超音波ピーニング処理した面外ガセットの局部応力に基づく疲労強度評価の検討

岐阜大学大学院　学生会員　○今村明登
岐阜大学　　正会員　　木下幸治

1. はじめに

鋼橋の溶接部の疲労強度向上法は多数存在しているが，ハンマーピーニングのような溶接部への圧縮残留応力導入により引張残留応力低減を目的とした方法では，各種方法により導入される圧縮残留応力が異なることから，統一的な疲労強度評価法を確立するには至っていない．圧縮残留応力導入による疲労強度向上は，き裂発生位置の引張側の応力範囲をできる限り小さくすることによるものである．このことから，き裂発生位置に導入された圧縮残留応力とき裂発生位置に発生する応力集中との和から求められる局部応力により疲労強度評価ができるのではないかと考えられる．本研究では面外ガセット溶接継手試験体を用いた疲労試験と FEM 解析並びに止端部の残留応力計測を行い，超音波ピーニング処理した面外ガセット溶接継手止端部の疲労強度評価法として導入された圧縮残留応力と止端部に発生する応力集中との和から求めた局部応力に基づく評価法について検討した．

2. 試験体および疲労試験方法

図-1 に疲労試験機及び試験体の寸法を示す．本研究では山田らにより開発された板曲げ試験機を用いて疲労試験を実施した．試験体は板厚 12mm の鋼板をすみ肉溶接で接合した面外ガセット溶接継手試験体を用いた．材料は SM490A を用いた．止端形状の計測を行ったところ，ピーニング処理の有無による大きな違いは見られなかった．公称応力範囲は文献 1)を参考に溶接止端から長手方向に 12mm の位置で，かつ試験体の中心から幅方向に 75mm 離れた位置に貼付したひずみゲージより求めた．応力範囲は上記ひずみゲージ位置において 80MPa 程度となる荷重を基本として与えた．疲労試験はピーニング処理なし試験体で 3 体，ピーニング処理あり試験体で 7 体，計 10 体実施した．また，ピーニング処理あり試験体のうち 2 体は 100MPa 程度の予荷重を与え片振りで疲労試験を行い，他の試験体は両振りで行った．

3. FEM 解析方法

図-2 に FEM 解析モデルの要素分割例を示す．解析モデルはモデルの対称性を考慮し 1/2 モデルとした．要素の最小寸法は板厚方向に 0.01mm とした．止端部の形状は止端形状計測結果の下限値を用いた．解析では公称ひずみゲージ位置の応力が 40MPa 程度となるように荷重を与えた．

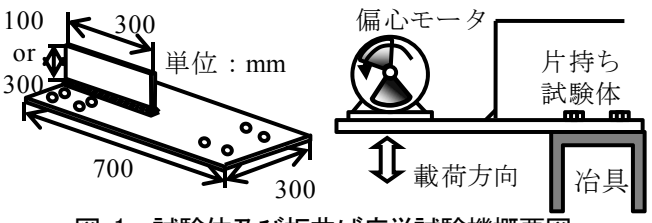

図-1　試験体及び板曲げ疲労試験機概要図

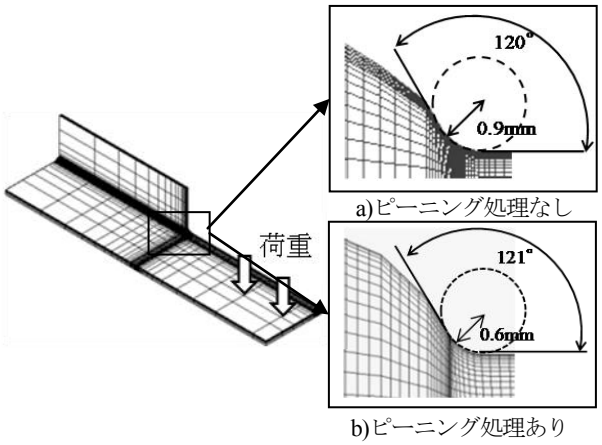

図-2 解析モデル

4. 残留応力測定

試験体の溶接止端部の残留応力はピーニング処理なし，ありの試験体を 1 体ずつ計測した．残留応力計測結果を**図-3** に示す．ピーニング処理なし試験体は表面では圧縮残留応力が導入されているものの，深さ 300μm では 30MPa 程度の引張残留応力となっていることがわかる．一方，ピーニング処理あり試験体では表面で-598MPa 程度の圧縮残留応力となっており，深さ 300μm まで-392MPa 程度の圧縮残留応力が導入されていることがわかる．これより，今回用いたピーニング処理では，ある程度の深さまで圧縮残留応力を導入できることがわかった．

5. FEM 解析結果

図-4 に FEM 解析より得られた溶接止端部周辺の最大主応力分布図を示す．止端部に発生する最大主応力の最大値はピーニング処理なし試験体で 308MPa 程度，ピーニング処理あり試験体で 294MPa 程度であり，ピーニング処理の有無で応力集中に大きな差異がないこ

