

断面形状変更によるトロリ線疲労強度の向上

菅原 淳* 山下 主税* 白木 理倫* 光用 剛**

Improvement of Anti-fatigue Property of Contact Wire by Modifying Cross-section Shape

Atsushi SUGAHARA Chikara YAMASHITA Tadanori USUKI Takeshi MITSUMOJI

Bending strain, which occurs in contact wire with every pantograph passage, may cause fatigue of contact wire. We designed cross-section shape of contact wire which reduces this bending strain. We confirmed that this cross-section shape does not make worse galloping property (property of vertical vibration raised by a cross wind) through wind tunnel test. We also confirmed that this cross-section shape can be applied to manufacturing contact wire by high strength copper alloy through trial manufacture. Compatibility with fittings (hanger ear, double ear, termination fitting, etc.) was tested with this trial piece and no problem was found. Meaningful decrease in bending strain was observed in pantograph running test.

キーワード：トロリ線，疲労，曲げひずみ，断面形状，ギャロッピング

1. はじめに

トロリ線にはパンタグラフ通過のたびに曲げひずみが発生する。このひずみが大きいとトロリ線の疲労が問題になる。トロリ線の耐疲労性向上には材質自体の改良のほか、断面形状を変更し同一の曲げ負荷における曲げひずみを低減する方法が考えられる。後者について試作・試験を通して検討を行った。

2. トロリ線断面形状の検討

2.1 検討時の要件

整備新幹線で公称断面積 110mm^2 の高強度材トロリ線が張力 19.6kN で用いられていること¹⁾²⁾、実設備への導入のしやすさを考慮して、次の各点を要件とした。

- ①断面積は概ね 110mm^2 とする。
- ②しゅう動面側円弧部の半径はJIS E 2101「みぞ付き硬銅トロリ線」³⁾の公称断面積 110mm^2 のもの（以下GT110と略）と同じにし、試験車、電気検測車等のしゅう動面幅に基づく摩耗測定に支障ないようにする。
- ③新幹線にも適用できるように、PHCトロリ線（クロム・ジルコニウム系銅合金トロリ線）に代表される高強度銅合金でトロリ線を製作可能なこと。
- ④イヤーは既存のものが使用可能なこと。
- ⑤その他、諸特性が現用断面形状に比べ悪化しないこと。

2.2 一次案

梁の弾性変形では、曲げひずみは横断面の断面二次

* 電力技術研究部 集電管理研究室

** 鉄道力学研究部 集電力学研究室

モーメント（以下 I と略）に反比例し、中立軸から曲げ変形曲率半径方向の距離（以下 y と略）に比例する。 I/y を断面係数（以下 Z と略）といい、曲げひずみは Z に反比例する。前節の要件①および②より I を大きく変えることは難しいため、曲げひずみを小さくするためには中立軸から上面までの y を小さくすることを主眼に、断面上部の形状を検討することになる。そのとき、断面形状は自ずと上面が扁平かつ両肩部の半径が小さい「いかり肩」になる。なお、下面、すなわちしゅう動面側は、一般的なトロリ線摩耗率がパンタグラフ通過 10^4 回あたり 10^{-2}mm オーダーであり、疲労き裂発生の前段である表面のミクロな塑性変形やき裂が発生しても摩耗で除去されるので、上面を対象に検討するのは疲労に関し問題ないと考えられる。

上記の考え方を具現化し、まず図1に示す断面形状（1次案）を案出した。GT110用のイヤーではいかり肩の部分が収まらないため、JIS E 2101の公称断面積 170mm^2 のトロリ線（以下GT170と略）用のイヤーに適合することを前提に案を検討した。図1中の2点鎖線の円はイヤー溝の位置を揃えて描いたGT170の外形で、断面形状がこの円内にあることはGT170用のイヤーが取付可能である

