高張力ちょう架方式架線の集電性能と改善手法に関する研究

正員 網 干 光 雄 (鉄道総合技術研究所)
 正員 中 井 一 成 (西日本旅客鉄道)
 非会員 木 下 弘 一 (四国旅客鉄道)

Study on Current Collection Characteristics and Improvement Methods of High-tension Overhead Catenary Systems.
 Mitsuo Aboshi, Member (R.T.R.I), Issei Nakai, Member (JR West), Hirokazu Kinoshita, Non-member (JR Shikoku)

Under the speed-up on electric railways, overhead catenary systems on narrow-gauge lines have been improved with an increase of messenger wire tension. However, contact loss ratio of pantograph is comparatively high under the heavy simple catenary or feeder messenger wire type overhead catenary. These catenary has higher tension of messenger wire. In order to investigate into the causes and to work out effective improvement methods, laboratory and field tests have been carried out. From the results thereof, it is confirmed that contact force fluctuation comes under the influence of wave reflection factor at hanger, and a hanger which has spring mechanism is found effective to improve it. It is expected that rubber damping hanger or friction damping hanger contributes to reducing the contact loss of pantograph and the wear of contact wire.

キーワード： 電気鉄道，集電，架線方式，離線，ヘビーシンプル架線，き電吊架方式架線

1. まえがき

近年，電気鉄道の高速度が目ざましく進展し，JR等の在来線においても，各地で130km/hの営業運転が実施されており，さらに近い将来160km/h運転も検討されている。これらに対応するため，集電系（架線・パンタグラフ系）では，特に高速走行時におけるパンタグラフの離線（トロリ線から離れること）を少なくすることが重要な課題の一つとなっている。離線は，電気車への電力供給支障やパンタグラフすり板，トロリ線の摩耗増加等の原因となる。

従来のJR等の在来線においては，架線の総張力が19.6kNのいわゆるシンプル架線（図1下段）が一般的であった。しかし，列車の速度向上や1列車あたりのパンタグラフ数の増加に伴い，架線の押上量増加に起因する事故が多発したため，高速走行区間を中心にちょう架線の張力を増加したヘビーシンプル架線（図1上段）に改良されてきた。しかしながらヘビーシンプル架線の離線率はやや高く，種別によっては120km/hを超える速度において常用に耐えない場合もある¹⁾ことが課題として残されていた。

一方，狭小トンネル内においては空頭に余裕がない場合が多いことから，ちょう架線とき電線を兼ねたき電吊架方式架線（図1中段）が多く設備されている。このき電ちょう架線は，電流容量を確保するため線条の断面積が比較的大きく（線密度も比較的高い），また弛度が過大にならないように架設張力も比較的大きくなっているのが一般的である。この架線方式においても，パンタグラフの離線が多

く，これによるトロリ線異常摩耗が多発するなど保全上の問題となっている。

前述の架線方式は，いずれもちょう架線の張力がトロリ線のそれに比べて比較的高いことが特徴である（このような架線方式を，以下「高張力ちょう架方式架線」と言う）。これら架線方式の離線多発要因を明らかにし，さらに改善手法を検討するため，特に，架線内を伝播する波動との関連を中心に，試験装置における走行実験や営業線での現車走行試験等を実施してきた²⁾³⁾⁴⁾。本論文では，ハン

架線方式	架線構造（線種，張力）	備 考
ヘビー・シンプル 架線		主に，高速 走行区間， 強風区間で 使用
き電吊架 方式架線		主に，狭小 トンネル内 等で使用
（参考） シンプル架線		在来線の一般的 な架線構造

凡例 T:トロリ線，M:ちょう架線

図1 主な高張力ちょう架方式架線の例

Fig.1. Example of high-tension overhead catenary system.

