

新幹線トンネル内の列車風が集電性能へ及ぼす影響

清水 政利* 菅間 陽二** 近藤 優一*
半田 恵一* 光用 剛***

Effect of High-Speed Shinkansen Train Draft in Tunnel on Current Collection Characteristics

Masatoshi SHIMIZU Youji SUGAMA Yuichi KONDOU
Keiichi HANDA Tsuyoshi MITSUMOJI

It is well-known that the wind speed to affect the pantograph is stronger in the tunnel than in the open air on the Shinkansen line. Therefore, we measured wind speed, wind direction, dynamic behavior of the overhead contacts line and metal fittings when the Shinkansen train ran through the tunnel at high-speed. This paper discussed the influence of the air flow in the tunnel caused by high-speed train on current collection characteristics and the overhead contacts lines. Further, the aerodynamic upward force of the pantograph was estimated on the basis of measured results. Finally, using the motion simulation of pantograph and overhead contacts line, their dynamic characteristics at high-speed were evaluated.

キーワード：電気鉄道，集電，電車線，トンネル，列車風，パンタグラフ揚力

1. はじめに

トンネル内ではパンタグラフに作用する風速が明かり区間に比べて大きく、パンタグラフの揚力が増加する¹⁾。このため、トンネル内の集電性能が集電系の安全性を確認するための指標の一つとなっており、速度向上時等の電車線設備の余裕度や改善方向を明らかにするためには、トンネル内の風速を考慮した検討が必要となる。

近年の新幹線速度向上に対応し、これらの検討を行うため、トンネル内の列車通過時における電車線付近の風速・風向を測定した。同時に、線条と金具類の変位、応力等の電車線の挙動を測定し、トンネル内の風速・風向が集電性能のうち地上側での確認項目である支持点押上量やひずみ等に与える影響を考察した。

また、得られた風速測定結果（線路平行方向）からトンネル内を走行するパンタグラフ揚力を推定し、架線・パンタグラフ系の運動シミュレーションにより新幹線高速域での集電性能を予測し、設備の改善方向を示した。

2. 風速・風向と電車線挙動の測定条件と測定方法

2.1 測定条件

測定を行ったトンネルとトンネル内の電車線の条件を

* 電力技術研究部 電車線構造研究室
** 電力技術研究部 電車線構造研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）
*** 鉄道力学研究部 集電力学研究室

表1に示す。トンネルAは比較的長いトンネルで、トンネル内で対向する列車のすれ違いがあり、電車線はトロリ線にGT-PHC110を用いた高速対応のヘビーコンパウンドである。測定箇所は列車がすれ違い可能性がある地点としてトンネルの中間付近を選定した。

トンネルBは比較的短いトンネルで、トンネル内で列車のすれ違いはなく、電車線はトロリ線にGT-Sn170を用いた一般的なヘビーコンパウンドである。測定箇所は、列車がトンネルに進入した際に発生する圧力波がトンネル出口で反射し、折り返して列車と遭遇すると想定される箇所を選定した。

表2に測定箇所における通過列車の条件を示す。測定した列車は、標準断面の車両の編成、小断面の車両と標準断面の車両の併結の編成で、それぞれパンタグラフの数と先頭からの位置が異なる2種類の形式がある。測定箇所は下り線であり、併結の編成は小断面の車両が前方となる。

表1 測定を行ったトンネルと電車線の条件

トンネル名 (全長)	トンネル A (9730m)	トンネル B (2620m)	
測定箇所	トンネル入口から 4051m	トンネル入口から 743m	
電車線	高速対応ヘビーコンパウンド	標準ヘビーコンパウンド	
線種 (標準 張力)	Me	St180 (21.6kN)	St180 (24.5kN)
	Ax	PH-Ag150 (12.7kN)	PH-Ag150 (9.8kN)
	Tr	GT-PHC110 (19.6kN)	GT-Sn170 (19.6kN)
径間長	45m	45m	

