

ハンマーピーニングによる溶接継手の疲労性能向上技術開発



特集
接合科学研究所
産学連携シンポジウム

関西大学 環境都市工学部 准教授 石川 敏之氏
大阪大学 接合化学研究所 准教授 堤 成一郎氏

1. はじめに

鋼鉄道橋や重交通路線の鋼道路橋を中心に、疲労き裂の発生が報告されており、疲労対策が急務となっている。疲労き裂の簡易的な補修法として、図1に示すように、き裂近傍をエアーツールで打撃し、き裂表面を閉口して疲労き裂の進展を遅延させる衝撃き裂閉口処理 (ICR 処理) が開発されている [1]。この工法を、き裂がない溶接止端に適用することで、ハンマーピーニングとして利用でき、疲労強度が向上することが明らかにされている [2]。この工法では、図2に示す、先端が平たんに加工されたフラックスチッパーが利用されており、超音波ピーニングやニードルピーニングに用いられるピンの先端形状と大きく異なっている。したがって、フラックスチッパーをハンマーピーニングとして用いた場合、溶接継手に導入される圧縮残留応力の状態や、ピーニング処理として利用できる適用範囲が明確でない。

本稿では、これまでに実施したフラックスチッパーを用いたハンマーピーニングに対して導入される圧縮残留応力の分布の評価や、ピーニング処理として適用できる処理位置について検討した疲労試験結果等を紹介する。

2. ハンマーピーニングによって導入される圧縮残留応力の評価

フラックスチッパーを利用したハンマーピーニングによって導入される圧縮残留応力や、ピーニング処理部周辺の応力状態を種々の方法で調べた [3]。図3に示すような平板試験体の片側を固定して片持状態にしてピーニング処理を施し、ひずみゲージによる残留応力の評価、 $\cos \alpha$ 法を用いたX線回折による残留応力の評価を行った。平板には厚さ12mmのSM490Y材 (降伏応力405N/mm²) また、試験体を切断して切断面の変形を計測し、その形状を線形FEM解析でモデル化し、切断面が平たんな基準断面になるように強制変位を与えて残留応力を推定す

るコンター法も実施した。また、ピーニング処理部を板面内に熱膨張させて簡易的にピーニングを模擬した弾塑性有限要素解析 (FEM 解析) も実施した。

図4に、ひずみゲージおよびX線残留応力計測から得られた、ピーニング処理による平板の上下面の残留応力の分布を示す。ひずみゲージから計測された圧縮残留応力の分布とX線回折法によって計測された圧縮残留応力の分布が同様であることがわかる。フラックスチッパーを用いたハンマーピーニ