ガ点における波動の反射係数とパンタグラフの接触力変動との関連を明らかにし、高張力ちょう架方式架線の離線低減のための改善手法を実用化したので、その結果を報告する。

2. 高張力ちょう架方式架線の離線特性

〈2.1〉接触力変動と離線 パンタグラフは、定常押上力（停車時押上力と走行時の空気の押上力増加分の和）でトロリ線に押し付けて走行する。トロリ線との接触力が常に定常押上力に等しく一定であれば安定した接触状態が維持できるが、実際には、図2のように、架線の径間（支持点間）周期やハンガ間周期の振動によって接触力は変動する。またこの他にも、トロリ線の高さ変化や摩耗凹凸等によっても接触力が変動する。この接触力が0となった場合に、パンタグラフはトロリ線から離線する。接触力の平均値はパンタグラフの定常押上力にほぼ一致するから、一般的には接触力変動が大きいほど離線が多いと考えられる。

本論文においては、接触力変動は定常押上力からの変化のことを言い、その度合を評価する指標として接触力の標準偏差を用いる。また離線を評価する指標として、離線率（全走行時間に対する離線時間の総和の百分率）を用いる。

図2 接触力変動の概念図

Fig.2. Illustration of contact force fluctuation.

〈2.2〉現車走行試験による離線率測定結果 図3に、現車走行試験（予讃本線、1993年3月）において測定された各種架線方式の離線率を、同じ走行速度範囲で比較して示す⁵⁾。離線率は、パンタグラフ間の高圧母線に流れる電流を測定する電流式離線測定方法⁶⁾により測定し、離線率の処理区間は300m程度を最小単位とした。ただし、110km/h走行時とは速度100～119km/hの、また125km/h走行時とは速度120～130km/hの測定結果を平均して示している。

後続パンタグラフほど離線率が高くなる傾向は各架線方式とも同様であるが、高張力ちょう架方式架線の離線率はシンプル架線に比べて高い傾向が見られる。特に、後続パンタグラフの平均離線率は、ヘビーシンプル架線では125km/h走行時で、またき電吊架方式架線では110km/h走行時で、離線率上限の目安値である5%を超えている。

シンプル架線 M: st90mm²/9.8kN, T: GT110mm²/9.8kN
ヘビーシンプル架線 M: st135mm²/19.6kN, T: GT110mm²/9.8kN
き電吊架方式架線 M: Cu325mm²/19.6kN 2条, T: GT170mm²/8.8kN 2条
8000系車両 パンタ: 4台 (S-PS59型), 間隔: 27.9m/78.7m/27.8m

図3. 各架線方式の離線率比較
(予讃本線における現車走行試験結果)

Fig.3. Comparison of contact loss ratio (Yosan line).

〈2.3〉接触力変動の分析 離線発生傾向を詳しく分析するためには、接触力変動の傾向を見るのが有効である。しかし、現時点では現車走行試験等で接触力を測定する方法が実用化されていないため、ここでは、コンピュータシミュレーション手法⁷⁾を用いてパンタグラフの接触力変動の特徴を分析した。シミュレーションでは架線系を多数の質点で表し、各質点に関する連立方程式として表現している。またパンタグラフも、ばね・質点系で表現する。

図4に、横軸を走行位置とし、ヘビーシンプル架線（図上段）とシンプル架線（図下段）における接触力変動の様子を比較して示す。シミュレーション条件は、いずれも、パンタグラフ数1台、定常押上力54N、パンタグラフは1

図4 接触力変動の比較(シミュレーション結果)

Fig.4. Comparison of contact force fluctuation (simulation).

質点モデル(21kg)、架線の径間長50m、ハンガ間隔5m、ハンガはちょう架線から離れないこととし、速度160km/hで走行した場合の結果(2径間)をそれぞれ示した。

シンプル架線では径間周期のパンタグラフ上下運動に伴う接触力変動が比較的大きく、支持点通過直後に接触力が小さくなっている。一方、ヘビーシンプル架線では、径間周期のパンタグラフ上下運動に伴う接触力変動は比較的小さいものの、ハンガ間周期の接触力変動が比較的大きくなっている(ハンガ点で大きく、ハンガ間中央付近で小さく、その接触力差が大きい)。また、ハンガ間中央付近の接触力は、シンプル架線のそれに比べて小さい傾向が見られる(支持点通過直後を除く)。

