

# 剛体電車線とカテナリ架線の新しい移行構造の開発

清水 政利\* 小林 武弘\* 大矢 明德\*\*

## Development of Transition Structures between Overhead Rigid Conductor Line and Catenary-Type Contact Line

Masatoshi SHIMIZU Takehiro KOBAYASHI Akinori OYA

Because of their simple structure and low-maintenance characteristics, railways have often adopted overhead rigid conductor lines for current collection systems in the underground track sections or tunnels. To adopt rigid conductor lines into the small section tunnel, it is necessary to install a transition structure to make a pantograph shift from the catenary-type contact line to the rigid conductor line in the exterior of the tunnel. However, since the present transition structure is complicated, has the inferior current collection characteristics, and requires many support equipments, its construction cost is high. In order to solve these problems, we have developed a new structure. It has a satisfactory performance for operating trains at speed of 130km/h, and the length of the equipment can be shortened to about one third of the present one.

キーワード：電気鉄道，集電，剛体電車線，オーバラップ，移行構造

### 1. はじめに

地下鉄等で採用されている剛体電車線は、摩耗管理等のメンテナンスが軽減可能であり、設備の保安度も高い。このため、様々なパンタグラフや速度に対応可能な剛体電車線が開発され、既存のき電ちょう架式電車線に代えてトンネル区間に導入されるなど<sup>1)</sup>、在来線にも採用が広がりつつある。

しかし、剛体電車線をトンネル内の電車線として導入する場合、トンネルの開口部でカテナリ架線との移行部分を設ける必要があるため、支持物が数多く必要で建設コストの上昇を招いている。また、現在の構造は複雑なため、パンタグラフの離線や電車線部材の疲労の原因となる振動が発生しやすい。これらの問題を解消するため、剛体電車線とカテナリ架線間の新しい移行構造を考案して研究所内の集電試験装置により走行試験を行い、速度130km/h程度まで安定した集電特性が得られることを確認した。この構造は、従来30m程度必要であった移行部分の長さを10m程度に短縮することが可能である。

### 2. 移行構造の現状と新構造の概要

#### 2.1 従来の移行構造

図1(a)は地下鉄や民鉄の地下区間などの標準的な構造

\* 電力技術研究部 電車線構造  
\*\* 元電力技術研究部 電車線構造  
現三和テッキ 技術部

例である。これらの線区では、剛体電車線の採用を前提として開口部の断面が大きいトンネルが建設されているため、トンネル内部でカテナリ架線と剛体電車線のオーバラップ構造を設備することが可能であり、トンネル外の電車線支持物は比較的少なくて済む。しかし、オーバラップ構造としては50m程度の設備長となっており、トンネル内ではちょう架線が無くトロリ線が壁面からの直吊りであるため集電特性も良好であるとは言えない。一部の線区では、トンネル内でも直吊りとせずにカテナリ構造としているが、同様に設備長を長く必要としている。

図1(b)は、JR篠ノ井線の構造例<sup>1)</sup>である。この構造では、剛体電車線の先端からトンネル入り口までの設備長は35mであり、またJR仙山線の例では26m程度であるなど、移行部分の設備長として30m程度が必要となっている。この長さは、地下鉄などの標準構造に比べて短い。山岳トンネルでは開口部の断面が小さいためトンネル外でオーバラップを構成する必要があり、電車線支持物が多く必要である。

#### 2.2 新しい移行構造

新しく考案した移行構造を図2に、集電試験装置での架設状況を図3に示す。図2(a)は引留型の移行構造である。この構造は、カテナリ架線と剛体電車線のトロリ線を連続したものとして一体化しており、パンタグラフはトロリ線を一体化した剛体電車線に移行した後、剛体同士のオーバラップとして200m程度毎に設けられるエキスパンションジョイントと同様な構造でトンネル内部の