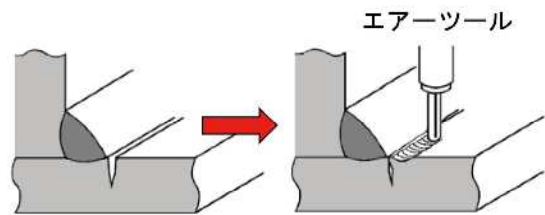


図1 衝撃き裂閉口処理の概要



図2 衝撃き裂閉口処理に用いるエアーツール

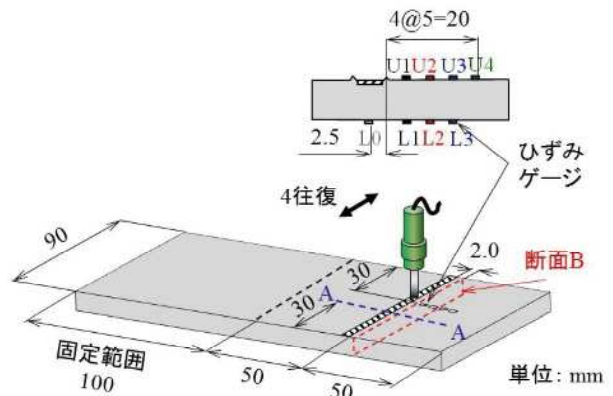


図3 ピーニングによる残留応力評価用平板試験体

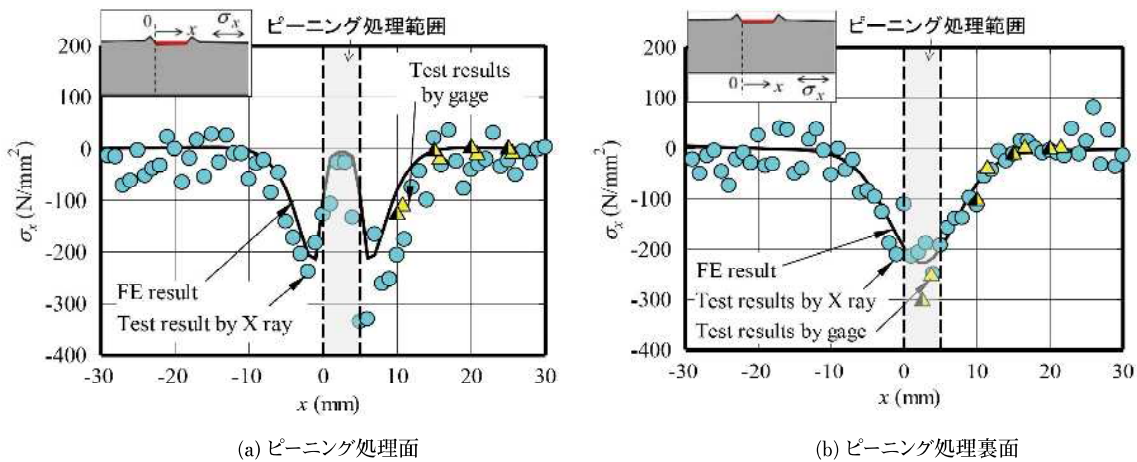


図4 ピーニング処理後の残留応力分布

ングによって、ピーニング処理範囲の圧縮残留応力よりも、ピーニング処理部の近傍およびピーニング処理部の裏面に大きな圧縮残留応力が導入されることがわかる。このような特徴は、ピーニング処理に用いたフラックスチッパーの先端の形状に依存する可能性がある。また、ひずみゲージから計測された圧縮残留応力と同様な分布となるように、板面内の熱膨張ひずみを 6000μ 、熱膨張導入深さを 3mm とした FEM 解析結果も図4に示している。FEM 解析結果は、X線回析法によって計測された残留応力分布と同様な分布になっていることがわかる。

コンター法によって計測された平板切断面（ピーニング処理縁から 2mm の位置）の残留応力の板厚方向の分布を図5に示す。この図には、熱膨張ひずみを利用してピーニングによる残留応力を再現した FEM 解析結果の分布も示している。この図からわかるように、コンター法によって計測されたピーニング処理による平板切断面近傍の残留分布は、平板表裏で圧縮残留応力、内部で引張り残留応力となるような分布となっていた。すなわち、ピーニング処理によって、処理側の表面に圧縮残留応力が導入されるが、断面内で応力がつり合うように内部で引張り残留応力が生じている。また、ピーニング処理裏面の圧縮残留応力は、ピーニング処理部が打撃によって側方に膨張し、ピーニング処理部裏側が圧縮となるような板曲げが生じるためと考える。したがって、主板の拘束状態によって、ピーニング裏面に生じる残留応力の値が異なると考えられる。熱膨張ひずみを利用した FEM 解析結果も、コンター法と同

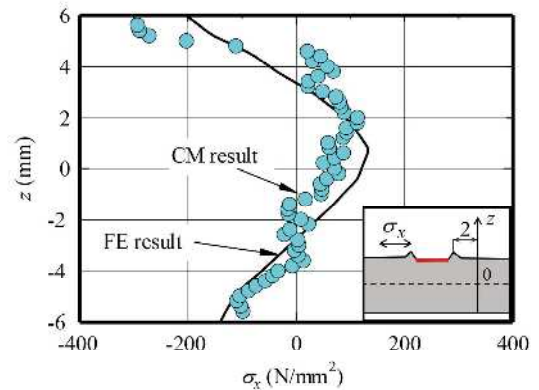


図5 鋼板内部の軸方向残留応力分布

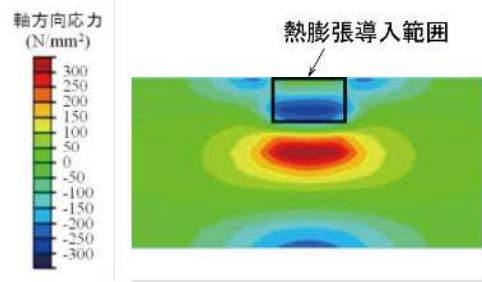


図6 鋼板内部の軸方向応力コンター図

様な残留応力分布となることがわかる。

図6に有限要素解析結果から得られたピーニング処理部近傍の平板内部の応力コンター図を示す。この図から、ピーニング処理部の近傍と裏面に圧縮残留応力が生じていることがわかる。したがって、3章では、それらの圧縮残留応力を利用した疲労強度向上法について紹介する。

