

新幹線の高速運転に対応した電車線の架設指針

網干 光雄* 常本 瑞樹**

Installation Guidelines of Overhead Contact Line for Shinkansen High-speed Operation

Mitsuo ABOSHI Mizuki TSUNEMOTO

For high-speed operations of Shinkansen railways, the current collection performance is one of the most important subjects. The installation accuracy of overhead contact line has a considerable influence on the contact force fluctuation between overhead contact line and pantograph. However, there is no concrete installation guideline of the overhead contact line to specify the acceptable range of the installation errors. This paper proposes the procedure for establishing the installation guidelines, which are derived from the results of the dynamic simulation based on the actual installation state. We herewith present the installation guidelines for Shinkansen operations at 300 or 320km/h established according to this procedure. We have demonstrated the indicators of the installation error and the guideline ranges respectively. It is hopeful that the installation guidelines will contribute to the improvement of the performance, the reliability, the safety and the maintenance efficiency of the overhead contact line.

キーワード：集電，架空電車線，架設誤差，架設指針，診断，新幹線，接触力

1. はじめに

現在，新幹線では最高速度300km/hでの営業運転が行われており，近く320km/hへの速度向上も計画されている。電気鉄道の架空電車線（以後，単に「電車線」という）とパンタグラフ（集電装置）を用いた集電系においては，高速走行時においても安定した電力を供給することが重要な技術的課題の一つである。このためには，パンタグラフ通過時のトオリ線の押上量やひずみ量が著大にならないようにするとともに，電車線とパンタグラフ間の接触力変動を低減する必要がある。

接触力変動の要因としては，①支持点間隔（径間）周期運動によるもの¹⁾，②ハンガ間隔周期運動によるもの²⁾，③電車線凹凸（トオリ線高さの変化）によるもの³⁾などがある。このうち，前2者についてはこれまでの研究によってその機構がほぼ明らかとなり，新幹線高速運転に対する改善指標が示されている。また電車線の凹凸のうち，波状摩耗についてはその形成理論⁴⁾がほぼ明確になり対策が実施されている。しかしながら，工事や保全に大きく依存する架設誤差（または架設精度）については，接触力変動に与える影響が比較的大きいにもかかわらず，現在は径間勾配の許容範囲が規定されているのみで，近年の新幹線高速運転に対応する具体的な架設指針が示されていない。

* 電力技術研究部

** 東日本旅客鉄道(株) (元 電力技術研究部)

そこで本論文では，電車線の架設誤差が集電性能に与える影響を実データに基づいて分析し，架設指針の策定手順及び新幹線の高速運転に対応した電車線の架設指針を提案する。

2. 電車線凹凸と接触力変動

2.1 電車線凹凸による接触力変動

図1に示のように，電車線を張力の作用する無限長の弦（張力 T ，線密度 ρ ）と仮定し，波長 λ ，振幅 A の凹凸下をパンタグラフが速度 v で走行するとき，電車線の波動方程式は式(1)で表される。ただし， y ， x ， t はそれぞれ電車線の上下変位，走行方向位置，時間， F は電車線とパンタグラフ間に作用する接触力変動成分， $\delta(x)$ はディラックのデルタ関数である。

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = F \delta(x - vt) \dots\dots\dots(1)$$

式(1)を，パンタグラフ点を原点とする移動座標系 $\xi = x - vt$ に変換した後に，パンタグラフ点での境界条件を用いて求めると，パンタグラフの接触力変動は式(2)で表される³⁾。ここで i は虚数単位， Z_i ， Z_p はそれぞれ電車線とパンタグラフの機械インピーダンスである。