特集：電力技術

剛体電車線に移行する。移行前のカテナリ架線の径間長は、トロリ線の振動や押上量を抑制するため従来構造と同様に20mとしている。

トロリ線の張力は剛体電車線末端部の把持クランプにより保持され、末端部の支持物に引き留められる。カテナリ架線と剛体電車線の接続部には、3章で述べる応力緩和機構をトロリ線に設けてパンタグラフの移行を円滑化している。この構造の移行部分の設備長は約10mであり、引留柱とトンネル入口までの距離を加えたものが全体の設備長となる。今回、この構造に対して種々の検討と走行試験を行った結果、速度130km/h程度まで安定した集電特性が確認され、実用化できる見通しが得られた。

図2(b)は一体型の移行構造である。この構造は、トロリ線張力の引留構造を設けずにトンネル内外のトロリ線を全て一体化する構造である。エキスパンションジョイントを設ける必要がない200m程度以下で、支持点で横張力が発生しない直線路のトンネルへの適用が考えられ、引留型に比べても更に構造が簡素化される。今回の検討では、集電特性などの基本的な特性を確認したが、温度伸縮時の挙動やトロリ線摩耗限度の検討等、実用化のための開発要素は残されている。

3. 移行構造における応力緩和機構の検討

3.1 静的押上試験

2章で述べたように、新構造はカテナリ架線と剛体電車線のトロリ線を一体として使用しているため、その接続部でパンタグラフの急激な高さ変化による離線の発生やトロリ線の曲げ応力の増加が懸念される。このため、新構造ではこれらを緩和するための機構（応力緩和機構、図3）を設けた。この機構は、トロリ線の上方に緩和部材を取り付けてトロリ線の急激な曲がりを抑制するものである。この緩和部材の適正な剛性や形状を検討するため、パンタグラフによる静的な押上試験を行った。

図4に試験の概要と架設概況を示す。研究所内に模擬的な接続部を設け、長さ1mの緩和部材をハンガイヤーと同等なものでトロリ線に取り付けた。剛体電車線の架台は狭小トンネル用剛体電車線<sup>1)</sup>と同一のものを使用した(図5)。これに、台車に搭載したPS32(在来線特急用パンタグラフ)を速度3km/h程度でしゅう動させ、接続部のトロリ線に発生するひずみを測定した。押上力は、走行時の増加を考慮して98Nとした。緩和部材は台形で厚さ4mmの形状とし(図6)、材質は表1に示す部材A~Cの3種類とした。表1の計算たわみ量は、部材単独(トロリ線無し)で末端部を固定し、先端部を50Nで押し上げた場合の先端部の変位量で、断面2次モーメントが図6中の式yで変化するものとして計算した値である。

ひずみの測定結果も表1に示している。部材無しとは、緩和部材の代わりに1m長の剛体架台を取り付けた場合であり、緩和機構を設けない場合に相当する。この場合に比べて、緩和部材を取り付けるとトロリ線のひずみが低減し、特に樹脂製の部材(部材B、C)では、一般箇所(接続部の1m手前)と同程度まで低減している。

