吊橋太径ねじ部材の疲労損傷に関する検討

本州四国連絡高速道路　正会員　○髙田　大資
本州四国連絡高速道路　　梶尾　光邦
本州四国連絡高速道路　正会員　　溝上　善昭

１．はじめに

対象橋梁は，**図-1** に示す中央径間 600m の 3 径間 2 ヒンジ吊橋である．中央径間中央には常時及び暴風時において桁とケーブルの相対変位により生じる支間中央付近の短ハンガーの傾斜角を抑制し，ハンガーの曲げ疲労を防止するためのセンターステイが設置されている．センターステイには桁との定着部にロッド（太径ねじ部材）が設けられており，バンドへの過大な力を発生させないために再現期間 25 年相当の地震でロッドの最小断面部が破断するよう設計されており，実際に 2001 年 3 月 24 日に発生した芸予地震（M6.7）において概ね設計どおりに破断が確認された [1)]．しかし，原形復旧後，4 本のロッドの内，下り線側の 2 本のロッドにおいて地震が発生していないにもかかわらず，ロープ側ソケットカプラーとかみ合う 1 山目のねじ底で破断を生じた（**写真-1**）．本論では，この損傷について，破面観察，化学成分分析等による損傷原因の推定及び対応方針について報告する．

２．破断ロッド詳細調査

破断原因の推定のため，化学成分分析及びビッカース硬さ試験により材料特性の確認を行った．ロッドに使用されている鋼材 SNCM625 の JIS 規格値と比較したところ，全てにおいて規格値を満足する結果であり，製作時の試験結果とも整合していたことから，材質に問題は無いと判断した．また，今回破断していないロッドねじ底を浸透探傷試験及び磁気探傷試験を実施したが，亀裂等の変状は見られなかった．

破断面について脱スケール後に観察を行った．マクロ観察結果とSEMによるミクロ観察結果を**図-2**に示す．マクロ観察では，ビーチマークが確認された．ロッド上側に最終破断部が見られ，ビーチマークの模様から伝播方向を推測すると，起点は下側であると考えられる．ミクロ観察では，起点部近傍の破面状況より，欠陥や腐食に起因した割れの発生の痕跡は認められなかった．**図-2**の左下の写真では，疲労破面に特徴的なストライエーションが見られた．また，最終破断部と推定される上側では，延性破面に特徴的なディンプルを確認した．

これらの結果より，破壊に至る経緯は，ねじ底のコーナー部を起点として繰返し応力により亀裂が徐々に進展し，減少した断面が引張力に耐えられなくなり，最終的に破断したと考えられる．

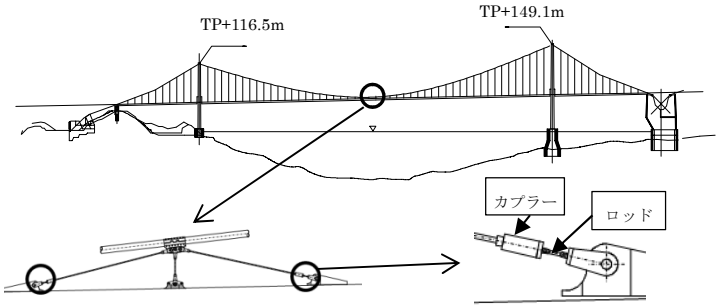


図-1　センターステイ概要

写真-1　破断状況

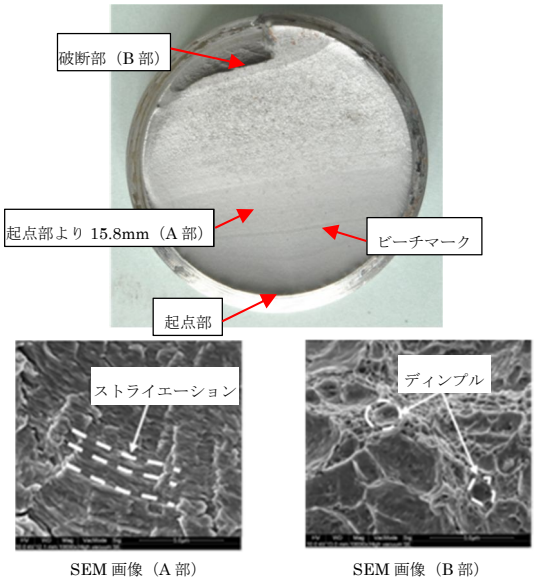


図-2　破面観察結果

キーワード　吊橋，ねじ，疲労亀裂，センターステイ，SEM，応力測定
連絡先　　〒794-0072　愛媛県今治市山路 751-2　TEL 0898-23-9785

３．疲労損傷度の検討

活荷重によるロッドの応力発生状況を確認するため，復旧後のロッドにおいて，72時間連続の応力計測を実施した．計測は上下線全てのロッド（4本）を対象とし，ゲージ張り付け位置は，破断箇所であるねじ部に直接ゲージを貼り付けることはできないため，ロッド中央部にひずみゲージを設置した．

