

トロリ線の疲労特性評価

電力技術研究部 集電管理
研究室長 菅原 淳

1 はじめに

トロリ線には図1にイメージを示すように、パンタグラフ通過のたびに曲げひずみが発生する。トロリ線のひずみは列車速度が高くなるに伴って大きくなる傾向があるほか、デッドセクション直近など特殊箇所で大きなひずみが生じることがある。大きなひずみがくり返し加わると、最悪の場合トロリ線が疲労で破断する。こうしたことから速度向上試験等においてひずみの実測がしばしば行われる。トロリ線ひずみの波形例を図2に示す。一方、測定結果の評価のためにひずみの目安値を設定しているほか、必要に応じて実際にトロリ線材料の疲労試験を行って疲労特性を把握することがある。本発表ではそのようなトロリ線材料の疲労特性評価について紹介する。

2 トロリ線ひずみ目安値の設定

本章ではトロリ線ひずみ実測結果を評価するための目安値設定の考え方を紹介する。

鉄鋼および非鉄金属の疲労特性の概略を図3に示す。くり返し負荷する応力やひずみの振幅が大きいほど疲労寿命は短い、即ち疲労破壊までの負荷回数は少ないのでグラフは右下がりになるが、鉄鋼は一般にある振幅以下では疲労破壊は生じず、グラフは途中から水平になる。この振幅を疲労限度という。非鉄金属は明確な疲労限度を示さないが、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る。トロリ線のひずみ波形は図2のようなものなので、1回のパンタグラフ通過が1回の加振に相当すると見なせば、 10^7 回を見込めばほぼ確実に疲労より先に摩耗で寿命に至るので十分である。

ところで、トロリ線には(張力÷断面積)に相当する平均引張応力が常に加わっているため、その影響を考慮する必要がある。重畳する平均引張応力が大きいほど疲労限度は小さく、疲労寿命は短くなる。ひずみ実測結果を評価するための目安値設定にあたっては、考え得る範囲で厳しい条件を想定した方が評価結果は安全側になる。実用上、平均引張応力が最大となるのは摩耗限度である。最も広く用いられている公称断面積 110mm^2 の硬銅トロリ線の摩耗限度は残存直径

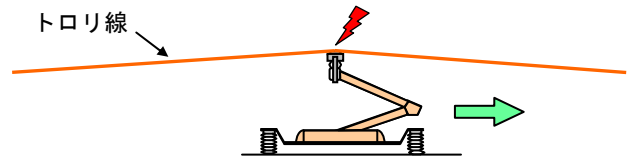


図1 パンタグラフ通過に伴うトロリ線曲げひずみ発生イメージ

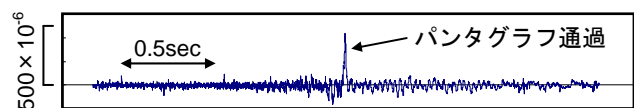
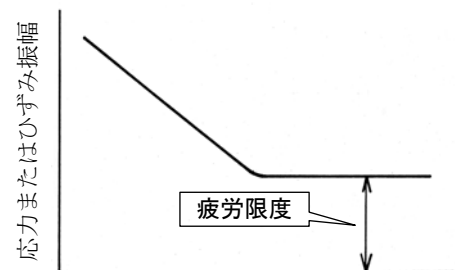
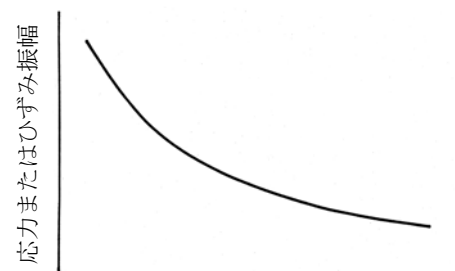


図2 トロリ線ひずみ波形例(上面で測定)



