

大気暴露された耐候性鋼材溶接継手の疲労強度とさび上からの疲労き裂検出

岐阜大学大学院 学生会員 ○佐々木雄也
 岐阜大学 正会員 木下幸治 正会員 小野友輝
 施工技術総合研究所 正会員 井上一磨 正会員 小野秀一

1. はじめに

耐候性鋼材は、大気中の暴露により、鋼材表面に保護性さび層が形成されることにより、地鉄部分に水や酸素の供給を防ぎ、高い防食効果を発揮する特徴を持った鋼材である。1970年代以降、数多くの耐候性鋼橋梁が建設されており、それらの多くは約40~50年程度の供用年数を迎えている¹⁾。これまでに2, 4, 10, 25, 41年間無塗装で大気暴露された耐候性鋼材溶接継手の疲労強度の検討が行われてきた^{2)~5)}。また、耐候性鋼材は表面が保護性さび層で覆われているため、塗装鋼材のようなき裂近傍の変色や塗膜割れが見られず、さび上から目視で早期に疲労き裂を検出するのが難しい場合があるとされる⁶⁾。以上より、さび層を有する耐候性鋼材溶接継手の疲労試験データ及びさび上から疲労き裂の非破壊的な検出について更なるデータの蓄積が必要である。そこで、本研究では、大気暴露された耐候性鋼材溶接継手の疲労試験を実施し、その疲労強度を明らかにした上で、さび上から疲労き裂の非破壊的な検出精度について検討する。

2. 試験体概要

本概要では、図-1(a)に示す荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手と図-1(b)に示す面外ガセット溶接継手の2種類を取り扱う。十字すみ肉溶接継手は、鋼種はSMA50(現SMA490)で、大気暴露は1977年9月から2018年9月までの41年間で、三河湾の海岸から約1km離れた工場敷地内において、試験体を架台上に碍子で挟み、南向き30°の角度で雨ざらしにすることで実施されてきた⁴⁾。暴露された試験体には全体に緻密なさび層が形成されている⁵⁾。なお、暴露期間・材質・寸法が同様の試験体2体を用いた疲労試験データやさび性状の計測データが既に蓄積されている⁵⁾。そのため、既往研究の試験体は1体目と2体目、本概要に掲載する試験体は3体目と表記している。面外ガセット溶接継手は、鋼種はSMA400AWで、No.0, No.1, No.2, No.7の4体を対象とした。このうち、No.0とNo.7の2体は無暴露、No.1とNo.2の2体は2018年7月から2021年3月の約2.5年間、離岸距離約0.05kmの琉球大学辺野喜試験場にて大気暴露された。

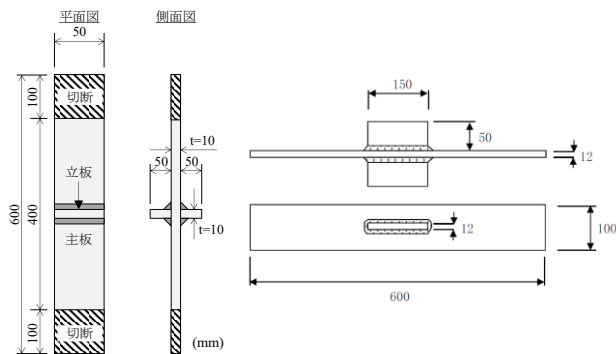
3. 疲労試験概要

電気油圧サーボ式疲労試験機により、一軸引張下で疲労試験を実施した。応力比はほぼ0、繰り返し速度は十字すみ肉溶接継手が5Hz、面外ガセット継手が20Hzである。公称応力範囲は十字すみ肉溶接継手が160, 215MPa、面外ガセット継手が135, 150MPaとした。疲労試験と並行して、目視、並びに磁粉探傷試験(MT)により、疲労き裂の発生と進展の確認を行った。また、応力範囲を半分にし、ビーチマーク試験を定期的に行なった。