Me：ちょう架線 Ax：補助ちょう架線 Tr：トロリ線

表2 通過列車の条件

編成	車両断面 (パンタグラフ数)	列車先頭からのパンタグラフ距離 [m]			
		第1	第2	第3	第4
A	標準 (1)	180			
B	標準 (2)	124	173		
C	小 (2) + 標準 (1)	43	103	308	
D	小 (2) + 標準 (2)	43	103	252	301
E	小 (1) + 標準 (1)	108	329		

2.2 測定方法

図1に測定概要を示す。電車線の各部に取り付けたセンサの測定データを、支持点の可動ブラケットに設置した自動記録計で収録した。測定項目はトロリ線から約400mm上方の風速、風向と、線条や金具類の各部の変位、応力、加速度である。ハンガ点の上下、左右変位は加速度の積分値から算出した。

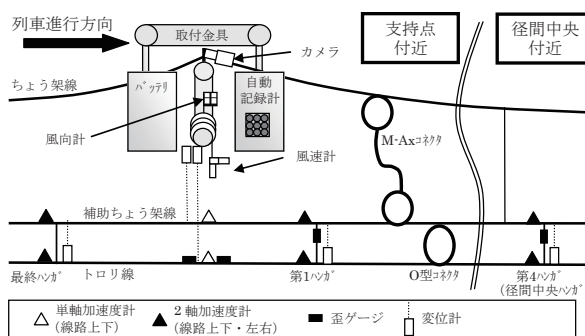


図1 測定概要

3. トンネル内における列車通過時の風速

3.1 線路平行方向の風速

(1) 風速、風向の特徴

図2にトンネルAをD編成が270km/hで走行した場合の線路平行方向の風速、風向の測定チャート例を示す。図中にはトロリ線の支持点押上量も同時に示している。ここでは、測定器を設置した下り線を通過する列車を自列車、反対線の上り線を通過する列車を対向列車と呼ぶ。

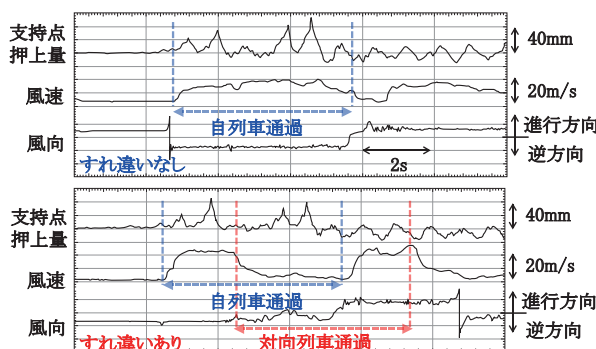


図2 線路平行方向の風速、風向の測定チャート例

列車のすれ違いがない場合は、測定点を列車が通過する前は列車進行方向、通過中は列車進行と逆方向、通過後は列車進行方向の風が発生している。また、列車の後方ほど風速が大きい傾向がある。

対向列車とのすれ違いがある場合は、自列車が測定点を通過中で、その前方に対向列車がある場合には列車進行と逆方向、自列車が測定点を通過後で、対向列車が測定点の反対側線路を通過中には自列車の進行と逆方向の風が発生し、その風速はすれ違いがない場合より大きい。また、測定点に両方向の列車がある場合はそれぞれの列車により発生する風が相殺され、測定点の風速は減少している。

トンネル内に対向列車がある場合は、ない場合に比べて自列車通過中の風速が増加するが、すれ違い時において特に過大となる風速や複雑な風向の変化は観測されなかった。

(2) 線路平行方向の最大風速

図3、図4に、自列車が測定点を通過した場合の線路平行方向の風速の最大値を示す。図3、図4と以降の風速の速度特性を表す図には、原点を通る近似直線も示している。風向は列車の進行方向と逆方向(対向風)である。