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

接触力変動の大きさは，電車線とパンタグラフの特性に依存する係数が含まれるものの，基本的には電車線の

特集：電力技術

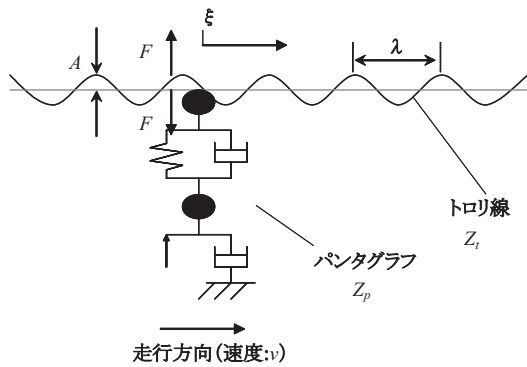


図1 解析モデル

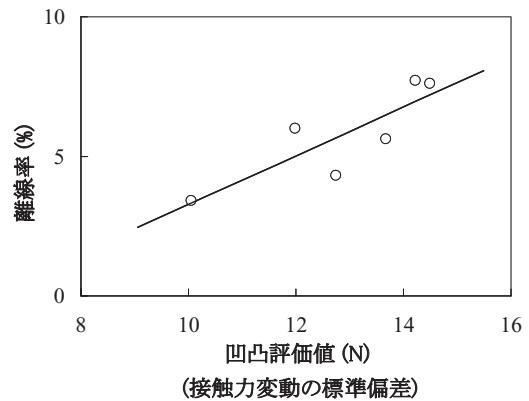


図2 凹凸評価値と離線率との関係例

凹凸振幅に比例することがわかる。また、接触力の増大はトロリ線の曲げひずみをも増大させることが示されている⁵⁾。

2.2 電車線凹凸の影響例

トロリ線高さは、ハンガ間の弛度凹凸を除いて水平に架設されることが標準であるが、支持点での施工誤差やハンガ点での不整など、実際には数十mm程度の電車線凹凸がある。図2に、新幹線区間における凹凸評価値と当該区間を走行した際のパンタグラフの離線率との関係を示す³⁾。凹凸評価値は、式(2)に基づいて算出した接触力変動の標準偏差であり、言わば電車線凹凸の大きさを表す。ここでは評価条件として $v=55.6\text{m/s}$ (200km/h) とし、この区間を走行するパンタグラフの定数を用いて計算している。離線率は、離線時間総和の走行時間に対する百分率で表す。図中の1点は、1引留区間すなわち1500m程度の電車線の引留から引留までの区間の値に相当する。この図から、同じ架線構造にもかかわらず凹凸評価値にばらつきが見られ、さらに離線率と相関傾向があることが示される。このことは、実際に電車線凹凸が接触力変動に与える影響が比較的大きいことを示している。

3. 架設指針の策定手順

現在、新幹線では径間勾配が3‰以下という解釈基準⁶⁾があるが、架設状態の実態を考えると、径間勾配のみの管理で十分とは言えない。新幹線高速運転においては、架設誤差が許容される範囲を定量的に示すことが求められており、本章以降において、架設指針を数値的に求める方法とその事例について述べる。

3.1 用語

本論文で使用する用語について、以下に説明する。なお本文中での紛らわしさを避けるため、以下の用語については「」で表記する場合がある。

(1) 標準状態：規定張力，新品トロリ線で，径間長・ハ

ンガ間隔等は設計値，架線金具が取り付けられた静的状態のこと。

- (2) 架設状態：張力変化やトロリ線摩耗，施工誤差等が含まれた静的状態のこと。
- (3) 架設誤差：「架設状態」－「標準状態」の差のこと。
- (4) 集電性能の評価項目：集電性能の維持や安全性の確保のために確認する必要がある項目。例えば，支持点のトロリ線押上量やひずみ量など。
- (5) 集電性能の評価基準：上記評価項目の上限値または下限値。
- (6) 架設誤差の指標：架設誤差の程度を具体的に示す定量的な項目。例えば，径間勾配，支持点基線勾配など。
- (7) 架設誤差の許容範囲：上記指標の上限値～下限値の範囲。
- (8) 架設指針：架設誤差の許容範囲内で設定する指針。

3.2 架設指針策定手順の策定

式(2)で示した接触力変動は電車線を1本の無限長弦と仮定した場合であり、実際にはハンガ点や支持点で波動が反射するためその挙動は複雑である²⁾。このため、架設誤差もその場所によってその影響度が異なると考えられる。接触力変動を架設状態に合わせて定式化できない現状では、理論解析のみによって架設指針を策定することは困難が予想される。仮にそれが可能となっても、実際の「架設誤差」の形態は様々であり、それらを組み合わせる評価すると、個々の「架設誤差の許容範囲」は過剰に小さく抑えることになりかねない。

