

## 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 その 4

新日鐵住金 正会員 ○島貫 広志, 新日鐵住金 非会員 米澤 隆行  
新日鐵住金 正会員 田中 睦人, 法政大学 フェロー会員 森 猛

**1. 背景と目的 :** 溶接部の疲労対策処理の一つである超音波衝撃処理(UIT)<sup>1)</sup>等の HFMI 処理は, 溶接止端形状の改善に加えて, 溶接止端部へ圧縮残留応力導入を行い, 局所的な平均応力を下げることで疲労強度改善がなされており, この改善効果は高強度鋼材を用いた方がより顕著であることが知られている. これまで著者らは, UIT 継手における応力比, 鋼材強度, また, 繰返し負荷による残留応力変化などの疲労特性に及ぼす影響因子の検討から, 修正グットマン線図を応用し UIT 継手の S-N 線図を比較的容易に推定する方法を提案するとともに, その妥当性を検証してきた<sup>2,3,4)</sup>. 一方, IIW の第 XIII 委員会では疲労対策推奨法<sup>5)</sup>の一つである HFMI 処理を施した継手の S-N 線図を提案している.<sup>6)</sup> 著者らも前報<sup>7)</sup>で独自に行った実験結果を用いて IIW の提案の妥当性について検討した.

本報告では, 著者らが提案した S-N 線図の予測方法に関し, 前報<sup>2,4)</sup>で紹介してきた, UIT 継手の疲労試験データにさらに低応力比側のデータも追加し, 広い応力比での検証を行うと同時に, IIW 提案の S-N 線図との対応関係について考察した.

**2. 試験体と試験条件 :** 本研究では図 1 に示す形状・寸法の面外ガセット溶接継手試験体を用いた. 試験片作製に使用した鋼材は, 前報<sup>2,4)</sup>で用いた橋梁用高降伏点鋼板 SBHS700(降伏応力(YS):753N/mm<sup>2</sup>, 引張強度(TS):810N/mm<sup>2</sup>), SBHS500(YS:575N/mm<sup>2</sup>, TS:665N/mm<sup>2</sup>)と SBHS400(YS:453-458N/mm<sup>2</sup>, TS:549-561N/mm<sup>2</sup>)である. 溶接は SBHS700 でリッドワイヤを用いた CO<sub>2</sub> 溶接, その他の鋼材では FCAW で完全溶け込み溶接としている. UIT は, ESONIX<sup>®</sup>27 UIS (UIT は米国 UIT.L.L.C 社の技術)装置, 打撃ピンには直径 3mm, 先端曲率半径 3mm のものを用い, 溶接後に面外ガセットの回し溶接部の先端部から 50mm 程度の領域を溶接止端線が消失するまで行った. この処理によってできる止端部の凹みは 0.2~0.3mm を目標とした.

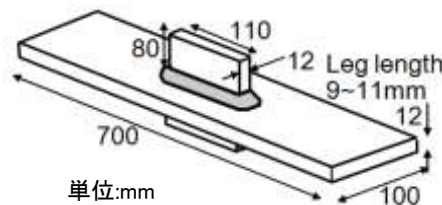


図1 面外ガセット溶接継手疲労試験片

疲労試験には容量が 500kN の油圧サーボ式試験機を用い, 応力比 R は R=-1 ~0.88 とした.

**3. 提案した S-N 線図の推定方法 :** 著者らが既報<sup>2,3,4)</sup>で提案した UIT 継手の S-N 曲線を推定方法は, UIT を施した継手の疲労限条件として, 修正グットマン線図を溶接止端部の局所的な部分に適用した式(1)と, 止端の降伏条件式(2)からそれぞれ疲労限応力と UIT による疲労特性改善効果が消失する繰返し応力条件(上限応力), そして溶接ままの継手の S-N 線図から成っている. この方法を用いて UIT 継手の S-N 線図を推定した結果と実験結果を比較した例<sup>4)</sup>を図 2 に示す. ここではある程度繰返し負荷を行い止端部の残留応力が安定した状況での圧縮残留応力値を実験から求めた. その結果に基づき降伏応力の 0.52 倍とした.

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

$$\sigma_Y = |K_t \cdot \sigma_{Nmax \text{ or } min} + \sigma_{RS}^*| \quad \cdots (2)$$

$\sigma_Y$ : 降伏応力,  $\sigma_B$ : 引張強さ,  $\sigma_W$ : 疲労限(= $\sigma_B/\alpha$ ),  $\alpha=3$

$K_t$ : 止端応力集中係数,  $\sigma_{Nmax \text{ or } min}$ : 公称応力の最大又は最小,

$\sigma_{RS}^*$ : 繰り返し後の止端部残留応力

さらに, 推定式(1)を用いて SBHS400, 500, 700 すべての疲労試験で得られた結果に基づいて, 鋼材強度と応力比の影響を整理(疲労限の変化する割合を補正)した. そして, すべての試験データを強度は SBHS500 相当に, 応力比は R=0.1 に変換した. 補正前後の結果を図 3 に示す. なお, UIT の効果が生じない応力よりも高い応力域のデータについても, 鋼材強度と応力比で補正される応力範囲の補正割合を試験応力範囲に乗じることで補正した. この結果, ばらつきはみられるものの鋼材強度と応力比の影響がほぼ解消され S-N 線図は一つの帯状領域で表された.