図3はトンネルAにおける対向列車の有無による風速の比較で、対向列車がある場合には、対向列車がない

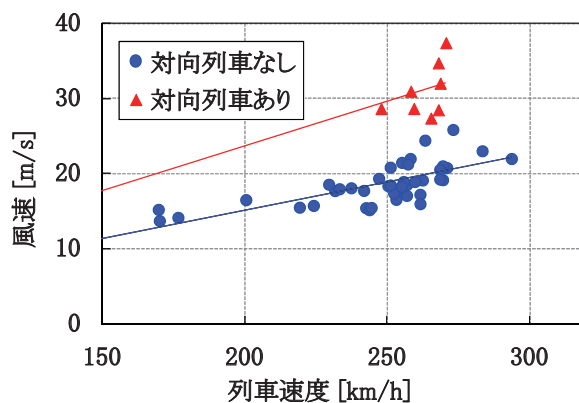


図3 トンネルAにおける対向風の最大値

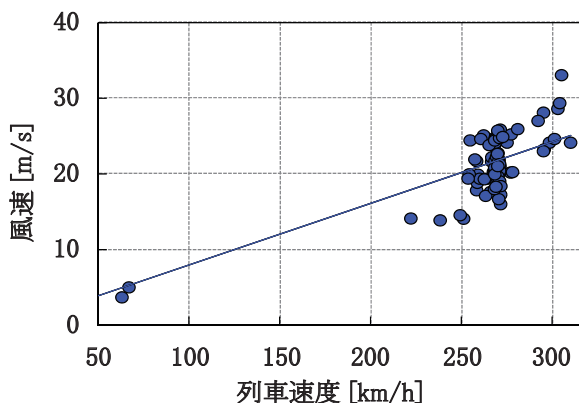


図4 トンネルBにおける対向風の最大値

場合に比べて風速が大きくなる傾向がある。図4はトンネルBにおける最大風速で、対向列車がない場合の測定結果であるが、トンネルAに比べてやや大きい傾向がある。この要因として、トンネル内での圧力波の伝搬が考えられる。図5はA編成がトンネルAを270km/hで走行した場合の1次元空気流動シミュレーション²⁾によるパンタグラフ点の風速を示している(計算は熱・空気流動研究室が実施)。列車がトンネル突入時に発生した圧力波は、トンネル出入口で反射を繰り返す。トンネルAを列車が270km/hで走行した場合、列車はトンネル出口で反射した圧力波と遭遇した後に測定箇所へ到達し、パンタグラフ点の風速が減少することが確認できる。

一方、トンネルBを列車が270km/hで走行した場合、測定箇所を列車が約250m通過した後、トンネル出口で反射した圧力波が測定箇所に到達する。そのため、編成の前方ではトンネル出口で反射した圧力波と遭遇する前の風速値となる。したがって、同一の速度域でもトンネルBの風速がトンネルAの風速よりも大きくなったと考えられる。

(3) パンタグラフ点における対向風の風速

走行する列車のパンタグラフ揚力は、一般的にパンタグラフと対向する線路平行方向の風速の2乗に比例するため、その風速は集電性能への影響を把握する上で重要な指標となる。

図6はトンネルAで測定した第1パンタグラフ点における風速の比較である。第1パンタグラフを搭載している車両の断面積が大きいA編成とB編成は、断面積が小さいC編成とD編成に比べて風速が大きくなる傾向がある。これは、トンネル断面積との比が異なることによるものと考えられる。また、同じ断面積でも、先頭から第1パンタグラフまでの距離が長いA編成は、距離が短いB編成に比べて風速が大きくなる傾向がある。これは、列車先頭から後尾部にかけて、トンネル壁面と列車表面での境界層の厚さが増加し、主流速度が増加したことによるものと考えられる。トンネルBでも、列車の断面積や先頭から第1パンタグラフまでの距離と風速の関係については同様の傾向が観測された。

3.2 線路直角, 上下方向の風速

図7にトンネルAにおける線路直角方向(ここでは左右方向をいう)の風速測定結果を示す。対向列車がある場合は、ない場合に比べて風速が大きくなる傾向がある。風向はトンネル中心から壁面へ向かう方向である。

