

温度変化やトロリ線摩耗が集電性能に与える影響

常本 瑞樹* 清水 政利*
 齋藤 寛之** 梶山 博司**

Effect of Temperature Change and Contact-Wire Wear on Current Collection Performance

Mizuki TSUNEMOTO Masatoshi SHIMIZU
 Hiroyuki SAITO Hiroshi KAJIYAMA

For electric railway, it is preferable that the tension and the height of overhead contact line are constant to maintain satisfactory current collection performance. Since overhead contact line expands and contracts according to temperature change, an automatic tension balancer is generally equipped at the terminations. However, the tension of overhead contact line is not always constant because of the tension fluctuation of an automatic tension balancer and the gradient of yokes. In addition, the contact wire wear decreases its mass. This also affects the tension and the height of it. The authors performed a theoretical study and a simulation to examine the effect of temperature change and contact-wire wear on current collection performance.

キーワード：集電，トロリ線，摩耗，温度，トンネル，シミュレーション

1. はじめに

電気鉄道の架空電車線（以下、架線）において、温度変化やトロリ線摩耗により架線が伸縮すると、架線張力とトロリ線高さは変化する。これらは架線とパンタグラフ間の接触性能（以下、集電性能）に影響するが、この影響は未解明であり、定量的な評価は行われていない。特に 300 km/h 超の高速走行においてはこれらが集電性能に与える影響が大きくなると考えられる。また、トンネル内では明かり区間よりもパンタグラフ対向風の風速が高く、パンタグラフ揚力が大きくなるため、トロリ線の支持点押上量・ひずみが悪化することが報告されている¹⁾。このことから、速度向上時などの集電性能評価には、トンネル内における風速や年間を通じての温度変化を考慮することが必要となる。このうち風速については現地測定結果より考慮すべき値が示されている¹⁾。しかしながら、温度変化については、トンネル内においては明かり区間よりも温度変化が小さいと考えられるものの、その特性は未解明である。

本研究では、まず、トンネル内の集電性能評価において考慮すべき温度範囲を検討するため、トンネル内気温の温度特性について現地測定およびシミュレーションを実施した。そして、温度変化やトロリ線摩耗が集電性能に与える影響を検討するため、理論検討および動特性評価を実施した。

* 電力技術研究部 電車線構造研究室
 ** 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

2. 温度変化やトロリ線摩耗による状態変化

図1、図2に、温度変化やトロリ線摩耗が集電性能に与える影響の概要および引留箇所概略をそれぞれ示す。引留箇所の自動張力調整装置は、架線伸縮に応じて動き、その変位により張力が変化する。また、一般に各線条は異なる材質・断面積の線種が用いられており、架線伸縮量の差によりヨークが傾斜する。このとき三角ヨークを用いているため、線条の張力比が変化することとなる。よって、架線伸縮時は、各線条の張力が釣り合う位置に自動張力調整装置の変位とヨークの傾斜が変化することとなる。そのため、架線張力やトロリ線高さが変化

