

トロリ線の疲労破断を防止する

菅原 淳

電力技術研究部(集電管理 研究室長)



すがはら あつし

はじめに

電車や電気機関車に電力を供給するため、線路の上方には架線が張られています。架線を構成する線材のうち、直接パンタグラフとしゅう動(摩擦)する線をトロリ線といいます。一方パンタグラフは、確実に電力を車両に取り込むため、ある程度の押し付け力でトロリ線と接触しています。日本の場合、押し付け力を停車状態で54N(1N=0.102kg)に調整するのが標準的です。

このようにトロリ線はパンタグラフから決して小さくない押し付け力を受けますから、パンタグラフが通過するたびにトロリ線には曲げひずみが発生します。図1はそのイメージです。列車のスピードアップ等に伴ってこのひずみが大きくなるとトロリ線が疲労で破断してしまい、長時間の運休を余儀なくされるおそれがあります。本記事では、トロリ線疲労破断防止のための取り組みを紹介します。

トロリ線ひずみの実測

トロリ線の疲労破断を防ぐためには、実際のトロリ線でのどの程度のひずみが発生しているかを把握することが必要です。そこで、スピードアップしても大丈夫かを確認するための走行試験(速度向上試験)などの際に、トロリ線ひずみの実測を行います。

ひずみの測定には「ひずみゲージ」というセンサが広く用いられています(図2)。これは、樹脂フィルムでできたベースの上に金属の箔などで電気抵抗線のパターンを形作ったもので、測定対象物に接着剤で貼り付けて使用しま

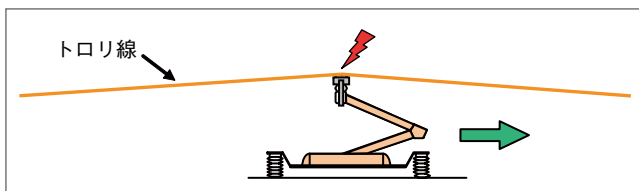


図1 パンタグラフ通過に伴うトロリ線曲げひずみ発生イメージ

す。測定対象物の伸び縮みに伴ってひずみゲージも伸び縮みし電気抵抗が増減するので、この抵抗の変化を検出してひずみを測定します。ひずみゲージをトロリ線に貼り付けた様子を図2にあわせて示します。

架線には高い電圧が加わっているので、ひずみ測定用の電線を直接地上まで引くことができません。そこで、トロリ線のひずみなど架線まわりの測定を行う場合は、無線で測定信号を伝送するテレメータという装置を用います。図3はテレメータの送信機を架線に取り付けた状態です。ひ

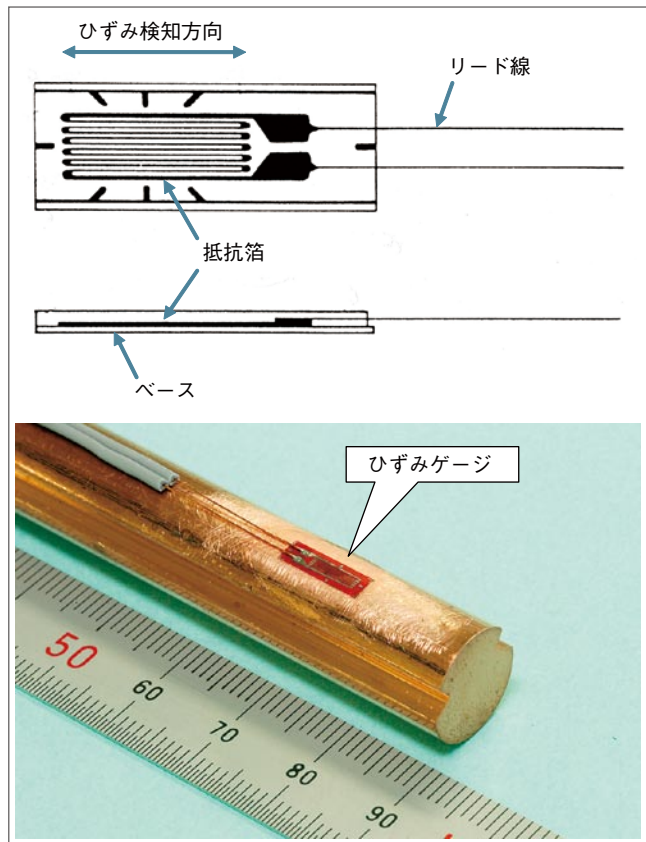


図2 ひずみゲージ(下段はトロリ線に貼り付けた様子の説明写真)