以上のことから、筆者らは営業線の実在の「架設状態」に基づいて統計的に分析して「架設指針」を策定する方法が適切と考えた。しかし、現地でその特性を直接測定する方法は、測定が困難な上にデータ数が限られるという問題がある。そこで、実在の「架設状態」に対してコンピュータシミュレーションによる動特性評価法⁷⁾を適用し、「集電性能の評価基準」を満足する「架設誤差の許

容範囲」を導出することを提案する。

以下に、架設指針の策定手順を示す。

- ① 「架設状態」の実測データを取得する。
- ② 「架設状態」に基づいて運動シミュレーションを行って、「集電性能の評価項目」の最大値を算出する。
- ③ 「集電性能の評価項目」と「架設誤差の指標」との関係を求める。
- ④ 「集電性能の評価基準」を満足する「架設誤差の許容範囲」を算出する。
- ⑤ 「架設誤差の許容範囲」に基づいて「架設指針」を設定する。

4. 集電性能の評価項目と評価基準

本論文で用いる「集電性能の評価項目」と「集電性能の評価基準」の具体的内容について、以下に示す。

- (1) 支持点におけるトロリ線押上量：100mm 以下
パンタグラフが曲線引金具に衝突しないための許容量であり、従来値を踏襲する。
- (2) トロリ線ひずみ量：支持点 500×10^{-6} 、径間 800×10^{-6} 以下

使用しているトロリ線の疲労特性曲線を前提に設定する場合もあるが、本論文では従来どおりの 500×10^{-6} 以下とする。ただし支持点を除く径間内の非硬点箇所およびハンガ点においては評価基準を 800×10^{-6} に緩和する⁸⁾。なお、ハンガ点は硬点の特性に近い箇所であるが、著大なひずみが発生しにくいことから径間内の非硬点箇所に含めて評価しても実用上問題ないと考えられる。

- (3) 最大離線時間：20ms 以下

「架設誤差」という局所的な事象に対しては離線率より最大離線時間で評価することが適切と考えられる。ヘビーコンパウンド架線（トロリ線 GT170/張力 19.6kN）の標準状態でのシミュレーション結果によると、走行速度 300～340km/h での先頭パンタグラフの最大離線時間はおよそ 10ms である⁹⁾。そこで、これの 2 倍までを許容することとする。

- (4) 接触力：500N 以下

接触力に関してはトロリ線ひずみとの関連が強いが、ひずみに関しては上記のひずみ量で直接検証するので、ここではトロリ線摩耗に与える影響を考える。室内の摩耗試験結果¹⁰⁾によれば、速度 200km/h で無通電、すり板押付力 50N の場合のトロリ線の寸法摩耗率は約 $5\mu\text{m}/10^4$ パンタである。トロリ線 GT-SN170、張力 19.6kN の条件の許容摩耗断面積を考慮して、年間通過パンタグラフ数 10 万パンタ、トロ

リ線張替周期を 10 年以上と設定すると、許容される接触力は 894N 以下と算出される。ここでは余裕をもって 500N として設定する。

5. 架設誤差の指標と許容範囲

5.1 架設誤差の指標

架設指針は現場で扱い易く、簡便に計測し易いことなどを考慮して、架設誤差の指標として次の項目を考える（図 3 参照）。

- (1) 径間勾配：径間両側の支持点トロッリ線高さを結んだ基線の勾配。走行方向に向かって上り勾配を正とする。
- (2) 径間勾配差：隣接する径間の勾配差。走行方向に向かって（前側の径間勾配）-（後側の径間勾配）とする。
- (3) サグ比：サグ量を両側の支持点トロッリ線高さを結んだ基線と径間中央点のトロッリ線高さの差として定義し、サグ比は（サグ量）/（径間長）とする。鉛直方向下に凸を正とする。
- (4) 支持点基線勾配：支持点両側の直近ハンガ点間のトロッリ線高さを結んだ基線の勾配。走行方向に向かって上り勾配を正とする。
- (5) 支持点曲率：支持点とその両側の直近ハンガ点のトロッリ線高さの 3 点を結ぶ円弧の曲率。鉛直方向上に凸を正とする。

