

第 I 部門

ハンマーピーニングによる疲労寿命延伸メカニズムについての考察

大阪大学 接合科学研究所 学生員 ○長尾 涼太  
 正会員 堤 成一郎  
 学生員 植田 一史  
 正会員 Fincato Riccardo

1. 緒言

鋼構造物における疲労寿命延伸手法の一つとして、疲労き裂発生が懸念される箇所へのハンマーピーニングが注目されており、その効果は特定の構造および荷重条件下において実験的に明らかにされている<sup>1)</sup>。しかしながら、ピーニングによる表面変形や圧縮残留応力導入、材料硬化等が複合的に作用するため、それら個々の要因が寿命延伸にどのような影響を与えるのか十分に明らかにされているとは言えない。そこで本研究では、面外ガセット溶接継手を対象に疲労試験を実施することでピーニングによる疲労寿命延伸効果を調査し、さらに数値解析を用いて疲労寿命延伸に関わっていると考えられる要因を含めた解析を行い、ピーニングによる疲労寿命延伸効果のメカニズムの考察を行った。

2. ピーニング施工条件と諸量の計測

試験体は HT780 材を用いた面外ガセット継手とした (図 1)。ピーニングはタガネを装着したエアツールを用いて溶接ビード部に沿って継手の廻し部から 20mm 程度まで行った。ピーニング施工中は試験体両端をクランプで固定し、3 パス以上施工した。ピーニング前後の残留応力測定結果および止端部近傍の表面形状測定結果の一例を図 2 に示す。ピーニングによって止端半径が拡大していることが分かった。導入された圧縮残留応力は止端から 4-5mm の位置において最大となり、-600MPa 程度となった。また、試験体の長手方向断面形状を比較したところ、ピーニングにより角変形量が 0.5°程度から-0.1°程度に低減されたことが分かった。

3. 疲労試験条件及び試験結果

初めに繰返し荷重に対する止端部周辺の応答にピーニングの有無が与える影響を調査するため、デジタル画像相関法 (DIC) による止端部周辺のひずみ応答を調査した。繰返し荷重は公称応力範囲が 250MPa となるように設定し、応力比 R=0 とした。DIC による撮影範囲は止端部から幅方向に 40mm 程度、長手方向に 30mm 程度とした。なお、ピーニングなしの試験体を「250w/o」、ピーニングありの試験体を「250P」と表記する。DIC によって得られた、特定繰返し数における最大荷重作用時及び除荷時の止端部位置における長手方向ひずみを図 3 に示す。N=1000 におけるひずみについて、250w/o では最大荷重時は 4710 $\mu\epsilon$  程度となっているのに対し、250P では最大荷重時は 2250 $\mu\epsilon$  程度となっている。ピーニングによって最大荷重点での局所

