

ショットピーニング技術を用いた溶接継手に対する疲労強度向上効果

岐阜大学大学院 学生会員 ○須川清諒, 岐阜大学 正会員 木下幸治
ヤマダイインフラテクノ株式会社 正会員 山田翔平, 亀山誠司

1. はじめに

鋼橋溶接継手部に発生する疲労き裂は、発見・対応が遅れると落橋や供用停止の事態を引き起こしかねず、甚大な社会損失が生じるため、予防保全を実施することが望まれている。鋼材表面に無数のショット材を高速で衝突させることにより表面に圧縮残留応力を導入させるショットピーニング(以下、SP)技術(例えば²⁾)は、アメリカでは既設鋼橋溶接継手部の疲労強度向上に有効な技術の一つとして試みられているが²⁾、我が国で既設鋼橋への適用を想定した場合、環境保護のためショット材の飛散防止対策が大掛かりになることやショット材の回収が困難であったことから、これまで現場では適用されてこなかった。そこで著者らは、既設鋼橋の塗替塗装時に実施するグリッドブラスト(以下、GB)処理と同様の設備を使用し、ショット材を回収し循環利用することを可能としたSP技術を開発し³⁾、既設鋼橋溶接継手部の疲労き裂予防保全工法として本技術の適用を進めてきた⁴⁾。本概要では、本SP技術を用いてSP処理された溶接継手において、SP処理回数が疲労強度向上効果に及ぼす影響を検討するために、SP処理回数を1~3回と変化させた面外ガセット溶接継手試験体を準備し、溶接止端近傍の残留応力を計測した後、板曲げ振動疲労試験を実施した。

2. 残留応力測定

図-1に試験体と疲労試験装置を示す。試験体は板厚12mmのSM490YA材(降伏強度は434MPa)を用い、溶接ルート部からの疲労き裂の発生を防ぐために、溶接止端側のガセット端部から50mmまでを完全溶け込み溶接として製作した。SP処理は現場施工時と同様の品質管理のもと実施した。なお、SP処理後に塗装塗替を想定したGB処理を実施している。試験体数はSP及びGB処理を行わない溶接まま試験体3体に加え、SP回数を1回、2回、3回と変化させた試験体各3体ずつの計12体とした。図-2に残留応力測定箇所を示す。残留応力測定はガセット前面(I)、回し溶接部(II)、ガセット前面から20mm(III)の3か所に対して実施した。それぞれの測定箇所において、溶接止端から2mm離れた位置の溶接止端に対して直交する方向の応力成分を測定した。残留応力測定にはX線回折法を利用したパルステック工業株式会社製の μ -X360nを使用した。それぞれの測定箇所において、SP処理前に板厚方向に500 μ mまで随時測定し、SP処理後に同様の位置を板厚方向に500 μ m程度、すなわち深さ1000 μ m程度まで随

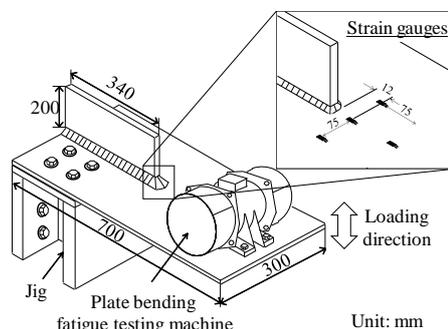


図-1 面外ガセット溶接継手試験体と疲労試験装置

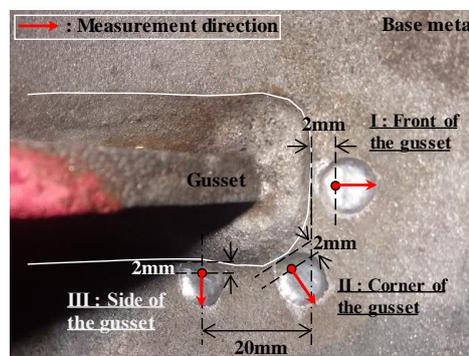
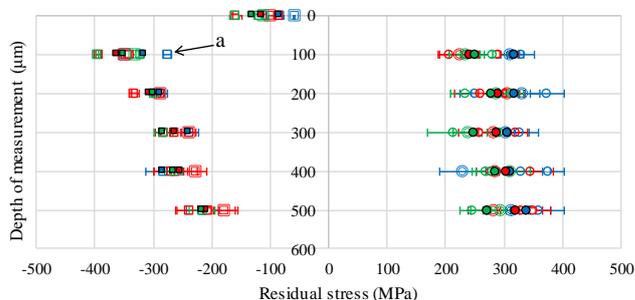