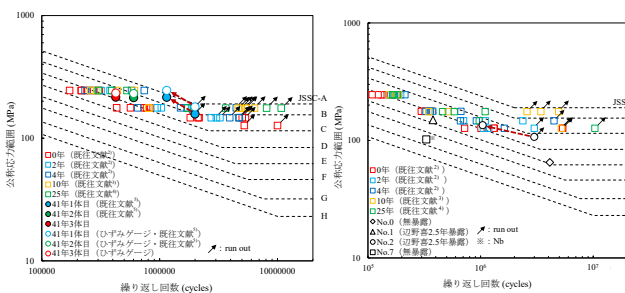
4. 疲労試験結果

十字すみ肉溶接継手の疲労試験結果を図-2(a)に示す。図中には、既往文献^{2)~5)}の暴露期間0, 2, 4, 10, 25年、暴露期間41年の1体目と2体目の疲労試験結果も合わせて示した。なお、41年暴露試験体については、止端から約100mm離れた位置に貼付したひずみゲージから得られた公称応力範囲で整理したデータと既往文献^{2)~4)}に従い、載荷荷重を腐食前の断面積で除して算出した公称応力範囲で整理したデータの2種類をプロットしている。また、矢印が付いたプロットは、未破断(run out)であることを示している。本研究で実施した3体目の試験体の結果は、41年暴露試験体の内では下限値となったが、41年暴露試験体の疲労強度は2年, 4年, 10年, 25年暴露試験体の疲労強度と比較すると、断面減少があるにもかかわらず、同程度の疲労強度等級であった。

面外ガセット溶接継手の疲労試験結果を図-2(b)に示す。図中には、既往文献^{2)~4)}の暴露期間0, 2, 4, 10,



(a) 十字すみ肉溶接継手 (b) 面外ガセット溶接継手
 図-1 試験体寸法



(a) 十字すみ肉溶接継手 (b) 面外ガセット溶接継手
 図-2 疲労試験結果



(a) 目視 (最大荷重時)
 (b) 磁粉探傷試験 (最大荷重時)

図-3 疲労き裂の検出例
 (面外ガセット溶接継手 No.1, 36万回時)

25年の疲労試験結果も合わせて示した。なお、No.7試験体のデータは疲労き裂が溶接止端から離れて主板上に進展する際の繰返し数(N_b)である。既往文献²⁾の暴露期間0年の疲労強度は、D等級程度であるのに対し、本研究でのNo.0試験体の疲労強度は、E等級程度、No.7試験体は、G等級(ただし N_b)と低い傾向にあった。この低い傾向は、本研究で使用した試験体のガセット長さの主板幅が既往研究より大きいためだと考えられる⁷⁾。一方、2.5年大気暴露されたNo.1とNo.2試験体の疲労強度は、それぞれE等級とD等級であり、暴露期間0年の試験体よりも疲労強度が高い傾向となった。この疲労強度の向上は、既往文献^{2)~4)}の2年以上のデータの下限値が0年よりも高い傾向と一致している。

5. さび上からの疲労き裂検出

試験体に発生した疲労き裂の検出精度を調べるため、十字すみ肉溶接継手3体目(以下、十字3体目)、面外ガセット溶接継手No.1とNo.2(以下、面外No.1, No.2)を対象に、目視及びMTによる検出を試みた。なお、き裂の検出は、十字3体目は疲労試験時のmean時、面外No.1とNo.2は最大荷重時及び最小荷重時に実施してい

キーワード：耐候性鋼材、さび、疲労強度、疲労き裂、磁粉探傷試験

連絡先：〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1 岐阜大学 社会基盤工学科 TEL 058-293-2424