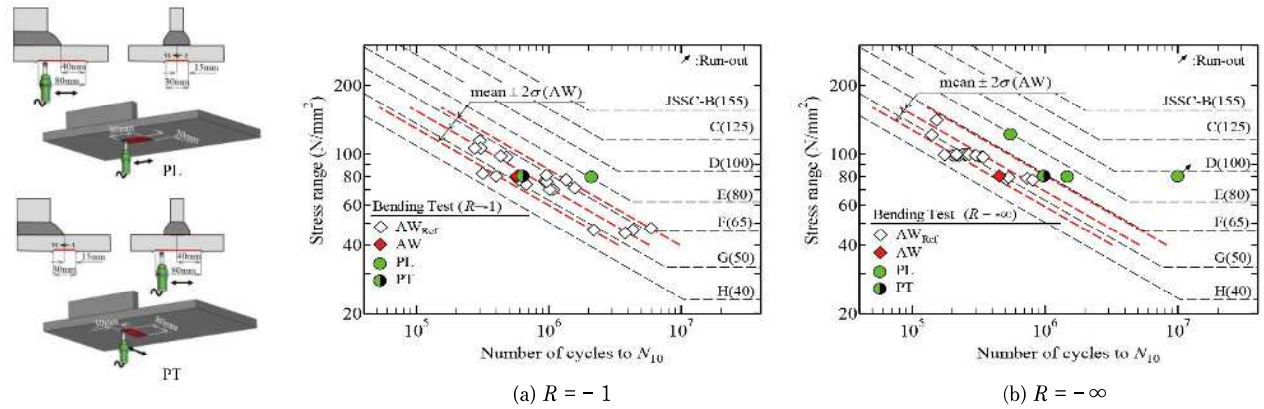


図7 面外ガセット溶接継手の裏面ピーニング処理後の効果

3. ハンマーピーニングによる疲労強度向上効果の確認

これまでに、面外ガセット溶接継手やリブ十字溶接継手に対して、フラックスチッパーを用いて溶接止端をハンマーピーニングすることで、疲労強度が大幅に向上することが明らかにされている [2]。ここでは、図6で確認された圧縮残留応力の分布を参考に、ピーニング処理から離れた位置およびピーニング処理の裏面の圧縮残留応力によるピーニング効果を評価した。

面外ガセット溶接継手に対して、溶接止端の裏面へのピーニングによる疲労強度向上効果を板曲げ振動疲労試験機によって確認した [4]。ピーニング処理方法と疲労試験結果を図7に示す。溶接止端の裏側からのピーニングに対して、応力比 $R = -1$ 、 $-\infty$ の場合に、面外ガセット裏面を面外ガセット溶接継手軸方向に沿ってピーニングした場合 (PL) に疲労強度向上効果が見られた。

図8に示すように、鋼床版では、デッキプレートとUリブの接合部の溶接ルート部からデッキプレートを貫通する疲労き裂が発生している。このき裂に対しては、疲労強度を向上させることが困難であるが、図9に示すように、溶接部の止端側にピーニング処理し、溶接ルート部の疲労強度を向上させる試みとして板曲げ振動疲労試験 (応力比 $R = 0$) を実施した [5]。疲労試験結果のS-N関係を図10に示す。この図から、溶接止端側に2ラインピーニング処理をすることで、溶接ままの溶接ルート部と比べて疲労強度が向上することが明らかとなった。ただし、横桁位置など連続してピーニングがで

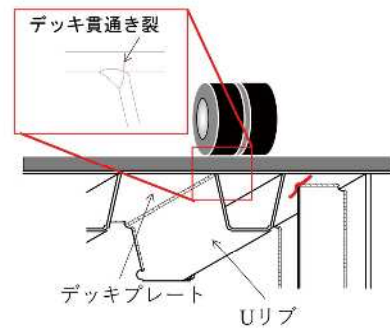


図8 鋼床版デッキプレート貫通き裂の発生位置

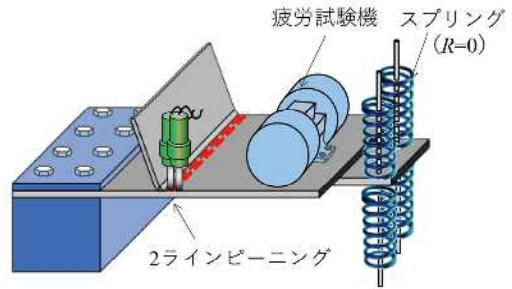


図9 溶接止端側のピーニング処理

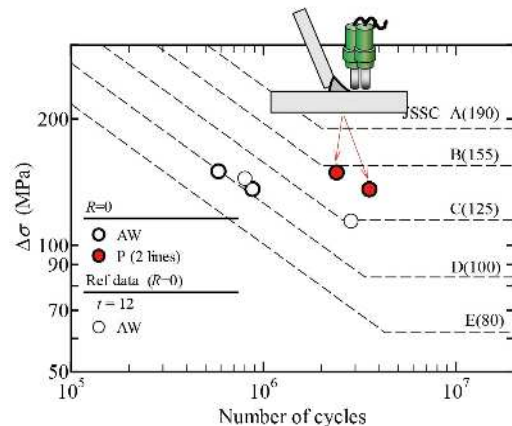


図10 溶接止端側のピーニング処理の効果

きない場合は、疲労強度が向上しないので注意が必要である [6].