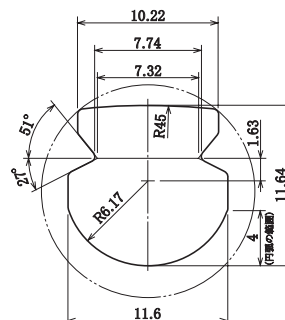


図1 断面形状一次案 断面積 111.02mm^2
(単位 mm, 指示なき R は 0.38mm)

特集：電力技術

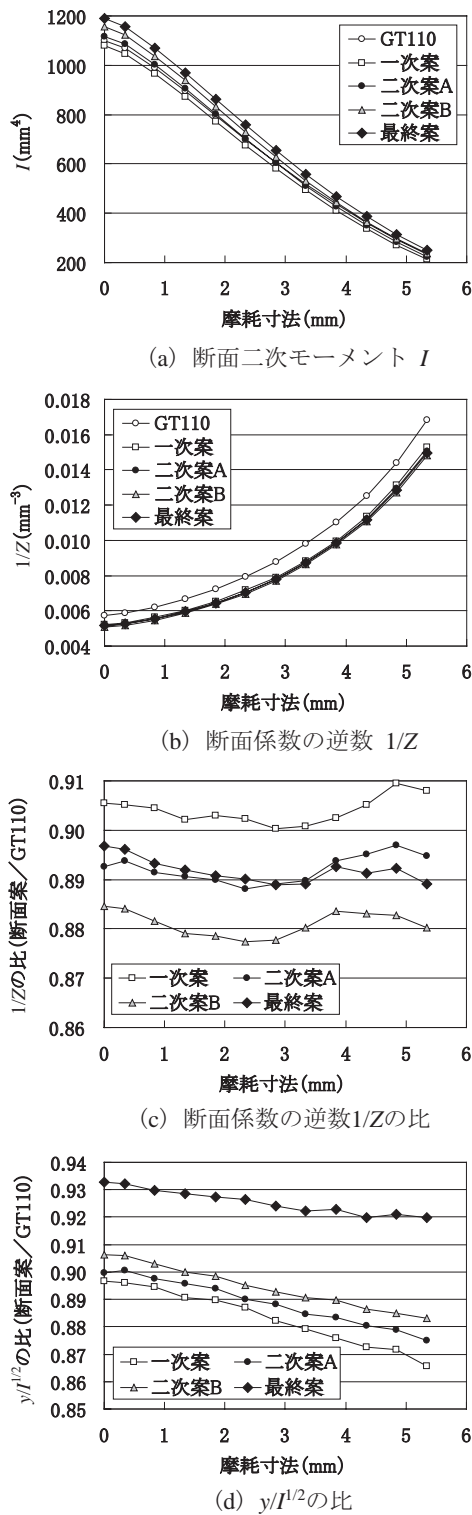


図2 断面形状案の特性

ことを意味する。イヤークの深さは把持力に問題がないよう、 51° の面の側をGT110と同じにした。

整備新幹線では前述のとおり公称断面積 110mm^2 の高強度材トロリ線を張力 19.6kN で使用している。公称断面積 110mm^2 のPHCトロリ線（以下PHC110と略）の引張荷重の仕様（ 59.0kN 以上）⁴⁾に基づけば、張力 19.6kN のもとでの摩耗限度、すなわち安全率2.2を確保できる限度の

残存直径を 0.5mm 単位で設定すると 9mm （断面積 84.96mm^2 ）であり、摩耗しろは $12.34 - 9 = 3.34\text{mm}$ である。図1の案では側面に平面部があるが、しゅう動面側円弧部の上下寸法がそれ以上あるため、材質を高強度材とし張力 19.6kN での使用を前提とすれば摩耗測定には支障しない。

一次案の摩耗寸法（＝未摩耗時の直径－残存直径）ごとの断面特性を図2に示す。同図には後述する二次案、三次案（最終案）の断面特性も併記する。(c)のグラフは $1/Z$ ベースでGT110からどの程度ひずみ低減が期待できるかを意味する。また、弾性支床上梁モデル⁵⁾によればトロリ線ひずみは y/I^2 に比例するので、 y/I^2 に関してGT110との比を(d)に示す。一次案は(c)(d)いずれに基づいてもGT110に比べ未摩耗時で10%程度ひずみが低減できると考えられる。