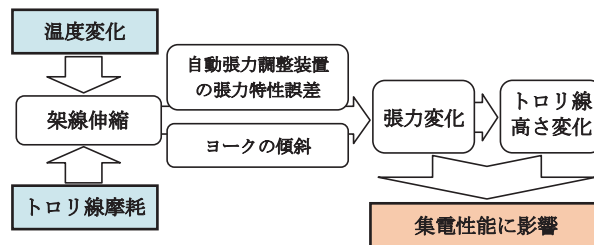


図1 温度変化やトロリ線摩耗による集電性能への影響

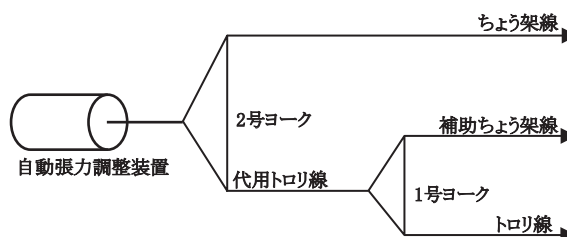


図2 引留箇所概略

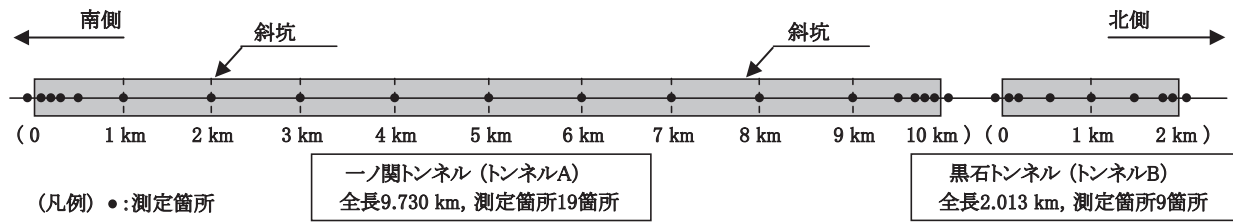


図3 トンネル内温度測定箇所

する。架線張力やトロリ線高さは集電性能に影響することから、これらの影響を定量的に評価することが重要である。本論文では、3章でトンネル内気温、4章で架線張力とトロリ線高さ、5章で集電性能について検討する。

3. トンネル内の温度変化

3.1 新幹線が走行するトンネル内の温熱環境

列車が高速走行する際、機械抵抗や空気抵抗などの走行抵抗に打ち勝つために常にエネルギーを供給する必要がある。供給されたエネルギーは最終的には熱エネルギーの形になり、気温を上昇させる。トンネル内においては、この熱エネルギーの一部はトンネル壁面から地盤へ移動し、別の一部は列車走行によりトンネル内に発生した列車風によりトンネル外に排出される。

3.2 新幹線トンネル内における現地測定

3.2.1 測定概要

温度測定器をトンネル内（壁面，地上高さ約1.0 m）とトンネル坑口付近の明かり区間（地上高さ約1.5 m）に設置し、トンネル内気温および外気温を測定した。測定は、東北新幹線一ノ関・水沢江刺間の比較的全長が長い一ノ関トンネル（以下、トンネルA：全長9.730 km）および比較的全長が短い黒石トンネル（以下、トンネルB：全長2.013 km）で実施した。図3のように、温度測定間隔は、坑口付近は数十m～数百m、トンネル中央付近は1 km程度とした。トンネルAとトンネルBは同じ線区にあり、間隔は約1 kmであるので、外気温および列車走行の条件はほぼ同じと考えてよい。列車走行条件は、1日あたり下り37本，上り36本である。測定期間は10月～翌年10月までの1年間である。

3.2.2 測定結果

図4に、温度測定波形を示す。外気温はトンネルA南側とトンネルB北側でほぼ同等であり、最高35℃程度、最低-10℃程度、変化幅（最高値と最低値の差）45℃程度である。トンネル内気温は外気温に比べて変化幅が小さい。トンネルA内の温度変化幅はトンネル内部ほど小さく、1 km箇所が26℃程度、中央付近が12℃程度である。それぞれのトンネルで坑口から1 km箇所（トンネルA 1 kmとトンネルB中央付近）を比較すると、温度変化