シミュレーションによる分析結果から、高張力ちょう架方式架線の離線発生の特徴は、ハンガ間周期の接触力変動が大きいことにあるとすることができる。

3. トロリ線波動の反射と接触力変動

〈3.1〉ハンガ点における波動の反射係数 ハンガ点における波動の伝播特性を解析するため、図5に示すようなトロリ線等を無限長の弦(曲げ剛性を考慮しない)としたモデルを考える。ただし、ここではハンガはちょう架線から離れない(浮かない)と仮定して考える。

トロリ線の左側から波動が入射した場合のトロリ線及びちょう架線各部の波動をそれぞれ、

$$y_1 = (A_1 e^{i\alpha x} + B_1 e^{-i\alpha x}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$y_2 = (B_2 e^{-i\alpha x}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$y_3 = (A_3 e^{i\beta x}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$y_4 = (B_4 e^{-i\beta x}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(4)$$

とする。ただし

$$\alpha = \omega/c_T, \beta = \omega/c_M \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$c_T = \sqrt{T_T/\rho_T}, c_M = \sqrt{T_M/\rho_M} \quad \dots\dots\dots(6)$$

である。ここに、 ρ_T, ρ_M, T_T, T_M はトロリ線並びにちょう架線の線密度及び張力を表す。 A_1, A_3 は x が負の方向に

進む波動の、また B_1, B_2, B_4 は x が正の方向に進む波動の振幅(複素数)を表す。また ω は波動の振動角周波数で、 $\omega = 2\pi f$ (f は振動周波数)である。また c_T, c_M は、トロリ線並びにちょう架線の波動伝播速度を表す。 i は虚数単位を表す。

ハンガ点 $x = 0$ における変位一致の境界条件から、

$$y_1 = y_2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$y_3 = y_4 \quad \dots\dots\dots(8)$$

である。またハンガ点 $x = 0$ における力のつりあい条件から、

$$m_T \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} = \left(-\frac{\partial y_1}{\partial x} + \frac{\partial y_2}{\partial x} \right) T_T - k(y_2 - y_3) - D \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - \frac{\partial y_3}{\partial t} \right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$m_M \frac{\partial^2 y_3}{\partial t^2} = \left(-\frac{\partial y_3}{\partial x} + \frac{\partial y_4}{\partial x} \right) T_M + k(y_2 - y_3) + D \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - \frac{\partial y_3}{\partial t} \right) \quad \dots\dots\dots(10)$$

である。ここに、 m_T, m_M, k, D は、ハンガのそれぞれトロリ線側質量、ちょう架線側質量、ばね定数、減衰係数を表す。

(7)~(10)式に(1)~(6)式を代入・整理して、ハンガ点に入射する波動振幅 B_1 に対する反射波の振幅 A_1 、透過波の振幅 B_2 並びにちょう架線への伝達波の振幅 A_3, B_4 との比を求めると、以下の式となる。

(反射係数)

$$R = \frac{A_1}{B_1} = -\frac{\delta}{Z_T + \delta} \quad \dots\dots\dots(11)$$

(透過係数)

$$P = \frac{B_2}{B_1} = \frac{Z_T}{Z_T + \delta} \quad \dots\dots\dots(12)$$

(ちょう架線伝達係数)

$$T = \frac{A_3}{B_1} = \frac{B_4}{B_1} = \frac{Z_T \varepsilon}{Z_T + \delta} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ただし

$$\delta = \gamma_T - \frac{\gamma^2}{Z_M + \gamma_M} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{Z_M + \gamma_M} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\gamma_T = m_T i\omega + D + \frac{k}{i\omega} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$\gamma_M = m_M i\omega + D + \frac{k}{i\omega} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\gamma = D + \frac{k}{i\omega} \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$Z_T = 2\sqrt{\rho_T T_T}, Z_M = 2\sqrt{\rho_M T_M} \quad \dots\dots\dots(19)$$