図8にトンネルAにおける上下方向の風速測定結果を示す。風向は上方向が大きく、図8には上方向の値を示している。風速の最大値は5m/s以下であり、速度に対する明確な相関や、対向列車の有無による明確な差は見られなかった。

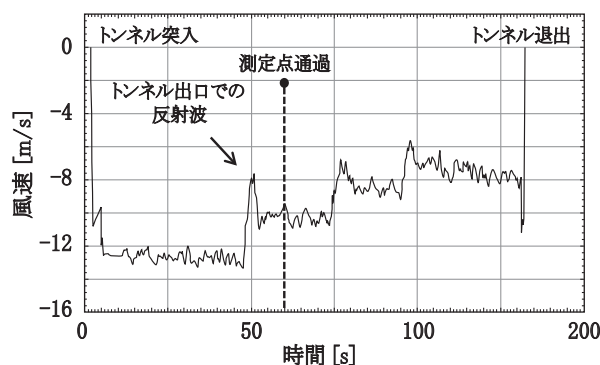


図5 パンタグラフ点の1次元空気流動シミュレーション結果(地上から見た風速)

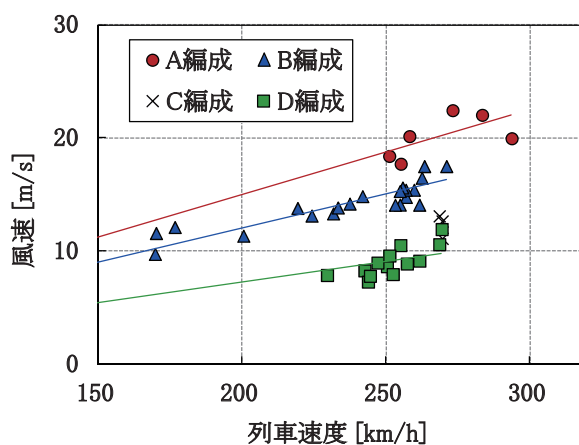


図6 第1パンタグラフ点での対向風の最大値

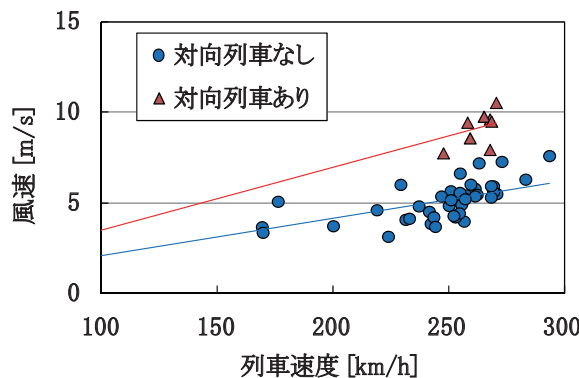


図7 線路直角方向風速の最大値

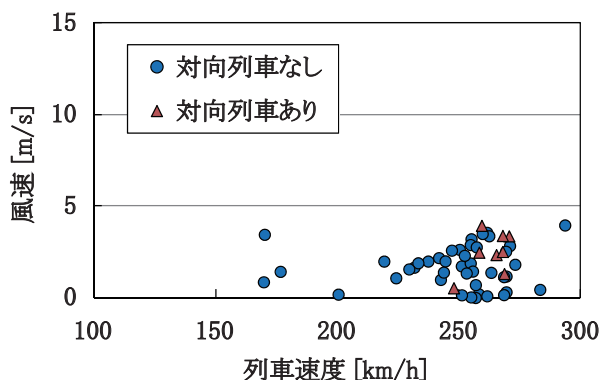


図8 上下方向風速の最大値

特集：電力技術

4. トンネル内において考慮すべき風速

4.1 電車線設備に対する風速

3章の測定結果について、電車線設備に作用する風速を列車速度比で整理すると、表3のようになる。表3は作用する風速の列車速度に対する比率を示しており、測定された風速（図3、図4、図7）の近似直線の傾きから算出している。

