

4年間大気暴露された耐候性鋼面外ガセット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 正会員 木下 幸治
 施工技術総合研究所 正会員 井上 一磨

岐阜大学大学院 学生会員 〇佐々木 雄也
 Aalto University 正会員 小野 友暉
 施工技術総合研究所 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、耐候性鋼材を使用した鋼橋が数多く建設されており、それらの多くは現在40~50年程度の供用年数を迎えている¹⁾。このため、これまでに山田ら²⁾⁴⁾により2, 4, 10, 25年間、木下ら⁵⁾により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。しかし、このようなさび層を有する溶接継手の疲労試験データは、未だに限られており、更なるデータの蓄積が望まれる。

他方、無塗装耐候性鋼橋梁の維持管理の観点から、定期点検・検査において、疲労き裂の早期発見は重要である。しかし、耐候性鋼材は表面が保護性さび層で覆われているため、塗装鋼材のように、塗膜割れが見られず、さび上から目視や非破壊検査による疲労き裂の検出精度の低下が課題とされる⁶⁾。実際に、既往研究では⁷⁾⁸⁾、2.5年と41年間大気暴露された溶接継手に生じた疲労き裂をさび上から非破壊検査による検出を試みてきており、大気暴露年数に関わらず、さび層の形成後はき裂に被るさび層の存在により、き裂の検出精度が低下する可能性が示唆された。このため、耐候性鋼溶接継手に生じた疲労き裂に対するさび上からの非破壊検査体系の確立に向けて、大気暴露により形成されたさび層がき裂の検出精度に及ぼす影響についても、引き続き実験データの蓄積が重要と言える。

以上より、本研究では、著者らの2.5年間の大気暴露を対象とした既往研究⁸⁾に続いて、4年間大気暴露された耐候性鋼面外ガセット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、さび上からの疲労き裂の非破壊試験による検出精度について検討した。

2. 試験体概要

本概要では、図-1に示す耐候性鋼面外ガセット溶接継手を対象とした。試験体の寸法は、図-2に示す通りである。鋼種は、SMA400AWであり、表-1にその機械的性質と化学成分を示す。試験体数は、計3体であり、1体は約4年大気暴露した試験体、2体は比較用の無暴露試験体である。大気暴露は、図-1に示すように、2018年7月から2022年6月の約4年間、離岸距離約0.05kmの琉球大学辺野喜試験場にて、木製の土台上に約45°の角度で設置された状態で実施された。材質・寸法・製作方法が同様である1体の無暴露(0年1体目)と2.5年大気暴露した試験体(2.5年1体目・2体目)の疲労試験データが既に蓄積されているため⁸⁾、本概要の無暴露試験体は、0年2体目・3体目、4年大気暴露した試験体は、4年1体目と以降表記する。

3. 疲労試験

3.1 試験概要

図-3に疲労試験状況を示す。疲労試験は、電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて、一軸引張下で実施した。応力比は、0.04程度、繰り返し速度は18Hzとした。公称応力範囲は、山田ら²⁾⁴⁾と同様の荷重を腐食前の断面積で除した値で、0年2体目が85MPa、0年3体目が150MPa、4年1体目が65MPa、135MPaとした。ここで、4年1体目は、大気暴露前に公称応力範囲65MPaで100万回の疲労履歴を与えており(ただし、疲労き裂は未発生)、本疲労試験では、大気暴露後に、同応力範囲で350万回を追加で載荷し、未破断(run-out)であったため、その後135MPaに増加させて継続した。また、疲労試験と並行し、図-4に示す止端から5mmの位置に貼付したひずみゲージ(図中赤色)、目視及び磁粉探傷試験(以下MT)により、疲労き裂の発生と進展の確認を定期的に行った。また、応力範囲を半分にし、ビーチマーク試験も定期的実施した。



図-1 試験体外観及び暴露状況

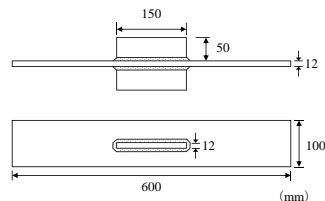


図-2 試験体寸法

表-1 鋼材の機械的性質と化学成分

鋼種	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	化学成分(%)							
				C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SMA400AW	317	446	31	0.11	0.22	0.68	0.01	0.005	0.31	0.09	0.5