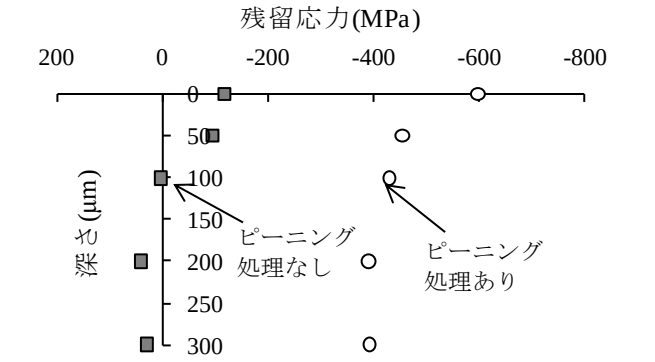

図-3 残留応力測定結果

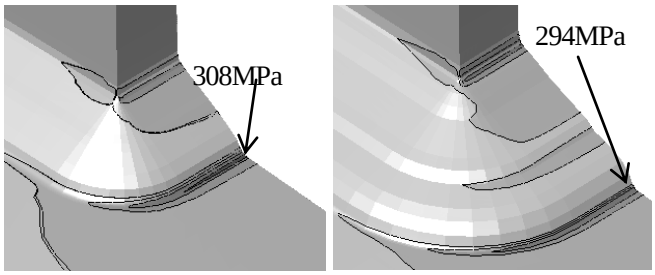

図-4 解析結果

とがわかる．従って，超音波ピーニング処理では主に圧縮残留応力の導入により疲労強度が向上すると考えられる．

6. 疲労試験結果

図-5 に疲労試験結果を示す．図中には疲労強度等級を示す．ピーニング処理なし試験体はF等級からG等級程度となった．一方，ピーニング処理あり試験体の2体を応力範囲80MPaで実施したところ，1体目は繰返し回数1000万回に達しても疲労き裂の発生が確認できなかった．これより応力範囲を120MPaに上げて疲労試験を継続したところ，疲労き裂は止端部から発生した．2体目はルート部からき裂発生した．3体目以降は応力範囲を予め120MPaまたは150MPaとして疲労試験を行ったが，いずれもルート部からき裂が発生し止端破壊，ルート破壊によらずD等級程度となった．また，片振りで疲労試験を行ったピーニング処理あり試験体2体は，止端部から疲労き裂が発生しピーニング処理なし試験体と同程度の疲労強度となった．以上のようにピーニング処理を実施することにより，止端破壊，ルート破壊に関わらず疲労強度が2～3等級程度向上すること，並びにルート破壊する可能性が高いことが確認された．

7. 超音波ピーニング処理した溶接継手部の疲労強度評価法の検討

本研究では超音波ピーニング処理した面外ガセット溶接継手止端部の疲労強度評価方法として，止端部に導入された圧縮残留応力 σ_{rc} とFEM解析により求めた止端部の局部応力 σ_{toe} との和から求めた疲労強度評価法を考え，この評価方法で用いる局部応力 σ_{local} を以下の式で定義した．

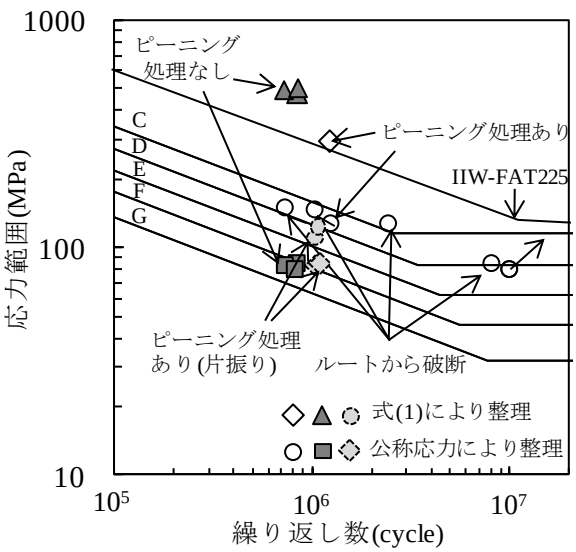

図-5 疲労試験結果

$$\sigma_{local} = \sigma_{toe} + \sigma_{rc} \qquad (1)$$

図-5 に式（1）を用いて求めた局部応力 σ_{local} で整理し直した疲労試験結果を示す．なお，図中には局部応力に基づく評価方法として，FAT225を本手法を検証する上での参考として示している．式（1）を用いて算出した局部応力により整理した疲労試験結果は応力範囲80MPaとしたピーニング処理なし試験体3体と応力範囲を80MPaから120MPaに上げ止端破壊したピーニング処理あり試験体1体と応力範囲80MPaとした片振りで疲労試験を行ったピーニング処理あり試験体2体の結果である．FAT225の曲線を基準に試験結果を見ると，ピーニング処理した試験体の結果はFAT225の曲線に近い位置にプロットされているが，ピーニング処理なし試験体及び片振りで疲労試験を行ったピーニング処理あり試験体はFAT225の曲線から離れた位置にプロットされており，両者の結果が直線的に整理できていないことから，本手法では精度よく評価できているとは言い難い．なお，式（1）を用いて応力範囲80MPaとしたピーニング処理あり試験体の局部応力を算出したところ，-5MPa程度となり，常に圧縮状態となっているために止端から疲労き裂が発生しなかったと推察できる．これより，止端部からのき裂発生の有無の評価に対しては本手法が適用できる可能性があると考えられる．なお，今回の検討に用いた溶接止端からき裂が発生した実験結果が少ないことから，今後より多くの実験結果を蓄積する必要がある．

<参考文献> 1) 山田ら：面外ガセット溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼすショットブラストの影響，構造工学論文集，Vol.54A，pp.522-529，2008.3.