

UIT による溶接継手の疲労強度改善効果の推定方法の検討

新日鐵住金 正会員 ○島貫 広志, 木下 昌彦
 法政大学 正会員 森 猛
 新日鐵住金 正会員 田中 睦人

1. 背景と目的

超音波衝撃処理(UIT)¹⁾等のピーニング処理による鋼橋、船舶等の溶接部疲労強度改善が一般化してきた。UIT 技術は溶接止端を金属製ピンで打撃し、溶接止端形状の改善により応力集中を低下させると同時に、溶接止端部に圧縮残留応力を導入し、局所的な平均応力を下げ疲労強度を向上させるものである。

疲労強度が要求される溶接構造物は一般に継手や負荷の形式ごとの S-N 曲線を基準として疲労設計されることが多い。この S-N 曲線は通常、鋼材の溶接部の場合、鋼材強度や応力比の影響をあまり受けないが、UIT を施した継手は鋼材材料強度や応力比の影響を受けることが知られている。よって、鋼構造物の溶接部疲労強度向上に UIT を有効に利用する為には、UIT 継手の S-N 曲線の設定や疲労強度の適切な推定方法の確立が急務となっている。

前報^{2,4)}では多数の UIT 継手を用い、様々な応力条件で疲労試験を行った。そして、UIT により導入される圧縮残留応力は高強度鋼程大きく、高強度鋼ほど UIT による高い疲労強度向上効果が期待出来ることを示した。また、UIT 継手の疲労強度予測については、止端残留応力を考慮した亀裂開閉口モデルを用いた亀裂進展解析で継手寿命予測ができることが示された。本報では、比較的簡易な手法により以前の結果を用いて様々な繰返し負荷条件で疲労強度予測法について検討したのでその考え方について示す。

2. 疲労強度簡易推定方法の検討

鋼材の疲労限度に及ぼす鋼材強度や応力比の影響については修正グッドマン線図によって良く表せることが広く知られている。また、溶接部の疲労強度は前述したように止端部に圧縮残留応力が存在する場合には、その局所的な応力状態に大きな影響を受けることから、本研究においては、UIT によって溶接止端部に圧縮残留応力を導入した試験片を例にとり、鋼材強度、修正グッドマン線図、止端の応力集中、止端残留応力を用いて、簡易に疲労強度や S-N 曲線を推定する方法について検討することにした。

UIT で処理された溶接止端の局所的な応力条件から疲労限度を予測することについては修正グッドマン線図を用いた方法が検討¹⁾されているが、この方法を多数の実験結果を用いてより詳細に妥当性の検討を行うことにした。また、UIT の疲労強度改善効果の主要因は圧縮残留応力であることから、UIT により導入した圧縮残留応力が負荷によって変化することで、疲労特性に影響を及ぼすと考え、止端の応力集中を考慮してその降伏条件との関係を調べた。

2. 1 疲労強度推定の条件式

溶接止端部に生じる局所応力 σ_L は公称応力 σ_N と残留応力 σ_{RS} 、集中係数 K_t から式(1)であらわされる。ここでは FEM 解析結果²⁾を基に、 $K_t = 2.81(\text{UIT}), 4.3(\text{AW})$ 、また、X 線回折法での止端付近での測定結果⁴⁾を基に $\sigma_R = -400\text{MPa}(\text{UIT}), 400\text{MPa}(\text{AW})$ とした。任意の応力比で疲労限となる応力振幅 σ_a は、修正グッドマン線図で表すと、 σ_m を平均応力、 σ_w を $R=-1.0$ における疲労限、 σ_B を引張強さとする式(2)であらわされる。