なお、これらの架設誤差の指標は、ハンガ間弛度凹凸があるため標準状態においても厳密に 0 にならない場合があるが、これらの影響が後述する「架設誤差の許容範囲」に比べて十分小さいことや現場での実用性を考慮して採用した。

5.2 架設誤差の許容範囲の算出

「架設誤差の許容範囲」は、前節で示した「架設誤差の指標」と第 4 章で示した「集電性能の評価項目」の相関図を作成し、90% 上側信頼限界が「集電性能の評価基準」以内となる範囲とする。90% 上側信頼限界とは、測定データが回帰直線に対して正規分布していると仮定したときに、90% の測定データが収まる上限を表す。また、「架設誤差の指標」が正負両方向に大きくなっても「集電

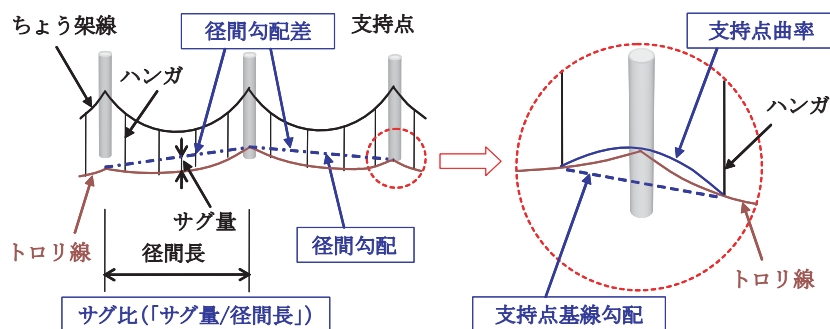


図 3 架設誤差の指標

特集：電力技術

性能の評価項目」が悪化する場合もあるので、この場合は正の測定データおよび負の測定データのそれぞれについての回帰直線と90%上側信頼限界を求める。

前述の各「集電性能の評価項目」についてそれに対応するそれぞれの「架設誤差の許容範囲」を求め、これらのうちで最も小さくなる範囲を「架設誤差の許容範囲」とする。

6. 300または320km/h 営業運転用架設指針の策定例

以上示した架設指針の策定手順に従って、具体的な事例として300km/hまたは320km/h営業運転用の「架設指針」を求める。ここで対象とする電車線は、新幹線用コンパウンド系架線である。

6.1 架設状態の実測データ

営業線における「架設状態」として、トロリ線凹凸測定器³⁾で測定した新幹線高速走行区間の計44引留区間のデータを用いる。この中には、表1に示すように6種類の電車線が含まれている。これらのトロリ線の張力はいずれも19.6kNであり、300km/hを超える運転にも対応可能と考えられる。ただしこれらの電車線には、トロリ線の線種、総張力および張力配分がそれぞれ異なることから若干の集電性能差がある。電車線ごとに細かく「架設指針」を設定することは可能であるが、現場での取り扱いは煩雑になる恐れがある。そこで今回はこれらの全ての測定データを用いて、300または320km/h用の標準的な「架設指針」を策定することとする。

6.2 運動シミュレーションによる計算

300km/h用架設指針は現用営業車を前提に、また320km/h用架設指針は近く運行が計画されている車両を前提とする。また、速度特性を確認するために、当該速度以外にも計算を行う。以下に、パンタグラフのシミュレーション条件を示す。

- (1) 300km/h用架設指針：パンタグラフA，速度270km/h，285km/hおよび300km/h
- (2) 320km/h用架設指針：パンタグラフB，速度300km/hおよび320km/h

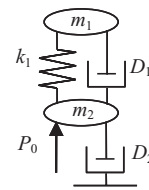
表2に、各パンタグラフの力学モデルと定数を示す。パンタグラフAは、現在の営業車で使用されている標準的な形式である。またパンタグラフBは、300km/hを超える速度に対応した形式で、多分割すり板を用いている。パンタグラフの揚力は、パンタグラフAにおいては現在の営業車用の標準的な値として300km/hで50Nとし、またパンタグラフBにおいては300km/hで35Nとし¹⁾、いずれも速度の二乗に比例して増加するものとする。ま