図-3 疲労試験状況

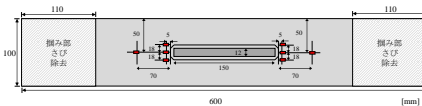


図-4 ひずみゲージ貼付位置

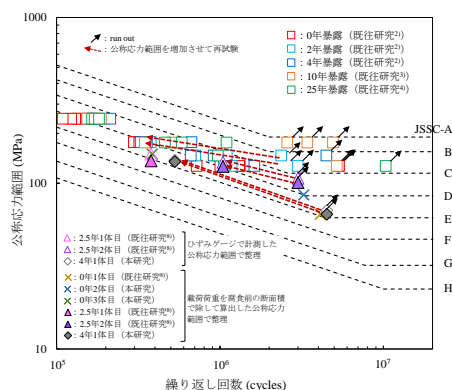


図-5 疲労試験結果

3.2 疲労試験結果

図-5に疲労試験結果を示す。図中には、山田らの大気暴露期間0, 2, 4, 10, 25年の疲労試験結果²⁾⁴⁾と著者らの0年1体目, 2.5年1体目, 2.5年2体目⁸⁾の疲労試験データも合わせて示し、本研究の結果と比較した。また、2.5年1体目・2体目、4年1体目の疲労試験結果に関して、溶接止端から70mm離れた位置に貼付したひずみゲージ(図-4)から得られた応力範囲を公称応力と定義して整理したデータもプロットした。図中の黒矢印は、run outしたデータ、赤茶色矢印は、run out後に公称応力範囲を増加させて再試験したデータであることを示す。図-5より、本研究の0年2体目・3体目の疲労強度は、いずれもE等級程度となり、山田らの大気暴露期間0年の疲労試験結果²⁾及び0年1体目⁸⁾と同程度となった。また、4年1体目の疲労強度もE等級となり、0年2体目と2.5年2体目よりは低いものの、下限値側の0年1体目・3体目、2.5年1体目と同程度となった。以上より、4年間大気暴露された耐候性鋼面外ガセット溶接継手の疲労強度は、山田らの2年以上のデータ²⁾⁴⁾で、断面減少があるにも関わらず大気暴露後の疲労強度が低下しないという傾向に一致した。

この傾向の理由としては、山田ら²⁾⁴⁾において、大気暴露された試験体(ただし、リブ十字すみ肉溶接継手)の溶接止端半径が無暴露試験体と比べて、同等以上となっていることが示されており、本研究においても、大気暴露された試験体の疲労強度が無暴露試験体と同程

度以上になった理由について、き裂形状から溶接止端半径の増大及び引張残留応力の減少の有無を間接的に考察した。疲労破面の例として、公称応力範囲が同程度である0年3体目、2.5年2体目、4年1体目の疲労破面を図-6～図-8に示す。各試験体の疲労破面に残されたビーチマークから、表面き裂長さ $2b$ とき裂深さ a をそれぞれ計測した。なお、4年1体目はき裂深さが浅い段階でのビーチマークが得られていない。各試験体のアスペクト比 a/b とき裂深さ a の関係に関して、田井ら⁹⁾と平山ら¹⁰⁾と比較した結果を図-9に示す。図中には、2.5年1体目・2体目の結果⁸⁾も合わせて示した。田井ら⁹⁾と平山ら¹⁰⁾は、本研究と同様に面外ガセット溶接継手を用いており、溶接ままとグラインダ処理したデータを含んでおり、グラインダ処理により、止端半径の増大ならびに引張残留応力の減少によってビーチマークが半円に近い形状となることが示されている。図-9より、0年2体目・3体目のアスペクト比 a/b は、田井ら⁹⁾と平山ら¹⁰⁾の溶接ままの結果と同程度であるのに対し、大気暴露された2.5年1体目・2体目、4年1体目では、0年2体目・3体目よりもき裂のアスペクト比 a/b が大きい、即ちビーチマークが半円に近づいていると言える。また、図-6～図-9より、公称応力範囲が同程度である0年3体目、2.5年2体目、4年1体目のうち、2.5年2体目、4年1体目のき裂形状は0年3体目よりも半円に近く、最も疲労強度が高くなった2.5年2体目では最もアスペクト比 a/b も大きく、図-5の疲労試験結果と対応していることが分かる。以上より、大気暴露に伴う腐食によって、引張残留応力が減少したことにより、疲労強度が低下しない傾向にあったと思われる。

4. さび上からの疲労き裂検出

4年1体目を対象に、さび上から目視及びMTによる疲労き裂の検出を試みた。なお、疲労き裂の検出は疲労試験時の最大荷重・平均荷重・最小荷重を載荷した状態で実施した。ここで、目視は溶接部から20cm程度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、40万回時の最大荷重時における目視及びMTでの検出状況を図-10に示す。検出精度の検証のため、疲労破面(図-8)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。各繰り返し回数における検出された表面き裂長さを図-11に示す。図-11より、最も内側のビーチマークから計測された16.2mmのき裂長さに対し、目視とMTでは18mm程度の表面き裂を検出できた。表面き裂長さが短い段階でのビーチマーク及びき裂検出結果が得られていないものの、目視及びMTによる検出長さは、ビーチマーク試験結果とよく一致しており、さび上から高い精度で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、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて、疲労破面上のき裂起点及びその周辺のさびの位置関係の観察を行った。4年1体目の疲労き裂の起点付近に対するSEMでの観察結果を図-12に示す。SEM画像は、破面に対して上面及び上面45°から撮影された。図中の橙色破線はさび層と地鉄の境界部を、赤色破線は破面を、緑色×印はき裂の起点をそれぞれ示している。図-12より、4年1体目のき裂起点周辺では、さび層の割れ目と破面(地鉄)はほぼ一致しており、き裂を早期に検出できた既往研究の2.5年2体目⁸⁾と同様に、き裂に対するさび層の被りが小さいことが確認された。以上より、木下ら⁷⁾と同様に、大気暴露年数に関わらず、き裂に対するさび層の被りが目視及びMTによるき裂の検出精度に影響することが示唆された。