溶接ルート部からのき裂は、Uリブ内部からも直接ピーニングすることはできないが、Uリブ内の溶接ルート部近傍(内側)をピーニングすることで、溶接止端側からのピーニングよりもさらに疲労強度が向上すると考え、図 11 に示すように、溶接ルート側をピーニングした疲労試験も実施した [7]. この試験では、溶接止端側(外側)から疲労き裂が発生する場合があるため、溶接止端側をグラインダー処理やピーニング処理して試験を実施した.

図 11 からわかるように、内・外側ピーニングを実施した試験体は、試験体固定部のフレットング疲労が発生したため試験を終了したが、疲労強度向上効果が最も高かった。内側ピーニングのみの場合は、溶接ままと比べて疲労強度が2倍に向上することが明らかとなった。

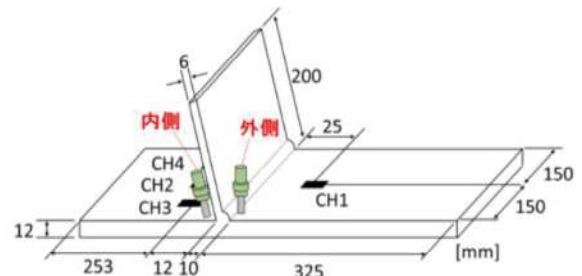
4. おわりに

本研究では、衝撃き裂閉口処理用のエアーツールであるフラックスチッパーを用いたハンマーピーニングによる疲労強度向上効果を明らかにするために、ハンマーピーニングによって導入される残留応力を調べた。また、ピーニング処理部に板面内の熱膨張ひずみを導入することにより、ピーニング処理によって導入される残留応力分布を簡易に再現できることを示した。

フラックスチッパーを用いたピーニングでは、ピーニング処理の周辺と処理部裏面に圧縮残留応力が生じるため、着目部から離れた位置をピーニング処理することによる疲労強度向上効果を調べた。その結果、繰り返し板曲げを受ける面外ガセット溶接継手に対して、応力比が $R = -1, -\infty$ の場合に対して、主板の裏面を面外ガセット軸方向に沿ってピーニング処理することで疲労強度が向上することが明らかとなった。また、デッキプレートとUリブの接合部のルート側から発生するデッキ貫通き裂に対して、デッキプレートの溶接止端側を2ラインピーニングすることによって、疲労強度が向上した。また、Uリブの内部をUリブに沿ってピーニングすることによっても疲労強度が向上した。

参考文献

1) 石川敏之, 山田健太郎, 柿市拓巳, 李 蒼, 土



試験体名	ピーニング		外側グラインダー
	内側	外側	
U1-AW	—	—	—
U2-P01	○	—	—
U3-G	—	—	○
U4-GP01	○	—	○
U5-GP11	○	○	○

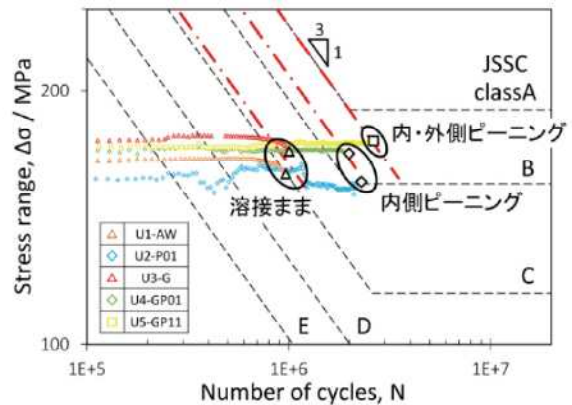


図 11 ルート側(内側)ピーニング処理の効果

木学会論文集 A, Vol.66, No.2 (2010), 264-272.
 2) 日本鋼構造協会, 鋼橋の強靱化・長寿命化にむけた疲労対策技術資料, JSSC テクニカルレポート No.120 (2020).
 3) 松本理佐, 石川敏之, 堤成一郎, 河野広隆, 山田健太郎, 構造工学論文集, Vol.62A (2016), 685-692.
 4) 松本理佐, ロッケンバッハ 浄, 石川敏之, 堤成一郎, 河野広隆, 溶接構造シンポジウム 2014 講演論文集 (2014), 477-480.
 5) 石川敏之, 堤成一郎, 松本理佐, 河野広隆, 溶接構造シンポジウム 2014 講演論文集 (2014), 185-188.
 6) 松本理佐, ロッケンバッハ 浄, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆, 構造工学論文集, Vol.63A (2017), 668-680.
 7) 長尾涼太, 堤成一郎, Fincato Riccardo, 石川敏之, 松本理佐, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-51 (2016).