表1 電車線の種類

No.	トロリ線		補助ちょう架線		ちょう架線	
	線種	張力 [kN]	線種	張力 [kN]	線種	張力 [kN]
①	GT-CSD170	19.6	PH150	14.7	St180	19.6
②	GT-CSD170	19.6	PH150	14.7	St180	24.5
③	GT-CSH130	19.6	PH150	14.7	St180	24.5
④	GT-SN-W170	19.6	PH150	14.7	St180	24.5
⑤	GT-SN-W-MF170	19.6	PH150	14.7	St180	24.5
⑥	GT-SN170	19.6	PH150	9.8	St180	24.5

表2 パンタグラフの諸元

	パンタA	パンタB
m_1 (kg)	9.8	0.6
m_2 (kg)	15.5	11.8
k_1 (N/m)	10.6	10.75
D_1 (Ns/m)	50	0
D_2 (Ns/m)	80	81
P_0 (N)	54	54



た、トンネル区間では流速が明かり区間の1.2倍と仮定して、トンネル区間の揚力係数は明かり区間のその1.2²倍とした。

パンタグラフ数については、それぞれの編成を前提としてパンタグラフAは2台、パンタグラフBは1台で計算するが、「架設誤差」が対象なのでいずれの場合も先頭パンタグラフのみで評価する。その他の詳細なシミュレーションモデルや条件については、参考文献(12)に従う。

6.3 集電性能の評価項目と架設誤差の指標との関係

図4に、「架設誤差の指標」と「集電性能の評価項目」との関係例として、パンタグラフBでトンネル区間で320km/hで走行する場合の支持点基線勾配と支持点ひずみ最大値の関係を示す。図中には、最小二乗法により求めた回帰直線と90%上側信頼限界も示している。支持点基線勾配の正負それぞれについて求めているため、これらの直線の傾きが異なる。支持点基線勾配が負になるほど支持点におけるトロリ線ひずみが大きくなる傾向が見られる。

表3に、「架設誤差の指標」と「集電性能の評価項目」の相関についてまとめて示す。図中の◎は相関係数0.5以上の比較的相関が強い場合、○は同0.2~0.5の場合、△は同0.1~0.2の場合で、×はほとんど相関がみられない場合(同0.1未満)である。なお、/印は因果関係が乏しいと判断したものである。なおここに示した相関係数は、上述の300、320km/h用の各パンタグラフ・各速度、明かり・トンネル区間の計10条件における相関係数の平均値で示している。

6.4 架設誤差の許容範囲の算出

次に、「架設誤差の指標」と「集電性能の評価項目」の関係を示す回帰直線の90%上側信頼限界線を用いて「架設誤差の許容範囲」を算出する。この際に、相関がほとんどみられない場合を除いた。算出の例として前出の図4で説明すると、支持点ひずみの上限値は 500×10^{-6} であるから、90%上側信頼限界より支持点ひずみが 500×10^{-6} 以下となる支持点基線勾配の範囲はおおよそ-1.5‰以下となる。

図5に、径間勾配と支持点基線勾配の許容範囲の速度特性例を示す。上限と下限の間が「架設誤差の許容範囲」である。なお、支持点基線勾配については上限値がないが、今回用いた「架設状態」の実測データからは上限値が設定されないだけで、現状の架設誤差程度であれば問

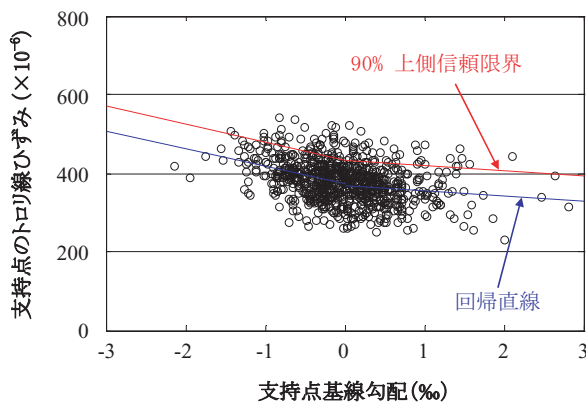


図4 支持点のトロリ線ひずみと支持点基線勾配との関係

表3 架設誤差と集電性能との関係

集電性能の評価項目	架設誤差					
	径間勾配	径間勾配差	サグ比	支持点基線勾配	支持点曲率	
支持点	押上	○	○	◎	○	◎
	ひずみ	△	△	○	○	○
	離線時間	△	△	△	×	○
	接触力	△	△	△	○	○
径間	ひずみ	○	○	○		
	離線時間	△	△	○		
	接触力	△	○	○		