σ_w は経験的に引張強さと相関があること知られており、 $\sigma_w = (0.3 \sim 0.6) \times \sigma_B$ であると言われているが、ここでは係数 α ($\sigma_w = \sigma_B / \alpha$) を用いて表すこととする。なお、本検討では UIT 処理部の打撃溝の表面からの亀裂の発生を想定し、打撃による表面の凹凸があるため σ_w を低めに想定し、 $\alpha=3$ とした。また、部材に作用する公称応力の変動の最大を σ_{Nmax} 、最小を σ_{Nmin} とすると、式の展開は省略するが、式(2)の修正グッドマン線図は変形して σ_{Nmax} と σ_{Nmin} の関係式(3)と表わせる。

また、常に圧縮負荷が作用している場合には疲労亀裂は進展せず疲労破壊しない条件を式(4)とする。一方、繰返し荷重下で止端部が塑性変形した場合、つまり局所最大応力が降伏条件に達した際にUITにより導入された圧縮残留応力は再配分されてしまうことが想定される。以上の式(3),(4),(5)による有効領域概念図を図1に示した。

$$\sigma_L = K_t \cdot \sigma_N + \sigma_{RS} \quad \dots(1)$$

$$\sigma_a = \sigma_W (1 - \sigma_m / \sigma_B) \quad \dots(2)$$

$$\sigma_{Nmax} = \{2(\sigma_B - \sigma_{RS}) + K_t \cdot (\alpha - 1) \cdot \sigma_{Nmin}\} / \{K_t \cdot (\alpha + 1)\} \quad \dots(3)$$

$$\sigma_L < 0 \quad \dots(4)$$

$$\sigma_L = |K_t \cdot \sigma_N + \sigma_{RS}| \quad \dots(5)$$

3. 疲労試験データでの検討

疲労試験結果は前報^{2,3,4)}で示した橋梁用高強度鋼 SBHS 700(降伏応力:753N/mm², 引張強度:810N/mm²)の面外ガセット溶接継手の結果を用いた. この試験の溶接は CO2 完全溶け込み溶接. UIT 施工は ESONIX[®]27 UIS にて, 直径 3mm の打撃ピンを用いて実施. また, 疲労試験は繰り返し周波数 5~14Hz の軸力で, 様々な応力比で行われた.

試験の結果は図 1 中に UIT の効果のレベル別(ほぼ疲労限(破断繰り返し数 200 万回以上)となったもの, 溶接ままの寿命の差が明瞭(疲労寿命が 20%以上向上したもの), 溶接ままの寿命の差が小さいもの)にプロットした.

この結果, 前節の方法では特に公称応力が高い領域において, 疲労寿命延長と推定の領域でも疲労寿命の延長が少ない傾向がある. これは, 止端応力が計算上弾性域であっても止端部付近の形状のばらつきなどによる局所的なミクロな降伏の負荷中の進行や板厚内での降伏のため, 導入した圧縮残留応力が徐々に解放されていくためであろうと考えられる.

4. S-N 曲線の推定への展開

そこで, 試験片に繰返しまたは一回のみ荷重を付与した後に残留応力を測定した結果を図 2 に示す. 図より明らかに, 最大応力が増加すると繰返し負荷により UIT によって導入した圧縮残留応力が減少する傾向が見られた. つまり, 最大応力の低い疲労限については式(3)が妥当であるが, 高最大応力では式(5)で示した効果の上限応力は UIT 直後に比べ圧縮残留応力が徐々に低下することにより, 図 1 で見られたような高最大応力条件で UIT 効果が見られなくなる傾向が表れると説明できる.

任意の応力比での UIT 継手の S-N 曲線は図 3 の様に疲労限と降伏条件を線で結び, 作成できるものと考えられるが, 降伏条件(式(5))は図 2 の傾向を考慮して修正する必要があると考えられる. なお, 図中で直線で結ぶべきかどうかや, 応力比がマイナスになるなど低い場合について実験結果が少なく十分な妥当性の検討ができていないこと, また, 繰返し負荷による止端残留応力変化量予測が困難などの課題がある. しかし, こうした課題の解明により比較的容易に UIT 等ピーニング処理継手の S-N 曲線を予想できるようになると期待できる.