る。ここで、目視は溶接部から 20cm 程度の離れた位置から肉眼でさび上からき裂の長さを確認した。検出例として、面外 No.1 の最大荷重時に実施した目視および MT を図-3 に示す。各試験体の繰返し回数と検出された表面き裂長さの関係を図-4 に示す。また、検出精度の検証のため、図-5 に示す各疲労破面に残されたビーチマークから正確な表面き裂長さを計測し、目視及び MT による表面き裂の検出結果と比較した。なお、図-5(c) に示すように、面外 No.2 ではき裂の起点が 2 点あることから、左側の起点から発生したき裂、右側の起点から発生したき裂、両者の合体後それぞれ分けて示した(図-4(c))。図-4(a)より、ビーチマーク試験では 30 万回終了時に 8.4mm、35 万回終了時には 11.5mm の表面き裂が確認できたが、いずれも目視と MT ではき裂を検出することができず、40 万回終了時には目視と磁粉探傷試験により 6mm の表面き裂を検出した。図-5(b)より、最も内側のビーチマークから計測された 24mm のき裂長さに対して、目視と MT では約 16mm の表面き裂を検出した。図-5(c)より、最も内側のビーチマークから計測された左側で 5mm、右側で 4mm のき裂長さに対する MT では、左側で 2mm、右側で 4mm の表面き裂を検出した。以上より、十字 3 体目と面外 No.1 はき裂を早期に検出できていないが、面外 No.2 は早期にき裂を検出できたと言える。この理由について考察を加えるため、走査型顕微鏡 (SEM) を用いて、疲労破面上のき裂の発生位置及びその周辺のさびの位置関係の観察を行った。各試験体の疲労き裂の起点付近に対する SEM による観察結果を図-6、図-7、図-8 に示す。ただし、紙面の都合上、面外 No.2 は、き裂を早期に検出した起点右側近傍のみを掲載する。SEM での撮影は破面に対して上面または、上面から 45° 傾けて行った。図-6 より、十字 3 体目はさび層の割れ目が地鉄部に対して屋根状に 0.60 μ m 程度覆い被さっており、図-7 より、面外 No.1 では、さび層の割れ目から破面(地鉄)が最大で 0.32mm 程度の露出、即ち観察した破面反対側からさび層が覆いかぶさっていたことが示唆される。一方、図-8 より、面外 No.2 では、さび層の割れ目と破面(地鉄)はほぼ一致した。以上から、41 年大気暴露された十字 3 体目と 2.5 年大気暴露された面外 No.1 の 1 体はき裂にさび層が覆い被さることで、目視及び MT でのき裂検出精度が低下したが、面外 No.2 では、き裂に対するさび層の被りが小さく、き裂を早期に検出できたと考えられる。

6. 結論

- ・大気暴露された耐候性溶接継手の疲労強度は大気暴露前の疲労強度よりも高く、既往研究の疲労試験結果^{2,4)}と同様の傾向であった。
- ・大気暴露年数に関わらず、さび層が形成された後は、き裂に被るさび層の存在により、疲労き裂の検出精度が低下する可能性が示唆された。

謝辞 本研究は、一般社団法人 日本鋼構造協会「鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会」(委員長 館石和雄 名古屋大学教授)の「疲労強度研究部会」(部会長 穴見健吾 芝浦工業大学教授)における活動の一部として実施している。また、下里哲弘 琉球大学教授には、暴露試験の実施にご尽力いただいた。ここに記して厚く御礼を申し上げます。

参考文献 1)三木, 市川:現代の橋梁工学—塗装しない鋼と橋の技術最前線, 数理工学社, 2004.12. 2)山田ら:大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ, 土木学会論文報告集, 1983.9. 3)近藤ら:10 年間大気暴露した耐候性鋼と普通溶接継手の疲労挙動, 土木学会論文集, 1994.4. 4)近藤ら:25 年間大気暴露した耐候性鋼と普通溶接継手の疲労強度, 土木学会論文集 A, 2007.7. 5)日本鋼構造協会:鋼橋の強靱化・長寿命化に向けた疲労対策技術資料, JSSC テクニカルレポート, 2020. 6)細見, 小峰:耐候性鋼材の溶接継手に生じた疲労き裂の非破壊検査による検知方法に関する基礎的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018. 7)Ono et al: "A reanalysis of fatigue test data for longitudinal welded gusset

