

既設締結装置（線ばね）の余寿命評価

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○輪田 朝亮
 東日本旅客鉄道株式会社 正会員 手代木 卓也
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 野本 耕一
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 西宮 裕騎

1. はじめに

JR 東日本管内のあるトンネル内において、線ばねの損傷が多く見られることから、トンネル区間の特異性について、破面や錆などの特徴を電子顕微鏡などにより詳細に調査した。その結果、亀裂起点部の破壊形態は応力腐食割れ（水素脆性破壊）と推定され、水分を多く含み、錆の発生し易い環境が原因と考えられた。また、錆の成分の分析結果からも、錆を促進する触媒として作用する特別な物質は検出されなかった。

そこで、当該線区をモデルとして、腐食環境の有無による線ばねの余寿命の違いについて、統計的アプローチにより評価を試みたので、その結果を報告する。評価手法は、敷設から 10 年間経過した線ばねをトンネル内と明かり区間のそれぞれから採取し、載荷応力の条件を変化させた繰返し疲労試験を行い、S-N 曲線を推定する方法を用いた。

2. 現地発生応力測定結果

S-N 曲線をもとに余寿命を推定するにあたり、繰返し疲労試験に適用する応力を測定するため現地試験を実施した。線ばねの応力測定箇所を図 1 に示す。現地試験に基づく応力変動を平均応力 0 からの両振の応力で表した S-N 曲線上に対応させるために応力片振幅に換算したヒストグラムを図 2 に示し、その換算応力の平均値 μ と標準偏差 σ の計算結果を表 1 に示す。なお、応力変動とは、現地における線ばね締結時の平均応力からの増減である。なお、計算に使用した全データは、車軸通過 792 軸分（33 列車）である。また、測定されたひずみが弾性限度を超えた場合もヤング率 ($E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$) を一定と仮定して主ひずみとヤング率の積で主応力を算出した。

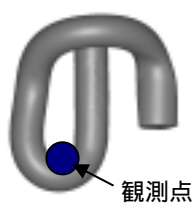


図 1 応力測定箇所

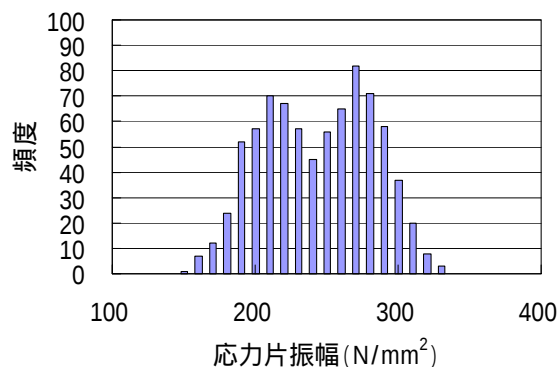


図 2 換算後の応力片振幅

表 1 換算応力統計値

項 目	値 (N/mm^2)
平均値 μ	238.5
標準偏差 σ	38.3

3. 繰返し疲労試験

繰返し疲労試験は、電気油圧式材料試験機にタイプレートを固定して線ばねを設置し、線ばね先端を反力受け治具で固定して、タイプレートを繰返し上下に変動させることにより、線ばねに繰返し荷重を与える方法で行った。（図 3）なお、荷重載荷方法は、締結装置の締付け力に相当する荷重をあらかじめ与えた上で、その状態を中心としてサイン波を繰返し与えた。

供試体とする線ばねは、急曲線（ $R = 300\text{m}$ ）を含むトンネル区間、明かり区間から採取して使用した。

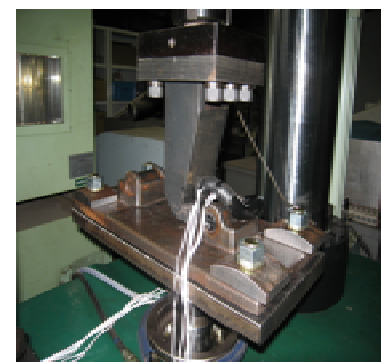
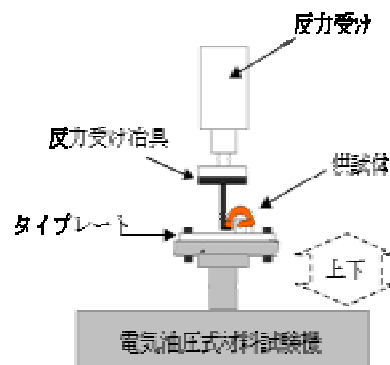


