

破断検知線を用いた疲労損傷モニタリング手法における破断検知線の開発

日本車輛製造(株) 正会員 ○吉嶺 建史
東海旅客鉄道(株) 正会員 伊藤 裕一

日本車輛製造(株) 松尾 昌武
日本車輛製造(株) 蔣 立志

1. はじめに

筆者らは、鋼構造物に発生する疲労亀裂の発生を迅速に把握する方法として、導線式の破断検知線を用いた疲労損傷検知方法を考案した。その手法は、破断検知線を予め鋼構造物の疲労亀裂発生が想定される位置に接着し、疲労亀裂の発生に伴う検知線の破断をモニタリングすることにより、鋼構造物本体に発生した疲労損傷を検知するというものである。本手法の成立のためには、施工性・耐久性・信頼性に優れたシステムの開発が必要とされている。本研究では、破断検知線を用いた疲労試験並びにFEM解析を行い、破断検知線の断線メカニズムを明らかにし、最適な破断検知線仕様を検討した。

2. 疲労試験

(1) 試験方法 疲労試験体は図1に示すとおり SM400 材に予亀裂を入れたダンベル型疲労試験片の亀裂進展方向に垂直に破断検知線を貼付したものを使用した。検知線の導体は $\phi 0.08 \sim 0.50\text{mm}$ の軟銅線及び硬銅線を用い、接着剤にて銅線を疲労試験体に固定した。試験中は破断検知線の導通状態を常時監視し、検知線が断線した場合に疲労試験機を自動停止した。荷重負荷は油圧サーボ式引張疲労試験機を用い、片振り ($R=0.05$) で、断線により自動停止した際に応力振幅値を $\Delta K=60$ 程度になるように随時減らしていった。検知後に、蛍光磁粉探傷にて疲労亀裂先端位置を測定し、亀裂突出長（検知時の銅線位置と疲労亀裂先端位置の差）、及び開口振幅量（検知時の振幅負荷による亀裂開口量を変位計で測定）を測定し、検知性能として評価した。

(2) 試験結果 検知感度は、接着剤種類と接着剤厚さにより、大きく異なった値を示した。接着剤は、種類により縦弾性係数、破断伸び、破断強度等のパラメータが大きく異なるが、特に縦弾性係数の影響を強く受けていることが確認された（図2）。また、試験結果は $N=3$ で評価したが、「エポキシ系B厚塗り」のようにデータが大きな範囲でばらついているのは、亀裂周辺において疲労試験片と接着剤に剥離が発生した影響を受けているためであり、接着剤の剥離を抑えることが、検知性能向上につながることを確認した。尚、疲労亀裂による検知線断線の特徴として、無負荷状態では断線した銅線破面どうしが接触し、導通が完全に復活する現象が確認できた。このような導通復活は、検知初期段階では必ず確認され、亀裂が進展するに伴って無くなっていった。

3. 静的試験及びFEM解析

(1) 静的試験 図3に示すように疲労亀裂の開口に相当する静的負荷を加えた場合の、検知線の銅線に生ずる歪み及び断線挙動を測定した。銅線に生じる歪みは銅線上に 0.2mm 間隔でレーザーマーキングをし、その間隔増加量をマイクロSCOPEで観察した。接着剤の縦弾性係数が大きい場合は歪みが