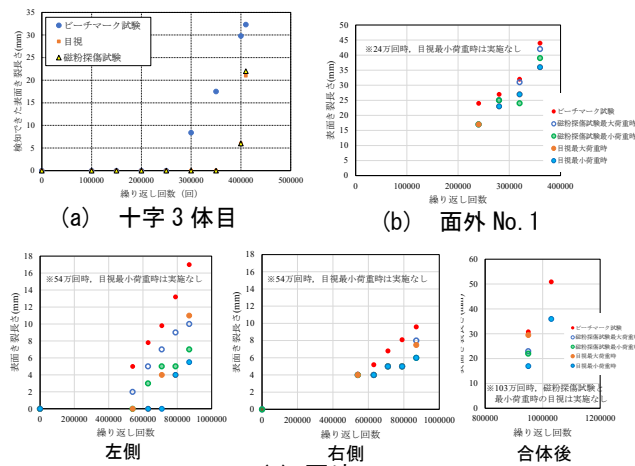
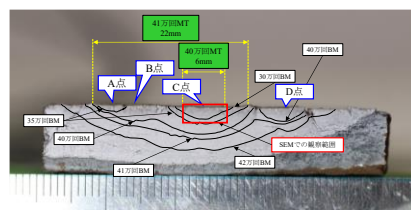


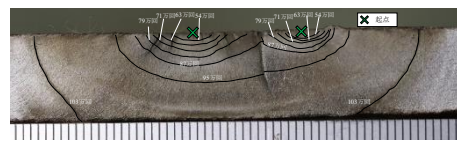
図-4 疲労き裂の検出結果



(a) 十字試験体 (3 体目)

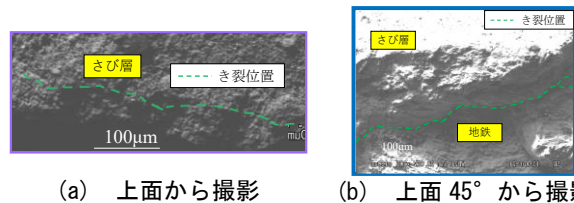


(b) 面外ガゼット No.1 試験体



(c) 面外ガゼット No.2 試験体

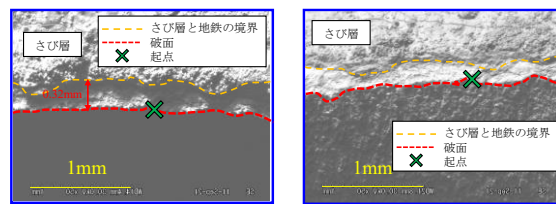
図-5 疲労破面



(a) 上面から撮影

(b) 上面 45° から撮影

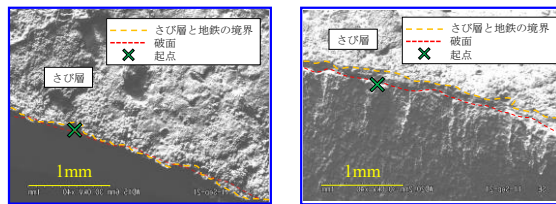
図-6 SEM での観察結果(十字すみ肉溶接継手 3 体目)



(a) 上面から撮影

(b) 上面 45° から撮影

図-7 SEM での観察結果 (面外ガゼット No.1 試験体)



(a) 上面から撮影

(b) 上面 45° から撮影

図-8 SEM での観察結果 (面外ガゼット No.2 試験体右側)

joints in as-welded and high frequency mechanical impact (HFMI)-treated state" International Journal of Fatigue, 2021.