# 剛体電車線の凹凸とその低減手法

網干光雄\*, 清水政利, 沖本文男(鉄道総合技術研究所)

# Unevenness of Overhead Rigid Conductor Line and its Reduction Method Mitsuo ABOSHI<sup>\*</sup>, Masatoshi SHIMIZU, Fumio Okimoto (Railway Technical Research Institute)

Rigid conductor lines are used in many subways, because there is little accident and the installation space is small. However, the unevenness of sliding surface is very influential to the contact force fluctuation between pantograph and contact line, it is necessary to decrease the unevenness in the construction and the maintenance. This paper describes the technical method to decrease the unevenness of overhead rigid conductor line and the examination method.

キーワード:電気鉄道,集電,剛体電車線,凹凸,精密測定器 (Keywords, electric railway, current collection, overhead rigid conductor line, unevenness, precise measurement device)

## 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凹凸をできるだ 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。

近年になって、剛体電車線の凹凸が精度良く連続的に計 測できる装置が開発され、その実態が明らかになるととも に、凹凸低減のための対策が進められている。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技術 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面構造例を示す。剛体電車線として最も一般的な構造はT形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。また腐食環境下における耐食性向上の観点から銅製T形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。

**〈2·2〉剛体電車線の凹凸と接触力変動** 図2に示すよう に,波長え,振幅4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は

で表わされる<sup>3)</sup>。ただし、Zp, Zはそれぞれパンタグラフ,



T-type Al base T-type Cu base Conductive Steel rail Fig.1 Cross section of typical overhead rigid conductor

#### 電車線の機械インピーダンスである。

接触力変動の大きさは、凹凸振幅に比例することは当然 であるが、パンタグラフと電車線の直列機械インピーダン スに比例する。カテナリ式電車線の場合、トロリ線の機械 インピーダンスは $Z_r = 2\sqrt{\rho T}$  (弦と仮定; $\rho,T$ はそれぞれト ロリ線の線密度,張力)で表わされるが、剛体電車線の場 合には $Z_r = \infty$ となり、カテナリ式電車線が有する追随性が 期待できないことになる。

図3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を、カテナリ式電車線 と剛体電車線とで比較して示す。例えば、周波数50Hzでは (波長0.5mの凹凸下を速度90km/hで走行した場合に相当)、

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に施工精度を高め る必要がある。

〈2·3〉剛体電車線凹凸精密測定器の開発 前節で示した ように、剛体電車線の凹凸は少なくとも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、測定車の振動の影響 を受けにくい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4は、剛体電車線専用の凹凸測定器<sup>5)</sup>であり、 これを保守用車等の作業台に設置し、速度10km/h前後で走 行しながら剛体電車線に非接触で連続的に測定することが



Fig.2 Analysis model of contact force fluctuation cased by unevenness



Fig.3 Maximum amplitude of unevenness without contact loss

できる。これにより,従来測定が困難であった短波長で微 小な凹凸まで正確にしかも連続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5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。また図6に、剛体電車線凹凸のスペクトル分布の例 を示す。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) 付近の凹凸が見られるが(図中③)、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。これらの波数は、電車線構造 によっても異なる。この他に、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の他、

パンタグラフ通過に伴い波状摩耗凹凸が形成される場合が 多く見られる。

〈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,式(1)から電車線凹凸による接触力変 動は次式で表される。



Fig.4 Unevenness measurement device for overhead rigid conductor line



Fig.5 An example of measured unevenness (T type-Al base)



Fig.6 An example of unevenness spectrum

したがって,計測された凹凸 $y = Aexp(i\omega t)$ に対して  $H(\omega) = -i\omega Z_p$ 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5 中の凹凸評価値はこれを表したものであり,この凹凸評価 値がパンタグラフの押上力の負値を下回る箇所で離線する と判定できる。

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>,  $A \propto (1/\lambda)^{-3/2}$ ,また $\omega \propto (1/\lambda)$ ,パンタグラフを質点とみな せば $Z_{\mu} \propto \omega \propto (1/\lambda)$ であるから,式(2)は

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5も,変位の大 きい支持点間たわみ凹凸よりも局部的で微小な架台接続凹 凸の影響が大きい例であり,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,短波長凹凸に留意する必 要がある。

### 3. 剛体電車線の凹凸低減手法

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、最近の成果をまとめて述べる。

**〈3·1〉支持点間たわみ凹凸の低減** 両端固定梁における 径間中央のたわみ凹凸は,剛体電車線の線密度,曲げ剛性, 径間をそれぞれ*EI*, ρ, *L*とすれば,

 $\delta = \frac{1}{384} \frac{\rho g L^4}{EI} \qquad \dots \qquad (4)$ 

で表わされる。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7は、高速用として開発され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<sup>7)</sup>。

