

ピーニング処理により溶接継手に導入された圧縮残留応力の消失メカニズムの解明と疲労強度評価

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 岐阜大学大学院 学生会員 阪野裕樹

1. はじめに

大型車両や過積載車両の走行量の増加に伴い、鋼道路橋の溶接継手部に疲労損傷の発生が報告されている¹⁾。このような疲労損傷の対策技術の1つに、溶接止端部を金属ピンやニードルを用いて打撃することにより圧縮残留応力を導入し疲労強度向上を図るピーニング処理技術がある²⁾。我が国では、Portable Pneumatic needle-Peening(以下、PPP)、超音波ピーニング(以下、UIT)、母材打撃ハンマーピーニング(以下、HP)が勢力的に使用されており、高い疲労強度向上効果が得られることが明らかにされている^{3),4)}。一方で、ピーニング処理により圧縮残留応力が導入された溶接止端部に、架設段階や過積載車の通過による過大な圧縮荷重(以下、圧縮のOL)が作用した場合、作用する圧縮荷重の大きさによっては圧縮残留応力が消失し、ピーニング処理による疲労強度改善効果が消滅することが懸念されている⁵⁾。これまでに、圧縮のOLが作用したPPP、UIT、HP処理された面外ガセット溶接継手の処理部近傍に導入された圧縮残留応力の消失メカニズムおよび圧縮のOLが疲労強度向上効果に及ぼす影響が報告されており⁶⁾、さらなる追加実験や解析的検討が望まれる。

本研究は、ピーニング処理により溶接継手に導入された圧縮残留応力の消失メカニズムの解明および疲労強度評価を目的に、HP処理された面外ガセット溶接継手を対象に、圧縮のOL作用後のHP処理部近傍の残留応力・ひずみ計測および板曲げ疲労試験の結果を報告する。

2. ピーニング処理により溶接継手に導入された圧縮残留応力の消失メカニズムの解明

2.1 試験体

図-1に面外ガセット溶接継手試験体を示す。試験体は板厚12mm、幅300mmの主板上に、板厚12mm、高さ100mmの付加板をCO₂半自動溶接で接合した。鋼材は降伏強度390MPaのSM490YBを用いた。図-2に示すように試験体は平坦部が3×4mmに加工したチゼルを用いてHP処理を施した。

2.2 载荷試験

疲労試験に先立ち、圧縮のOLを作用させた際のHP処理端部から長手方向に2mm離れた位置でX線回折法を用いた残留応力計測ならびにひずみゲージを用いたひずみ計測を実施した。残留応力計測にはCos α法を用いたX線残留応力測定装置μ-360nを使用した。残留応力計測箇所は、グラインダーで試験体の黒皮の除去した上で鋼板表層から深さ100μm程度を電解研磨処理した。なお、残留応力の計測は圧縮のOL载荷中に随時実施している。図-3に圧縮のOL载荷状況を示す。载荷位