である。 Z_T, Z_M は、それぞれトロリ線及びちょう架線の機械インピーダンス(あるいは加振点インピーダンス)と

呼ばれるものであり、加振力と速度との比で定義される。

通常一般的に用いられているハンガの場合には、 $k = \infty$, $D = 0$, $m_M = 0$ であるので（実際にはハンガのたわみがあるため、厳密ではないが）、反射係数 R は、

$$R = -\frac{Z_M + m_T i \omega}{Z_T + Z_M + m_T i \omega} \quad \dots\dots\dots(20)$$

で表される。ここで $m_T \omega \ll Z_M$ を満足する条件（ $m_T \approx 0.2\text{kg}$, $Z_M \approx 300\text{Ns/m}$ 程度とすると、 $\omega \ll 1500\text{rad/s}$ ）では、(20)式の反射係数 R は、振動角周波数 ω に無関係な以下の式で表される。

$$R = -\frac{Z_M}{Z_T + Z_M} \quad \dots\dots\dots(21)$$

ちょう架線の機械インピーダンスがトロリ線に比べて比較的大きい場合には、反射係数の絶対値は大きくなり、極端に大きい場合には $R = -1$ に近い値となる。

〈3.2〉 ハンガ点における反射係数と接触力変動 前出のシミュレーション手法を用いて、ハンガ点における波動の反射係数と接触力変動との関係について分析する。

図6に、ヘビーシンプル架線を標準架線として、ちょう架線の機械インピーダンスのみを変化させた場合の接触力標準偏差（1径間走行中）を示す。この場合、ちょう架線の張力と線密度を同率で変化させ、ちょう架線の波動伝搬速度を変えないようにした。なお反射係数は、(21)式で計算される値とした。

反射係数の絶対値 $|R|$ （以下、単に反射係数と言う）が大きいほど接触力標準偏差は大きくなり、特に、反射係数0.5程度以上になると接触力変動が各速度で急増する傾向が見られる。接触力変動波形と比較すると、図4上段で示したように、主にハンガ間周期の接触力変動が大きい。

標準架線 M: st135mm²/19.6kN, T: GT110mm²/9.8kN, 径間50m
パンタグラフ 1台, 定常押上力55N, 1質点径16(21kg), ハンガ固定

図6 反射係数と接触力変動との関係(シミュレーション結果)

Fig.6. Relation between reflection factor and contact force fluctuation.

〈3.3〉 トロリ線波動と接触力変動 反射係数が大きい架線方式ほど接触力変動が大きくなる理由については、次のように考えられる。トロリ線の振動は、パンタグラフによって励振され波動として伝播するが、トロリ線に付けられているハンガによって反射され、伝播方向の反転を繰返しながら重畳され、結果としてはかなり複雑な挙動を示す。パンタグラフ（停止時）に入射する波動を、

$$y_1 = B_1 e^{-i\alpha x} e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(22)$$

とし、パンタグラフを1質点モデル（パンタグラフ等価質量： m ）とすれば、パンタグラフの接触力変動 F_P は、

$$F_P = \frac{\omega}{\frac{1}{m\omega} + \frac{1}{Z_T} i} B_1 e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(23)$$

で表される²⁾。接触力変動 $|F_P|$ は入射波の振幅 $|B_1|$ に比例し、また $m\omega \gg Z_T$ を満足する条件（ $m \approx 20\text{kg}$, $Z_T \approx 300\text{Ns/m}$ 程度とすれば $\omega \gg 15\text{rad/s}$ ）ではほぼ ω に比例する。すなわちこの場合、パンタグラフに入射するトロリ線波動の速度振幅 $|\omega B_1|$ が大きいほど接触力変動 $|F_P|$ が大きいことが示される。なおトロリ線波動の周波数領域については、架線の径間固有振動数の1Hz程度から、ハンガ間固有振動数の10Hz程度、パンタグラフ舟体の固有振動数やトロリ線波状摩擦周期の数百Hz程度の広範囲にわたっている²⁾。

これまでの分析結果をまとめると以下ようになる。シミュレーション結果によると、ハンガ点における波動の反射係数が大きい架線方式ほど、接触力変動が大きい傾向が見られる。またこの理由は、トロリ線波動が接触力変動に与える影響を示した(23)式から、ハンガ点で反射したトロリ線波動がパンタグラフに入射することによる影響と考えられる。

〈3.4〉 高張力ちょう架方式架線の反射係数 表1に、代表的な高張力ちょう架方式架線のハンガ点における反射係数（(21)式による計算値）の例を、シンプル架線と比較して示す。ヘビーシンプル架線やき電吊架方式架線はいずれも、トロリ線に比べてちょう架線の機械インピーダンス

表1 代表的な架線方式の反射係数
Table.1. Example of reflection factor.