ずみゲージなどのセンサやテレメータ装置の取り付けは、終列車から初列車の間の停電時間帯を利用して行います。

棒などが曲げ変形した場合、曲がりの外側には引っ張り(+)のひずみが、内側には圧縮(-)のひずみが発生します。トロリ線では図2のように上面にひずみゲージを貼って測定しているので、図4に示すようにパンタグラフ通過の瞬間に鋭い+方向のピークを持つ波形が測定されるのが一般的です。なお、縦軸にある「 $\times 10^6$ 」とは百万分の一の意味で、実際に発生するひずみの値(寸法の伸縮率)は非常に小さいものです。

材料の疲労特性

材料の疲労破壊を防ぐためには、その材料の疲労寿命特性を把握することが必要です。つまり、その材料に力またはひずみが何回負荷されたら破壊するかを、さまざまな大きさの力またはひずみについてあらかじめ調べます。疲労寿命特性をグラフに表す場合、縦軸にくり返し加える力またはひずみの大きさ(振幅)、横軸に疲労寿命、即ち破壊までの負荷回数を取ります。鉄鋼と非鉄金属では一般にグラフは図5のようになります。縦軸にある「応力」とは、材料に加わっている力を単位面積あたりに換算したものです。応力やひずみの振幅が大きいほど疲労寿命は短いです

から、グラフは右肩下がりになります。鉄鋼の場合、ある振幅以下では疲労破壊は生じず、従ってグラフは途中から水平になります。この振幅を疲労限度といいます。一方、非鉄金属(銅やアルミニウムなど)は明確な疲労限度を示しませんが、実用上十分な疲労寿命に対応する振幅を疲労限度と見なすことがあります。トロリ線の場合は1,000万回を見込んでおけば疲労より先に摩耗(すり減り)で寿命に至ることはほぼ間違いありません。

トロリ線ひずみ目安値の設定

トロリ線ひずみの実測については既に述べましたが、測定結果を評価するためには、ひずみがどの程度以下なら疲労の心配がないか、即ち目安値を設定する必要があります。

ところでトロリ線は9.8kN(1t)ないし19.6kN(2t)の張力で架設されており、(張力÷断面積)に相当する平均の引っ張り応力が常に加わっています。平均引張応力が加わる場合、疲労限度は小さく、疲労寿命は短くなるので、トロリ線ではこの点を考慮しなければなりません。疲労限度に及ぼす平均引張応力の影響については、平均引張応力の増大に伴って疲労限度は直線的に小さくなるという経験的法則があります。そこで、トロリ線のひずみ目安値設定にあたってはこの考え方を適用しています。

