

UIT を施した面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する最大応力の影響

法政大学 デザイン工学部 正会員 森 猛

新日本製鐵株式会社 鉄鋼研究所 正会員 島貫 広志

新日本製鐵株式会社 厚板営業部 正会員 田中 睦人

1. はじめに 一般に、鋼素材の疲労強度はその静的強度に比例して高くなるとされている。しかし、疲労上の弱点とされる溶接継手の疲労強度は静的強度レベルの影響を受けないとされている。そのため、橋梁などの構造物に高強度鋼を有効に利用するためには、溶接継手部の疲労強度を向上させる必要がある。疲労強度向上法は、疲労き裂の起点となる溶接止端の形状をグラインダーなどにより滑らかにする方法と低変態点温度溶接材料などにより圧縮残留応力を付与する方法に大別される。ここで注目する UIT (Ultrasonic Impact Treatment) は、超音波振動を利用してピンを振動させ、溶接止端部を打撃するものであり、圧縮残留応力の効果に加えて、止端形状改善効果も期待できる方法である。その疲労強度改善効果については、これまでも多数報告されている¹⁾。圧縮残留応力の効果は、処理後の応力履歴の影響を受けることが考えられるため、一昨年度と昨年度は、UIT 処理時の応力レベルを変え、また応力比を変えた疲労試験を行うことにより、UIT の疲労強度改善効果について検討した。そして、(1) 無負荷で UIT を行った面外ガセット溶接継手が高い応力比 ($R=0.5$) の繰り返し応力を受ける場合、顕著な疲労強度改善効果は認められない、(2) 荷重作用下で UIT を行った場合には、高い疲労強度改善効果が得られる、(3) UIT による止端部形状改良による疲労強度改善効果は、圧縮残留応力の効果に比べて小さい、という結果を得た。

本年度は、無負荷で UIT を行った面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する最大応力レベルの影響について実験的に検討した結果を報告する。また、UIT の止端形状改善による顕著な疲労強度向上が認められなかった原因を明らかにする目的で行った 3 次元弾性有限要素応力解析の結果も報告する。

2. 疲労試験 供試鋼材は、板厚 12mm の橋梁用高降伏点鋼板 SBHS500 (降伏応力:575 N/mm², 引張強度:665 N/mm²) である。試験体の形状・寸法を図 1 に、溶接部の外観を図 2 に示す。母材とガセットの接合は、CO₂ 法を用いて完全溶け込み溶接で行った。UIT の施工には、Applied Ultrasonics 製の ESONIX^(r) 27 UIS を使用した。ピンの直径は 3mm である。試験体は、溶接のままの試験体 (AW) の溶接止端部を UIT 処理した試験体である。疲労試験は動的能力 500 k N の電気油圧サーボ式材料試験装置を用いて、軸引張荷重下で行った。その際、最大応力 σ_{max} は 400, 352, 300, 268, 208 N/mm² とした。応力波形は正弦波、繰返し速度は 6~12Hz である。

昨年度の発表で、無負荷で UIT 処理を行い、応力比 $R=0.5$ で疲労試験を行った場合には、UIT 処理による圧縮残留応力の効果は認められず、その理由は付加応力が高くなると圧縮残留応力の効果が消失することにあると述べた。残留応力がない場合には、引

張りの範囲にある応力の変動幅が疲労寿命を決定し、圧縮領域にある応力の繰返しは疲労破壊に寄与しないという考え方がある。UIT の圧縮残留応力による疲労強度改善効果は、このようなメカニズムによるものと考えられる。これを模式的に示したのが図 3 である。すなわち、圧縮残留応力の効果が及ばない領域では、繰返し応力のすべての変動成分が疲労破壊に寄与するものの、それ以下の領域では圧縮残留応力の影響を超える領域の応力の変動幅が疲労破壊に寄与すると考えられる。

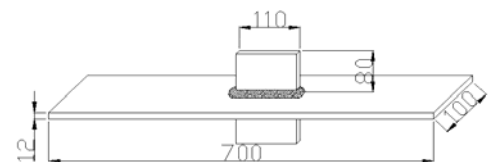


図 1 試験体寸法



AW UIT

図 2 溶接形状

キーワード UIT, 疲労強度改善, 圧縮残留応力, 最大応力レベル

連絡先 〒184-8584 東京都新宿区市谷田町 2-33 法政大学 都市環境デザイン工学科

疲労試験結果を、疲労試験時の上限応力 $\sigma_{\max}$ によってマークを変えて、図 4 に示す。図中の実線は、AW 試験体の疲労試験結果 ($R=0, 0.5$) に最小 2 乗法を適用することによって求めた疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線である。また、図中の数値 2 は、データが 2 つ重なっていることを意味している。 $\sigma_{\max}$ が 208 N/mm^2 と低い場合には、高い疲労強度改善効果が認められる。しかし、 $\sigma_{\max}$ が 352 あるいは 400 N/mm^2 と高い場合には、すべての応力範囲において、UIT による疲労強度改善効果はほとんど認められない。それらの中間である $\sigma_{\max}=268, 300 \text{ N/mm}^2$ の場合には、低応力範囲 ($\Delta\sigma=100, 130 \text{ N/mm}^2$) では UIT の効果が認められないものの、高応力範囲 ($\Delta\sigma=172, 200 \text{ N/mm}^2$) では疲労寿命が若干長くなっている。これは、上述の疲労強度改善メカニズムの考察とその傾向が一致している。ただし、上述の考察が正しいとすれば、 $\Delta\sigma=172$ と 200 N/mm^2 での疲労寿命は一致するはずであるが、ここでの結果は異なる。これは、圧縮残留応力の効果が、上限応力だけではなく、下限応力の大きさにも影響されることを意味しているものと考えられる。この圧縮残留応力による疲労強度改善メカニズムを定量的に示すためには、さらなる検討が必要と考えられる。