これらの結果に多少の余裕を考慮してまとめると、トンネル内において列車通過時に電車線設備で考慮すべき風速は、表4のように考えることができる。線路上下方向については、上述のように明確な速度特性が見られないため、測定された最大値を考慮して5m/s程度とした。

4.2 パンタグラフの対向風

3章で示した通り、パンタグラフに作用する対向風は、対向列車の有無、車両断面、先頭からのパンタグラフの距離により異なる。トンネルAおよびトンネルBにおいて、パンタグラフ点で観測された対向風を整理すると、表5（トンネルA）、表6（トンネルB）のようになる。

これらのパンタグラフ点における測定結果や、列車通過時の最大風速の測定結果（表3）から、車両上のパンタグラフに作用する対向風として考慮すべき風速は表7のように考えられる。トンネル内に対向列車がある場合は列車速度の1.5倍の風速を考慮する必要があり、パンタグラフ揚力についてもこれに応じた増加率を見込む必要があると考えられる。

なお、パンタグラフ点毎の集電性能等の詳細な検討を行うには、表7の値を用いず、表5、表6の列車速度比率を参考として揚力を算定することも可能であると考えられる。

5. 電車線の挙動

5.1 支持点のトロリ線押上量とひずみ

図9にトンネルAにおける支持点のトロリ線押上量の測定結果を示す。D編成での対向列車の有無による測定値を比較すると、対向列車がある場合の測定値が大きくなっており、対向列車がある場合の揚力の増加を裏付けられるものとなっている。編成の違いによる測定値の差は、対向風の風速の差やパンタグラフの揚力係数の差によるものであると考えられる。トンネルAでの最大値は50mm程度、トンネルBでの最大値は60mm程度であった。

図10にトンネルAにおける支持点のトロリ線ひずみの測定結果を示す。押上量と同様に、D編成では対向列車がある場合にひずみが大きくなる傾向がある。

表3 電車線設備に作用する風速の列車速度比率

風向	トンネル	対向車	列車速度比率
線路平行	トンネルA	なし	0.27
		あり	0.49
	トンネルB	なし	0.29
線路直角	トンネルA	なし	0.075
		あり	0.12

表4 電車線設備に対して考慮すべき風速

風向	対向車	列車速度比率	300km/h 走行時に考慮すべき風速
線路平行	なし	0.3	25m/s 程度
	あり	0.5	42m/s 程度
線路直角	なし	0.08	7m/s 程度
	あり	0.12	10m/s 程度
上下	—	—	5m/s 程度

表5 パンタグラフ点での風速の列車速度比率（トンネルA）

対向列車	編成	第1パンタ	第2パンタ	第3パンタ	第4パンタ
なし	A	0.27			
	B	0.22	0.21		
	C	0.14	0.15	0.21	
	D	0.14	0.15	0.21	0.19
あり		最大 0.45			

表6 パンタグラフ点での風速の列車速度比率（トンネルB）

対向列車	編成	第1パンタ	第2パンタ	第3パンタ	第4パンタ
なし	A	0.28			
	B	0.24	0.26		
	C	0.18	0.20	0.22	
	D	0.18	0.20	0.21	0.17
	E	0.18	0.24		

表7 考慮すべきパンタグラフの対向風

対向列車	車両断面	列車速度比率	揚力の増加比率（速度の2乗に比例する場合）
なし	標準	1.3	1.69
	小断面	1.2	1.44
あり		1.5	2.25

5.2 ハンガ点でのトロリ線変位、傾斜

ヘビーコンパウンド式の電車線では、ハンガ長さが150mmでトロリ線と補助ちよう架線の上下間隔が短く、トロリ線と補助ちよう架線の波動伝播速度も異なるため、押上量が大きい状況では、ハンガの傾斜やトロリ線と補助ちよう架線の押上量の差による離隔不足等が懸念される。このため、ハンガ点でのトロリ線との補助ちよう架線の上下、左右変位を測定した。