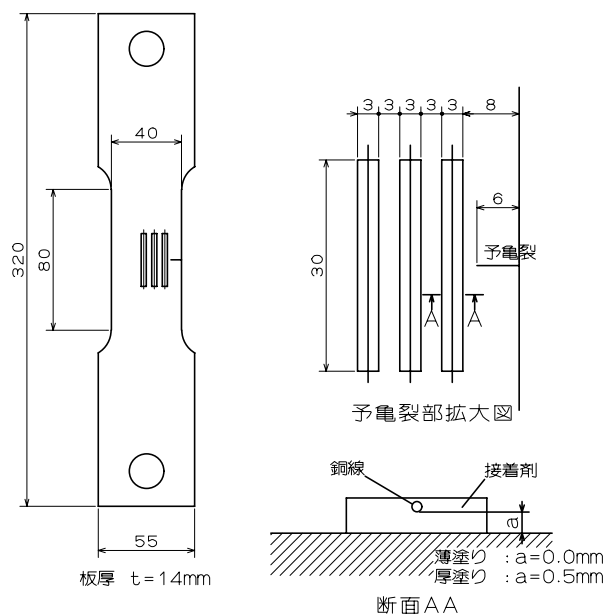


図1 疲労試験体

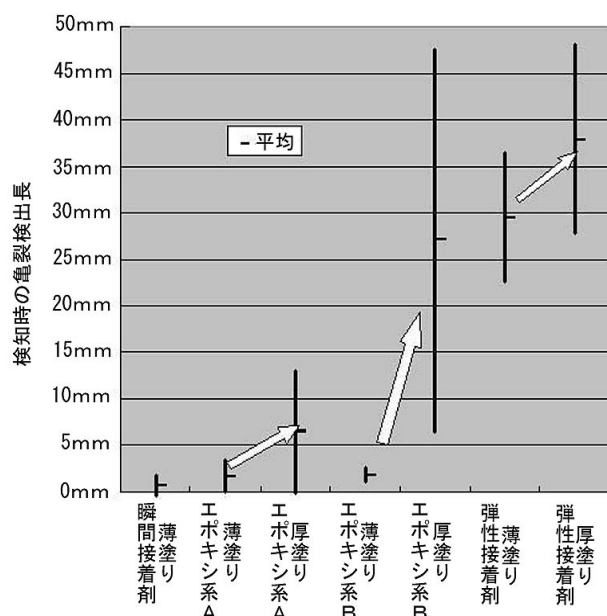


図2 疲労試験結果

キーワード 鋼構造物, 疲労損傷, モニタリング, 破断検知線, 接着

連絡先 〒475-0831 愛知県半田市 11 号地 20 番地 日本車輛製造(株) 鉄構本部設計部 TEL 0569-22-7511

局部的に発生し、小さい場合は応力緩和により歪みが分散しているという結果が得られ、疲労試験の縦弾性係数による検知感度の変化傾向とほぼ一致した。銅線は、接着剤にクラックが発生すると同時に銅線が破断するという破壊形態を示した。クラック発生により、接着剤にて緩和されていた歪みが銅線のクラック周辺に集中し、銅線が延性破壊すると考えられる。

(2) FEM解析 検知線破断の静的引張試験について3次元非線形FEM解析による同定を行った。図4にFEM解析で対象としたモデルの概要を示す。図5にはFEM解析の要素分割図の一例を示す。接着剤及び銅線の物性値は、応力・ひずみ線図測定試験曲線より与えた。尚、剥離については、静的試験で接着剤の剥離がほとんど確認されなかったため、FEMにおいてもモデル化していない。このケースのFEM解析結果を図6に示すが、この結果が示すように解析結果の歪み分布は静的試験結果をほぼ同定できることが解った。これにより、接着剤の効率的な選択が可能となった。

4. 破断検知線仕様の検討結果

上記の試験結果から得られた破断検知線の検知メカニズムをもとに考案・試作した破断検知線を図6に示す。尚、本システムでは、検知線の断線位置を計測できるようにケーブル障害位置測定器（TDR方式）を用いるため、2本の銅線を検知線上に平行に並べている。図に示すように、特殊なフィルム樹脂の間に銅線をサンドイッチ状に固定したプレハブ電線を、接着剤を用いて鋼構造物に接着する。採用したフィルム樹脂は、縦弾性係数が高いが塑性域の伸びが大きく、折り返して曲げることが可能である。検知線の表裏の区別無いため溶接止端形状にそって折り返して曲げて貼り付けることが可能となった。

尚、試作した破断検知線は塗装がされた鋼構造物の疲労亀裂にも有効で、フタル酸系塗装がされた疲労試験体に貼付し、亀裂突出長2mm以下、検知時の開口振幅量 $10\mu\text{m}$ 以下の非常に優れた検知性能を示した。

