

45 年間大気暴露された耐候性鋼面外ガセット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
Aalto University 正会員 小野 友暉

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

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、大気暴露後の疲労強度が大気暴露前から低下しないという結果が得られてきている。山田ら^{3)~5)}の残りの試験体を用いて、引き続き長期大気暴露された耐候性鋼材溶接継手の疲労強度や溶接継手形式の違いなどを明らかにするとともに、山田ら^{3)~5)}の試験と異なる高腐食環境下で長期大気暴露試験を行った試験体の疲労試験結果の蓄積が必要と言える。

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、著者らは 2.5 年、4 年、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^{7)~9)}。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、45 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

本研究では、図-1 に示す試験体寸法の耐候性鋼面外ガセット溶接継手試験体 3 体を対象とした。鋼種は SMA50 (現 SMA490) であり、表-1 にその機械的性質と化学成分を示す。試験体の製作方法は、山田ら³⁾に示されている。大気暴露は 1977 年 9 月から 2022 年 7 月までの約 45 年間実施された。1977 年 9 月から 2018 年 9 月までの 41 年間は三河湾の海岸から約 1km 離れたトピー工業株式会社豊橋製造所 (愛知県豊橋市) の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⁵⁾、2018 年 9 月から 2022 年 7 月までの 4 年間は駿河湾の海岸から約 8km 離れた施工技術総合研究所 (静岡県富士市) にて同様の設置方法で暴露された。試験体数は 3 体であり、以降順に 45 年 1 体目・2 体目・3 体目と表記する。

3. 疲労試験

3.1 試験概要

図-2 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。繰返し速度 10Hz、応力比はほぼ 0 とした。公称応力範囲は山田ら^{2)~4)}と同様に、載荷荷重を腐食前の断面積で除した値で、176MPa、245MPa とした。応力範囲を半分にし、ピーチマーク試験を定期的に実施した。また、図-3 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状況を確認しながら実施した。

3.2 疲労試験結果

図-4 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)}、著

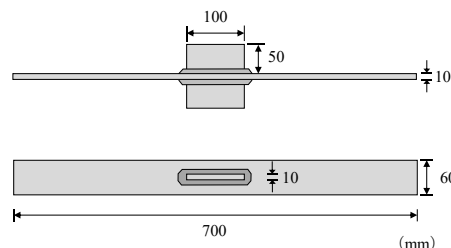


図-1 面外ガセット溶接継手試験体

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	Cr	V
SMA50 (現 SMA490)	421	578	18	0.17	0.25	1.04	0.018	0.009	0.28	0.44	0.36



図-2 疲労試験状況

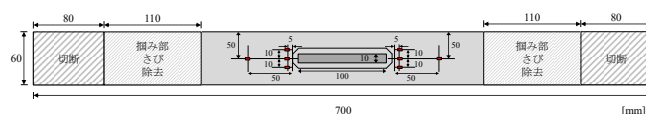


図-3 ひずみゲージ貼付位置

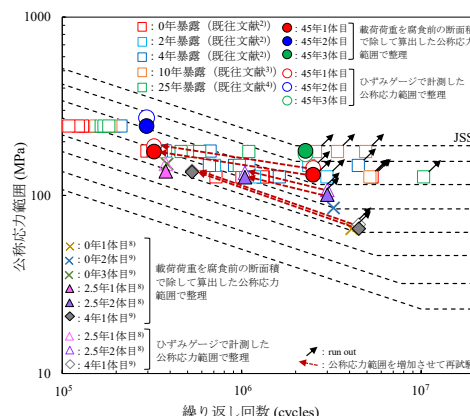


図-4 疲労試験結果

者らの無暴露並びに高腐食環境下で 2.5 年間・4 年間大気暴露された 0 年 1 体目~3 体目、2.5 年 1 体目・2 体目、4 年 1 体目の疲労試験データ^{8)~9)}も合わせて示し、本研究の結果と比較した。また、45 年 1 体目~3 体目の疲労試験結果は、溶接止端から 70mm 離れた位置に貼付したひずみゲージ (図-3) 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 したデータを、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を示す。図-4 より、45 年 1 体目~3 体目の疲労強度は、順に D 等級、C 等級、B 等級となり、山田らの 2, 4, 10, 25 年間大気暴露された耐候性鋼溶接継手の疲労試験結果^{3)~5)}と同程度~3 等級高い結果となった。以上か

キーワード 耐候性鋼材、さび、疲労強度、疲労き裂、非破壊検出

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

ら、45 年間大気暴露された耐候性鋼材溶接継手試験体の疲労強度は、大気暴露後の疲労強度が低下しないという山田らの暴露年数2年以上の疲労試験結果^{3)・5)}並びに著者らの暴露期間2.5年・4年の疲労試験結果^{8)・9)}と同様の傾向であった。この傾向の理由について、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。45年1体目～3体目疲労破面を図-5～図-7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。各試験体のアスペクト比 a/b とき裂深さ a の関数に関して、田井ら⁹⁾と平山ら¹⁰⁾と比較した結果を図-8に示す。図中には、0年2体目・3体目、2.5年1体目・2体目、4年1体目の結果^{8)・9)}も合わせて示した。図-8より、45年1体目～3体目では、き裂深さの浅い段階で、き裂のアスペクト比 a/b が大きい、即ちグラインダ処理で見られる傾向のようにビーチマークが半円に近づいていると言える。また、紙面の都合上、未掲載であるが、溶接止端付近のさび表面半径⁵⁾の計測により、溶接止端形状が改善傾向にあった。以上より、大気暴露に伴う腐食による引張残留応力の緩和及び引張残留応力の減少により、大気暴露後の疲労強度が改善する傾向にあった可能性が伺えた。