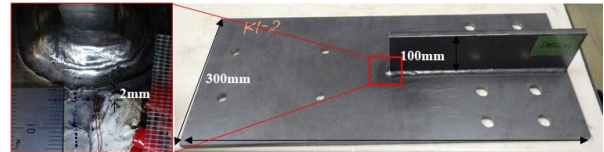


図-1 面外ガセット溶接継手試験体

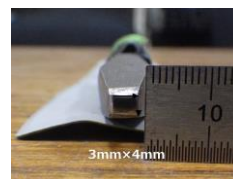


図-2 チゼル形状

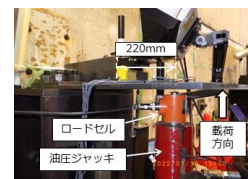


図-3 圧縮のOL
载荷状況

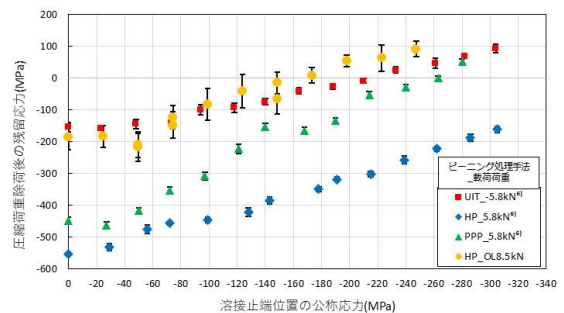


図-4 圧縮のOL 除荷後の残留応力計測結果

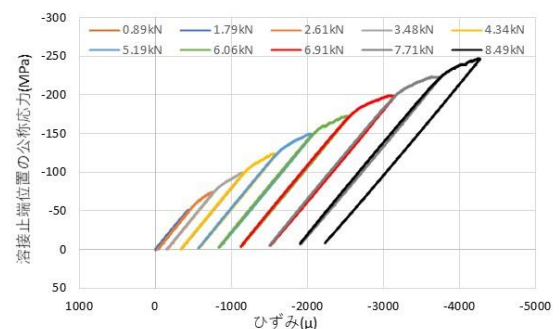


図-5 圧縮のOL 載除荷中のひずみ計測結果

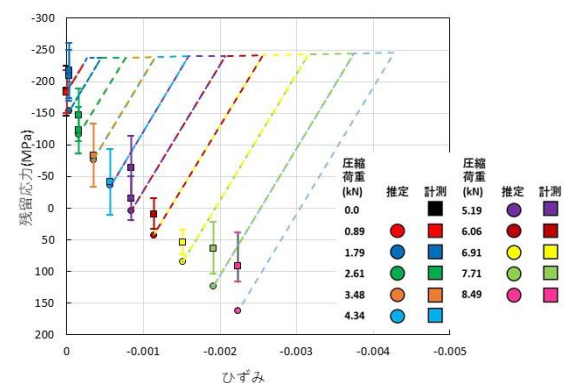


図-6 圧縮残留応力消失過程の推定結果

置はガセット端部から長手方向に220mmの位置とした。試験体と油圧ジャッキの間にロードセルを挿入し载荷荷重を管理し、溶接止端位置の公称応力 σ が、約-250MPaになるまでが-25MPa刻みで载荷・除荷を繰返した。

3. HP 処理部近傍の残留応力・ひずみ計測結果

図-4 に圧縮の OL 载荷中に随時計測した残留応力計測結果を示す。図より、圧縮の OL の増加に伴い HP 処理端部より 2mm の位置に導入された圧縮残留応力は線形的に消失し、圧縮の OL が 6.06kN (溶接止端位置の公称応力は-173MPa) 以上作用した場合、圧縮残留応力は完全に消失することが分かった。図-5 に HP 処理端部より 2mm の位置における、圧縮の OL 載除荷中のひずみ計測結果を示す。縦軸に溶接止端位置の公称応力を、凡例に载荷した圧縮の OL を示す。図より、作用する圧縮荷重が増加するに従い非線形性を示し、圧縮荷重除荷後に塑性ひずみの発生が確認されたことから、ひずみの再配分による導入圧縮残留応力の消失が伺える。ここで、既往研究において、ピーニング処理端部より 2mm の位置の残留応力計測結果およびひずみ計測結果を用いて圧縮の OL 作用後の導入圧縮残留応力の消失過程の推定の試みがなされている⁶⁾。そこで、既往研究⁶⁾と同様に、圧縮の OL が作用した HP 処理された面外ガセット溶接継手に導入された圧縮残留応力の消失過程を推定した。図-6 に推定結果を示す。図には HP 処理端部より 2mm の位置の残留応力計測結果 (図-4) を圧縮荷重除荷後に生じた塑性ひずみ (図-5) を用いてプロットするとともに標準偏差の範囲も示している。なお、圧縮残留応力の消失過程の推定にあたり X 線回折による残留応力計測結果を起点としているため、算出した応力-ひずみ履歴の折れ曲がり点が鋼材の降伏強度を一致していないことに留意されたい。作用させた圧縮荷重が 4.34kN 程度までは推定結果と残留応力計測結果がよく一致した。一方で作用させた圧縮荷重が 6.06kN から、推定結果と計測結果に差異が見られ、作用させた圧縮荷重が大きくなるに従い差異が大きくなった。この差異の原因は不明であるが、今後の予定として記載した圧縮荷重の消失メカニズムの解析的検討の課題としたい。したがって、本研究においても、処理部近傍の圧縮残留応力計測結果およびひずみ計測結果を用いて圧縮残留応力の消失過程を推定可能であることが分かった。