図 3 繰返し疲労試験概要

キーワード：線ばね，余寿命，S-N 曲線，繰返し疲労試験

連絡先：〒331-8513 さいたま市北区日進町 2 丁目 479 番地 テクニカルセンター TEL048-651-2389

4. S-N 曲線の推定

S-N 曲線は応力レベルと破断に至る繰返し载荷回数から式(1)として定義される。繰返し疲労試験で与えた応力レベルと破断に至る繰返し载荷回数を元に、プロビット法を用いてトンネル区間、明かり区間のそれぞれについて S-N 曲線を推定した。試験で与えた平均応力と振幅を両振りの応力片振幅に換算した。計算結果を表2に示す。破壊確率は50%と、締結装置の設計思想による10%の2種類とした。10%確率の算定は、全ての応力における標準偏差が疲労限度における標準偏差と同一であると想定し50%確率の推定曲線を平行移動することにより算出した。

$$S = A \log_{10} N + D \quad (S: \text{応力振幅}, A: \text{傾き}, N: \text{载荷回数}, D: \text{切片}) \quad \cdots \text{式(1)}$$

表2 プロビット法による計算結果

項目	明かり区間	トンネル区間
傾き	-545	-723
切片	4,176	5,089
疲労限度	627	623
疲労限度 変動係数	0.078	0.136
交点の回数 疲労限度に対 する 载荷回数	3.3×10^6	1.5×10^6

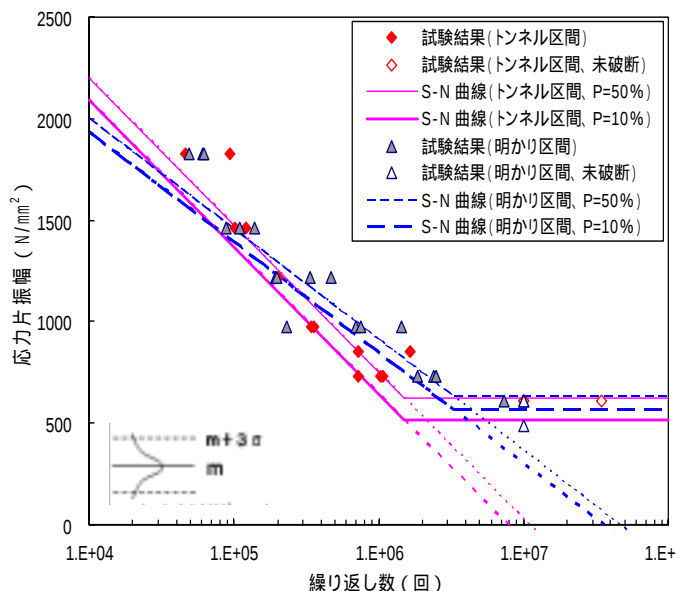


図4 線ばねの S-N 曲線

5. 破断に至る载荷回数の推定

次の前提条件にもとづき、破断に至る载荷回数をマイナー則、修正マイナー則に基づきそれぞれ算定した。

【前提条件】

応力片振幅は正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従って発生する。

応力片振幅の発生範囲は、 $\mu - 3\sigma$ から $\mu + 3\sigma$ とする。

1) マイナー則を適用した場合

S-N 曲線にマイナー則を適用した場合、現地試験の結果が疲労限度以下であることから、载荷回数にかかわらず破断には至らないと推定される。

2) 修正マイナー則を適用した場合

表3に、腐食環境等を考慮して S-N 曲線に修正マイナー則を適用した場合、線ばねの10%が破壊する载荷回数は、明かり区間が約1270万回、トンネル区間が約360万回と推定され、明かり区間の線ばねの余寿命はトンネル区間に比べ3.5倍となった。

ただし、実際の環境条件を模擬した試験室等で繰返し疲労試験を実施した場合は、明かり区間、トンネル区間の破断に至る繰返し载荷回数に、今回の結果以上の差が生じる可能性がある。

表3 修正マイナー則を適用した破断に至る繰返し载荷回数の推定結果

	50%破壊確率(回)	10%破壊確率(回)
明かり区間	16.6×10^6	12.7×10^6
トンネル区間	5.1×10^6	3.6×10^6

6. まとめ

ある線区をモデルに、明かり区間、トンネル区間に敷設される線ばねの余寿命の違いを評価するため、それぞれから供試体を採取し、疲労試験により S-N 曲線を求め、現地における破断までの载荷回数を推定した。

その結果、現地の線ばねに発生する応力が両区間ともに疲労限度以下であることから、载荷回数にかかわらず、疲労により破断には至らないと推定される。ただし、腐食環境等を考慮して修正マイナー則を適用した場合、トンネル区間と明かり区間の線ばねの余寿命には3.5倍以上の違いがあると予想される。