4. さび上からの疲労き裂検出

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、45年1体目の28万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-9に示す。検出精度の検証のため、疲労破面(図-5～図-7)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。45年1体目(中央のみ掲載)・2体目・3体目の各繰り返し回数における検出された表面き裂長さを図-10～図-12に示す。図より、45年1体目(中央)ではき裂を早期に検出できていないが、45年2体目、45年3体目は比較的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。紙面の都合上、45年1体目(中央)の疲労き裂の起点付近に対するSEMでの観察結果を図-13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-13より、45年1体目(中央)の起点近傍では最大で0.24mmの露出、即ち観察した破面反対側からさび層が覆い被さっていたことが示唆された。つまり、地鉄部に覆い被さったき裂に対して、さび層がき裂に覆い被さっていることで、ある程度き裂が進展するまで、さび上からMT及び目視でき裂を検出できなかったと考えられる。

以上より、著者らの知見^{7)・9)}と同様に、大気暴露年数に関わらず、さび層の形成後は、さび層がき裂に被る場合、疲労き裂の検出精度が低下する可能性が示唆された。そのため、大気暴露年数に関わらず、実際にき裂の検出が遅れる可能性を想定する必要があるものの、き裂長さがある程度進展した段階では、目視またはMTでき裂を検出することが可能であると言える。

5. 結論

- 45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、大気暴露前の疲労強度の下限値と同程度以上となり、大気暴露後の疲労強度が低下しないという山田らの2年以上の疲労試験結果^{2)・4)}及び著者らの暴露期間2.5年・4年の疲労試験結果^{8)・9)}と同様の傾向であった。
- 著者らの知見^{7)・9)}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によっては疲労き裂の検出精度が低下する可能性が示唆された。

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鋼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鋼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知方法に関する基礎的検討、土木学会

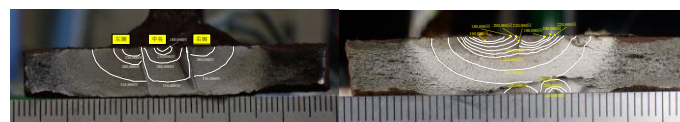


図-5 45年1体目の疲労破面

図-6 45年2体目の疲労破面

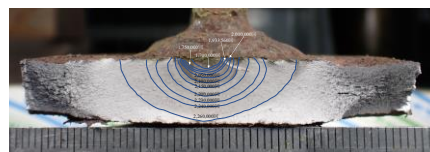
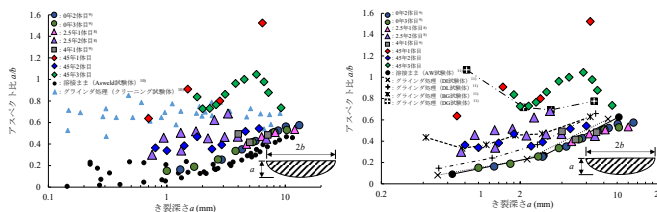


図-7 45年2体目の疲労破面



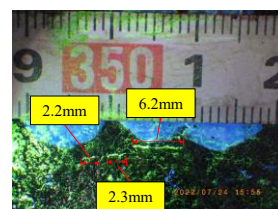
(a) 田井ら⁹⁾と比較

(b) 平山ら¹¹⁾と比較

図-8 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-9 45年1体目疲労き裂の検出例(28万回・最大荷重時)

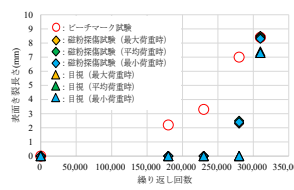


図-10 45年1体目(中央)の疲労き裂の検出結果

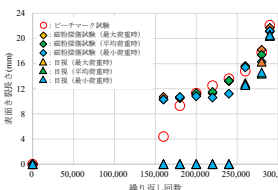


図-11 45年2体目の疲労き裂の検出結果

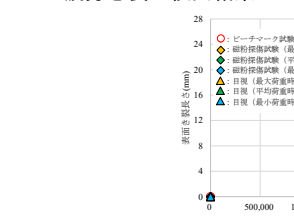
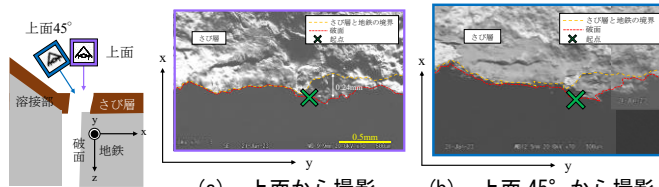


図-12 45年3体目の疲労き裂の検出結果



(a) 上面から撮影

(b) 上面45°から撮影

図-13 45年1体目(中央)のき裂起点近傍のSEMでの観察結果

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)佐々木ら：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、令和4年度土木学会中部支部研究発表会、2023。10)田井ら：ハンマービ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。11)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 本研究で使用した試験体は、1977年より実施されてきた耐候性鋼溶接継手の大気暴露後の疲労挙動に関する研究の一環としてトビー工業株式会社豊橋製造所で1977年から大気暴露されていた貴重試験体であり、山田健太郎名古屋大学名誉教授よりご提供いただいたものである。施工技術総合研究所の小野秀一氏、深見亮介氏は、暴露試験の継続及び疲労試験の実施でご尽力いただいた。また、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 銘石和雄 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。