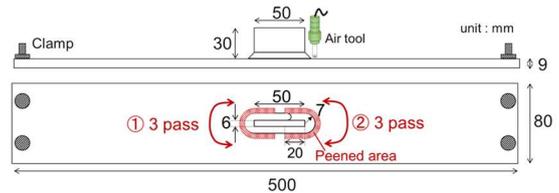


図 1 試験体の概要

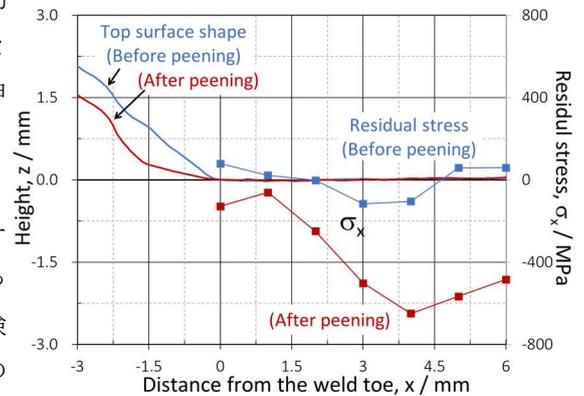


図 2 残留応力分布及び表面形状

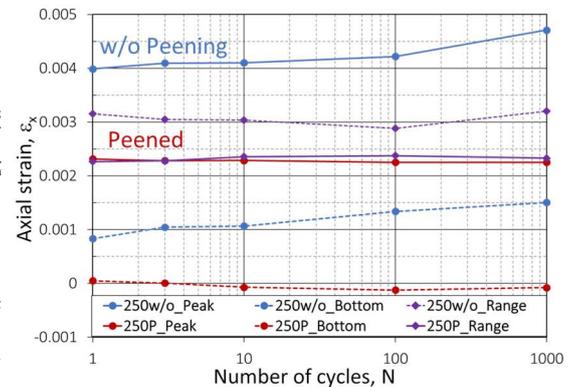


図 3 止端部における長手方向ひずみ変化

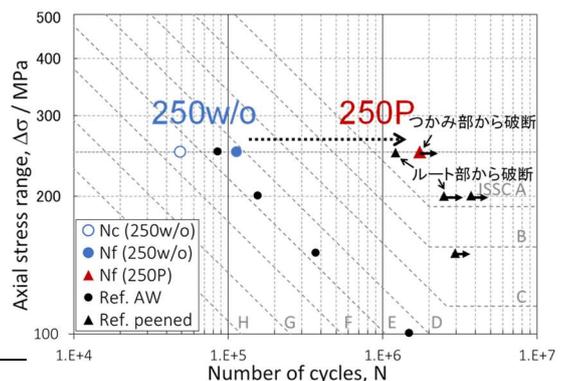


図 4 S-N 線図

Ryota NAGAO, Seiichiro TSUTSUMI, Kazushi UEDA, Riccardo FINCATO  
 tsutsumi@jwri.osaka-u.ac.jp

的な引張ひずみが半分程度に抑えられていることが分かる。N=1001 以降は油圧サーボ試験機を用いて疲労試験を継続した。試験荷重はN=1000 までと同様とし、周波数は5Hz とした。試験中は止端から12mm の距離に貼付したひずみゲージによってひずみを計測し、ひずみ範囲が5%変動した繰返し数をき裂発生寿命と定義した。結果を図4 に示す。参考に既往の研究<sup>2)</sup>で得られた破断寿命を黒点で示している。250w/o では約11 万回で破断したが、250P では約170 万回程度で止端部から破断せずつかみ部から破断したため、ピーニングによって破断寿命が15 倍以上に延伸していることが分かる。

#### 4. FE 解析による疲労寿命評価

本研究では疲労試験と同様の面外ガセット溶接継手を模擬した(1/4)モデル形状および境界条件を採用した解析を行った(図5)。モデル形状は250w/o 試験体を考慮した止端半径 $p=1.5\text{mm}$ 、角変形 $0.5^\circ$ のもの、ピーニングによる形状変化を考慮し止端半径 $p$ のみ $2.5\text{mm}$ に変化させたもの(250P1)、角変形のみ $-0.1^\circ$ に変化させたもの(250P2)、両方の形状変化を加えたもの(250P3)、及び形状変化に加えて材料硬化を含めたもの(250P3H)を作成した。材料硬化については、既往研究<sup>4)</sup>を参考にピーニング施工箇所周辺の要素の降伏強度をその他の部分の1.2倍とした。なお材料モデルは図6の応力ひずみ挙動を示す疲労SSモデル<sup>3)</sup>を採用した。解析順序としてはまず治具拘束による角変形矯正の再現計算を行い、その後モデル端部に繰返し荷重を100回載荷させることで疲労試験の再現計算を行った。疲労寿命評価にはN=100における累積相当塑性ひずみ増分を用いて外挿し、累積相当塑性ひずみが10に達したときに疲労き裂が発生すると仮定して疲労寿命予測を行った。図7に示すように、ピーニング影響なし(250w/o)に対して、250P1で2.24倍、250P2で1.83倍、250P3で3.43倍、250P3Hで6.60倍となることが予測された。