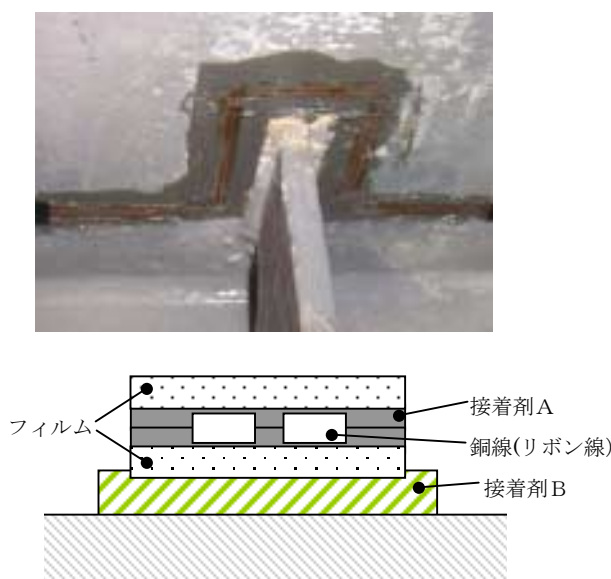


図7 考案した破断検知線

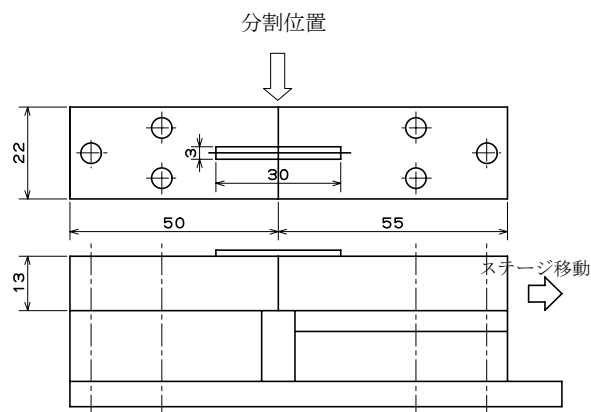


図3 静的引張試験

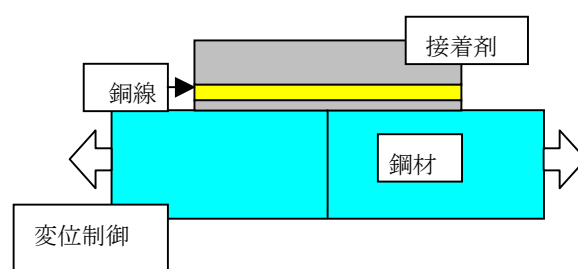


図4 FEM解析のモデルの概要

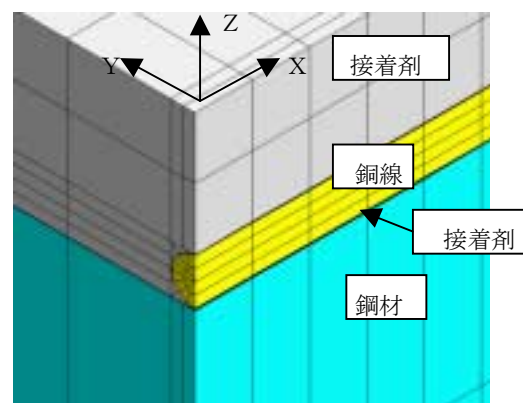


図5 FEM解析メッシュ分割例

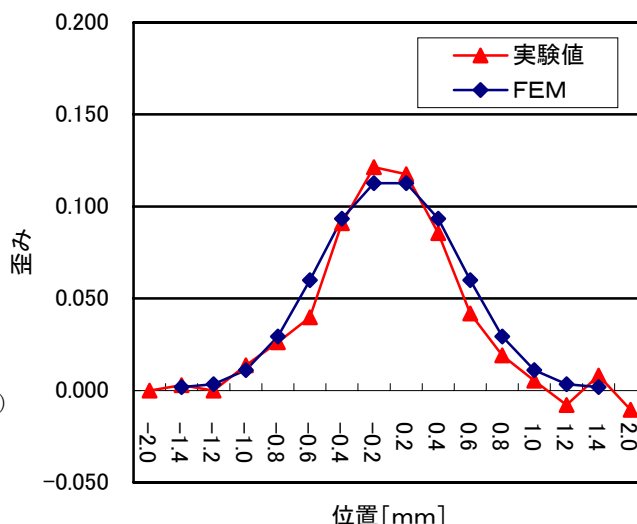


図6 静的試験結果とFEM値の比較