架線方式	線種(張力)	機械インピーダンス(Ns/m)		反射係数(絶対値)
	上段: ちょう架線 下段: トロリ線	トロリ線	ちょう架線	
シンプル架線	st90(9.8kN) GT110(9.8kN)	197	165	0.46
ヘビーシンプル架線	st135(19.6kN) GT170(9.8kN)	243	292	0.55
	st135(19.6kN) GT110(9.8kN)	197	292	0.60
き電吊架方式架線	Cu325(19.6kN) GT170(9.8kN)	243	480	0.66
	Cu325(19.6kN) 2条 GT170(9.8kN)	243	960	0.80

が大きく、したがって反射係数が大きいのが特徴である。したがってハンガ間周期の接触力変動が大きいことが、パンタグラフの離線多発要因の一つと考えられる。

〈3.5〉 ハンガ点における反射係数の改善 高張力ちょう架方式架線の離線を低減させるために、ハンガ点における反射係数を小さくする改善手法は、第1に、(21)式に示すように、ちょう架線の機械インピーダンスをトロリ線のそれに比べて過大としないようにすることである。第2に、ハンガにばね特性を付加させることである。(11)、(14)式は、次のように書き直すことができる。

$$R = -\frac{1}{\frac{Z_T}{\delta} + 1} \dots\dots\dots(24)$$

$$\delta = m_T i\omega + \frac{1}{\frac{1}{Z_M + m_M i\omega} + \frac{1}{D + \frac{k}{i\omega}}} \dots\dots\dots(25)$$

したがって、反射係数を小さくするためには、 δ を小さくすることであり、すなわち m_T を小さくするとともに k を小さくすることが有効であることが分かる。(25)式右辺分母第1項及び D が小さいとして無視すると、反射係数が最も小さくなる(δ が最も小さくなる)振動角周波数は、

$$\omega_r = \sqrt{k/m_T} \dots\dots\dots(26)$$

のときである。

ハンガにばね特性を持たせる具体的かつ実用的方法として、我々はダンパハンガ⁸⁾と防振ハンガ⁹⁾を開発した。ダンパハンガは、ばね定数を特に小さくするために開発したもので、ばね機構にコイルばねを用いており(図7左)、ばね定数は1.5kN/m程度である。一方、防振ハンガは、特に、

図7 ダンパハンガ、防振ハンガの構造

Fig.7. Friction damping hanger and rubber damping hanger.

ヘビーシプル架線 M: st135mm²/19.6kN, T: GT110mm²/9.8kN
 一般ハンガ : $m_t=0.2\text{kg}$
 ダンパハンガ : $m_t=0.2\text{kg}$, $m_v=0.6\text{kg}$, $k=1500\text{N/m}$, $D=50\text{Ns/m}$
 防振ハンガ : $m_t=0.2\text{kg}$, $k=55000\text{N/m}$, $D=85\text{Ns/m}$

図8 ハンガのばね特性による反射係数の改善

Fig.8. Improvement of reflection factor.