4. 疲労強度評価

HP 処理した面外ガセット溶接継手試験体に圧縮の OL を 8.5kN (止端から 12mm 離れた位置の応力で-200MPa) 作用させた後に疲労試験を実施した。本試験体に加えて、同試験体形状の as-weld 試験体 4 体、HP 処理を施し圧縮の OL を作用させていない試験体 1 体の試験を実施した。応力比は $R=-1$ とした。図-7 に回し溶接部から発生した疲労き裂が主板を 10mm 進展した段階である、 N_{10} 時で整理した S-N 線図を示す。縦軸は止端から 12mm 離れた位置の応力範囲で整理している。図中には、同試験体形状・同応力比で実施された疲労試験結果⁵⁾を合わせて示す。

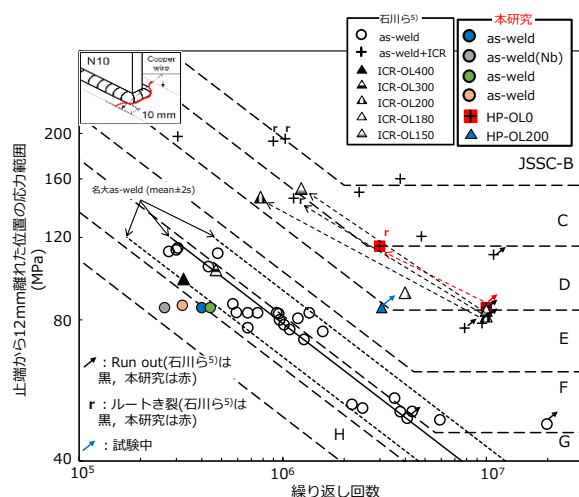


図-7 N_{10} 時で整理した S-N 線図

図より、本研究の as-weld 試験体は G 等級程度だったのに対し、既往研究の as-weld 試験体は mean が F 等級程度だった。HP 処理を施し圧縮の OL を作用させていない本研究の試験体は、応力範囲 85MPa で run-out した後に、115MPa で試験を続けた結果、溶接ルート部から発生した疲労き裂が進展し、C 等級上にプロットされた。したがって、本研究の HP 処理による疲労強度向上効果は 3 等級以上と言える。また、HP 処理を施し圧縮の OL を 200MPa 作用させた試験体は、現在試験中だが E 等級を示しており、2 等級の疲労強度向上が確認できる。既往研究の圧縮の OL を作用させた試験体は、圧縮の OL が 300MPa 以上で疲労強度向上効果は消滅した。一方で、圧縮の OL が 200MPa 以下では D 等級以上を示した。したがって、200MPa の圧縮の OL が作用した場合でも、2 等級以上の疲労強度向上効果が残されていると言える。これは本研究の圧縮の OL を作用させた試験体で確認されている疲労強度向上効果と同程度である。

5. 結論

HP 処理を施した面外ガセット溶接継手を対象に、圧縮の OL 载荷試験を実施した。OL 载荷中に随時計測した残留応力・ひずみ計測結果を用いて、圧縮残留応力の消失過程を推定可能であることを改めて示した。

今後の予定として、既往研究⁶⁾で実施された PPP, UIT, HP 処理および本研究で追加検証した HP 処理された面外ガセット溶接継手試験体を対象とした解析モデルを作成し、各種ピーニング処理された試験体に圧縮の OL を作用させ、ピーニング処理部近傍の圧縮残留応力の消失メカニズムの解析的検討を実施する予定である。

(参考文献) 1) 日本道路協会: 鋼橋の疲労, 丸善, 1997.5. 2) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 2012. 3) 判治ら: 止端処理による溶接継手の疲労強度改善効果とその鋼材強度依存性, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.646-658, 2017.3. 4) 木下ら: ニードルピーニングによる溶接継手部の疲労強度向上効果, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp.668-672, 2016.11. 5) 石川ら: ICR 処理による疲労強度向上効果に圧縮の過荷重が与える影響, 鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻, pp.345-350, 2011.11. 6) 日本鋼構造協会: JSSC テクニカルレポート No.120, 2020.10.