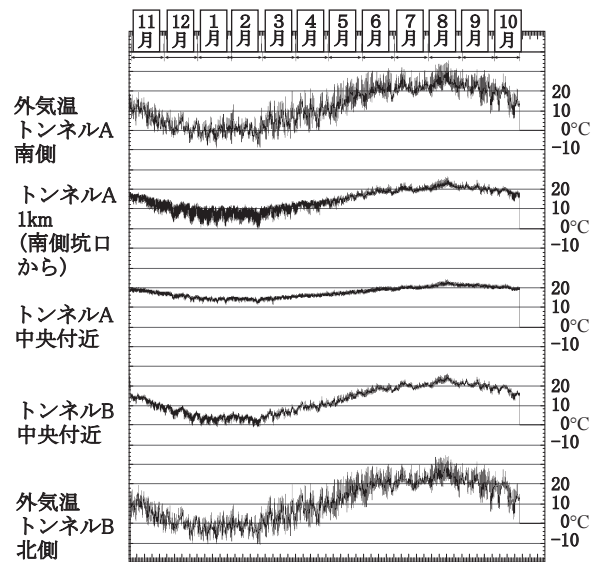


図4 トンネル内温度測定結果
年間の比較（10分間平均値）

幅はそれぞれ26℃程度、27℃程度とほぼ同等である。

3.2.3 トンネル内気温の年間温度変化幅と平均値

図5に、各測定点に近い側の坑口からの距離（以下、坑口基準距離）と年間温度変化幅の関係を示す。図5より、年間温度変化幅は、トンネルAとトンネルBのどちらもトンネル中央ほど小さい。坑口基準距離と年間温度変化幅の関係は、トンネルAとトンネルBではほぼ同じであり、トンネル長さの違いによる差はみられない。また、トンネルAの年間温度変化幅は、坑口から離れるにつれて徐々に減少する傾向がみられる。測定結果について、最小二乗法により指数関数で近似曲線を求めると式(1)で表される。

$$t_{yr} = 27.1 \cdot \exp(-0.62 \cdot x_m) + 10.3 \quad (1)$$

ここで、 t_{yr} は年間温度変化幅 [°C]、 x_m は坑口基準距離 [km] である。図5より、近似曲線は測定結果の傾向を良く表していることがわかる。式(1)より、坑口基準距離 x_m が大きいほど年間温度変化幅 t_{yr} は小さくなり、第3項の値 (10.3°C) に漸近する。坑口基準距離 x_m に対する年間温度変化幅 t_{yr} の減少率は、坑口に近いほど大きく、坑口基準距離 x_m が 0 km から 3 km の間で年間温度変化幅 t_{yr} の減少は 23℃程度であるのに対し、坑口基準距離 x_m が 3 km から 6 km の間で年間温度変化幅 t_{yr}

の減少は3.5℃程度である。坑口基準距離 x_m が6 kmの年間温度変化幅 t_{yr} は11℃程度で、それよりもトンネルの奥では年間温度変化幅 t_{yr} はほぼ一定となる。

図6に、坑口基準距離と年間温度平均值（最高値と最低値の平均值）の関係をそれぞれ示す。図6より、年間温度平均值は、トンネルAとトンネルBのどちらもトンネル中央ほど高い。坑口基準距離と年間温度平均值の関係は、トンネルAとトンネルBでほぼ同じであり、トンネル長さの違いによる差はみられない。また、トンネルAの年間温度平均值は、坑口から離れるにつれて徐々に増加する傾向がみられる。測定結果について、最小二乗法により指数関数で近似曲線を求めると式(2)で表される。

$$t_{ya} = -12.4 \cdot \exp(-1.76 \cdot x_m) + 23.4 \quad (2)$$

ここで、 t_{ya} は年間温度平均值 [℃] である。図6のように、近似曲線は測定結果の傾向を良く表している。

3.3 シミュレーションによる温度計算

3.3.1 シミュレーション条件

トンネル内の温熱環境シミュレーション²⁾は、トンネルの形状（全長、断面積など）、外気温の時間変化、トンネル内の列車風の風速の時間変化、列車の発熱量などからトンネル内気温の変化を予測する計算手法である。

トンネル両坑口の外気温の時間変化については、予測対象地点の最寄りの気象台の観測結果から季節変化と日変化を正弦波で近似して与えた。表1に、今回使用した外気温に関する入力条件を示す。また、トンネル壁面か