表4 架設誤差の許容範囲

架設誤差の指標	許容範囲	
	300km/h パンタグラフA	320km/h パンタグラフB
径間勾配 (‰)	-0.9 ~ 2.0	-1.2 ~ 10.8
径間勾配差 (‰)	-1.3 ~ 3.4	-9.5 ~ 2.0
サグ比 (‰)	-0.4 ~ 0.4	-3.5 ~ 0.5
支持点基線勾配 (‰)	-1.3 ~ ***	-1.5 ~ ***
支持点曲率 ($\times 10^{-3}$ 1/m)	-1.9 ~ 1.4	-2.0 ~ 1.2

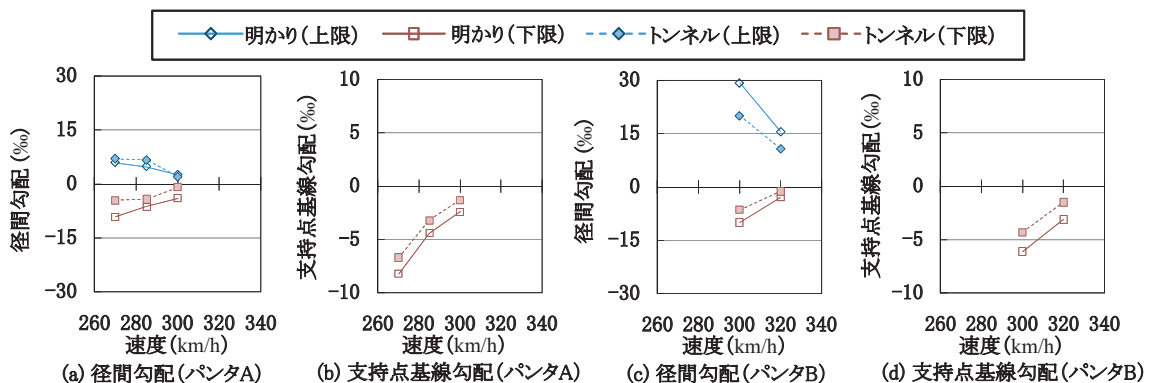


図5 許容範囲の速度特性

題ないということである。どちらのパンタグラフの場合も、速度が高いほど「架設誤差の許容範囲」が狭いことがわかる。また、パンタグラフAの300km/h走行よりもパンタグラフBの320km/h走行のほうが「架設誤差の許容範囲」が広い。これは、パンタグラフの性能差によるものである。また、ほとんどの場合において、トンネル区間のほうが明かり区間に比べて「架設誤差の許容範囲」が狭い。パンタグラフ押上力が大きいほどトロリ線ひずみが大きくなる特性があるため⁵⁾、パンタグラフ揚力の大きいトンネル区間のほうが許容範囲は小さくなると考えられる。

表4に、パンタグラフAで走行速度300km/hの場合およびパンタグラフBで走行速度320km/hの場合について、「集電性能の評価基準」を満足する「架設誤差の許容範囲」を、明かり区間・トンネル区間を含めてまとめて示す。「架設誤差の許容範囲」を決定付けるのは、多くの場合において支持点もしくは径間のトロリ線ひずみである。なお、支持点基線勾配の正側の上限値を記載していないのは、前述の理由による。

6.5 架設指針の設定

「架設指針」を設定するにあたっては、表4に示した「架設誤差の許容範囲」内とし、さらに現場で管理しやすいように区切りの良い値とし、また許容範囲の上限と下限の絶対値を等しい値とした。

パンタグラフAで走行速度300km/hの場合よりもパンタグラフBで320km/hの場合のほうが「架設誤差の許容

特集：電力技術

範囲」が広いことから、320km/h用架設指針を緩和して設定することも可能である。しかし、この区間を現行パンタグラフで300km/hで運転する場合もあることも考えると、320km/h用架設指針を300km/h用のそれと同等としておくことが適切と考えられる。表5に、今回提案する運転速度320km/hまで対応する「架設指針」を示す。