経済的で簡素な設備を目指して開発したものであり、ハンガ天頂部(ハンガカバー接触部)に防振ゴムを加硫接着した構造で、ゴム材質は耐候性、温度依存性等を考慮してクロロプレンゴム(CR)としている(図7右)。ばね定数はダンパハンガより高く52~60kN/m程度である。

これらのハンガを用いた場合の反射係数の改善効果を図8に示す。ダンパハンガは、比較的低い振動周波数まで反射係数を低減させる効果がある((26)式における $\omega_r=86.6\text{rad/s}(f=13.8\text{Hz})$)。一方、防振ハンガは、ダンパハンガに比べて比較的高い振動周波数において改善効果が見られる(同 $\omega_r=524\text{rad/s}(f=83.5\text{Hz})$)。

4. 走行実験による性能確認

これまで述べた高張力ちょう架方式架線における集電性能の問題点と改善手法の効果を、鉄道総研内の集電試験装置における走行実験によってその性能を確認した。

〈4.1〉 実験装置の概要 集電試験装置は、リニアサイリスタモータ(LTM)により駆動する走行台車で、実物の架線・パンタグラフを用いて走行実験することができる。走行路は全長約500mで、各種特性の測定は速度ほぼ一定の惰行区間で行う。今回の試験では、パンタグラフは在来線高速用のPS26型(パンタダンパ付)を用いた。

〈4.2〉 実験の条件 ヘビーシプル架線については、ハンガ点の反射係数が高い条件として、ちょう架線張力のみ増加、一方、低い条件として、トロリ線及びちょう架線の張力変更、防振ハンガの使用等を設定した。

一方、き電吊架方式架線については、反射係数が高い条件として、ちょう架線の2条化、ハンガ固定、一方、低い条件として、トロリ線の張力増加、防振ハンガ使用、ダンパハンガ使用、ハンガ間隔縮小等を設定した。

改善手法については、営業線における改良工事に多額の

費用を必要としないことが望まれており、これを考慮した実験条件を設定した。また、これまでハンガはちょう架線から離れないとして検討してきたが、実際には、パンタグラフ通過時にハンガが離れることにより、一時的に反射係数が小さくなる効果があると考えられる。今回の実験では、一部の条件を除いて営業線の使用条件と同じくハンガが離れるようにしている（固定していない）。ハンガ間隔

標準架線: M:st135mm²/19.6kN, T:GT170mm²/9.8kN(径間50m)
 M4t: ちょう架線張力を4tf(39.2kN)に増加
 M3t: ちょう架線張力を3tf(29.4kN)に増加
 M1.5/T1.5: ちょう架線張力14.7kN, トロリ線張力14.7kN
 防振: 防振ハンガ 全使用
 T1.5: トロリ線張力を1.5tf(14.7kN)に増加
 T1.5防振: トロリ線張力を1.5tf(14.7kN)に増加, 防振ハンガ 全使用

図9 ヘビーシンプル架線における走行実験結果

Fig.9. Result of experiment (heavy simple catenary).

標準架線: M:Cu325mm²/19.6kN, T:GT170mm²-9.8kN(径間10m)
 ガンバ: ガンバハンガを全使用
 防振: 防振ハンガを全使用
 T1.5: トロリ線を1.5tf(14.7kN)に増加
 ハンガ間隔小: ハンガ間隔を1/2(2.5m)に縮小
 M2条: ちょう架線を2条
 ハンガ固定: 全ハンガがちょう架線から浮かないように固定

図10 き電吊架方式架線における走行実験結果

Fig.10. Result of experiment (feeder messenger wire type).

図11 反射係数と平均離線率との関係
(集電試験装置による走行試験結果)

Fig.11. Relation between reflection factor and contact loss ratio.

縮小は、ハンガ軸力を低減することにより離れ易くした条件である。

4.3> 実験結果 図9に、ヘビーシンプル架線（径間長50m）に関する実験結果を、また図10に、き電吊架方式架線（径間長10m）に関する実験結果をそれぞれ示す。平均離線率は、120, 140, 160km/h各走行時の離線率の平均値を示す。また図下（ ）内は、ハンガ点における反射係数を示す。ただし、この値は(11)式の $\omega = 62.8\text{rad/s}$ ($f = 10\text{Hz}$) と $\omega = 628\text{rad/s}$ ($f = 100\text{Hz}$) における値の平均値（絶対値）を便宜的に用いた。図11に、これらの結果をまとめて反射係数と平均離線率との関係を示す。