ただし、いかり肩の断面形状では横風の空気流が上面で剥離しやすくなり、ギャロッピングが生じやすくなる可能性がある。そこで、実物大模型を製作し、鉄道総研構内の小型低騒音風洞でギャロッピング特性を調べる試験を行った。試験では風速および横風に対する迎角 α を変えながら揚力係数 C_L と抗力係数 C_D を測定し、ギャロッピング条件式の値を式(1)により求めた。この値が負側に大きい場合にギャロッピングを生じやすいと判断される。なお迎角 α は、斜め下からの吹き上げに相当する場合が正である。

$$\text{ギャロッピング条件式の値} = C_D + \frac{dC_L}{d\alpha} \quad (1)$$

試験結果のうち風速 30m/s の場合を図3に示す。同図には後述する二次案の結果も併記する。一次案では迎角 -4° でギャロッピング条件式の値が負側に大きくなっており、断面形状に検討の余地があることが明らかになった。

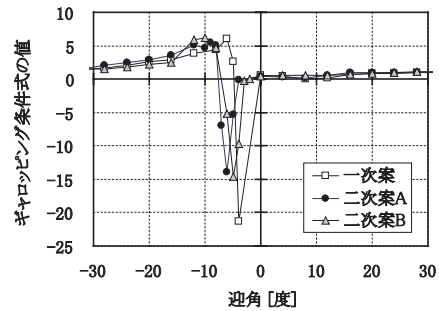


図3 一次案および二次案の風洞によるギャロッピング特性試験結果（未摩耗時、風速 30m/s ）

2.3 二次案

一次案の風洞試験結果を受けて、図4に示す二次案AおよびBを検討した。いずれも一次案より上面の半径を小さく（ 30mm ）、肩部の半径を大きくした。

二次案の断面特性を一次案と合わせて図2に示す。案Bは上下寸法が大きい分 I がやや大きくなっており（図2(a)）、 $1/Z$ ベースでのひずみ低減効果がやや大きくなっている（同(c)）。案A、案Bとも y/I^2 ベースでも未摩耗時で10%程度のひずみ低減効果が見込まれる。

二次案について一次案と同様に風洞試験を行った。その結果を一次案と合わせて図3に示す。一次案より改善は見られるものの、風速30m/sではA案は迎角 -6° 、B案は -5° でギャロッピング条件式の値が負側に大きくなっており、断面形状におお検討の余地があることが明らかになった。

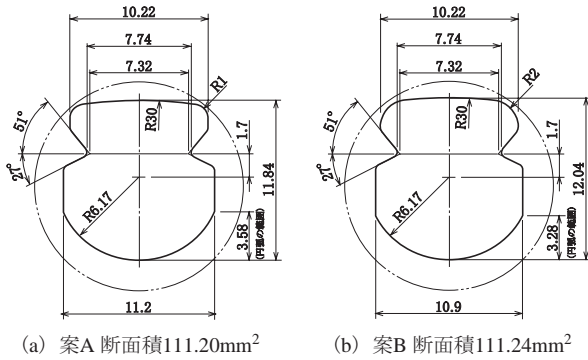


図4 断面形状二次案(単位mm, 指示なきRは0.38mm)

2.4 三次(最終)案

二次案の風洞試験結果を受けて、図5に示す三次案を検討した。本案では上面の半径を新幹線営業線への試験架設実績を有するTA トロリ線(鉄アルミニウムトロリ線)⁶⁾に倣い10mmとした。しゅう動面側円弧部の上下寸法は3.5mmで一次案(4mm)より小さいが、2.2節で述べたPHC材、張力19.6kNでの使用を想定した摩耗しろ(3.34mm)よりは大きい。上面の半径が小さい分、上下寸法を一次案、二次案より大きくせざるを得なかったため、GT110と同じ12.34mmとした。