別途，FEM解析による破断位置の応力とゲージ貼付部の応力比率（以下，「応力換算係数」という）を算出し，応力計測の結果に乗じることで破断位置の応力を推定した．解析モデルでは，破断したロッドの断面マクロ写真（**図-3**）から計測し，亀裂発生部のねじ底Rの半径を0.3mmとした．

疲労寿命の推定は，72時間計測した応力履歴に，前述の応力換算係数を乗じたものを破断したねじ底の応力履歴とし，累積線形被害則により累積損傷度を求め，疲労寿命を予測した．なお，応力頻度解析はレインフロー法を用い，SN線図は，文献2）に示されるSNCM625のSN線図（**図-4**）の50%破壊確率の曲線を用い，修正マイナー則に従うものとした．なお，SN線図の縦軸は応力振幅を引張強度で除した応力比である．

各ロッドの寿命結果等を**表-1**に示す．下り線で累積損傷度が大きな値となっている．これは，対象橋梁が完成4車線から暫定2車線へのすり付け部のため，下り線側への活荷重が偏載状態となるためと考えられる．また，寿命が0.8年から34.5年となり，活荷重による疲労損傷の可能性が高いことが示唆された．なお，実際に破断するまでの年数は，2001年3月の芸予地震によりロッド交換している事から，今回破断を確認した2014年5月までの約13年程度であった．

４．疲労対策構造の検討

疲労強度を高める構造的な対策としては，ねじ部の径を大きくし応力を低減させる方法と，亀裂の起点となったねじ底R部の応力集中を低減させる方法がある．前述の方法ではソケット及び定着ピンのカプラーの改良など大幅な構造変更が必要となる．後述の方法では，ロッドのみの対応で，大幅な構造変更が不要であるため，まずは，この方法を検討した．

ねじ底Rを大きくした場合の応力集中軽減効果を確認するためにFEM解析を行った．FEM解析は，前述の応力換算係数算出に用いたFEM解析のモデルのねじ底Rを0.5mm, 0.7mmとした2ケースについて行った．応力換算係数は，3.65（R=0.3），3.09（R=0.5），2.75（R=0.7）であり，破断寿命予測では，最も寿命が短い下り線（終点側）ロッドでR=0.3を1とした場合，R=0.5で約9倍，R=0.7で約30倍の疲労寿命となった．ねじ底Rの拡大による疲労対策は有効であることが確認できた．

今回用いたSN線図は小形平滑試験片のものである．今後，疲労寿命予測精度向上のため，実物大のロッドを用いた疲労試験を実施する予定である．

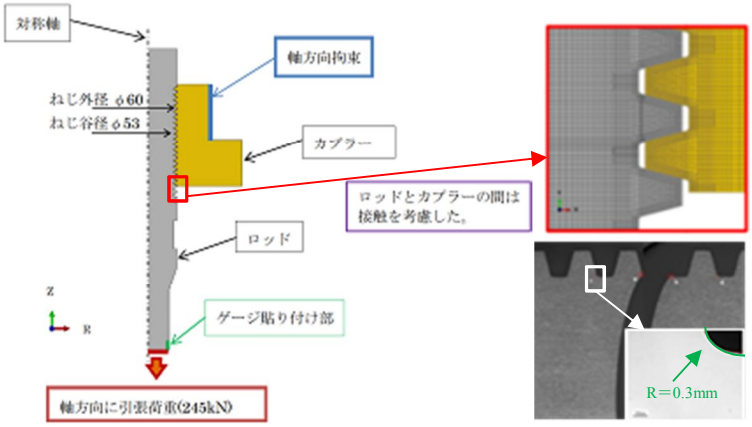
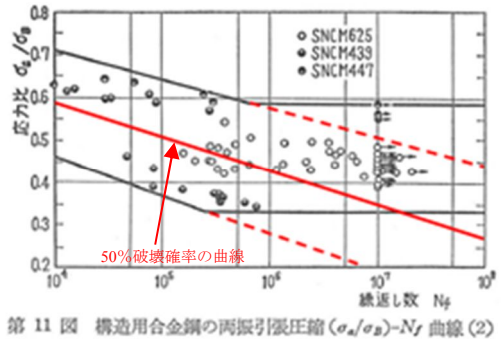


図-3　FEM 解析モデル



第 11 図　構造用合金鋼の両振引張圧縮 (σ_a/σ_B)-N_f 曲線 (2)

図-4　SN 線図（SNCM625）[2)]

表-1　疲労寿命結果等

ロッド	累積損傷度	疲労寿命（年）
上り線（起点側）	5.33×10^{-4}	18.7
上り線（終点側）	2.88×10^{-4}	34.5
下り線（起点側）	1.66×10^{-4}	5.99
下り線（終点側）	1.25×10^{-4}	0.80

参考文献

1) 古家和彦，磯江浩，帆足博明，平野茂：芸予地震における動態観測と来島海峡第一大橋センタースティロッド破断に対する検証，鋼構造論文集 Vol.10.No.39，pp.132-141，2003 年 9 月

2) （一社）日本機械学会：金属材料疲労強度の設計資料（1）（改定第 2 版），p60，1982