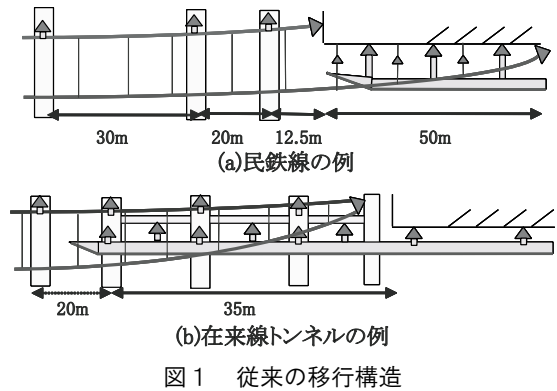


図1 従来の移行構造

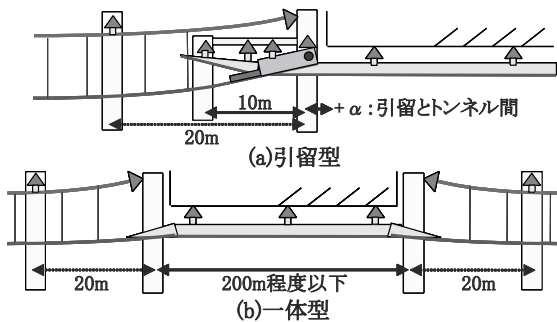


図2 新しい移行構造

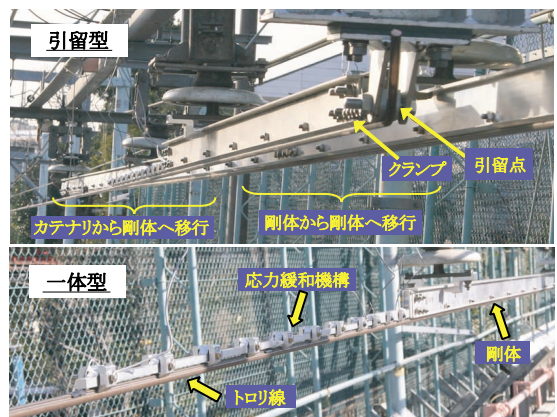


図3 集電試験装置への架設状況

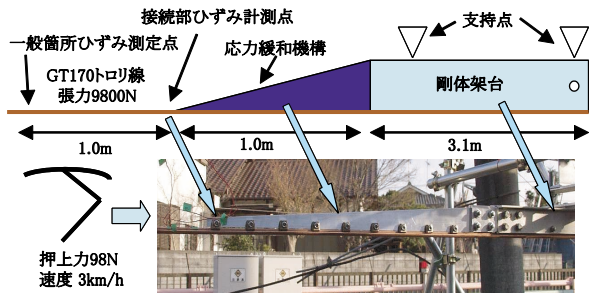


図4 静的押上試験の概要

3.2 部材の形状と仕様

このように、緩和部材の剛性が樹脂製の部材と同程度であれば、トロリ線の応力が低減することが期待できる。実設備で樹脂製の材料を用いることは、耐候性等の面で課題が多いため、材質をアルミ合金として同等の剛性が得られる形状を検討した。表2に検討条件、図7に決定した基本形状についてFEMにより部材応力を解析した結果を示す。表1に示したように、部材単独での樹脂製部材の先端部たわみ量は100mm程度（50Nで押上時）であるので、部材の形状は、①長さ1000mmでの先端たわみ量が100mm、②架設時の想定される押上量（今回20mm）で部材の応力が疲労限度以下、の2点を満たす形状とした。①の剛性であればトロリ線の応力は軽減し、②では部材自身の応力も問題ないことが確認される。

図8に4章で述べる走行試験を行った部材の形状を示す。実用化形状は、動的な振動による応力増加等を考慮して長さ2mとし、2個の試作品について試験を行った。1次試作品は基本形状（図7）の長さだけを変更して2mとした。2次試作品は、1次試作品の走行試験で末端部分のトロリ線応力がやや大きい結果となったため、これを低減して他の箇所と平均化するため、末端部分の高さ方向の寸法を25.5mmに拡大したものである。1次試作品は末端部まで高さが12mmである他は、2次試作品と同一形状である。

この試作品2点について、FEMにより部材の曲げ変位と応力を解析して比較した。トロリ線は張力を付加していないものとし、材料条件を表3とした。図9に示す点にそれぞれ単独で（1点のみ）荷重を加え、変位と最大応力値を解析した。荷重値は走行時に想定される変位量を考慮して両者の比較のために定めたものであり、荷重点①では15N、荷重点②～⑤では25Nとした。これらの荷重は変位が実際と同程度になるように設定した。これは、トロリ線に張力が付加されていないため、通常のパンタ

