega \propto (1/\lambda) \tag{10}$$

であり、またパンタグラフを質量  $m$  の質点とみなせば、であるから、

$$Z_p \propto \omega \propto (1/\lambda) \tag{11}$$

となる。したがって、(5)式は

$$F \propto (1/\lambda)^{1/2} \tag{12}$$

で表される。これは、剛体電車線の凹凸波長が短いほど接触力変動が大きくなる傾向を意味する。図8に示した例も、変位の大きい支持点間たわみ凹凸よりも微小ながら局所的な架台接続凹凸の影響が大きい例である。このことから、従来から注目している支持点間たわみ凹凸だけでは不十分で、短波長凹凸にも留意する必要があることがわかる。

3. 剛体電車線凹凸の低減手法

本章では、それぞれの凹凸形態に対する低減手法について述べる。

3.1 支持点間たわみ量の低減

両端固定梁における径間中央のたわみ量は、剛体電車線の曲げ剛性、線密度、径間、重力加速度をそれぞれ  $EI$ ,  $\rho$ ,  $L$ ,  $g$  とすれば、

$$\delta = \frac{1}{384} \frac{\rho g L^4}{EI} \tag{13}$$

で表される。これを低減するためには、軽量で断面二次モーメントの大きい断面形状とするのが望ましく、従来からこの観点からの構造が提案され実用化されている。

図11は、高速用として開発した剛体電車線であり、アルミ架台で断面二次モーメントを増加させた構造としている。従来のT型アルミ架台方式に比べて、たわみ量は約40%程度低減する。この架台は、JR在来線の狭小トンネル内において実用化されている<sup>7)</sup>。

一方、実際の支持点間のたわみ量の分布は、図12に示すように、大きなばらつきが見られる<sup>5)</sup>。このばらつきの原因としては、架台自体の大曲り(曲がりぐせ)や架台接続箇所の角折れ、支持点での摩擦抵抗、隣接する径間長差等の影響が考えられる。

図13は、支持点での摩擦抵抗による架台の軸力変動を低減するために開発した支持構造を示す。支持装置には、防塵シールを施した支持および案内ローラーを設けている。図14に、屋外の集電試験装置に架設した剛体架線の温度と支持点間のたわみ量との関係を、従来型と比

較して示す。摩擦抵抗による軸力変化に伴いたわみ量が変化しているが、新型の場合の変化量は従来型の約1/2に低減していることがわかる。

### 3.2 長イヤー取付ボルト間隔凹凸の低減

この凹凸を軽減させるため、有張力でのトリ線延線が推奨される。ある程度の張力をかけながらトリ線を延線して、延線開始始点から順番に長イヤーを取り付けてボルトを締付ける方法が採用されている例がある<sup>8)</sup>。

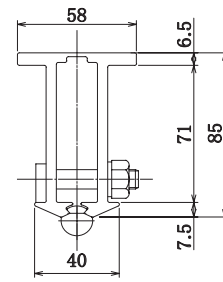


図11 高速用剛体電車線の断面図

### 3.3 整流器による凹凸の低減（横巻トリ線）

従来から、剛体電車線には縦巻トリ線を使用するため、延線する際に整流機を使用している。このため整流機のコマ円周長に相当する凹凸が一般的に見られる。そこで最近では、整流機を使用しなくても済むように横巻トリ線が採用される例がある。

図15に、横巻トリ線を有張力で取り付けた箇所の凹凸測定例（波長1m以下）を、縦巻トリ線を整流機に通して無張力で架設した箇所の例と比較して示す<sup>8)</sup>。凹凸振幅が減少し、改善されていることがわかる。