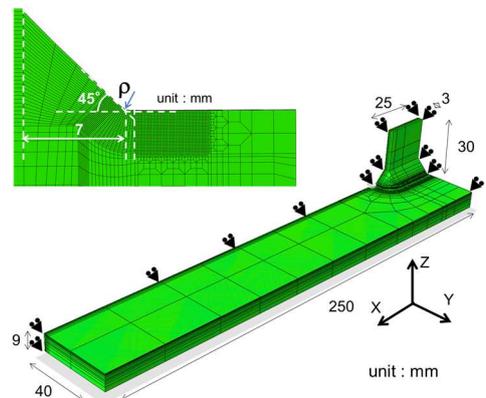


図5 解析モデル及び境界条件

#### 5. 結言

本研究ではハンマーピーニングを施工した面外ガセット溶接継手を対象とした疲労試験を実施し、1.ピーニングにより最大-600MPa程度の圧縮残留応力の導入、角変形量の低減、止端半径の拡大などの効果があること 2.繰返し荷重によって止端部近傍に集積される引張ひずみの大きさがピーニングによって大きく低減されること 3.面外ガセット溶接継手ではピーニング処理により、250MPaの応力範囲に対して破断寿命が15倍以上に延伸することを確認した。また数値解析により、ピーニングによる止端半径・角変形量の変化、材料硬化が疲労寿命延伸に寄与しており、それぞれの影響度合いを定量化した。今後の課題として、ピーニングによる高サイクル域での疲労寿命延伸効果の確認や、数値解析におけるピーニングの影響の再現性向上が望まれる。

#### 参考文献

- 1) 中西克佳, 森影康, 川畑篤敬, 靱一: 母材打撃ハンマーピーニングによる溶接継手部の疲労強度向上方法に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 71(1), 10-19, 2015.
- 2) 森影康: ハンマーピーニングの実適用を目的とした溶接継手の疲労特性向上に関する研究, 博士論文, 2016.3.
- 3) Tsutsumi, S. et al., "Fatigue life assessment of a non-load carrying fillet joint considering the effects of a cyclic plasticity and weld bead shape", Fracture and Structural Integrity, 38, 240-250, 2016.
- 3) 松本理佐, 石川敏之, 堤成一郎, 河野広隆, 山田健太郎: ハンマーピーニング処理による残留応力の解析的検討, 構造工学論文集 Vol.62A, pp.685-692, 2016.

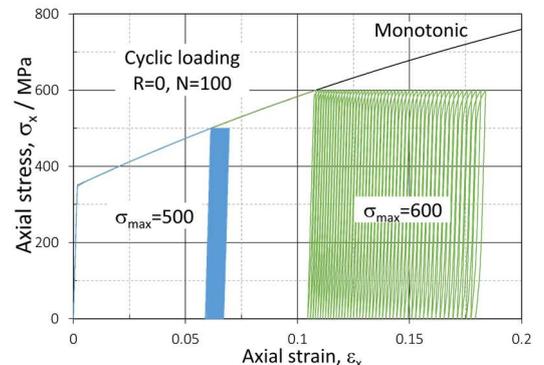


図6 採用した材料モデルの応力ひずみ挙動例

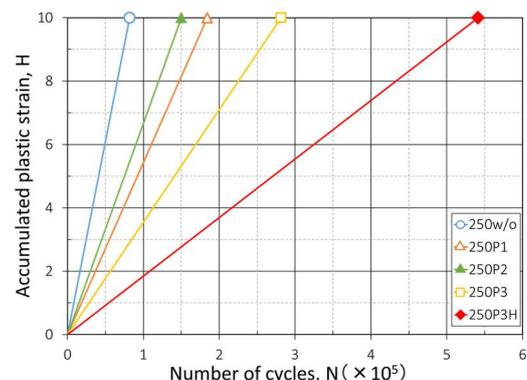


図7 累積相当塑性ひずみ外挿結果