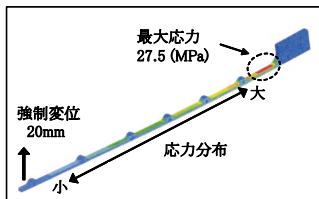


図7 基本形状の応力解析結果

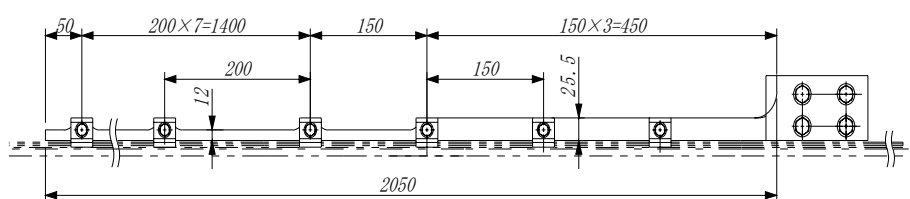


図8 部材の実用化形状（2次試作品）

表3 材料条件

	緩和部材	トロリ線
ヤング率 (MPa)	71000	118000
ポアソン比	0.33	0.33

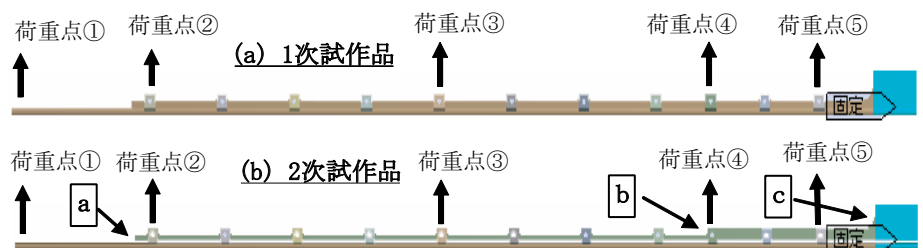


図9 応力緩和機構部材形状と荷重付加点の概略

グラフ押上力を使用すると変位が過大となるためである。

図10に2次試作品に荷重点①で15Nを作用させた場合の応力の解析例を示す。図中の解析箇所a～cは、図9に示したa～c箇所に相当する。この場合、荷重点④に相当する箇所のひずみが最も大きく、部材のひずみは圧縮方向で417μである。これは、トロリ線の大弧面に発生した引張方向のひずみである321μの1.3倍である。他の条件でも、部材のひずみはトロリ線大弧面の大きさより大きく、概ね1.3倍程度であった。表4に変位と応力の解析結果を示す。2次試作品は1次試作品に比べて変位、応力とも低減しており、1次試作品の走行試験で見られたトロリ線応力分布の不均衡が軽減することが期待できる。このため、2次試作品を最終的な実用化形状とした。

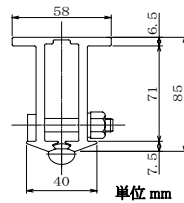


図5 架台形状

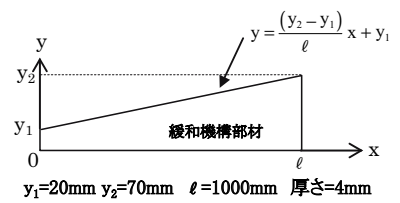


図6 部材形状の概略

表1 緩和部材の条件とひずみ測定結果

緩和部材の材質	ヤング率 (MPa)	たわみ量 (mm)	トロリ線ひずみ (μ)		
			引張	圧縮	振幅
部材無し			91	316	407
A アルミ合金	68600	5.0	174	99	273
B アクリル樹脂	3200	106.3	172	50	222
C ポリカーボネート	2500	136.0	165	45	210
一般箇所ひずみ測定点			170	30	200

表2 部材形状の検討条件

材質等	アルミ合金 疲労限度 98.3MPa
長さ	1m
先端部変位	100mm (50N 押上時)
確認項目	先端部強制変位時最大応力
解析値	変位 20mm で根元部 27.5MPa