三次案の断面特性を一次案、二次案と合わせて図2に示す。1/2ベースのひずみ低減効果は二次案Aとほぼ同じで10%をやや上回っている(図2(c))。Iは図2(a)に示す5つのうち最も大きい、yも大きくなっているため、 $y/I^{1/2}$ ベースでのひずみ低減効果は未摩耗时で7%弱とやや小さくなっている。

三次案についても風洞試験を行った。試験結果のうち風速30m/sの場合をGT110と合わせて図6に示す。未摩耗时はギャロッピング条件式の値は負とはならなかった。2.2節で述べたPHC材、張力19.6kNでの使用を想定した摩耗限度(9mm)の場合は、ギャロッピング条件式の

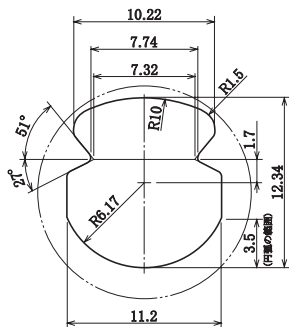


図5 断面形状三次(最終)案 断面積113.17mm²
(単位mm, 指示なきRは0.38mm)

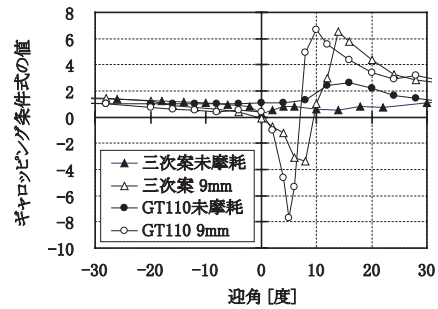


図6 三次案およびGT110の風洞によるギャロッピング特性試験結果(風速30m/s)

値は負になっているものの、GT110より絶対値は小さく、ギャロッピング特性は悪化していないことが確認された。従って、三次案を最終案としてトロリ線の試作を行った。

3. トロリ線試作と基本特性確認試験

トロリ線の試作はPHCトロリ線の材質で行い、2.1節③の要件を満足することを確認した。試作品の写真を図7に、仕様を表1に示す。試作にあたって、引張荷重、伸び、耐屈曲性、導電率はPHC110の仕様に準じることとした。

試作品を用い、次の項目について基本特性確認試験を行った。

- (1) 引張荷重・伸び試験
- (2) 振動疲労試験
- (3) ダブルイヤー接続部引張荷重試験
- (4) ハンガイヤー引張耐荷重試験
- (5) ハンガイヤー滑り耐荷重試験
- (6) ハンガイヤーねじり耐荷重試験
- (7) 圧縮引留部引張荷重試験
- (8) デッドセクション端末の振動耐久試験, 引張荷重試験



図7 トロリ線試作品

表1 試作トロリ線の仕様

計算断面積 (mm ²)	113.17
質量 (g/m)	1009 ± 2.0%
引張荷重 (kN)	59.0 以上
伸び (%)	2.0 以上
耐屈曲性 (回)	8 以上
導電率 (%)	76 以上

特集：電力技術

3.1 引張荷重・伸び試験

試験数は3とした。引張速度は試験片長500mmに対し45mm/minとし、試験片長(チャック間距離)に比例して調整した。伸びはJIS E 2101に準拠し標点間距離250mmで測定した。試験結果は表2に示すとおりで、表1の仕様を満たしていることを確認した。

表2 引張荷重・伸び試験結果

試験番号	試験片長 (mm)	引張速度 (mm/min)	引張破断荷重 (kN)		伸び (%)	
			仕様値	試験値	仕様値	試験値
1	736	66.24	59.0 以上	66.68	2.0 以上	4.4
2	728	65.52		66.37		4.4
3	726	65.34		66.68		4.4