いずれの場合も反射係数が大きいほど離線率が高い傾向が見られ、特に、反射係数が0.5程度以上で急激に増加する傾向が見られる。この傾向は、前述のシミュレーション結果（図6参照）ともほぼ一致する。また、防振ハンガやトロリ線の張力増加による改善効果が認められ、反射係数を小さくすることで離線率が低減することが確認された。

なお、反射係数の大きい範囲で、き電吊架方式架線がヘビーシンプル架線に比べて比較的離線率が小さいが、これはパンタグラフ通過時にハンガが比較的離れやすい傾向があるためと考えられる。また、トロリ線を張力増加した場合には、反射係数の低減度合に比べて離線率の低減効果がやや大きい。これは、架線系全体の張力が増加することによる接触力変動低減効果が含まれているものと思われる。

5. 改善手法の現車走行確認試験

これまで述べた実験結果から、高張力ちょう架方式架線の離線を低減させるためには、ハンガ点における波動の反射係数を小さくすることが有効であることが明らかになった。そこで具体的な改善手法としては、

(1)ばね特性を有するハンガの使用

(2)架線張力の変更

等が有効かつ比較的経済的と考えられる。これらの改善手法のいくつかを営業線に実際に適用して、その改善効果を確認したので、以下に述べる。

〈5.1〉 予讃本線における現車走行試験 図12に、ダンパハンガ、防振ハンガを使用した場合の改善効果を示す⁵⁾。予讃本線のヘビーシンプル架線区間に防振ハンガを300m間、またき電吊架方式架線にダンパハンガを60m間に設備し（いずれも全ハンガ）、その他の一般ハンガ区間の離線率と比較して示したものである（8000系車両による現車走行試験、1993.3）。

ヘビーシンプル架線の125km/h走行時、またき電吊架方式架線の110km/h走行時ともに、従来の一般ハンガの場合、後続パンタグラフにおいて5%以上の離線率であったものが、防振ハンガ、ダンパハンガを用いることにより、離線率は

ヘビーシンプル架線 M:st135mm²/19.6kN, T:GT110mm²/9.8kN
またき電吊架方式架線 M:Cu325mm²/19.6kN×2, T:GT170mm²/8.8kN×2
その他の走行条件は、図2備考欄参照のこと

図12 ダンパハンガ等による離線率低減効果
(予讃本線における現車走行試験結果)

Fig.12. Reduction of contact loss ratio (Yosan line).

ヘビーシンプル架線 M:st135mm²/14.7kN, T:GT170mm²/11.8kN, サグ0.5/1000
681系車両, パンタ3台(WPS27型), パンタ間隔40m/60m

図13 防振ハンガによる離線率低減効果
(湖西線における現車走行試験結果)

Fig.13. Reduction of contact loss ratio (Kosei line).

大幅に低減し、1~3%程度に改善された。

〈5.2〉 湖西線における現車走行試験 図13に、トロリ線にGT170mm²を用いたヘビーシンプル架線に、防振ハンガを使用した場合の改善効果を示す⁵⁾。湖西線の高速走行区間に、防振ハンガを352m間に設備し（全ハンガ）、同じドラム内の隣接した一般ハンガ使用区間の離線率と比較して示したものである（681系車両による高速走行試験、1992.10）。

一般ハンガの場合、160 km/h付近で平均10%（各パンタ平均）を超える離線率であるのに対して、防振ハンガの使用により3%程度まで低減した。

〈5.3〉 中央東線における現車走行試験 図14に、トロリ線及びちょう架線の張力配分を見直すことにより改善した例を示す³⁾。総張力は29.4kNのままで、トロリ線張力を14.7kNとすることにより、従来の架線方式（トロリ線GT170mm²）の離線率3~8%（速度130km/h）¹⁾に比べて1.5%以下と低減している。この架線に防振ハンガを用いた場合には、離線率はさらに低減して130 km/hで0.5%以下である。

ヘビーシンプル架線 M:st135mm²/14.7kN, T:GT170mm²/14.7kN
E351系車両, パンタ2台(PS26型), パンタ間隔80m

図14 架線張力変更による改善
(中央東線における現車走行試験結果)

Fig.14. Reduction of contact loss ratio (Chuo-east line).