(a) 鉄鋼の場合



(b) 非鉄金属の場合

図3 鉄鋼と非鉄金属の疲労特性

7.5mm(残存断面積67.6mm²)である。そこに張力9.8kN(1tf)が加わった場合の平均引張応力は145MPaである。一方、疲労限度は平均引張応力の増大に伴って直線的に低減するという経験的法則がある。それを図にしたのが図4である。同図は横軸に平均引張応力、縦軸に(平均±くり返し応力)を取り、硬銅の応力ベースの引張強さを350MPa、平均引張応力0における疲労限度を120MPaとして描いている。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する。即ち疲労限度は0である。従って前述の経験的法則は三角形ABCで表される。図4の横軸の145MPa、即ち摩耗限度における平均引張応力の位置に垂直線を引くと、この線が疲労限度を示す三角形ABCを横切る長さは70MPaと求まる。これに種々の不確定要素(経年による電車線高さ等の変形やトロリ線の表面劣化等)に対する余裕を見込んで60MPaとし、さらに硬銅のヤング率を 1.2×10^5 MPaとしてひずみに換算すると 500×10^{-6} となる。これを疲労に対するトロリ線ひずみの目安値としている。

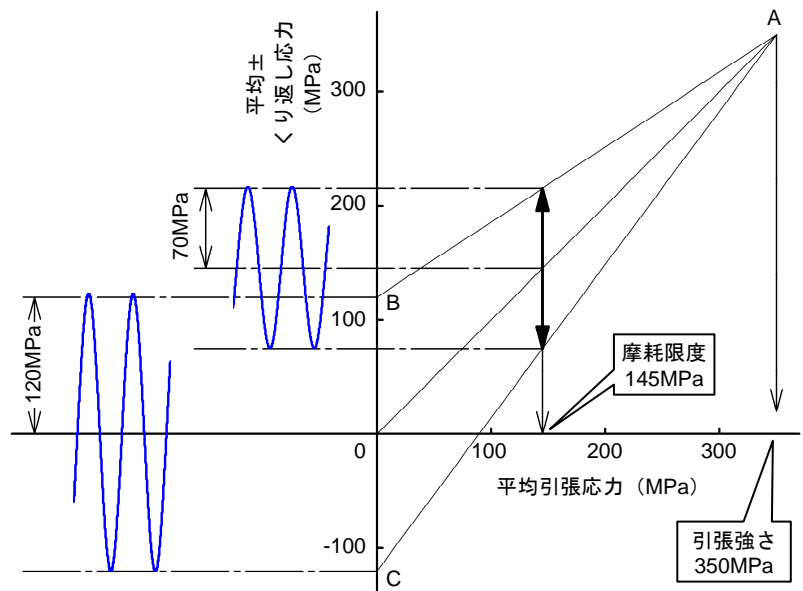


図4 硬銅トロリ線のひずみ目安値設定の考え方

図4の横軸の145MPa、即ち摩耗限度における平均引張応力の位置に垂直線を引くと、この線が疲労限度を示す三角形ABCを横切る長さは70MPaと求まる。これに種々の不確定要素(経年による電車線高さ等の変形やトロリ線の表面劣化等)に対する余裕を見込んで60MPaとし、さらに硬銅のヤング率を 1.2×10^5 MPaとしてひずみに換算すると 500×10^{-6} となる。これを疲労に対するトロリ線ひずみの目安値としている。

3 試験によるトロリ線疲労特性の把握

3.1 硬銅トロリ線

2章で紹介したひずみ目安値設定の考え方は疲労限度に関するものである。一方、実測において目安値を超えるひずみが測定され、対策を講じてもひずみを目安値以下に抑えきれない場合、累積通過パンタグラフ数に基づいてトロリ線の疲労寿命管理を行うよりどこが必要である。そこで、筆者が属するグループで硬銅トロリ線110mm²の疲労試験を摩耗限度を模擬した条件で行って疲労特性を直接求めた例を紹介する。