3.2 振動疲労試験

試験の概略を図8に示す。供試トロリ線に所定の張力を加え、中央を上下に加振して加振部に所定の曲げひずみをくり返し発生させた。PHC110について既に張力14.7kNで多くの疲労データを得ていたため、試作トロリ線も張力14.7kNで試験した。加振波形は正弦波、周波数は5Hzとした。試験は供試トロリ線が疲労破断するまで行い、破断時の加振回数を疲労寿命とした。

試験結果をPHC110と合わせて図9に示す。材質自体の疲労特性はPHC110と同等であることが確認された。

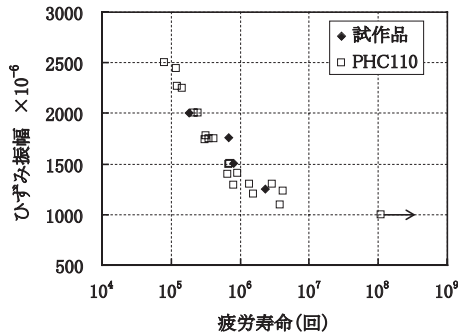
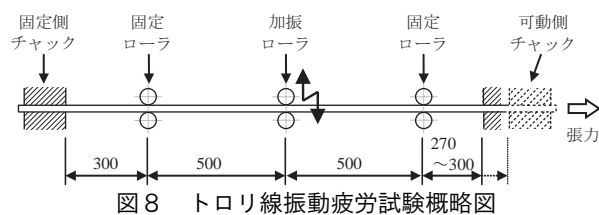


図9 振動疲労試験結果 (張力 14.7kN) (一は未破断で試験打ち切り)

3.3 ダブルイヤー接続部引張荷重試験

新しく開発したトロリ線の現地架設試験は、まず在来線において割り入れ(金具接続による部分的張替)で行うのが通例であるのに備え、ダブルイヤー接続部の引張荷重試験を行った。試験はGT110と試作品の接続部を対象とし、試験数は2とした。ダブルイヤーは両トロリ線(未摩耗品どうし)の接続を想定して特に製作したもので、1個あたりのボルト本数は2本である。

試験方法はJIS E 2201「電車線路用架線金具」⁷⁾の

JC110およびJIS E 2002「電車線路用金具試験方法」⁸⁾に準拠した。供試品はダブルイヤーを300mm間隔で2個使用し両トロリ線を接続した。チャック間距離は1000mm以上を確保した。引張耐荷重試験は20kNの張力を1分間負荷した。ただし張力8kNにおいてボルト・ナットの再締付をトルク100N・mで行った。試験後は張力を1kNまで下げた状態で滑り等の異常の確認とボルト・ナットの追い締め試験を行った。試験の結果、2試験とも滑りは認められなかった。追い締め試験ではトルク100N・mでボルト・ナットの回転は認められなかった。

引張耐荷重試験で供試品に異常が見られなかったため、最大引張荷重試験は同じ供試品をそのまま用いた。荷重負荷方法は、JIS E 2201におけるJC110の最大引張荷重値26.0kNを1分間程度負荷し、滑り等の異常の有無を観察した後、引張速度5mm/minで破壊(トロリ線破断や大規模な滑り等)に至らせ、最大荷重を調べた。試験結果は表3のとおりで、JIS E 2201におけるJC110の規定を満足した。

表3 ダブルイヤー接続部最大引張荷重試験結果

試験番号	張力 26.0kN 時の状況	最大荷重 (kN)	試験後の状況
1	滑り等の異常なし。	39.56	GT110が破断。試作品はダブルイヤーに対し約1mm滑った。
2	同上	39.56	同上

3.4 ハンガイヤー引張耐荷重試験

3.4節~3.6節の試験は本来ハンガイヤーの試験項目であるが、トロリ線断面形状変更に伴いイヤーの把持力に影響(ハンガ引張方向の抜け、トロリ線長さ方向の滑り、トロリ線長さ方向まわりにねじりを加えた場合の外れ)がないかを確認するため実施した。いずれも供試イヤーは旧JRS35303-8G-14AR6A「ハンガイヤー(新幹線用)」⁹⁾のH形(170mm²用)とし、試験数は各々3とした。