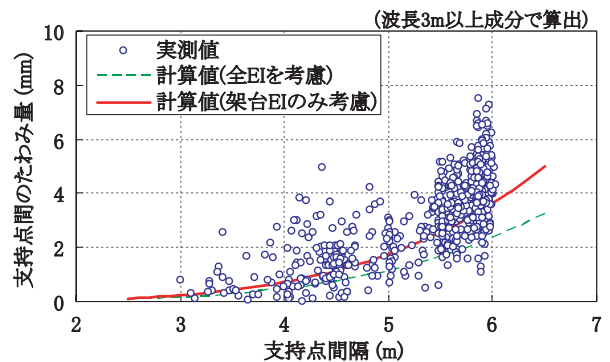


図12 支持点間のたわみ量の実測例（銅架台）

### 3.4 波状摩耗対策

剛体電車線には、パンタグラフの通過に伴ってしゅう動面に波状摩耗が形成され、離線アークによりパンタグラフすり板や電車線の異常摩耗等の問題となる場合が多い。波状摩耗は不規則な微小凹凸を起点として成長する機構を有しており、次第に凹凸振幅が大きくなり無離線限界凹凸を超えるとパンタグラフが離線するという経緯をたどると考えられる。波状摩耗の波長は、パンタグラフすり板間隔の整数分の一である場合が多く、各すり板が同時に離線する波状摩耗成長可能波長である。またこれに加えて、パンタグラフの振動特性が大きな影響を与えることが明らかになっている<sup>9)</sup>。

波状摩耗対策としては、上述した微小な初期凹凸をできるだけ減らすことが基本であるが、波状摩耗の波長によっては、パンタグラフのすり板配置を変更することにより消滅する例もある<sup>2)</sup>。

しかし近年、パンタグラフのすり板間隔の整数分の一に相当しない波長の波状摩耗が顕在化しつつあり、パンタグラフの振動特性を詳細に調査したうえでの対応が必要である。剛体電車線にとって宿命とも言える波状摩耗への対応が、今後、重要度を増すとと思われる。

### 3.5 しゅう動面の切削

以上述べてきたこれらの凹凸は施工上不可避な部分もあり、これに対応するため、しゅう動面切削装置<sup>10)</sup>を開発した。図16に、しゅう動面切削箇所における施工直後の凹凸測定例を示すが、その効果が明瞭である。波状