表5には、今回用いた「架設状態」実測データの「(平均値 \bar{u}) $\pm 2 \times$ (標準偏差 σ)」の範囲を示す。架設誤差が正規分布すると仮定すれば、この範囲内には全体のおよそ95%のデータが含まれることになる。架設誤差の実態は、今回提案した「架設指針」を超える場合もあり、300km/hを超える高速運転に対応するためには、現在よりも架設精度をより高める必要があると言える。また、現行の径間勾配3‰以下という架設基準は、新幹線開業当時の営業速度210km/hに対して設定されたもので、300km/h超域の営業運転に対してはもはや十分ではないこともわかる。

表5 300, 320km/h用架設指針

架設誤差の指標	架設指針 (以内)	現地調査結果 $\bar{u} \pm 2\sigma$
径間勾配 (‰)	± 0.5	-0.6 ~ 0.6
径間勾配差 (‰)	± 1.0	-1.0 ~ 1.0
サグ比 (‰)	± 0.4	-0.4 ~ 0.4
支持点基線勾配 (‰)	± 1.0	-1.4 ~ 1.4
支持点曲率 ($\times 10^{-3}$ 1/m)	± 1.0	-1.3 ~ 1.1

7. まとめ

本論文の要旨をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 電車線架設指針の策定手順として、実測データに基づく運動シミュレーションを用いて架設誤差の許容範囲を導出する方法を提案した。
- (2) 上記の手順に従い、300または320km/hでの新幹線高速運転に対応した電車線架設指針を提案した。

8. おわりに

電車線の架設精度についてはこれまでほとんど定量的な検討が行われてこなかったが、今回初めて架設指針の策定手順を示すことができた。またその一例として提案した新幹線高速運転用の架設指針は、電車線の性能向上

や信頼度・保安度の向上、設備の長寿命化、保全の効率化に寄与するものと期待される。この方法を用いれば、新幹線のみならず在来線用についても適用可能であり、線区に応じた設備の簡素化や保全手法を検討することも考えられる。

今後の課題としては、さらにさまざまな現場の実態に則したものに改良を加えること、また営業線の架設誤差のデータを効率的に収集・判定する手法も合わせて実用化していく必要があると考えている。

文献

- 1) 網干光雄：「弾性支床弦モデルによる架線・パンタグラフ系の径間周期運動解析」, 日本機械学会論文集C編, Vol.75, No.755, pp.1950-1956, 2009
- 2) 網干光雄, 真鍋克士：「架線・パンタグラフの接触力変動解析」, 鉄道総研報告, Vol.13, No.7, pp.7-12, 1999
- 3) 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D編, Vol.124, No.9, pp.871-877, 2004
- 4) 真鍋克士：「トロリ線波状摩耗の発生機構に関する動力学解析」, 日本機械学会論文集C編, Vol.66, No.642, pp.454-459, 2000
- 5) 網干光雄, 久須美俊一, 倉岡拓也：「パンタグラフ接触力に基づくトロリ線のひずみ推定法」, 鉄道総研報告, Vol.24, No.2, pp.23-28, 2010
- 6) 国土交通省鉄道局監修：「解説 鉄道に関する技術基準（電気編）」, 日本鉄道電気技術協会, 2002
- 7) 網干光雄：「動特性計算による架空電車線凹凸の評価法」, 電気学会論文誌D編, Vol.126, No.7, pp.983-988, 2006
- 8) 網干光雄, 常本瑞樹：「高速走行時のトロリ線ひずみ評価」, J-RAIL2009論文集, pp.721-724, 2009
- 9) 常本瑞樹, 網干光雄：「電車線架設精度と集電性能」, J-RAIL2009論文集, pp.709-712, 2009
- 10) 青木純久, 福原邦夫, 長沢広樹：「金属すり板・トロリ線の材質組合せが摩耗特性におよぼす影響」, 鉄道総研報告, Vol.9, No.6, pp.31-36, 1995
- 11) 池田国夫, 栗田健：「300km/hを越える速度に対応した集電系の開発」, J-RAIL2009論文集, pp.121-124, 2009
- 12) 網干光雄, 藤井保和：「架線・パンタグラフの運動シミュレーション」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-10-17, 2010