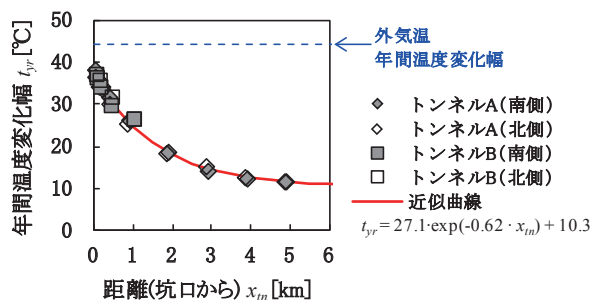


図5 坑口基準距離と年間温度変化幅の関係 測定結果（10分間平均値）

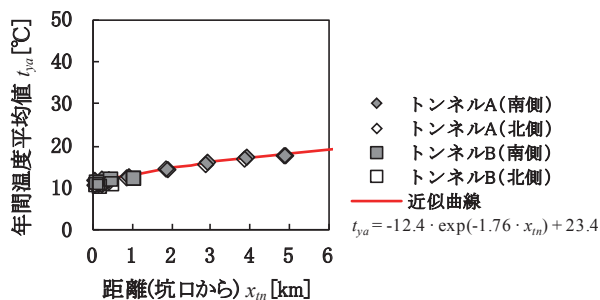


図6 坑口基準距離と年間温度平均值の関係 測定結果（10分間平均値）

らある程度以上の深さ（ここでは10 m以上とした）の地中温度は、外気温年間平均値と同様の値（11.4℃）とした。

トンネル内の列車風の風速は、トンネルの形状、列車速度、列車本数などからトンネル内圧力変動シミュレーション³⁾により求めた。列車の発熱量については、トンネル内での走行抵抗（水平・直線・定速）による発熱量のみを考慮した。走行抵抗を空気抵抗と機械抵抗の足し合わせと考え、空気抵抗はトンネル内圧力変動シミュレーションにより算出し、機械抵抗は列車質量と速度から機械抵抗を概算する新幹線の機械抵抗 R_M の実用式（式(3)）⁴⁾により算出した。

$$R_M = \frac{(1.2 + 0.0792 \cdot V) Wg}{1000} \quad (3)$$

ここで R_M は機械抵抗 [N]、 V は列車速度 [m/s]、 W は列車総質量 [kg]、 g は重力加速度 [m/s²] である。

3.3.2 計算結果と現地測定結果の比較

図7に、温熱環境シミュレーションにより求めた冬季のある1日のトンネル内気温の計算結果を前節で述べたトンネルAにおける現地測定結果と比較して示す。図7より、計算結果は坑口付近では外気が列車風によって出入りするために変動が大きく、坑口から奥に入るほど変動が小さい傾向を示している。この傾向は、年間を通して現地測定結果の傾向とほぼ一致した。

3.3.3 トンネル長さが温度変化に与える影響

全長10 kmのトンネルとその半分の長さ（全長5 km）のトンネルを対象として、トンネル内温熱環境シミュレーションを実施した。トンネル長さ以外の条件（列車本数、外気温など）は同条件とした。図8、図9に、トンネル内気温について、坑口基準距離と年間温度変化幅、年間温度平均值の関係をそれぞれ示す。図8、図9より、トンネル気温の年間温度変化幅と平均値は、現地測定結果と同様に、トンネル長さの違いによる影響はみられない。

表1 外気温に関する入力条件

項目	温度 [℃]
外気温年間平均値	11.4
日平均値の年変動振幅（半幅）	15.0
日変化の変動振幅（半幅）	5.0

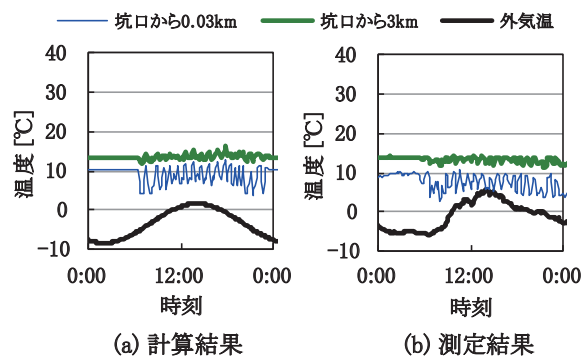


図7 シミュレーション計算結果と測定結果の比較 日変化の例（2月、10分間平均値）

3.4 トンネル内で考慮すべき温度範囲

測定結果およびシミュレーション結果より、トンネル内気温の年間温度変化幅と平均値は、トンネル長さによらず坑口からの距離が影響することがわかった。このことから、同一線区などで外気条件や地中温度、列車走行の条件が同等と考えられる場合には、集電性能評価で考慮する温度範囲はトンネル長さによらず、坑口からの距離により設定すればよいと考えられる。