試験装置の概略を図5に示す。トロリ線供試体を試験装置に取り付け、所定の張力を加えた上で中心を上下に加振して所定の曲げひずみを与える。振幅の設定は加振部の小弧面にひずみゲージを貼付し、その出力に基づいて行った。加振波形は正弦波、周波数は5Hzとした。

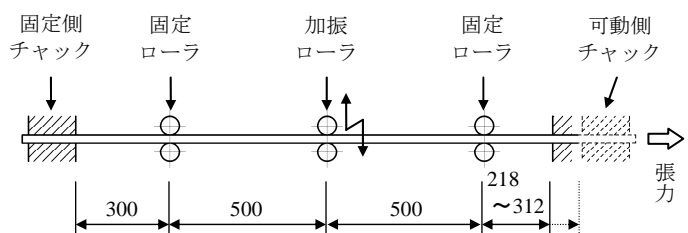


図5 トロリ線疲労試験装置概略

表1 硬銅トロリ線110mm²のさまざまな残存直径における平均引張応力

残存直径 (mm)	断面積 (mm ²)	引張荷重 (kN)	引張強さ (MPa)	平均引張応力許容値 (MPa)	平均引張応力 (MPa)	
					張力 9.8kN	張力 14.7kN
12.34	111.1	≥38.2	$38.2 \times 10^3 \div 111.1 = \underline{344}$	$344 \div 2.2 = \underline{156}$	88.2	132
12.0	110.18				88.9	133
11.5	107.57				91.1	137
11.0	104.08				94.2	141
10.5	99.96				98.0	147
10.0	95.33				103	154
9.5	90.31				109	163
9.0	84.97				115	173
8.5	79.37				124	185
8.0	73.56				133	200
7.5	67.60				145	218
7.0	61.53				159	239

表1は硬銅トロリ線110mm²のさまざまな残存直径における平均引張応力を示したものである。

引張荷重(破断荷重)はJIS E 2101「みぞ付き硬銅トロリ線」の規定が38.2kN以上なので、これを新品時の断面積で除した値を応力ベースの引張強さとすれば344MPa、さらに架設張力に対する安全率を2.2とすれば平均引張応力の許容値は156MPaである。平均引張応力がこの許容値を超えない限度を摩耗限度とすれば、残存直径0.5mm単位でいえば張力9.8kNに対しては7.5mmで先に述べた値どおりである。一方、張力を14.7kN(1.5tf)とした場合、摩耗限度は10.0mmとなる。このときの平均引張応力は154MPaで、張力9.8kN、残存直径7.5mmの場合(145MPa)よりやや大きく、疲労に対してはわずかだが条件が厳しいことになる。そこで、疲労試験は新品を残存直径10.0mmに切削加工し、張力14.7kNで行った。

試験結果を図6に示す。実験値から疲労寿命の対数 $\log N$ の残差二乗和が最小となるように、つまり最小二乗法で両対数近似式を求め、これを破断確率50%の推定線とした。さらに、この近似式に対する標準偏差の推定値 $\hat{\sigma}(\log N)$ を求め、あえて $\pm 3.09\hat{\sigma}$ 、即ち破断確率0.1%と99.9%の推定線も図6に書き加えてある(ただし厳密には、非常に低い、または高い破断確率の推定には多くのデータが必要であり、その数は破断確率5~95%に対しては14程度、1~99%に対しては70程度である)。トロリ線ひずみが目安値 500×10^{-6} 以内に収まらない場合は、破断確率0.1%の線を参考に累積通過パンタグラフ数に基づき疲労寿命管理を行えば、トロリ線破断のおそれは小さいと考えられる。また 500×10^{-6} は、摩耗限度において 10^7 回の加振を受けた場合の疲労破断確率が0.1%であるひずみ振幅と見なすことができ、妥当性が実験的に確認されたといえる。