引張耐荷重試験は同JRSに準拠したが、試験時のボルト締付トルクは29.4N・mとされているところ、新幹線での現状を踏まえ34.3N・mとした。試験荷重および負荷時間は2.94kNで3分間とした。

試験では3試験とも抜けおよび外観の異常は認められなかった。ボルトをトルク34.3N・mで追い締めしたところ、1試験のみボルトがわずかに回転したが、2試験ではボルトの回転は認められなかった。

3.5 ハンガイヤー滑り耐荷重試験

滑り耐荷重試験も旧JRS35303-8G-14AR6Aに準拠した。試験荷重および負荷時間は0.98kNで3分間とした。

試験では3試験とも滑りおよび外観の異常は認められなかった。ボルトをトルク34.3N・mで追い締めしたところ、1試験のみボルトがわずかに回転したが、2試験ではボルトの回転は認められなかった。

3.6 ハンガイヤーねじり耐荷重試験

ねじり耐荷重試験も旧JRS35303-8G-14AR6Aに準拠した。試験荷重および負荷時間は24.5N・mで3分間とした。

試験では3試番ともイヤーの外れおよび外観の異常は認められなかった。ボルトをトルク34.3N・mで追い締めしたところ、1試番のみボルトがわずかに回転したが、2試番ではボルトの回転は認められなかった。

3.7 圧縮引留部引張荷重試験

新幹線ではトロリ線末端を圧縮形の引留クランプで引き留めているが、トロリ線の断面が円形でなく、かつ材質が高強度なことで圧縮部の引張強度に支障がないか確認する引張荷重試験を行った。図5の断面形状の外接円直径は13.06mmであり、GT110断面のトロリ線用の圧縮引留クランプ(内径13mm)は使用できない。そこで、図10に示す圧縮引留クランプ(内径13.7mm)を製作し試作トロリ線を圧縮固定して供試品とした。試番数は3とした。

引張耐荷重試験は旧JRS35201-10G-14AR5A「電車線路用銅接続管(スリーブ・クランプ)」¹⁰⁾を参考にした。同JRSでは引張荷重耐力値として適用電線の引張荷重の80%相当の値が示されているため、本試験でも試験荷重は試作品の引張荷重(59kN)の80%である47.2kNとし、負荷時間は3分間とした。試験の結果、3試番ともトロリ線の滑りや抜けおよび外観の異常は認められなかった。

引張耐荷重試験で供試品に異常が見られなかったため、最大引張荷重試験は同じ供試品をそのまま用いた。試験では完全な破断あるいは引き抜けによる分離には至らなかったが、圧縮内部での滑りまたはトロリ線破断による考えられる引張荷重の急激な低減を試験機が破断と判断して自動停止したため、試験機停止直前の最大荷重値を試験結果とした。その値を表4に示す。旧JRS35201-10G-14AR5Aでは最大引張荷重値は適用電線の引張荷重の95%相当の値が示されているので、本試験でも試作品の引張荷重(59kN)の95%である56.1kNを基準とすれば、3試番ともそれを上回った。

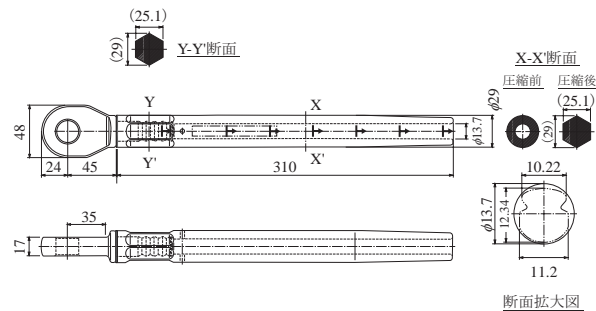


図10 試作トロリ線用圧縮引留クランプ(単位mm)