トンネル内気温の年間温度変化幅は坑口から3 km程度までは比較的大きいことから、この範囲においては考慮する温度変化を明かり区間で示されている値と同等（例えば、現地測定箇所では $10 \pm 30^\circ\text{C}$ ）とすることが望ましいと考えられる。坑口から3 km程度より奥では、年間温度変化幅が小さく、距離に対する減少率が小さくなることから、考慮する温度範囲を明かり区間よりも狭くすることが可能であると考えられる。ただし、トンネル内気温は、トンネル周囲地盤深部の温度と外気温、新幹線が出す熱のバランスで決まることから、外気温とトンネル内気温では年間温度の平均値に差が生じる。そのため、トンネル内気温の年間温度変化幅だけでなく、平均値を考慮する必要がある。

4. 架線張力・トロリ線高さ変化

4.1 計算条件

温度変化やトロリ線摩耗による架線張力とトロリ線高さの変化を張力計算モデル⁵⁾により計算した。表2および図10に、架線条件および自動張力調整装置の張力特性（仕様値）をそれぞれ示す。架線は、新幹線用ヘビーコンパウンド架線である。自動張力調整装置は、明かり区間では滑車式（WTB）、トンネル内ではトンネル用ばね式（TTB）とする。TTBの張力特性は、内部摩擦抵抗等による架線伸長・収縮時のヒステリシスを考慮して示されている。外気温の変化は 10°C （標準温度） $\pm 30^\circ\text{C}$ とした。トンネル内は、ドラム長最長（1600 m）におけるTTB可動全範囲内の温度変化について検討することとした。計算の初期条件は、トロリ線が新線で高さ水平、標準温度において各線条は標準張力（表2の値）、ヨーク傾斜なしとした。

4.2 架線張力

図11に、温度変化やトロリ線摩耗による架線伸縮時の架線張力計算結果を示す。図11より、トンネル内のTTB可動範囲における温度変化は $10 \pm 15^\circ\text{C}$ 程度である。前章の結果より、トンネル内3 km程度より奥の温度変化に対してTTB可動長は十分である。張力は、温度が高いほどトロリ線は低下、ちょう架線は上昇することがわかる。これは、線膨張係数が異なる（トロリ線と

