

## 静的荷重下でピーニング処理された面外ガセット溶接継手の板曲げ疲労強度と残留応力

名古屋大学 正会員 判治剛 学生会員 ○加納俊 フェロー会員 舘石和雄 正会員 清水優

**1. 研究の目的** ピーニング処理を架設前の部材に施した場合、架設時の圧縮過荷重の作用や架設後の応力比の上昇により、処理効果が低減または消失することが懸念される。一方で、ピーニング処理を既設部材、つまり供用下の部材に対して行うことにより、これらの課題を克服できる可能性がある。本研究では、既設部材の予防保全対策として、死荷重を想定した静的荷重下での処理効果を、疲労試験と有限要素解析により明らかにした。

**2. 疲労試験** 図-1 に示す面外ガセット溶接継手を用いて板曲げ疲労試験を行った。鋼種は SBHS500 であり、降伏応力  $\sigma_Y$  は  $587\text{N/mm}^2$  である。溶接材料には SF-60 (型番: JIS Z 3313 T59J1T1-1CA-N2M1-UH5) を用い、まわし溶接部周辺は完全溶込み溶接とした。本研究では、エア式ニードルピーニング機器の一種である HiFIT<sup>1)</sup> (DYNATEC 製) を用いた。すべての処理は同一人物が実施し、処理条件も統一して行った。処理品質の管理に関しては別報<sup>2)</sup>を参照されたい。処理部の状況を写真-1 に示す。過去の実験<sup>3)</sup>と同様に、ガセット側の止端を処理した後、主板側止端に処理を施した。

無荷重下で処理した試験体と既設部材への処理を想定した静的荷重下で処理した試験体の 2 種類を用いた。疲労試験中の応力比  $R$  は  $0.5$  とした。無荷重下での処理は主板端部 4 点を拘束しながら行った。静的荷重下での処理は、板曲げ疲労試験機のコイルばねにより、疲労試験中の最小応力に相当する曲げ応力が生じている状態で行った。処理中の試験体の振動を抑えるために、静的荷重を与えてから直径  $18\text{mm}$  の寸切ボルトとナットにより試験体を架台にしっかりと固定して処理を行った。

処理形状はレプリカ法により計測した。無荷重下で処理した試験体の曲率半径は  $2.13\text{mm}$ 、処理深さは  $0.372\text{mm}$  であった。また、静的荷重下で処理した試験体の曲率半径は  $2.34\text{mm}$ 、処理深さは  $0.376\text{mm}$  であり、両者に大きな差がないことがわかる。

疲労試験結果を図-2 に示す。横軸は疲労き裂が主板に  $10\text{mm}$  進展した時点の繰返し数であり、縦軸はその時点までの等価応力範囲である。図中には、過去に同様の試験方法によって得られた溶接ままの疲労試験結果(AW)と、本研究とは異なるピーニング処理方法(HP, UIT, PPP)による疲労試験結果<sup>3)</sup>もあわせて載せている。無荷重下で処理を行った試験体では、写真-2 に示す処理部からの疲労き裂を確認したが、静的荷重下で処理を行った場合、 $200\text{N/mm}^2$  程度の高い応力範囲でも疲労き裂は発生しなかった。今後の試験結果の拡充が望まれるが、これらの結果より、死荷重が作用した状態でのピーニング処理の効果は高いことが示された。

**3. 有限要素解析** 溶接継手に対するピーニング処理を解析により再現するために、まず熱弾塑性解析による溶接残留応力分布の再現解析を行った。解析モデルを図-3 に示す。図-1 で示した試験体寸法を基に、計算時間短縮のため、対称性を考慮した  $1/2$  モデルとした。モデルの剛体移動を防ぐため

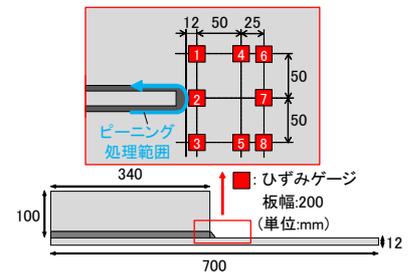


図-1 試験体



写真-1 ピーニング処理部

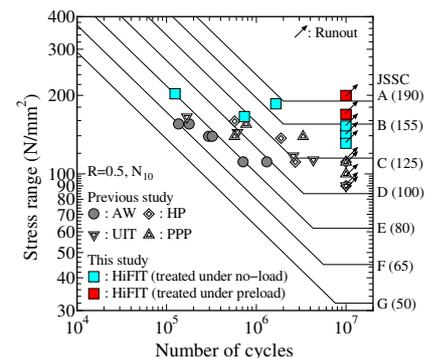


図-2 疲労試験結果



写真-2 処理部からの疲労き裂

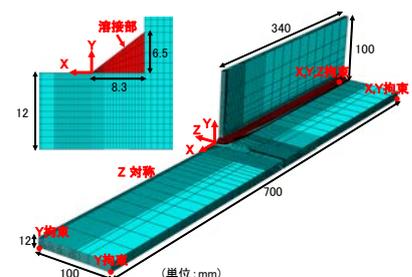


図-3 溶接シミュレーション

キーワード HiFIT, ピーニング処理, 既設部材, 圧縮残留応力, 板曲げ疲労強度, 有限要素解析

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 TEL: 052-789-4620

に主板端部に拘束条件を与えた。鋼材および溶接部の材料特性には温度依存性<sup>4)</sup>を与えた。解析では、試験体の製作手順にならない、完全溶込み溶接部、まわし溶接部、側面すみ肉溶接部の要素集合の出現と入熱を3段階に分けて行い、最後に室温まで自然冷却させた。入熱領域および入熱量は試験体の溶接条件に基づいて決定している。なお、入熱効率は80%とした。