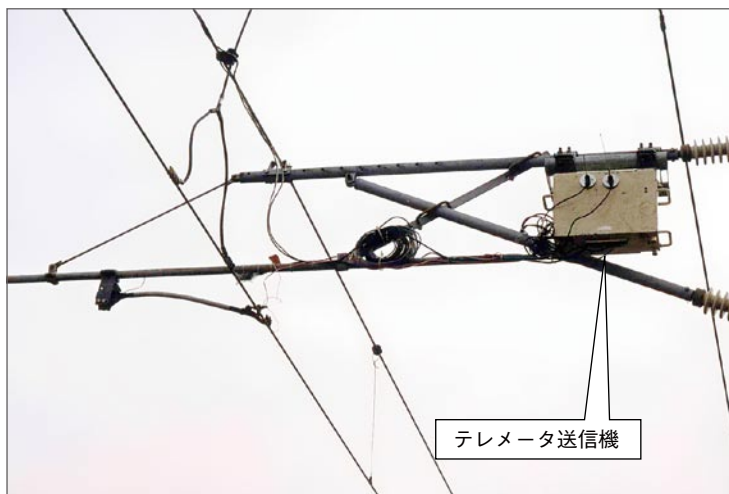


図3 テレメータの取付状態

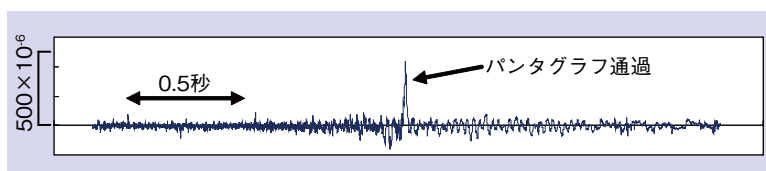


図4 トロリ線ひずみ波形例

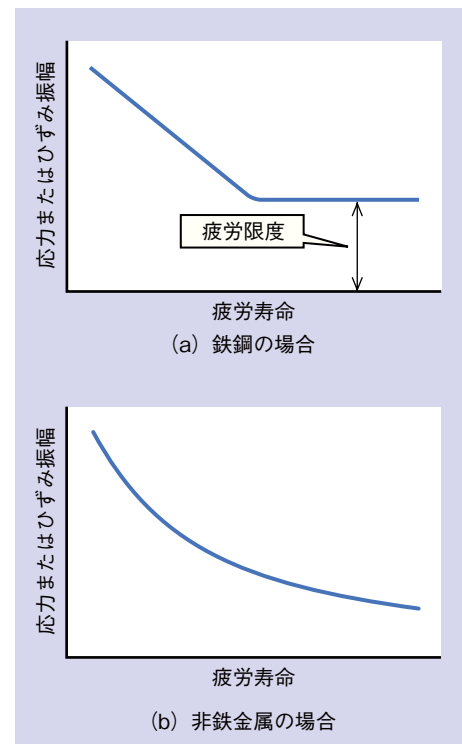


図5 鉄鋼と非鉄金属の疲労寿命特性

表1 硬銅トリリ線(公称断面積110mm²)の断面積と平均引張応力

残存寸法 (mm)	断面積 (mm ²)	平均引張応力 (MPa)	
		張力9.8kN	張力14.7kN
12.34 (新品)	111.1	88.2	132.3
12.0	110.18	88.9	133.4
11.0	104.08	94.2	141.2
10.5	99.96	98.0	147.1
10.0	95.33	102.8	154.2
9.5	90.31	108.5	162.8
9.0	84.97	115.3	173.0
8.0	73.56	133.2	199.8
7.5	67.60	145.0	217.5
7.0	61.53	159.3	238.9

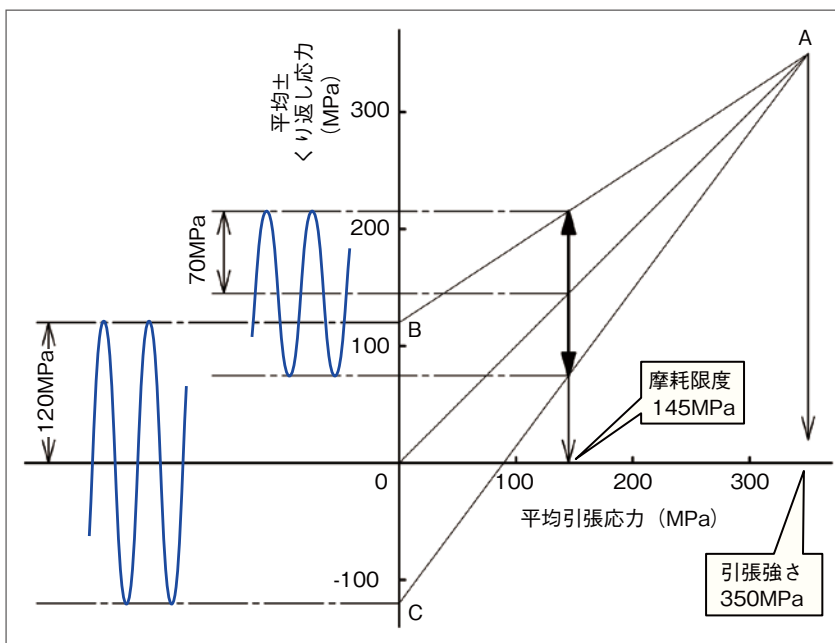


図6 硬銅トリリ線のひずみ目安値の設定

図6はそれを図に示したもので、横軸に平均引張応力、縦軸に平均±くり返し応力を取っています。最も一般的なトリリ線の材料は硬銅、つまり純銅を加工硬化という方法によって強度を高めたものですが、硬銅を単純に引っ張って破壊したときの強さを350MPaとします。MPaとは応力の単位で、1mm²の面積に1Nの力が加わっていることに相当します。材料にその引張強さと同じ応力が加わると、くり返し応力が作用するまでもなく破壊してしまいます。つまり硬銅の場合、平均引張応力350MPaでの疲労限度はゼロです。一方、平均引張応力がゼロの場合の疲労限度を120MPaとします。すると、前に述べた経験的法則は三角形ABCで示されます。