3.2 GT-SN-Wトロリ線

GT-SN-Wトロリ線は新幹線における高速運転に対応すべく、すず入り銅トロリ線(GT-SNトロリ線)をベースに開発された高強度銅合金トロリ線である。その特性を表2に示す。旧国鉄では規格化され、現在も広く普及しているGT-SNトロリ線は銅に対してすずを0.3%添加した合金を用いているが、GT-SN-Wトロリ線ではすずの割合を0.35%に増し、加工度も増して強度の向上を図っており、開発のねらいどおり新幹線の高速区間等に適用されている。しかし、その疲労特性はこれまで必ずしも詳細に調べられていなかったため、疲労試験を行って疲労特性を直接求めた。

試験装置は前節の硬銅トロリ線の場合と同じである。張力と残存直径の条件は摩耗限度を模擬した。GT-SN-Wトロリ線は高強度なので、公称断面積 170mm^2 のものに対し架設張力19.6kN(2tf)を想定した。張力19.6kNにおけるさまざまな残存直径と平均引張応力の対応を表3に示す。引張荷

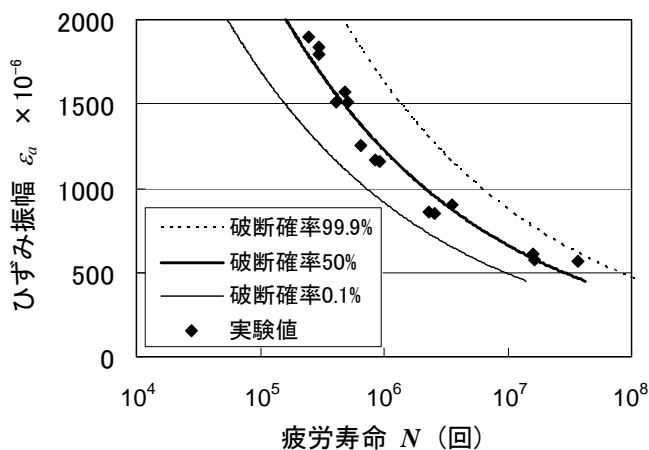


図6 硬銅トロリ線疲労試験結果

表2 GT-SN-Wトロリ線の特性(170mm²)

	GT-SN-W	GT-SN	GT
断面積(mm ²)	169.7	169.4	170.0
線密度(g/m)	1509	1506	1511
引張荷重(kN)※	74.5	58.8	57.8
導電率(%)※	70	70	97.5

※は規格上または仕様上の最小値

表3 GT-SN-Wトロリ線170mm²のさまざまな残存直径における平均引張応力

残存直径(mm)	断面積(mm ²)	引張強さ(MPa)	平均引張応力許容値(MPa)	平均引張応力(MPa) (張力19.6kN時)
15.49	169.7	$74.5 \times 10^3 \div 169.7 = 439$	$439 \div 2.2 = 200$	115
15.0	167.9			117
14.0	160.4			122
13.0	150.1			131
12.0	137.9			142
11.0	124.4			158
10.5	117.2			167
10.0	109.9			178
9.5	102.4			191
9.0	94.8			207

重の仕様上の最小値は74.5kNなので、これを新品時の断面積で除した値を応力ベースの引張強さとすれば439MPa、さらに安全率2.2で除すれば平均引張応力の許容値は200MPaなので、摩耗限度を残存直径0.5mm単位で設定するならば9.5mmである。そこで、疲労試験は新品を残存直径9.5mmに切削加工し、張力19.6kNで行った。

試験結果を図7に示す。プロット点に右矢印があるのは未破断のまま試験を打ち切ったことを示す。併記した硬銅トロリ線の疲労試験結果と比べるとGT-SN-Wトロリ線の耐疲労性は若干向上しているが、一般に耐疲労性は引張強度等の静的強度と相関があるので、そのあらわれと考えられる。