6. 結論

これまでのシミュレーション分析、走行実験及び現車走行試験結果等から、高張力ちょう架方式架線の集電性能とその改善手法について、以下の点が明らかになった。

- (1)ハンガ点における波動の反射係数が大きいほど離線率が高く、高張力ちょう架方式架線における反射係数が比較的高いことが、離線多発要因の一つと考えられる。
- (2)改善手法として、防振ハンガ等のばね特性を有するハンガの使用や架線張力変更等により、反射係数を小さくすることが有効である。

7. あとがき

この研究においては、ハンガ点における波動の反射係数が大きい架線方式ほど接触力変動が大きいことを明らかにし、高張力ちょう架方式架線の問題点の解明と、具体的な改善手法を実用化することができた。今回取り扱った架線方式は、主に在来線用のものであるが、新幹線等のコンパウンド系架線の補助ちょう架線とトリ線の間においても同様に扱うことができる。

今回実用化した改善手法を適用することにより、高速走行時における離線が低減され、電気車への電力安定供給はもちろんのこと、すり板やトリ線摩耗の軽減効果が期待できる。また、防振ハンガ等による架線振動低減により、部材の長寿命化等の効果も期待できる。

しかし今回の研究においては、走行速度の影響を含めて、ハンガ付近における反射波動と接触力変動との詳細な解析には至っていない。また反射係数の周波数依存性と接触力変動との関係についても明らかになっていない。これらは、今後の研究課題と考えている。

最後に、現地試験に際してご協力いただいた東日本、西日本、四国の各旅客鉄道株式会社の関係者の方々、また本研究を進めるにあたってご指導いただいた慶応義塾大学工学部吉田和夫教授に謝意を表する。

(平成8年5月20日受付, 平成9年2月13日再受付)

文 献

- (1)大浦 泰:「シンプル架線とヘビーシンプル架線の速度特性」, 平成2年電気学会全国大会講演論文集(8), 8-153, (1990-3)
- (2)網干光雄, 御船直人:「架線の振動低減による集電性能改善」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料TER-93-37, 51~60, (1993-7)
- (3)網干光雄, 中井一成:「ヘビーシンプル架線の集電性能とその改善手法」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料TER-94-38, 57~66, (1994-12)
- (4)中井一成, 網干光雄:「き電吊架方式架線の集電性能とその改善手法」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料TER-95-4, 27~36, (1995-2)

- (5)中井一成, 網干光雄, 木下弘一:「シンプル架線とヘビーシンプル架線の集電性能」, 平成6年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, 649~650, (1994-8)
- (6)鉄道総合技術研究所編:「電車線とパンタグラフの特性」, 研友社, 226~230, (平5-10)
- (7)Y.Fujii, K.Manabe: "Computer Simulation for Dynamics of Overhead Catenery-Pantograph System", Computers in Railways III, (1992-8)
- (8)網干光雄, 山浦一郎, 平 亘:「ダンパハンガの開発」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料TER-94-13, 57~66, (1994-5)
- (9)網干光雄, 半坂征則, 山縣徹也, 中村 登:「防振ハンガの開発」, 平成6年電気学会全国大会講演論文集(8), 207-208, (1994-3)

網干 光雄

(正員) 1957年2月23日生まれ。1979年3月京都大学工学部電気工学科卒業。同年4月日本国有鉄道入社。主として電車線路設備の設計・施工・保全, 電車線の高速化等の研究開発に従事。現在, (財)鉄道総合技術研究所基礎研究部主任研究員。日本機械学会。

中井 一成

(正員) 1967年6月2日生まれ。1990年3月東京農工大学工学部電気工学科卒業。1992年4月より鉄道総合技術研究所勤務。主として電車線の高速化等の研究開発に従事。現在, 西日本旅客鉄道(株)せとうち地域鉄道部助役。

木下 弘一

(非会員) 1953年8月21日生まれ。1972年3月愛媛県立八幡浜工業高校卒業。同年4月日本国有鉄道入社。主として, 電灯電力設備及び電車線路の設計・施工・保全に従事。現在, 四国旅客鉄道(株)高松電気区助役。