5. 結論

- 4年間大気暴露された耐候性鋼面外ガセット溶接継手の疲労強度は、無暴露及び2.5年大気暴露された試験体の疲労強度の下限値と同程度となり、断面減少があるにも関わらず大気暴露後の疲労強度が低下しないという山田らの2年以上のデータ²⁾と同様の傾向であった。
- 暴露年数に関わらず、き裂に対するさび層の被りが小さい場合は、さび上から目視及びMTで高い検出精度でき裂を検出できることが示唆された。

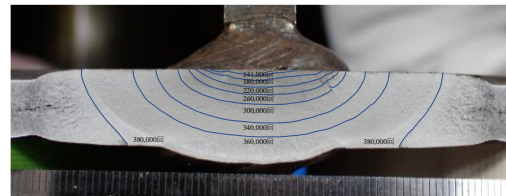


図-6 0年3体目の疲労破面

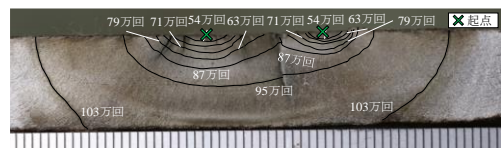


図-7 2.5年2体目の疲労破面⁸⁾

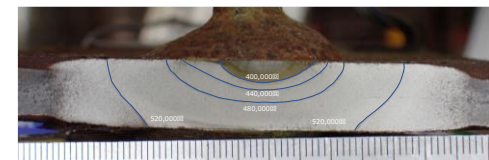
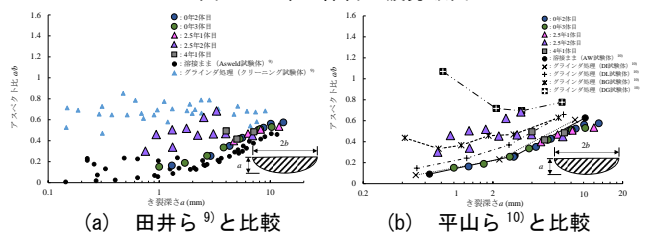
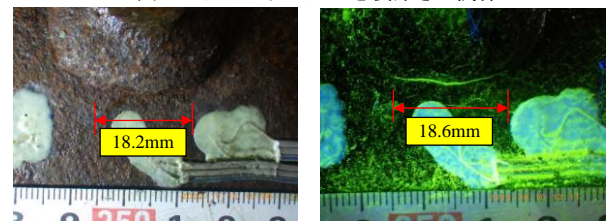


図-8 4年1体目の疲労破面



(a) 田井ら⁹⁾と比較 (b) 平山ら¹⁰⁾と比較

図-9 アスペクト比とき裂深さの関係



(a) 目視 (b) 磁粉探傷試験
図-10 4年1体目疲労き裂の検出例(40万回・最大荷重時)

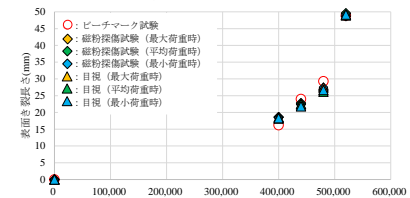
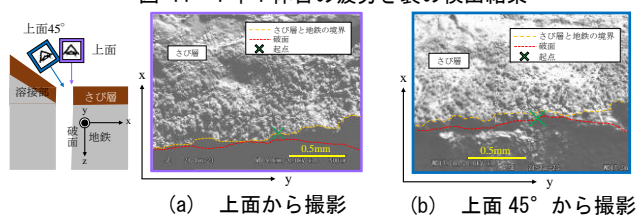


図-11 4年1体目の疲労き裂の検出結果



(a) 上面から撮影 (b) 上面45°から撮影

図-12 4年1体目のき裂起点近傍のSEMでの観察結果

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)木下ら: 41年間大気暴露された耐候性鋼溶接継手のさび組成と疲労強度, 土木学会論文集 A1, 2022. 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出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)木下ら: 長期大気暴露された耐候性鋼溶接継手のさび上からの疲労き裂検出, 鋼構造年次論文報告集, 2021.11. 8)木下ら: 大気暴露された耐候性鋼面外ガセット溶接継手のさび上からの疲労き裂検出, 鋼構造年次論文報告集, 2022.11. 9)田井ら: ハンマーピーニング処理による面外ガセットの溶接止端部の疲労強度改善, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 2011. 10)平山ら: 面外ガセット溶接継手の疲労強度に対するグラインダ仕上げ方法の影響, 鋼構造論文集, 2005.3.
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申し上げます。