特集：電力技術

表4 部材の解析結果

観測点	1次試作	2次試作
	応力 (MPa)	
荷重点④	—	562
荷重点⑤	774	331
	変位 (mm)	
荷重点②	52	33
荷重点③	11	7

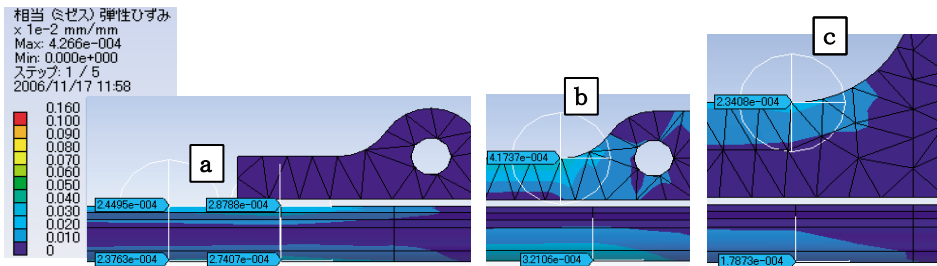


図10 応力解析例

4. 走行試験

4.1 試験条件

2章で述べた新しい移行構造(引留型および一体型)を集電試験装置に架設し、走行試験を行って集電特性を確認した。応力緩和機構の緩和部材として、3章で述べた2種類の走行試験を行っているが、引留型では両者とも大差無く良好な特性が得られ、一体型では2次試作品の方が良好な結果が得られた。このため、以後は2次試作品の試験結果を述べる。

表5に走行試験条件を示す。カテナリ架線は在来線で一般的に使用されているヘビーシンプル方式とし、トロリ線張力を19.6kNと14.7kNの2条件として比較した。剛体電車線は狭小トンネル用剛体電車線<sup>1)</sup>を使用し、径間長5mで架設した。ただし、この電車線は通常ツイン方式として使用するが、架設上の都合でシングル方式とした。パンタグラフは在来線特急用のPS32を使用した。

表5 走行試験条件

カテナリ架線	ちょう架線: St135 張力: 19.6kN トロリ線: GTM-Sn170 張力: 19.6kN, 14.7kN
剛体電車線	狭小トンネル用剛体電車線 <sup>1)</sup> 径間長 5m シングル方式
移行構造	引留型および一体型 応力緩和機構の緩和部材は2次試作品
パンタグラフ	PS32 押上力 64N なびき、反なびき走行 速度 80~160km/h

4.2 架設概要

図11に引留型の架設状況と移行部分の高さ構成を示す。トンネル内の剛体電車線に相当する剛体電車線を試13号柱以降に架設し、試13号~試14号柱間を移行区間となる引き上げ区間として、その中間付近に応力緩和機構を設けている。試14号がカテナリ架線の引留箇所である。トロリ線高さは、試13号でカテナリ側を剛体側より30mm低く設定し、径間長は20mとしている。これは、移行部分の高さ構成として、架線張力の変化、トロリ線の摩耗を考慮したシミュレーション等を実施し、最も円滑にパンタグラフが移行できる構成として定めたものである<sup>1) 2)</sup>。

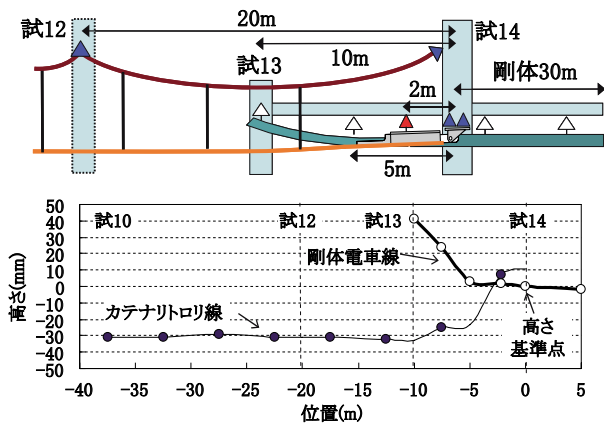


図11 引留型移行構造の架設状況と高さ構成

図12に一体型の架設状況と高さ構成を示す。移行前後のカテナリ架線径間長は20mで、剛体電車線は試14号~試18号柱間に架設し、試14号と試18号柱付近に応力緩和機構を設けている。トロリ線高さは引留型とほぼ同様に20mm程度引き下げる構成とした。