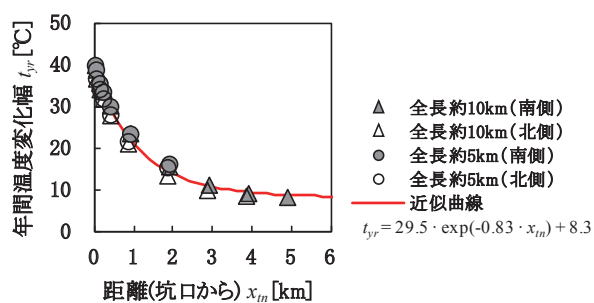


図8 坑口基準距離と年間温度変化幅の関係
シミュレーション結果（10分間平均値）

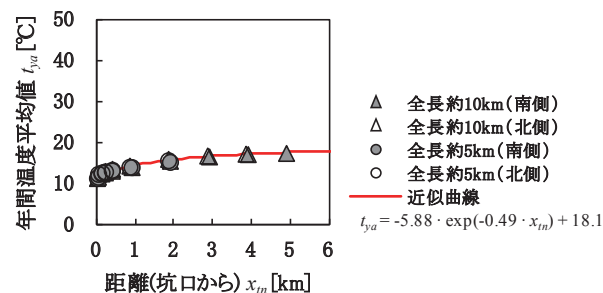


図9 坑口基準距離と年間温度平均値の関係
シミュレーション結果（10分間平均値）

補助ちょう架線は 17×10^6 、ちょう架線は 12×10^6 ことにより線条の温度伸縮量に差があり、2号ヨークが傾斜するためである。また、ちょう架線張力は、明かり区間に比べてトンネル内は温度に対する張力変化が大きい。これは、2号ヨークの垂直方向長さが明かり区間の550 mmに対して、トンネル内は330 mmであるため、温度伸縮量の差が同じ場合でもトンネル内のほうが明かり区間よりも2号ヨークの角度変化が大きくなるためである。ちょう架線張力はトロリ線高さに影響するので、トンネルでは温度に対する高さ変化が大きくなることが予想される。トロリ線が摩耗した場合にトロリ線張力は低下する傾向がみられる。これは、トロリ線の弾性伸びによりヨークが傾斜するためである。

4.3 トロリ線高さ

図12に、温度変化やトロリ線摩耗による架線伸縮時のトロリ線高さ計算結果を示す。TTBの張力特性はヒステリシスを考慮して示されているため、最低温度と最高温度のそれぞれについて、初期状態からのトロリ線高さ変化が大きい条件を示している（最低温度は図10のD点、最高温度は図10のE点）。図12より、摩耗進行時のトロリ線高さは、明かり区間とトンネル内のどちらも残存直径が小さいほど全体的に上昇する。標準温度における新線（直径15.49 mm）条件と残存直径12.50 mm条件の支持点におけるトロリ線高さの差は、明かり区間で25 mm程度、トンネル内で30 mm程度である。同様に径間中央のトロリ線高さの差は、明かり区間で40 mm

表2 架線条件

区間	明かり	トンネル
トロリ線 (張力)	GT-Sn170 (19.6 kN)	
補助ちょう架線 (張力)	PH150 (9.8 kN)	
ちょう架線 (張力)	St180 (24.5 kN)	
トロリ線残存直径	15.49 mm (新線), 12.50 mm	
架高	1.5 m	1.1 m
ドラム長	1600 m	
径間長	50 m	45 m
自動張力調整装置	形式	WTB
	張力変動率	5 %
	可動長	0.588 m

程度、トンネル内で 50 mm 程度である。また、温度変化時のトロリ線高さは、明かり区間ではほとんど変化がみられないのに対して、トンネル内では温度が高いほど全体的に上昇する。これは、自動張力調整装置の張力特性のヒステリシス考慮の有無と前節で述べたように 2 号ヨーク寸法の影響によるものである。トンネル内において、残存直径 12.50 mm で最高温度の条件は、新線で標準温度の条件に対するトロリ線高さの差が最も大きく、トロリ線高さは支持点で 40 mm 程度上昇する。トロリ線上昇により、支持点押上量は目安値に対する余裕が減少するので注意が必要である。

5. シミュレーションによる動特性評価

5.1 シミュレーション条件

架線・パンタグラフシミュレーション⁶⁾により動特性評価を実施した。架線は表2に示した新幹線用架線であり、トロリ線高さは図12に示したようになる。図13に、パンタグラフの力学モデルを示す。なお、パンタグラフの押上力 F は、静押上力 (54 N) と揚力 (明かり区間走行速度 300 km/h で約 28 N) を加えて計算した。また、トンネル内ではパンタグラフ対向風の風速が明かり区間の 1.5 倍¹⁾ であるとして、トンネル内の揚力は明かり区間の 2.25 倍とした。

5.2 シミュレーション結果

図14に、トロリ線の支持点押上量および支持点ひずみの速度特性計算結果を示す。トロリ線ひずみは、引張りひずみ (正の値) と圧縮ひずみ (負の値) の最大値をそれぞれ示している。TTBの張力特性はヒステリシスを考慮して示されているため、最低温度と最高温度のそれぞれについて、押上量・ひずみの値が大きい条件を示している (最低温度は図10のD点、最高温度は図10のG点)。

図14(a)より、温度変化時のトロリ線押上量は、温度が高いほど大きい。最高温度と標準温度の場合で、押上量の差は最大 25 mm 程度であった。また、摩耗進行によるトロリ線押上量の差は最大でも 5 mm 程度であり、