温度履歴および残留応力分布の実測値と解析結果の比較を図-4、図-5、図-6にそれぞれ示す。実測値と解析結果は概ね一致しており、入熱方法および入熱量の妥当性が示された。

次に、溶接シミュレーションによって得られた残留応力分布を初期状態として与えたモデルに対して、ピーニング再現解析を行った。まず、無荷重下でのピーニング処理の再現を試みた。解析モデルと境界条件を図-7に示す。試験体での処理状態を基に、主板の端部と下面のY方向変位を拘束した。鋼板の弾性係数は200kN/mm<sup>2</sup>、ポアソン比は0.3、構成則は複合硬化則とし、パラメータにはSBHS500の材料試験<sup>5)</sup>により同定されたものを用いた。溶接部の構成則は移動硬化則とし、降伏応力 $\sigma_Y$ は547N/mm<sup>2</sup>、2次勾配が弾性係数の1/100のバイリニア型とした。本解析では、図-7に示すように、実測した処理部の曲率半径に合わせた剛体を静的に押し込み引き抜くことで処理を再現した。弾性変形分を考慮し、剛体は処理深さの1.05倍だけ押し込んだ。残留応力分布の実測値と解析結果の比較を図-5、図-6中に示している。残留応力分布の実測値と解析結果は概ね一致しており、溶接継手に対するピーニング処理を解析で再現できている。

最後に、静的荷重下でのピーニング再現解析を行う。静的荷重は、図-8に示すように、主板端部に鉛直下向き方向の強制変位を与えることで再現した。境界条件として、試験体処理時の固定状況と同じ範囲のXYZ方向変位を拘束した。試験体と同様に、溶接止端位置の公称応力が200N/mm<sup>2</sup>となるように強制変位を与えた状態でピーニングの再現解析を行った。処理後の残留応力分布は図-5、図-6中に示すとおりである。処理部から離れた位置では、実測値と解析結果に差がみられるものの、処理部近傍に着目すると、ピーニング処理後の圧縮残留応力は、処理時の応力状態に関係なく、ほぼ同程度の値であることがわかる。この結果は、疲労試験において、静的荷重下で処理を施した継手が無荷重下での処理の場合と比較して高い疲労強度を示したと整合している。

**4. まとめ** 既設部材の予防保全対策として、本研究では、繰返し荷重の最小応力を静的に作用させた状態でピーニング処理を施すことにより、応力比の影響を受けることなく、疲労強度が大幅に向上することを示した。さらに、ピーニング処理により導入される圧縮残留応力は、処理時の応力状態に関係なく、ほぼ同程度の値になることを実測と解析の両面から明らかにした。

**謝辞** 本研究の一部は2019-20年度「鋼構造研究・教育助成事業(代表:判治剛)」によるものである。また、試験体製作では日本車輛製造株式会社 吉嶺建史氏にご協力いただいた。ここに記して深謝します。

**参考文献** 1) IIW: Recommendations for the HFMI Treatment, Springer, 2016. 2) 加納ら: 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集 3) 日本鋼構造協会: JSSCテクニカルレポート No.120, 2020. 4) 金ら: 溶接学会論文集, Vol.23, No.3, pp.431-435, 2005. 5) Hanji et al: Int. Journal of Steel Structures, Vol.11, No.4, pp.409-425, 2011.

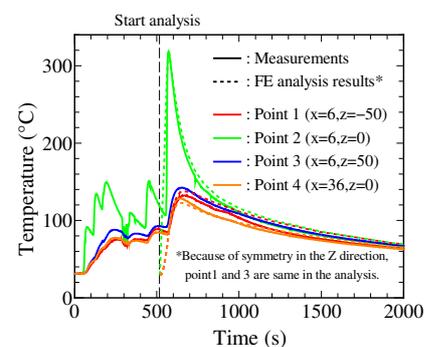


図-4 温度履歴の比較

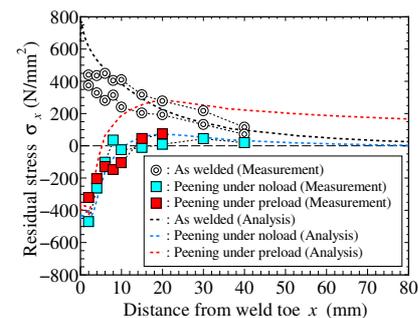


図-5 長手方向の残留応力分布

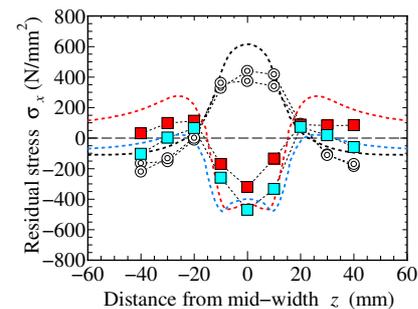


図-6 溶接止端から2mm位置の幅方向の残留応力分布

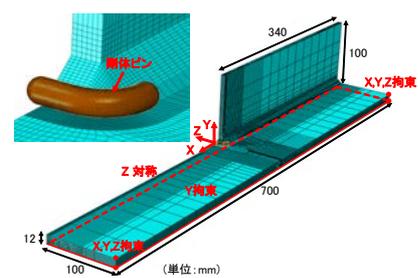


図-7 無荷重下でのピーニング解析

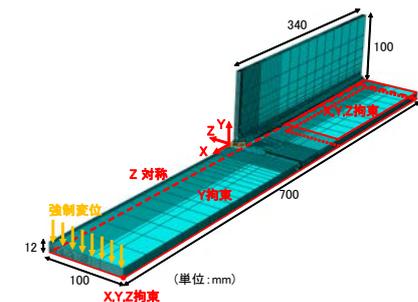


図-8 静的荷重下でのピーニング解析