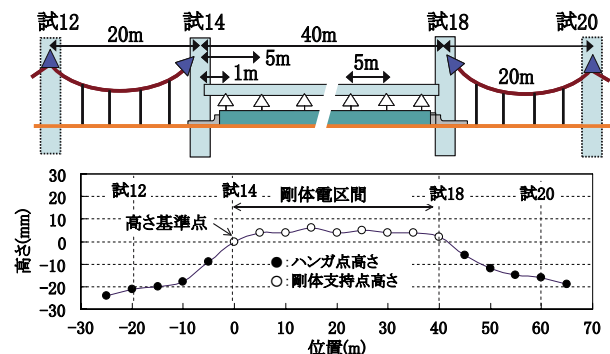


図12 一体型移行構造の架設状況と高さ構成

4.3 確認項目

走行試験における確認項目を表6に、ひずみとトロリ

4.4 引留型の集電特性

引留型の測定最大値（速度，張力条件別）を図14に，離線とひずみの速度特性を図15に示す。離線時間は速度130km/hまで10ms程度以下で目安値である20msより小さく，140km/h程度から増加する傾向があるが，急激なものではない。なお，離線の発生箇所は移行部分より後方の剛体電車線単独区間での発生が多く，剛体電車線自体の特性を改善すれば，更に良好な離線特性が得られる可能性もある。

試13号柱下の押上量（押上量①）は概ね20mm程度であり，トロリ線と剛体間の高差差である30mm以内である。また，緩和機構先端の押上量（押上量③）も同程度であり，パンタグラフが剛体に衝撃することなく，円滑な移行が行われていると考えられる。

緩和機構先端部のトロリ線ひずみであるひずみ②は，速度による増加傾向も無く，目安値である500 $\mu$ 以内である。緩和機構内部のトロリ線ひずみ（③～⑤）は，ひずみ④が最も大きい，何れも125 $\mu$ 以内であり，速度による増加傾向も殆ど無い。緩和機構内のトロリ線ひずみは，緩和部材を取り付けていることにより曲げに対する中立軸がトロリ線中心から上方に移動することが予想され，測定している小弧面上より大弧面上に大きなひずみが発生する可能性がある。

図16は，ひずみ④点で小弧面と大弧面の両方にひずみゲージを貼り，パンタグラフの押上力を変えて，各測定点で静的に押し上げた場合に発生する両者の比率を示したものである。この測定では，ひずみ測定位置直下を押し上げた場合に最大4倍程度の値が観測された。このことから，換算倍率を4とすると，大弧面上で目安値である500 $\mu$ が発生するのは，小弧面に125 $\mu$ が発生した場合に相当する。しかし，最大のひずみが発生したひずみ④点での測定値は，125 $\mu$ 以下である。また，3章での応力解析結果では，大弧面上のひずみは同一位置の緩和部材（ひずみ⑥に相当）に発生するひずみより小さい。ひずみ⑥の測定値は最大でも250 $\mu$ 程度であり，換算倍率を4とすることは過大である可能性もある。以上のことから，トロリ線に発生するひずみは今回測定した160km/h程度まで問題ないと考えられる。

緩和部材のひずみである⑥，⑦は250 $\mu$ 程度以下であり，目安値である1600 $\mu$ より十分低く問題ない。

以上のように，速度130km/h域までの特性は全て目安値以下で安定していることから，引留型の移行構造は速度130km/h域での実用化が可能であると考えられる。

なお，一般のカテナリ区間でGT170相当のトロリ線を使用する場合，速度130km/h域では14.7kN程度以上の張力が望ましいため，実用上は張力を14.7kNとすることになると考えられる。また，施工上の都合で出口側の特性は確認していないが，より条件の厳しい一体型の出

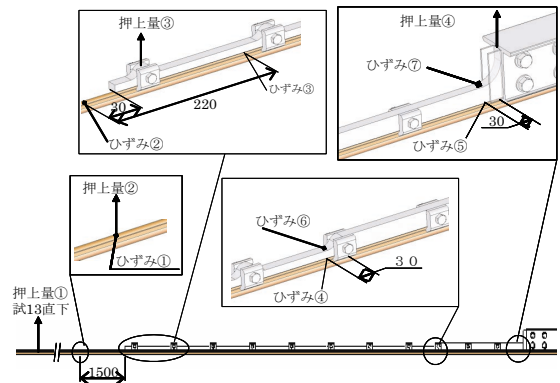


図13 測定位置概要

表6 確認項目と目安値

確認項目	目安値
最大離線時間	20ms 以下
トロリ線ひずみ	500 $\mu$ 以下
緩和部材ひずみ	1600 $\mu$ 以下
トロリ線押上量	30mm 程度以下