一方,実際の支持点間のたわみ凹凸の分布は,図8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,次節以降に述べるような架台自体の大曲りや 架台接続の位置,施工方法,支持点での摩擦抵抗等の影響 が考えられる。

図9は、摩擦抵抗による軸力変動を低減するために開発 した支持構造であり、支持部にローラーを設けている。こ れにより、摩擦係数は概ね1/2以下に低減できることを確認 した。

〈3・2〉架台またはレール大曲りの低減 導電鋼レールは、製造過程において大きな曲りが発生するのでローラー 矯正を行い、矯正不可能な端部0.5mを切断して定尺長にする。また架台や導電鋼レールは、工場出荷後の運搬や現場 搬入、架設時の変形を防ぐためのさまざまな対策が採られている<sup>80</sup>。

〈3·3〉接続箇所凹凸の低減 アルミ架台や導電鋼レール は現場で溶接するため、施工誤差が生じやすい。そこで、 半自動アーク溶接機を使用するなどして溶接方法について も改善が行われている<sup>8)</sup>。図10は、架台継目箇所の凹凸を低 減するために開発した新型の継目金具の構造を示す。

〈3・4〉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、張力をかけながらトロリ線を延線して、 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<sup>8)</sup>。

(3・5)整直機凹凸の低減(横巻トロリ線) 従来から, 剛体電車線には縦巻トロリ線を使用するため,延線する際 に整直機を使用している。このため整直機のコマ円周長に 相当する凹凸が一般的に見られる。そこで最近では,整直











(a) Conventional type (b) New type Fig.9 Support device of base



Fig.10 Joint fitting of base



Fig.11 Measured unevenness at side-winded wire installed

機を使用しなくても済むように横巻トロリ線が採用される 例がある。

図11に、横巻トロ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、縦巻トロリ線を整直機に通して 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。

(3.6) 波状摩耗対策 剛体電車線には、パンタグラフの 通過に伴って摺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。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 るだけ減らす対策を行うことであるが、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>21</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,重要度を増すと思われる。

〈3·7〉摺動面の切削 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、そのため、剛体電車線の新設後 に摺動面切削装置<sup>10)</sup>を用いて凹凸を除去する方法を採用し ている例がある。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。 図12に、摺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。



Fig.12 Example of measured unevenness in grinded section

### 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、以下のようになる。

(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 み凹凸のほか,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, 継目金具,切削装置を開発した。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

本論文で紹介した凹凸低減手法が,剛体電車線の性能向 上と効率的な保全に貢献できることを期待している。また 凹凸精密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管 理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年8月
(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, 1995年2月
(3)	M.Aboshi: "Research on methods to improve dynamics performance of current collection system by reducing wave motion of contact wire", RTRI Report, Special No.26(1998) 網干光雄:「トロリ線波動の低波による集電系の動的性能改善手法に 開ける近常: 体験の確認に、合集電系の動的性能改善手法に
(4)	<ul> <li>(例) 5007元1, 鉄道総研報音, 特別第20万, 1996年10月</li> <li>M.Aboshi: "Precise measurement and estimation method for overhead contact line unevenness", IEEJ Trans. IA., Vol. 124, No.9(2004)</li> <li>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, 2004年9月</li> </ul>
(5)	M.Aboshi, Y.Oura: "Development of unevenness measurement device for overhead rigid conductor line", IEEJ TER-08-10(2008) 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, 2008年5月
(6) (7)	日野幹雄:「スペクトル解析」,朝倉書店 T.Mandai, M.Shimizu, F.Sato, J.Uno: "Application of overhead rigid conductor line to tunnel section of conventional lines", RTRI Report, Vol. 18, No. 6(2004) 満代 毅,清水政利,佐藤文久,鵜野順一:「在来線トンネル区間へ の剛体質市線の適用」,鉄道総研想告, Vol. 18, No. 6, 2004年6月
(8)	M.Aboshi, H.Shoji: "Unevenness of overhead rigid conductor line and its

reduction method", IEEJ TER-09-64(2009) 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, 2009年11月

- (9) M.Aboshi, H.Nakaya, H.Syoji: "Undulating wear mechanism of overhead rigid conductor line", IEEJ Trans. IA., Vol.126, No.2(2006) 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, 2006年2月
- (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,2000年3月