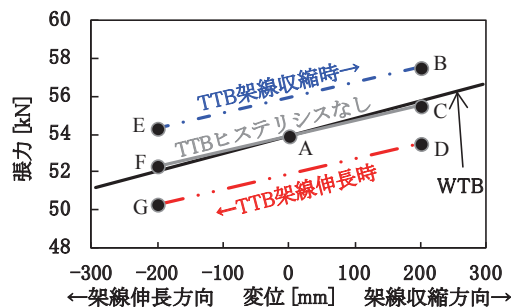


図10 自動張力調整装置の張力特性

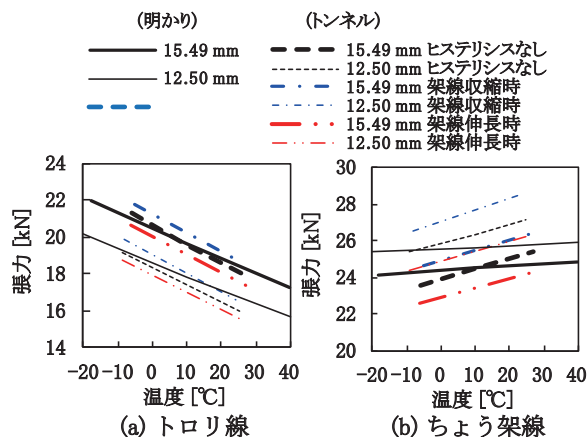


図11 架線張力

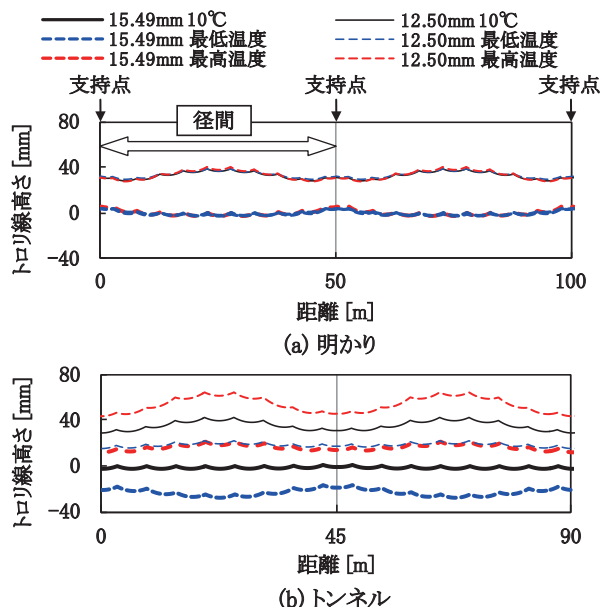


図12 トロリ線高さ

本架線条件において、摩耗条件による差はほとんど認められなかった。ただし、この評価は図12に示した静的なトロリ線高さ変化後を基準としているので、トロリ線新品、温度 10°C の状態を基準とすると、摩耗した場合のほうが押上量に対する余裕は小さい。

図14(b)より、温度変化時のトロリ線ひずみは、温度が高いほど大きい。最高温度と標準温度の場合で、ひずみの差は最大 75×10^{-6} 程度であった。また、摩耗進

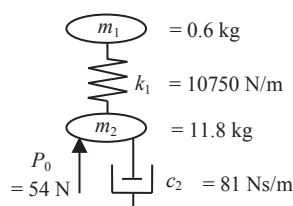


図 13 パンタグラフの力学モデル

行によるトロリ線ひずみの差は、走行速度 300 km/h でやや大きな差がみられるが、本架線条件において、全体としては摩耗条件による差は認められなかった。

6. 温度変化やトロリ線摩耗の影響抑制方策

温度変化やトロリ線摩耗により架線張力やトロリ線高さが変化し、支持点押上量の余裕減少、温度上昇時の集電性能悪化などの影響を明らかにした。これらの結果を考慮し、温度変化やトロリ線摩耗による影響の抑制方策を考える。