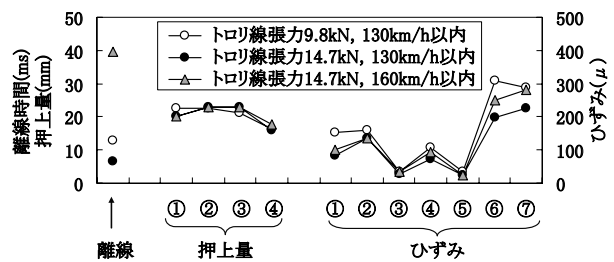


図14 引留型の測定最大値

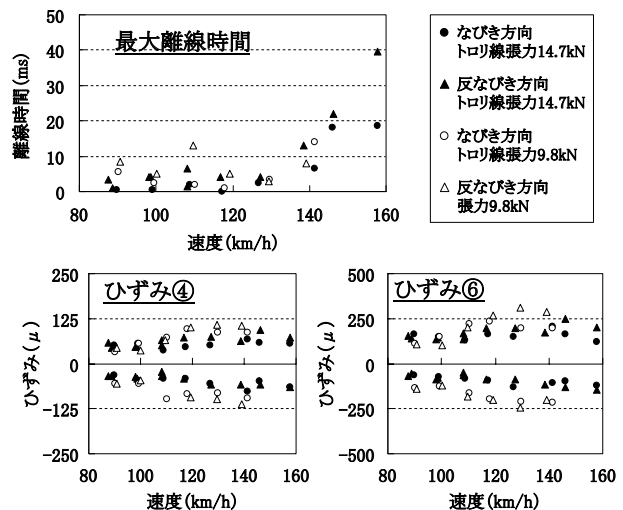


図15 引留型の速度特性

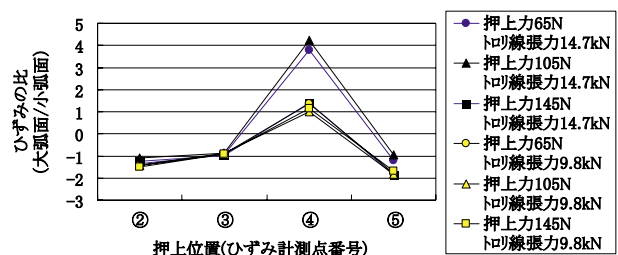


図16 小弧面と大弧面の発生ひずみ比(ひずみ④計測点)

特集：電力技術

口側の特性が問題ないことから、引留型の特性も問題ないと考えられる。

4.5 一体型の集電特性

一体型（入口側）の測定最大値を図17に、離線とひずみの速度特性を図18に示す。トロリ線張力14.7kNの条件では速度130km/hまで、9.8kNの条件では速度110km/hまでが10ms程度以下で目安値である20ms以下である。しかし、それ以上の速度で急激に増加する傾向がある。離線の発生箇所は移行部分通過直後であり、緩和機構の特性によるものであると考えられる。トロリ線押上量は引留型と同様に20～30mm以下であり問題ない。