平均引張応力は実用上考え得る最も大きい場合、つまり摩耗限度を想定しておけば、実測値を評価する上では安全側の判断が得られます。最も広く用いられている公称断面積110mm²の硬銅トリリ線(新品の断面積は111.1mm²)を張力9.8kNで架設する場合の摩耗限度は7.5mmとされており、このときの平均引張応力は表1に示すように145MPaです。図6の横軸145MPaの位置に縦線を引くと、その線が三角形ABCを横切る長さから疲労限度は70MPaと求まります。これに若干の余裕を見込んで60MPaとします。応力とひずみは比例関係にあると見なし、既にわかっている両者の関係を用いて60MPaをひずみに換算すると500×10⁻⁶となります。この値をトリリ線のひずみ目安値として実測値の評価を行っています。

トリリ線の疲労評価に関する課題

前節で述べたように実測値評価のためトリリ線ひずみ目安値が設定されていますが、課題がないわけではありません。そのうちふたつの例を紹介します。

1点目は、実測の結果目安値を超えるひずみが測定され、対策を講じても目安値以内に抑えきれない場合、疲労寿命管理、つまり疲労で寿命に至る前にトリリ線を交換しなければなりません、その参考となる疲労データが必要です。そこで我々鉄道総研で、硬銅トリリ線の疲労試験を摩耗限度相当の条件で行ってデータを得ています。

試験は図7に概略を示す装置で行いました。トリリ線を装置に取り付けて所定の張力を加え、その中央を上下に加振してくり返し曲げひずみを与えます。トリリ線の摩耗限度は引張強さ自体に対して2.2倍以上の余裕があるように設定されます。公称断面積110mm²の硬銅トリリ線を張力9.8kNで架設する場合の摩耗限度が7.5mmであることは既に述べましたが、張力を14.7kNにした場合は、残存寸法0.5mm刻みで考えると表1にあわせて示したように10mmになります。このときの平均引張応力は154.2MPaで9.8kN、7.5mmの場合に比べ若干条件が厳しくなります。試験には新品のトリリ線を10mmまで切削加工して供しました。