図 11 にトロリ線のハンガ点の左右変位と支持点押上量の測定結果を示す。トンネル内の曲線引金具（主アーム）は長さ 950mm、引き角度 20° であり、支持点でのトロリ線押上量 (y) に応じて左右方向の変位 (x) が生じる。図中の実線はこの特性を示している。

支持点直近の第 1 ハンガ点（図中の第 1H）では、ほぼこの特性に応じて左右変位が発生している。径間中央の第 4 ハンガ点（図中の中央 H）では、ややばらつきが見られるが、左右変位は最大でも片側 20mm 程度である。

図 12 に、第 1 ハンガ点におけるトロリ線 Tr と補助ちょう架線 Ax の上下変位、左右変位から算出した離隔の減少量と、両者の位置関係から求めた相対的な傾斜角度の変化量の関係を示す。離隔の減少量は、トンネル B に比べてトンネル A での測定値が大きい。これは、トンネル B に比べてトンネル A のトロリ線の線密度が小さいため、ハンガ浮きが生じやすいためであると考えられる。トンネル A における離隔の減少量は最大 20mm 程度であるが、ハンガグループの内径寸法である 30mm に比べて余裕がある。また、傾斜角度は最大 4° で、一方の方向へ増大する傾向がある。これは、図 11 に示した曲線引金具の押上量と左右変位の特性によるものである。

5.3 電車線挙動のまとめ

表 8 に今回観測された主な測定項目の最大値を示す。支持点での押上量やトロリ線と補助ちょう架線の離隔減少量は、現状の電車線金具の条件を考慮すると、安全上や保守上において直ちに問題となるものではない。ハンガやドロップに発生する軸力変動は、パンタグラフの通過により減少方向に生じたものであり、材料の強度を考慮すると余裕があると言える。

トロリ線の左右変位は最大でも 20mm 程度、傾斜は最大でも 4° 程度であった。左右方向の風速値も最大で 10m/s 程度であり、現状では、左右方向の電車線の挙動についても直ちに問題となることはないと考えられる。

表 8 主な測定項目の最大値

測定項目	測定点	トンネル A	トンネル B
支持点押上量	トロリ線	51 mm	62 mm
	補助ちょう架線	39 mm	46 mm
トロリ線と補助ちょう架線の離隔減少量	最終ハンガ点	—	11 mm
	第 1 ハンガ点	22 mm	9 mm
	第 4 ハンガ点	13 mm	7 mm
	O 型コネクタ点	29 mm	—
軸力変動	第 1 ハンガ	-57 N	-82 N
	第 4 ハンガ	-60 N	-60 N
	第 2 ドロップ	-33 N	-38 N
トロリ線左右変位		20mm 程度	15mm 程度
トロリ線傾斜		4° 程度	3° 程度