改めてGT-SN-Wトロリ線の疲労試験結果を見ると、疲労寿命200万回を境に短寿命側と長寿命側に分けてデータを整理するのが適当と考えられる。以降、前者をA群、後者をB群と称する。A群については疲労寿命の対数 $\log N$ に対して最小二乗法で片対数近似式を求め、これを破断確率50%の推定線とした。一方B群については $\log N$ に対して最小二乗法を用いても適切な近似式が求まらないので、ひずみ振幅 ε_a に対して最小二乗法を用いて片対数近似式を求め破断確率50%の推定線とした。さらに $\log N$ 、 ε_a それぞれの標準偏差の推定値 $\hat{\sigma}(\log N)$ 、 $\hat{\sigma}(\varepsilon_a)$ を求め、限られたデータ数からではあるが $\pm 3.09\hat{\sigma}$ 、即ち破断確率0.1%と99.9%の推定線を求めた。疲労試験結果にこれらの破断確率推定線を併記したものを図8に示す。B群から求めた長寿命域の破断確率0.1%の推定線が疲労寿命 10^7 回と交差する点のひずみ振幅は 728×10^{-6} である。2章で述べたように通過パンタグラフ数 10^7 回を見込めば疲労より先に摩耗でトロリ線が寿命に至るため、GT-SN-Wトロリ線では長期使用を想定してもやや余裕を見込んだ上でひずみ振幅 700×10^{-6} まで許容可能と考えられる。

4 おわりに

以上、トロリ線材料の疲労特性評価について紹介した。今回紹介した疲労試験結果はいずれも正弦波加振で得られたものだが、実際のトロリ線ひずみ波形は図2に示すようなものである。今後は、実際の波形による疲労損傷について、既に提唱されている波形読み取り法のトロリ線への適用可能性を実験的に検討する予定である。

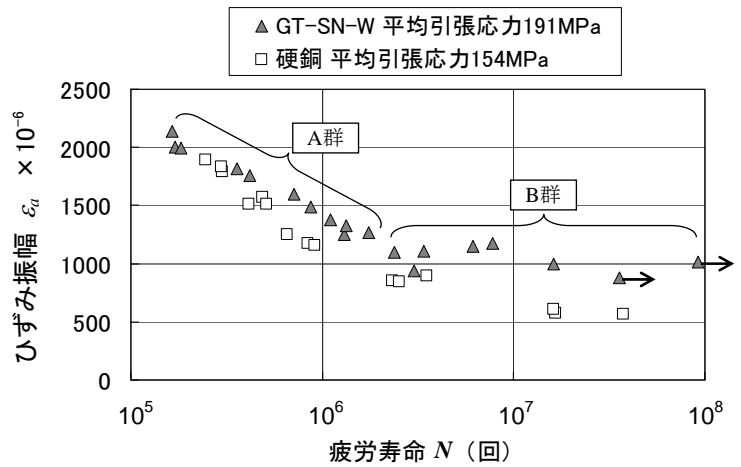


図7 GT-SN-Wトロリ線疲労試験結果

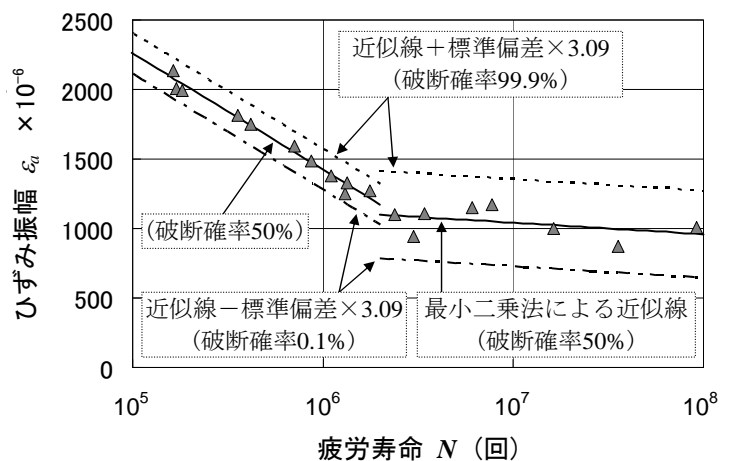


図8 GT-SN-Wトロリ線の疲労破断確率推定線