表4 圧縮引留部最大引張荷重試験結果

試番	最大荷重値(kN)
1	60.25
2	60.18
3	62.06

3.8 デッドセクション端末の振動耐久試験、引張耐荷重試験

4章に述べるように、試作トロリ線のパンタグラフ走行試験を、トロリ線に大きなひずみが発生しがちな交流異相区分デッドセクションを用いて行った。それに先立ち、セクションの端末(取付金具)と試作トロリ線が確実に固定できるか確認するため、張力を負荷した状態での振動耐久試験と、続けて引張耐荷重試験を行った。

試験に用いたデッドセクションは旧JRS35318-6E-14AR3A「セクションインシュレータ(交流20kV用FRP製)」¹¹⁾の異相用に準じたもので、次章のパンタグラフ走行試験も同様である。ただし取付金具は試作トロリ線に適合したものを特に製作した。試番数は2とした。

振動耐久試験では図11に示すように供試品を試験機に取り付けた。取付金具の押しボルト締付トルクは39.2N・mとした。供試品取付後、9.8kNの張力を負荷し、振幅が上20mm下0mm、周波数が5Hzの正弦波振動を 2×10^6 回加えた。加振終了後、試験機の張力負荷機能を用いて引張耐荷重試験を行った。試験荷重と負荷時間は旧JRS35318-6E-14AR3Aに準拠し、19.6kNで5分間とした。

引張耐荷重試験後、トロリ線と取付金具の間に滑りは認められなかった。押しボルトの追い締めを行ったところ、1試番にてボルト1本がトルク37.2N・mにてわずかに回転したが、他はトルク39.2N・mでも回転しなかった。

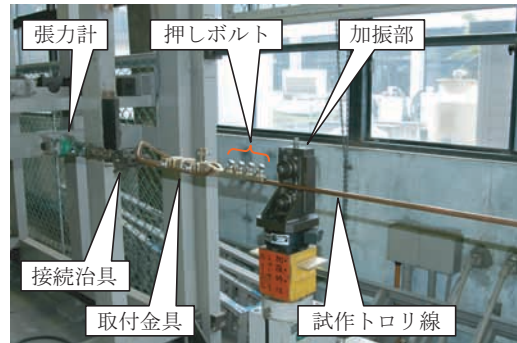


図11 デッドセクション端末振動耐久試験供試品取付状態

4. パンタグラフ走行試験

試作トロリ線のひずみ低減効果を調べるため、鉄道総研構内の集電試験装置でパンタグラフ走行試験を行った。

4.1 試験方法

試験は前述のとおりトロリ線に大きなひずみが発生しがちであることから交流異相区分デッドセクションを用いて行った。集電試験装置に常設されているシンプルカタナリ(トロリ線:GT110, ちょう架線:亜鉛めっき鋼より線90mm², 張力:各9.8kN)にデッドセクションを架設した。架設に際してひとつの径間を20mと30mに分け、20m径間の中央にデッドセクションを架設した。

特集：電力技術

GT110と試作トロリ線の両方について試験を行うため、デッドセクション前後にダブルイヤー接続を設け、接続箇所からデッドセクション前後のトロリ線を交換した。デッドセクション架設状態の概略を図12に示す。なお、デッドセクションの架設状態に左右の傾きがあるとパンタグラフとアークホーン（図13）の間で衝撃が生じ、トロリ線ひずみに影響する可能性があるため、特に傾きに留意するとともに、アークホーン有無の両条件で試験を行った。パンタグラフはシングルアーム形のPS32形を使用し、走行方向は反なびき（←→）、静押上力は54Nとした。

4.2 試験結果

デッドセクション20cm手前のトロリ線ひずみ測定結果（ひずみ波形の正負ピーク値）を図14に示す。アークホーンありの方がひずみがやや大きいのは前述の衝撃およびアークホーンの質量の影響と考えられる。試作トロリ線とGT110の比較では、高速域（概ね100km/h以上）において正側のひずみに有意差が見られ、試作トロリ線の方が小さかった。ただし、測定結果のばらつきが少なからずある。デッドセクションは局所的に質量が大きくパンタグラフ通過時の挙動が一般のカテナリ区間に比べ複雑であること、また、架設状態、いわゆる造り込みの差によってパンタグラフ通過時の衝撃に差が生じ、トロリ線ひずみに影響が及んだ可能性が考えられる。ただし一般のカテナリ区間でも測定結果にばらつきは生じ得るので、約10%のひずみ低減効果を調べるには、同一条件に対してさらにデータを多く取得し、平均値や標準偏差に基づいて結果を評価する必要があると考えられる。