トロリ線ひずみの最大値は測定点⑤、緩和部材の最大値は測定点⑦で発生した。トロリ線ひずみの換算倍率を引留型と同様に4とすると、ひずみ特性上は張力14.7kN

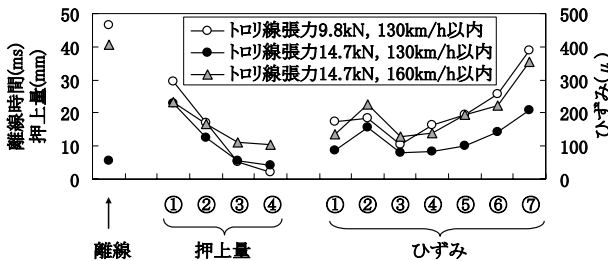


図17 一体型（入口側）の測定最大値

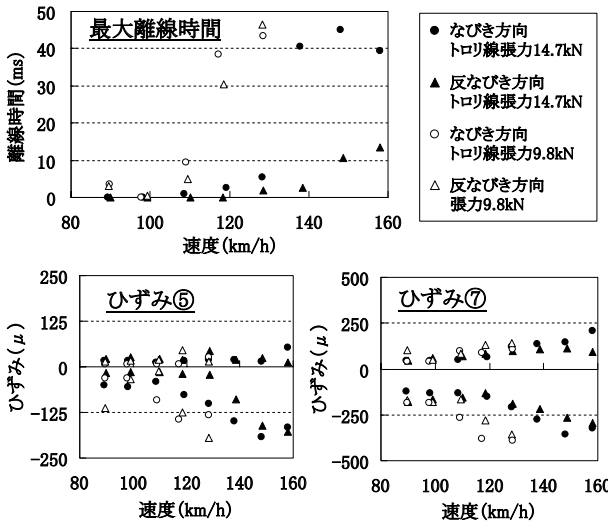


図18 一体型（入口側）の速度特性

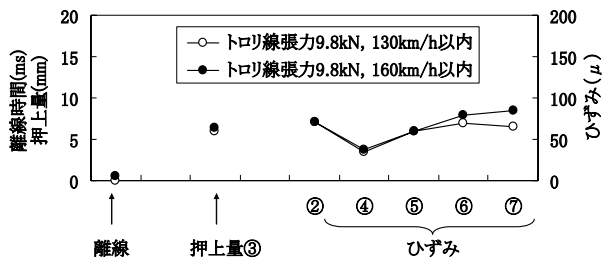


図19 一体型（出口側）の測定最大値

の条件で130km/h程度まで、9.8kNの条件では速度110km/hまでが目安値以内となる。また、緩和部材に発生するひずみは400 μ程度以下であり問題ない。

一体型（出口側）の測定最大値を図19に示す。速度160km/hまで離線は殆ど発生せず、トロリ線ひずみは50 μ程度、緩和部材ひずみは100 μ以下であり、全く問題なかった。

以上のように、離線特性、ひずみ特性の両面で、一体型の移行構造は張力14.7kNの条件で130km/h程度まで、9.8kNの条件で110km/hまで走行が可能であると考えられる。離線の増加傾向から、これにある程度余裕を見込んだ速度域で走行することが必要であるが、比較的低速域の線区では実用化できる可能性が高い。ただし、実用化に対しては、トンネル外のトロリ線を含めた温度伸縮に対する問題点の把握や、張力に対抗してトロリ線の摩耗限度をカテナリ架線より向上させるための把持構造等の検討が課題として残されている。

5. まとめ

剛体電車線をトンネル内の電車線として導入する場合に、集電特性や建設コストの面で問題となっている剛体電車線とカテナリ架線間の移行構造について、新しい構造を考案して集電試験装置により走行試験を行った。この結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 剛体電車線とカテナリ架線間の新しい移行構造を考案した。その構造は、現在30m程度必要である設備長を10m程度に短縮できる引留型と、適用は200m程度以下の直線路に限られるが更に設備長を短縮できる一体型である。
- (2) 引留型の移行構造は、速度130km/h域まで離線特性、ひずみ特性とも目安値以下で安定した走行が可能であり、実用化が可能であると考えられる。
- (3) 一体型の移行構造は、速度100km/h程度の比較的低速域の線区では実用化できる可能性が高いと考えられる。ただし、実用化に対しては、温度伸縮挙動やトロリ線摩耗限度の検討等の課題が残されている。

文献

- 1) 萬代, 他: 在来線トンネル区間への剛体電車線の適用, 鉄道総研報告, 16巻6号, pp.5-10, 2004
- 2) 萬代, 他: 高速区間におけるカテナリ架線から剛体電車線への移行構造の検討, 平成14年電気学会産業応用部門全国大会論文集, 2002
- 3) 鉄道総合技術研究所編: 電車線とパンタグラフの特性, pp.50-51, 研友社, 1993