図-2 残留応力測定箇所



	SP処理1回				SP処理2回			SP処理3回				
	1体目	2体目	3体目	平均	1体目	2体目	3体目	平均	1体目	2体目	3体目	平均
SP処理前	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	●
SP処理後	□	□	□	■	□	□	□	■	□	□	□	■

図-3 試験体のSP処理前後の残留応力測定結果

時測定を実施した。なお試験体によっては、SP処理後の残留応力測定を板厚方向に100 μ m、すなわち深さ600 μ mまでとしている。

図-3にSP処理試験体9体のSP処理前後の残留応力測定結果を示す。紙面の都合上、ガセット前面(図-2のIの位置)における測定結果のみを示している。図中のSP処理後における測定点の深さは処理前にすでに500 μ m電解研磨しているため、実際の深さと異なるが、ここでは処理後の表面からの深さとして整理した。図よりSP処理前は試験体製作時の溶接残留応力が測定された。SP処理後では測定深さが浅いほど大きな圧縮残留応力が測定され、深くなるにつれて徐々にそれが

減少する傾向を確認した。SP 処理後の深さ 100 μm における導入された圧縮残留応力に着目すると、SP 処理 1 回の 1 体のみ降伏強度の 6 割程度の導入量となり(図中の矢印 a)、データにばらつきが見られた。一方、SP 処理 2 回以上においてもデータにばらつきは見られるが、全ての試験体において、SP 処理 1 回よりも大きい降伏強度の 8 割程度以上の圧縮残留応力の導入が確認できた。ただし、SP 処理 2 回と 3 回では導入量に大きな違いはなかったことから、SP 処理 2 回以上では圧縮残留応力の導入量が収束していることが伺える。したがって、SP 処理による確実な疲労強度向上効果を得るために、SP 処理は 2 回以上が望ましいと考えられる。

3. 疲労試験

図-1 に示すように板曲げ振動疲労試験は、試験体端部に固定した起振機の振動により、試験体に面外曲げ応力を与えることが可能である。試験中の応力範囲は試験体表面に貼付したひずみゲージにより管理した。疲労試験は全ての試験体で応力比 $R=-1$ とし、回し溶接部の止端から発生した疲労き裂が溶接部から離れて主板を 20mm 進展した段階である N_{20} 時で終了した。図-4 に N_{10} 時の疲労試験結果を示す。図中の応力範囲は、疲労試験時のひずみゲージによる測定値から止端部の応力範囲を算出し、梁理論より求めた止端部の公称応力範囲との差異を補正する係数を乗じ、引張疲労強度と等価に扱うため 4/5 倍することで算出した⁵⁾。図中には本研究での試験結果の他、著者らの既往の試験結果⁴⁾を合せて示しているとともに、JSSC (日本鋼構造協会) 及び IIW (国際溶接学会) により提案された疲労設計曲線⁶⁾及び、JSSC のテクニカルレポート (以後、JSSC レポート) 並びに IIW にて提示されているピーニング処理、HFMI 処理された溶接継手の疲労設計曲線^{5),7)}を示した。なお、後者の疲労設計曲線は鋼材の降伏強度と応力比に応じて設計曲線の等級を増減するものであり、本 SP 試験条件では JSSC レポートの場合+3 等級、IIW の場合+5 等級で整理される。図より、溶接まま試験体は G 等級程度を示している。一方、SP 試験体は、応力範囲 80MPa では繰返し回数 1,000 万回まで疲労き裂が発生せず、応力範囲を 120MPa 程度に上げて試験を継続したところ、疲労き裂の発生、進展を確認した。なお、SP3 回試験体の 1 体については、90~110MPa においても疲労試験を実施したが 1,000 万回に達しても疲労き裂は発生せず、疲労限の向上が確認された。