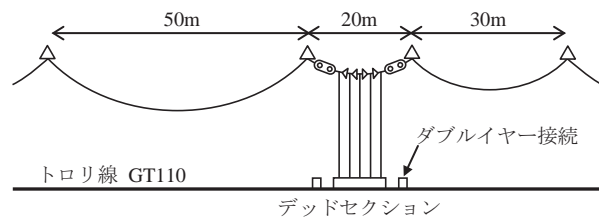
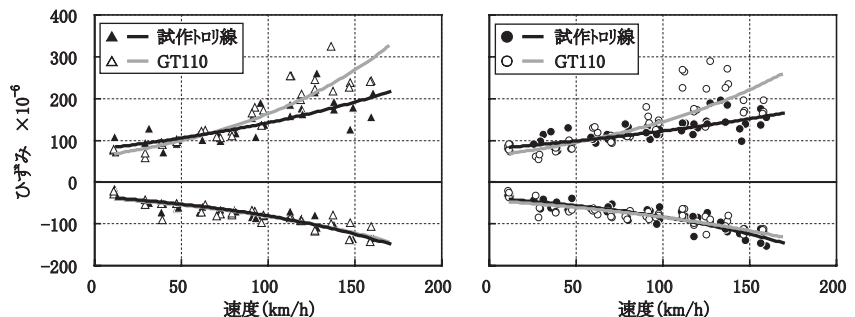


図12 パンタグラフ走行試験におけるデッドセクション架設状態概略図



図13 デッドセクション端部のアークホーン



(a) アークホーンあり (b) アークホーンなし
図14 トロリ線ひずみ測定結果（デッドセクション20cm手前）

5. まとめ

トロリ線の断面形状を変更することにより曲げひずみを低減し、耐疲労性を向上する方法について試作・試験を通して検討を行った。その結果得られた断面形状はGT110断面に比べギャロッピング特性は悪化せず、PHCトロリ線の材質でトロリ線を製作可能であることが確認された。電車線金具類との適合性に問題は見出されず、パンタグラフ走行試験ではGT110に比べひずみが有意に低減している測定結果が得られた。

文献

- 1) 金子誠：北陸新幹線の高速度シンプル架線，鉄道と電気技術，Vol. 7, No. 12, pp. 9-13, 1996
- 2) 小谷野昭一，鹿島節，早川隆，谷口俊彦，金子利美，松岡利彦：東北新幹線（八戸～新青森）の電気設備，鉄道と電気技術，Vol. 21, No. 10, pp. 16-22, 2010
- 3) JIS E 2101 「みぞ付き硬銅トロリ線」，1990
- 4) 長俊之，大戸路暁，細川浩一，橋本幸治，林隆行：整備新幹線向け析出強化型銅合金トロリ線，三菱電線工業時報，105号，pp.42～45，2008
- 5) 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，pp.58～64，1993
- 6) 藤井保和，大浦泰，下前哲夫，伊藤貞夫：TAトロリ線の各種試験結果，電気学会交通・電気鉄道研究会資料，TER-91-12，1991
- 7) JIS E 2201 「電車線路用架線金具」，2002
- 8) JIS E 2002 「電車線路用金具試験方法」，2001
- 9) JRS35303-8G-14AR6A「ハンガイヤー（新幹線用）」，1986
- 10) JRS35201-10G-14AR5A「電車線路用銅接続管（スリーブ・クランプ）」，1985
- 11) JRS35318-6E-14AR3A「セクションインシュレータ（交流20kV用FRP製）」，1983