まず、全体の張力変化抑制のため、自動張力調整装置の張力ヒステリシス特性の低減が考えられる。次に、ちょうど架線張力変化の低減によりトロリ線高さ変化を抑制するため、2号ヨーク寸法の変更が考えられる。筆者らは、2号ヨーク寸法変更によるちょうど架線張力変化低減の可能性とその効果について検討し、特にトンネル内において効果が大きいことを報告している⁷⁾。その他の方策としては、パンタグラフ揚力の低減、また、押上量に関しては押上量に対する余裕が大きい支持装置の採用、ひずみに関しては疲労強度の高いトロリ線の採用も考えられる。

7. まとめ

温度変化やトロリ線摩耗が集電性能に与える影響を検討するため、理論検討および動特性評価を実施した。また、トンネル内気温について現地測定および温熱環境シミュレーションを実施した。主な結果を以下に示す。

- (1) 温度上昇時には標準状態に対して集電性能評価項目であるトロリ線支持点押上量・ひずみが悪化する。
- (2) 温度変化やトロリ線摩耗により支持点におけるトロリ線高さは最大で 40 mm 程度上昇するため、トロリ線支持点押上量は目安値に対する余裕が減少する。
- (3) トンネル内気温の年間温度変化幅と平均値は、トンネル長さによらず、坑口からの距離が影響する。
- (4) 温熱環境シミュレーションによるトンネル内気温の計算結果は、年間を通して実施した現地測定結果の傾向とほぼ一致した。

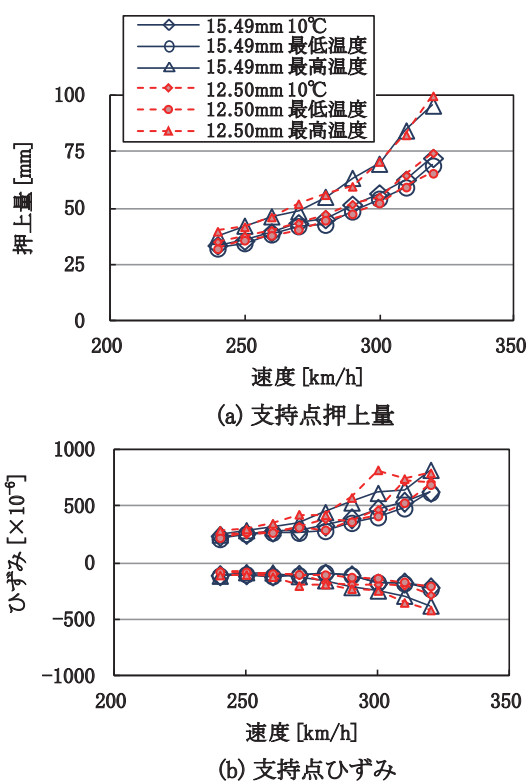


図 14 シミュレーション結果：トンネル

謝 辞

現地試験の実施に際してご指導、ご協力いただきました東日本旅客鉄道株式会社の関係各位に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 清水政利, 菅間陽二, 近藤優一, 半田恵一, 光用剛：新幹線トンネル内の列車風が集電性能へ及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.27, No.8, pp.29-34, 2013
- 2) 梶山博司：地下鉄道の温熱環境シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.11, No.10, pp.41-46, 1997
- 3) 飯田雅宣, 前田達夫：トンネル内圧力変動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.4, No.7, pp.54-62, 1990
- 4) 福地合一：長大鉄道トンネルの換気に関する理論とその応用例について, 鉄道技術研究報告, No.1076, 1978
- 5) 井上輝明, 清水政利, 藤井保和：ヘビーコンパウンド架線における張力変動についての考察, J-RAIL2011, S9-16, 2011
- 6) 網干光雄：動特性計算による架空電車線凹凸の評価法, 電学論 D, Vol.126, No.7, pp.983-988, 2006
- 7) 奈良場勇人, 常本瑞樹, 清水政利, ヨーク形状が電車線張力変動に与える影響, 平成 27 年電学全国大会, Vol.5, pp.243-244, 2015