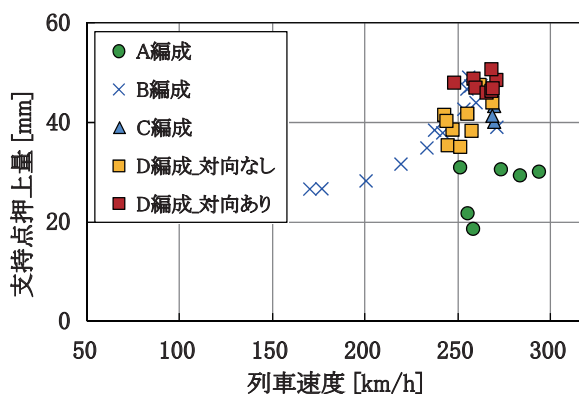


図 9 支持点トロリ線押上量の最大値

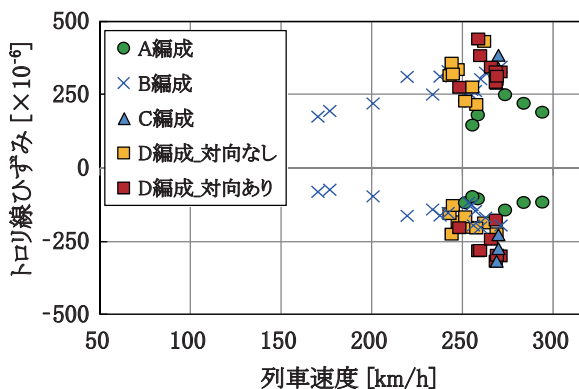


図 10 支持点トロリ線ひずみの最大値

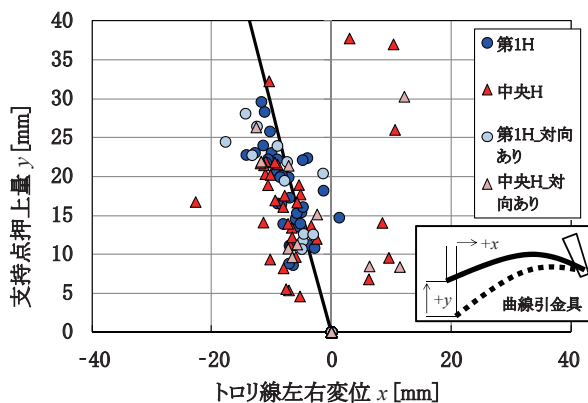


図 11 ハンガ点左右変位とトロリ線の支持点押上量

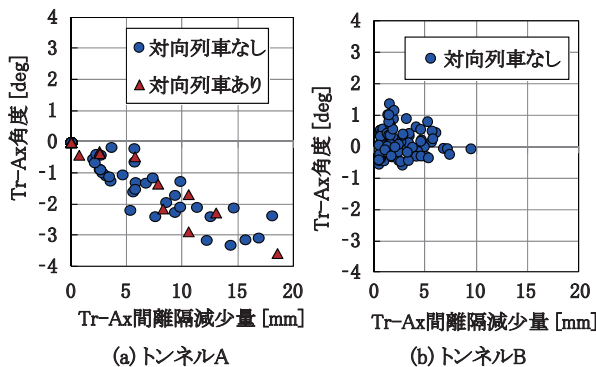


図 12 第 1 ハンガ点での離隔減少量と傾斜角度

特集：電力技術

6. シミュレーションによる電車線挙動予測

6.1 シミュレーション条件

表7に示したパンタグラフ対向風による揚力増加率を用いて、架線・パンタグラフ系の運動シミュレーション³⁾により、速度向上時のトンネル内での集電性能を予測した。揚力係数等のパンタグラフの特性値は、表2に示した編成のパンタグラフに対応したものを用い、電車線条件は表1の通りとした。速度条件は、想定する電車線とパンタグラフの組み合わせに応じて、最高速度を280～360km/hまでとした。

6.2 高速域におけるトロリ線の押上量，ひずみ

図13、図14にA編成のパンタグラフ条件におけるトロリ線の支持点押上量，ひずみの速度特性を示す。風速1.0倍とは、明かり区間での走行に相当する。両者ともパンタグラフの対向風が大きい条件で上昇傾向が大きく、特にトンネル内で対向列車がある条件（風速1.5倍）では、速度向上とともに余裕が減少することが予測される。

図15に、トロリ線の押上量とひずみの径間内での最大値の速度特性を示す。電車線条件はトンネルA相当、パンタグラフ条件はD編成相当である。対向列車がある条件では、トロリ線押上量の上昇傾向が大きく、280km/h域でやや大きなひずみが発生している。これは、ハンガ点でのトロリ線と補助ちょう架線の離隔が減少し、ループ部の余裕がなくなったことによるものである。