3. 応力解析 図 2 に示したように、UIT による圧痕は、図 5 に示すように上部から見て、円が重なったような形状となっている。ここでは、圧痕の断面形状を深さ 0.8 mm 、表面での幅 3.0 mm の半楕円形と仮定し、また圧痕の重なりを OL で表すこととした。そして、OL を $0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 3.0 \text{ mm}$ とした。OL= 3.0 mm では、圧痕の継ぎ目のない滑らかな形状となる。

最小要素寸法を 0.1 mm とした 3 次元有限要素解析から求めた OL= 0.7 mm での主応力のコンター図を図 6 に示す。最大の応力集中は圧痕の最深部ではなく、圧痕が重なった頂部に生じている。応力集中係数と OL の関係を図 7 に示す。応力集中係数は、OL が大きくなるにしたがって小さくなっている。したがって、止端形状改善による疲労強度改善効果を確保するためには、UIT の施工を圧痕ができるだけ密に重なるように行うのが望ましいと言える。

4. まとめ

- (1) 無負荷で UIT 処理を施した場合、上限応力が高い場合には圧縮残留応力の効果が減少する。
- (2) 最大応力を一定とした場合、最大応力が低いほど、また応力範囲が大きいほど UIT の効果は高くなる。
- (3) UIT の止端部形状改善による疲労強度改善効果は、圧縮残留応力の効果に比べて小さい。これは、ピンによる打撃痕が重なった頂部に高い応力集中が生じるためである。

参考文献：1) 例えば、野瀬哲郎：疲労強度向上向け超音波ピーニング法，溶接学会誌，Vol.77，No.3，pp.210-213，2008。

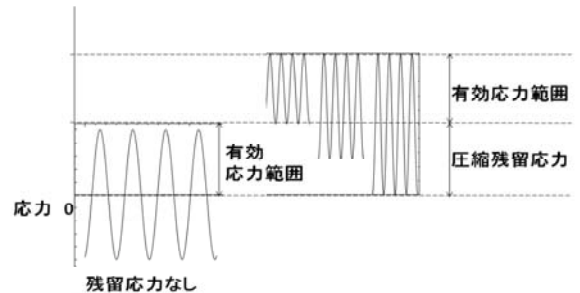


図 3 圧縮残留応力による疲労強度改善

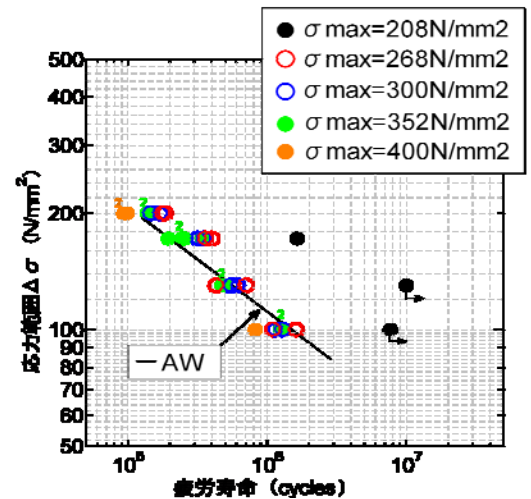


図 4 疲労試験結果

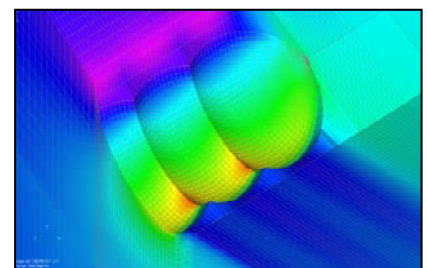
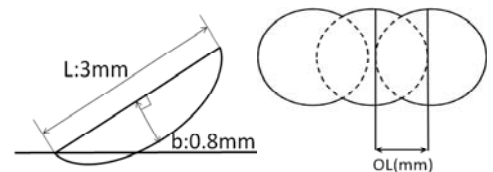


図 6 主応力のコンター図 (OL=0.7 mm)

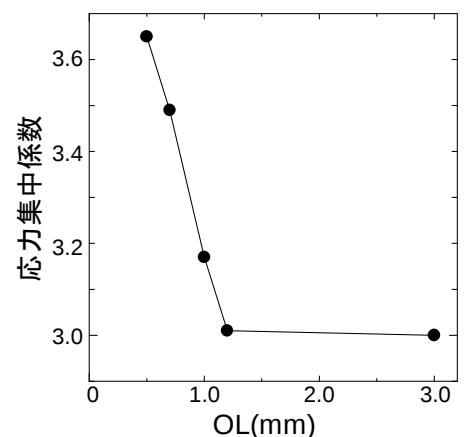


図 7 応力集中係数と OL の関係