試験結果を図8に示します。なお横軸の10⁴は1万回、以下10万回、100万回、1,000万回、1億回を表します。

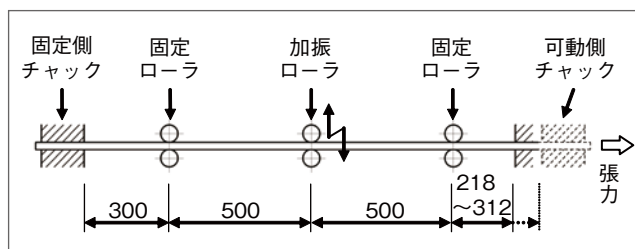


図7 トリリ線疲労試験装置概略

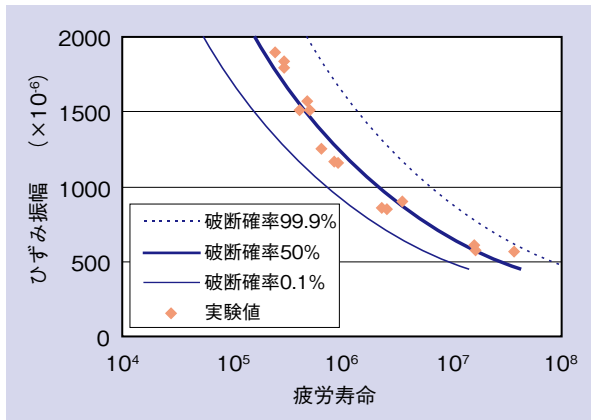


図8 硬銅トリ線疲労試験結果

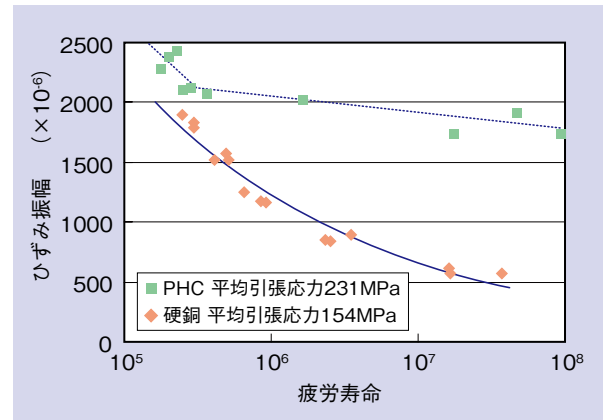


図9 PHCトリ線疲労試験結果

表2 PHCトリ線の特
性
(公称断面積110mm²での比較)

	引張破断荷重 (kN)	電気抵抗 (Ω/km)
PHC (高強度型)	59.0以上	0.159以下
硬銅	38.2以上	0.204以下

表3 PHCトリ線(高強度型、公称断面積110mm²)
の断面積と平均引張応力(張力19.6kN)

残存寸法 (mm)	断面積 (mm ²)	引張破断荷重 (kN)	引張強さ (MPa)	許容 応力 (MPa)	平均引張応力 (MPa)
12.34	111.1	≥59.0	531	531 ÷ 2.2 = 241	176.4
12.0	110.18				177.9
11.0	104.08				188.3
10.0	95.33				205.6
9.5	90.31				217.0
9.0	84.97				230.7
8.5	79.37				246.9

試験ではデータのばらつきは避けられませんが、図8では全15試番のデータから求めた近似線を疲労破断確率50%を表す線とし、この線に対するデータのばらつきに基づいて破断確率0.1%と99.9%を表す線も描いてみました(厳密には、極めて低い、または高い確率について議論するにはもっと多くのデータが必要です)。疲労試験によって、ひずみ振幅 500×10^6 を超える場合の疲労寿命管理の参考にできる疲労寿命特性を得ることができました。また、ひずみ目安値を 500×10^6 と設定した考え方は先ほど述べたとおりですが、疲労試験を行った結果でも、 500×10^6 とは1,000万回加振したときの破断確率が0.1%である振幅と解釈することができ、妥当といえることが確認できました。

もう1点は高強度のトリ線についてです。新幹線のスピードアップに対応するにはトリ線を強い張力で架設する必要があるため、強度の高い銅合金トリ線が開発されています。ところが先に述べた 500×10^6 というひずみ目

安値は硬銅トリ線の特に基づいて設定されたものであり、高強度トリ線にも同じ目安値を適用しなくてはならないのかということです。

高強度銅合金トリ線のひとつにPHCトリ線があります。これは、銅に対して微量のクロムとジルコニウムという金属を添加した合金をトリ線に適用したもので、表2に示すように強度が大幅に向上している一方、電気抵抗の増大は比較的軽微であり、今後の実用化が目されています。そこで、このPHCトリ線についても試験を行って疲労寿命特性を調べました。

試験装置は図7と同様です。残存寸法と張力の条件はやはり摩耗限度相当としました。引張破断荷重が59.0kNなので応力としての引張強さは531MPaです。引張強さ自体に対する余裕を2.2倍以上確保するのはPHCトリ線でも同様なので、平均引張応力が $531 \div 2.2 = 241$ MPaを超えないように摩耗限度を設定します。PHCトリ線は高強度なので張力19.6kNでの架設を想定すると、摩耗限度は表3より9.0mmとなります。

試験結果を図9に示します。データ数は必ずしも十分ではありませんが、強度の向上に伴って耐疲労性も硬銅トリ線に比べ大幅に向上しており、ひずみ目安値を 500×10^6 より大きくしてもよいのではないかと考えられます。ただし、十分な試番数の疲労試験を行って疲労寿命特性を的確に把握しておくことが前提であるのはいまでもありません。

おわりに

架線は車両や施設などの鉄道を構成する要素の中でも目が向きにくい部分だと思いますが、今回ご紹介したような取り組みがあることを少しでも知って頂ければ幸いです。なお今後は、疲労寿命に及ぼすひずみ波形の影響についても検討を進める予定です。RRR