これらの対策として、支持点押上量やループ部浮きの余裕度を向上した金具の採用が考えられる。

7. まとめ

近年の新幹線速度向上に対応するため、トンネル内の列車通過時における電車線付近の風速・風向と、線条と金具類の変位、応力等の電車線の挙動を測定するとともに、得られた風速測定結果からトンネル内を走行するパンタグラフ揚力を推定し、新幹線高速域での集電性能を予測した。その結果は以下の通りである。

- (1) 新幹線トンネル内での電車線近傍の線路平行方向の風速として、列車速度に対して対向列車がない場合は0.3倍程度、対向列車がある場合は0.5倍程度を考慮する必要がある。
- (2) 線路直角（左右）方向の風速は、列車速度に対して対向列車がない場合は0.08倍程度、対向列車がある場合は0.12倍程度である。
- (3) 線路平行方向の風速は、車両断面が小さい場合には減少し、同じ編成内においては先頭からの距離が長いほど増加する傾向がある。
- (4) 現在の電車線とパンタグラフ条件、営業速度では、

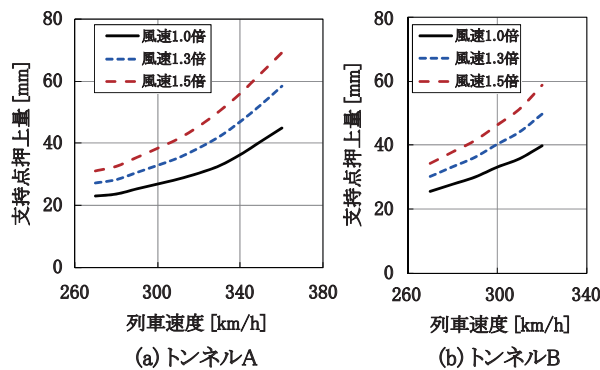


図13 支持点押上量の速度特性

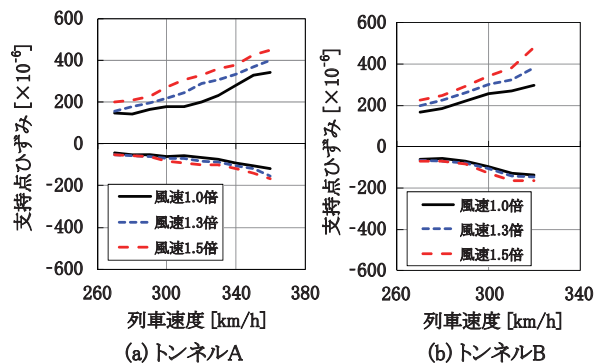


図14 トロリ線ひずみ（支持点）の速度特性

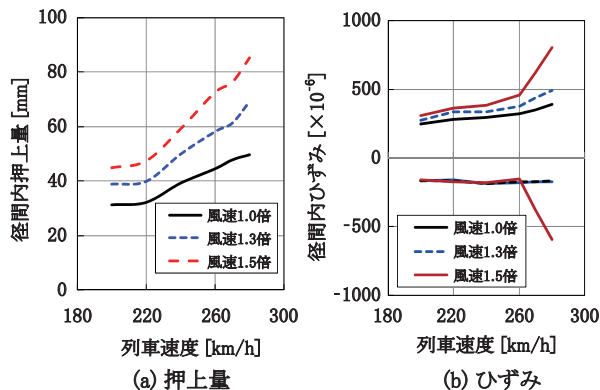


図15 径間内でのトロリ線押上量，ひずみの速度特性

安全上や保守上において直ちに問題となる電車線の挙動は認められなかった。

- (5) 営業速度を向上した場合、トロリ線のひずみ，支持点押上量，ハンガループ部の浮き量の余裕度が減少すると予想される。

文献

- 1) 池田充，他：「列車走行時のパンタグラフまわりの風向・風速特性」，鉄道総研報告，Vol.25，No.6，pp.11-16，2011
- 2) 梶山博司，他：「大深度地下鉄道の空気流動シミュレーション」，鉄道総研報告，Vol.7，No.7，pp.51-58，1993
- 3) 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，126巻7号，2006