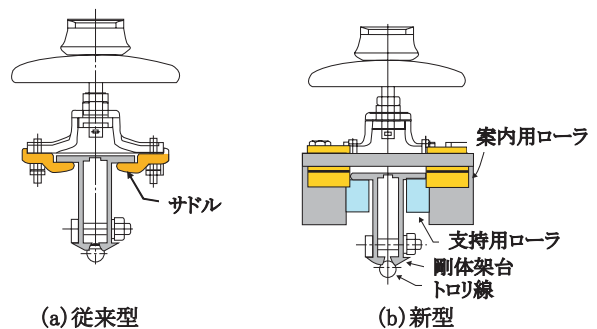


図13 架台支持装置

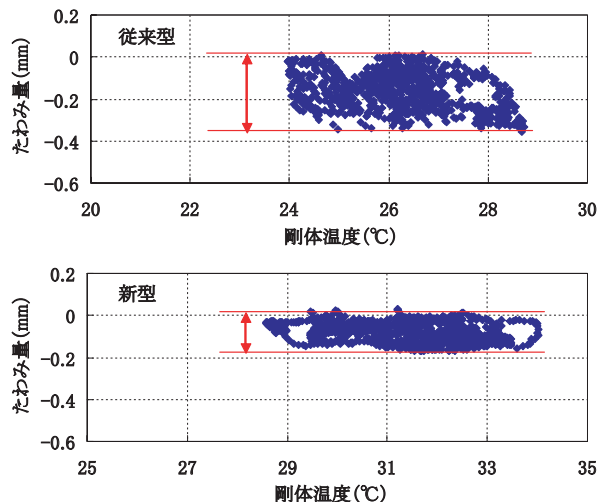


図14 架台支持装置によるたわみ量変化の比較

特集：電力技術

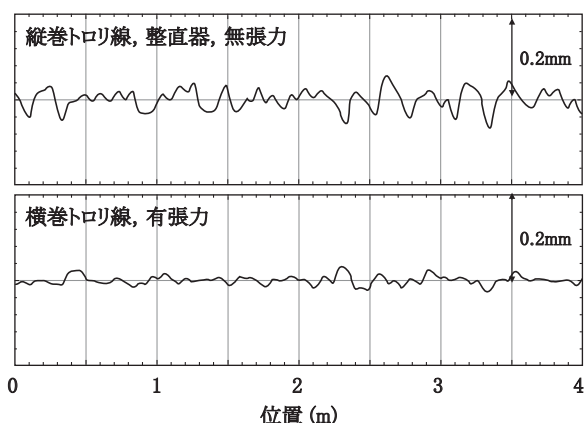


図 15 横巻トロリ線使用箇所の凹凸測定例

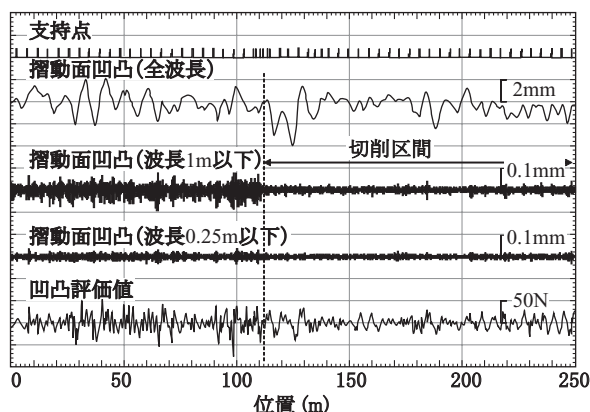


図 16 しゅう動面切削箇所の凹凸測定例

摩耗発生箇所に適する場合のほか、剛体電車線の新設直後に凹凸を除去することが推奨される。主に短波長の凹凸が目的であるが、これにより波状摩耗の発生を防いで良好な状態を保っている例がある。

4. まとめ

本論文では、剛体電車線の凹凸とその低減手法について述べた。まとめると、以下ようになる。

- (1) 剛体電車線はカテナリ式電車線に比べて施工精度を高める必要がある。
- (2) 剛体電車線の凹凸を連続的に精密に計測できる剛体電車線用凹凸精密測定器を開発した。
- (3) 剛体電車線の凹凸の実態を初めて把握し、支持点間たわみ量のほか、架台の大曲り、長イヤー取付ボルト間隔の凹凸、整直機による凹凸、架台接続箇所の

不整凹凸、波状摩耗などがあることを確認した。

- (4) 凹凸低減手法として、高剛性のアルミ架台、支持装置、切削装置等を開発した。またトロリ線の有張力による延線・取付、横巻トロリ線の採用などが有効である。

5. おわりに

凹凸低減手法による剛体電車線の性能向上とともに、凹凸測定器を用いた架設後の完成検査、営業後の定期検査等を組み合わせることにより、より正確で効率的な保全が可能になると期待される。

最後に、現地測定に際してご協力いただいた鉄道事業者、工事会社の各位に深く謝意を表する。

文献

- 1) 剛体集電系の速度向上技術調査専門委員会:「電気鉄道の剛体集電系に関する調査報告」, 電気学会技術報告第466号, 1993
- 2) 網干光雄, 高樋健一, 澤田一郎:「剛体電車線における波状摩耗とその発生防止策の開発」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料 TER-95-7, pp.57-66, 1995
- 3) 網干光雄:「トロリ線波動の低減による集電系の動的性能改善手法に関する研究」, 鉄道総研報告, 特別第26号, 1998
- 4) 網干光雄:「架空電車線の凹凸精密測定とその評価法」, 電気学会論文誌, Vol.124D, No.9, pp.871-877, 2004
- 5) 網干光雄, 大浦 泰:「剛体電車線用凹凸測定器の開発」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料 TER-08-10, pp.19-24, 2008
- 6) 日野幹雄:「スペクトル解析」, 朝倉書店, p48,1997
- 7) 萬代 毅, 清水政利, 佐藤文久, 鵜野順一:「在来線トンネル区間への剛体電車線の適用」, 鉄道総研報告, Vol.18, No.6, pp.5-10, 2004
- 8) 網干光雄, 東海林博行:「剛体電車線の凹凸とその低減対策」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料 TER-09-64, pp.7-12, 2009
- 9) 網干光雄, 中谷 浩, 東海林博行:「剛体電車線における波状摩耗の発生機構」, 電気学会論文誌D編, Vol.126, No.2, pp.109-115, 2006
- 10) 清水政利, 原田 智, 藤井保和:「剛体電車線用しゅう動面切削装置の開発」, 平成12年電気学会全国大会論文集, pp.2322-2323, 2000