ピーニング処理された溶接継手の疲労設計曲線 (JSSC レポート) との比較より、SP2 回以上の試験体が D(G+3) 等級の曲線により良く評価された。さらに、HFMI 処理された溶接継手の疲労設計曲線 (IIW) との比較より、SP2 回以上の試験体では FAT90(FAT50+5) の曲線でも良く評価された。以上より、本 SP 疲労試験の SP2 回以上の結果は、国内の JSSC レポートのみならず

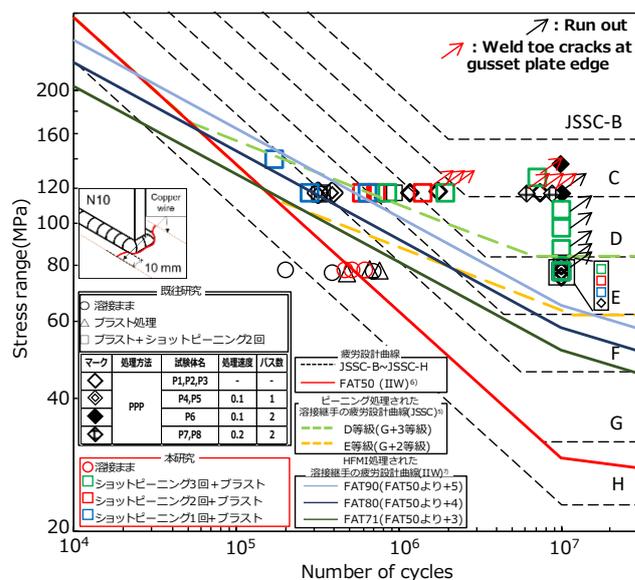


図-4 N_{10} 時の疲労試験結果

国際的な IIW の疲労設計基準のいずれに対しても適用可能であるといえる。一方、応力範囲 120MPa の試験結果にみられるように、既往研究の SP2 回の試験体の結果は、疲労強度向上効果はみられるものの、本研究の SP2 回試験体と比較し、同程度もしくは 1 等級低い結果となっている。これは、既往研究では狭隘部用のノズルを使用して SP 処理を行ったことによる差異と考えられる。ただし、既往研究の SP 試験体であっても、E(G+2) 等級のピーニング処理用の曲線により良く評価される結果であり、また、FAT80(FAT50+4) の曲線でも良く評価された。今後、ツールの違いによる圧縮残留応力の差異の整理を進める。

4. 結論

- ✓ SP 処理による確実な疲労強度向上効果を得るためには、SP 処理回数は 2 回以上が望ましい。
- ✓ 本研究で実施した SP 処理 2 回以上の試験結果は、JSSC レポート及び IIW で提案されたピーニング処理及び HFMI 処理された溶接継手の疲労設計曲線のどちらでも評価可能であった。
- ✓ 以上より、他のピーニング手法と同様の疲労設計基準を SP 処理に適用可能といえる。

〈参考文献〉1)村上ら:ばね鋼の疲労強度に影響を及ぼす介在物,ショットピーニング,脱炭層,微少表面ピットの総合的評価,ばね論文集,Vol.39,pp7-16,1994. 2)Metal Improvement company Inc., Carlstadt, New Jersey: A Concept for Preventing Repeated Weld Repairs of Bridge Structures, pp.208-226, 1990. 3)Kinoshita et al: Fatigue Strength Improvement of Welded Joints of Existing Steel Bridges by Shot-Peening, International Journal of Steel Structures, Vol.19, No.2, pp.495-503, 2019. 4)Kinoshita et al: Application of shot peening for welded joints of existing steel bridges, Welding in the World, Vol.64, pp.647-660, 2020. 5)日本鋼構造協会: JSSC テクニカルレポート No.120 「鋼橋の強靱化・長寿命化に向けた疲労対策技術資料」, 2020.10. 6)A. F. Hobbacher: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, IIW document IIW-2259-15, 2016. 7)G. B. Marquis., and Barsoum, Z. : IIW Recommendations for the HFMI treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, International Journal of Welding, pp.1-34.