5. まとめ

UIT による疲労強度改善を行った溶接継手の疲労強度または寿命は処理による圧縮残留応力の影響が大きいいため, 疲労負荷中の止端部の残留応力挙動にも注目して S-N 曲線を推定する方法を提案した. 今後, 検証を進める予定である.

参考文献

- 1) 例えば野瀬: 溶接学会誌, 第 77 巻, 第 3 号, pp.4-7, 2008. 2) 森ら: 第 65 回土木学会年講, I-099, pp197-198, 2010.
- 3) 島貫ら: 第 66 回土木学会年講, I-144, pp287-288, 2011. 4) 島貫ら: 第 67 回土木学会年講, I-260, pp519-520, 2012.

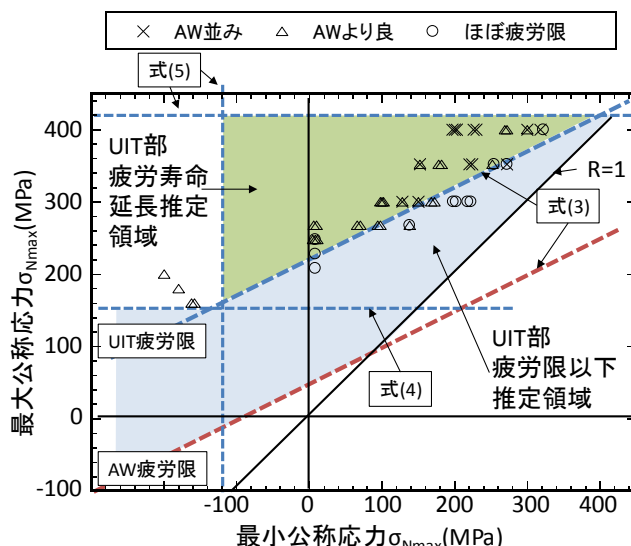


図1 UIT 処理効果領域の予想図 (残留応力変化なしの場合)

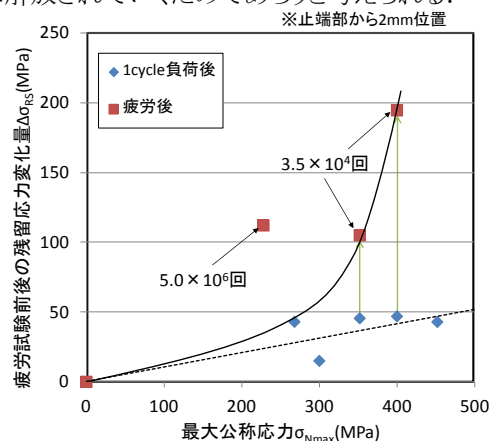


図2 繰返し負荷による圧縮残留応力の緩和量

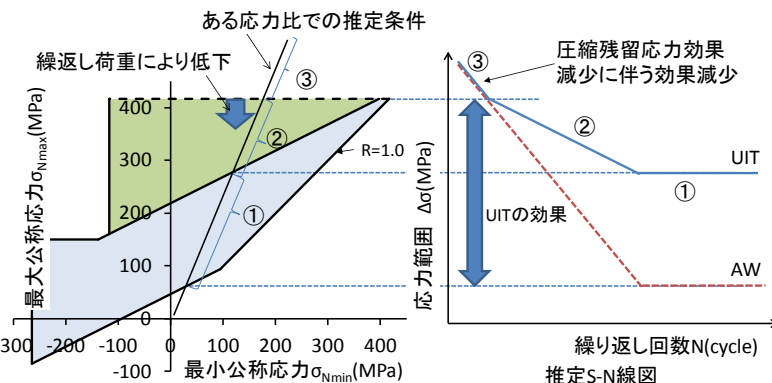


図3 S-N 曲線の推定方法概念図