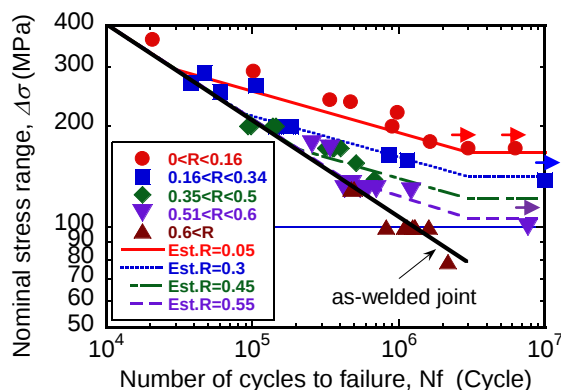


図2 SBHS500 の面外ガセット溶接継手の疲労試験結果と推定結果の例<sup>4)</sup>

表 1 IIW の S-N 線図での強度の影響

| 降伏強度<br>クラス(Mpa) | FAT class |                 |
|------------------|-----------|-----------------|
|                  | 上昇量       | 面外ガセット<br>継手の場合 |
| 235-355          | 4         | 112             |
| 355-550          | 5         | 125             |
| 550-750          | 6         | 140             |
| 750-950          | 7         | 160             |
| 950-             | 8         | 180             |

表 2 IIWS-N 線図の応力比の影響

| 応力比                  | 最小FATクラスreduction     |
|----------------------|-----------------------|
| $R \leq 0.15$        | No reduction          |
| $0.15 < R \leq 0.28$ | 1 FAT class reduction |
| $0.28 < R \leq 0.4$  | 2 FAT class reduction |
| $0.4 < R \leq 0.52$  | 3 FAT class reduction |
| $0.52 < R$           | —                     |

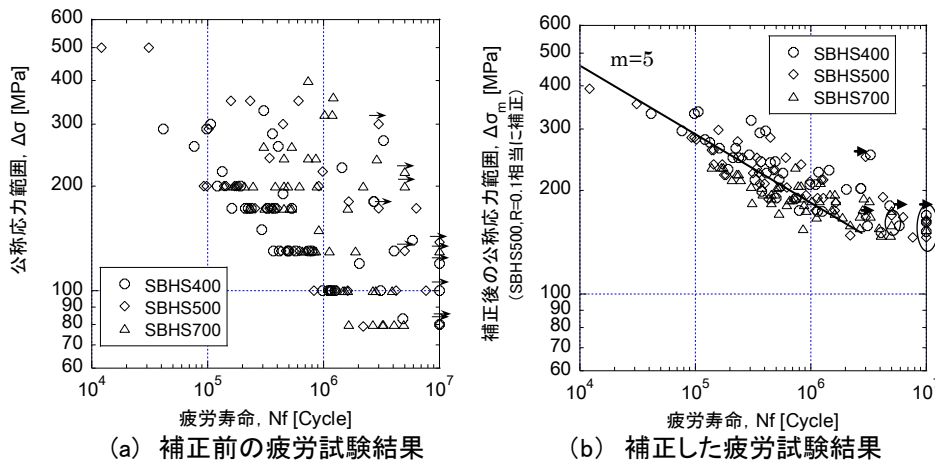


図 3 提案式による強度と応力比の影響を補正した疲労試験結果

4. IIWで提案されている HFMI 継手用 S-N 線図<sup>6)</sup> : S-N 線図は通常  $\Delta \sigma^m \cdot N = C$  (但し  $m, C$  は定数) の形で表され, IIW の S-N 線図の傾き  $m$  は 5 (ただし  $10^7$  回以上は 9) で, 通常の継手の  $m=3$  よりも大きい. この為, 高応力側では溶接ままと HFMI の線図が上下逆転するため, 溶接ままの方を用いる. 鋼材強度による FAT クラスを上昇及び, 応力比による FAT クラスの下降の程度を表 1, 表 2 に示した. なお, 本検討の評価に用いる応力は公称応力とした.

5. S-N 線図推定法の比較 : 上記二つの S-N 線図推定法の成り立ちは全く異なっているが, いずれも応力比と鋼材強度の依存性が示されている. まず, 応力比の依存性を比較した. 図 4 は応力比が 0.1 の条件を基準として IIW の HFMI 用線図<sup>6)</sup>については 200 万回疲労強度, 著者らの線図については, これにほぼ相当する疲労限の応力比依存性を合わせてプロットした. なお, IIW の線図<sup>6)</sup>では応力比が 0.15~0.52 で階段状の係数が設定されているが, これは著者らの提案式とほぼ重なる Weidner<sup>5)</sup>の式に基づいたものである. また, 応力比が負の領域については IIW の疲労設計推奨案<sup>5)</sup>において enhancement factor が定式化されており, HFMI に対してもこの式の適用が示唆されていることから, これらの式も合わせて記した. 図より明らかに, 著者らの提案式と IIW の断片的な提案式<sup>5,6)</sup>はほぼ傾向が一致した.

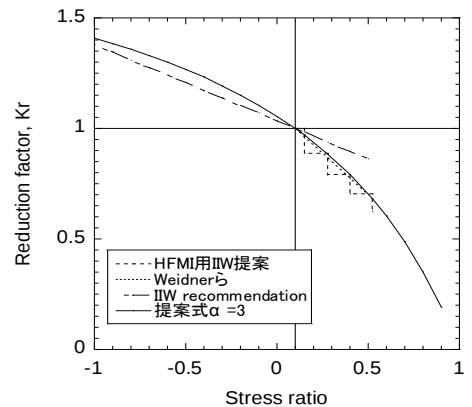


図 4 応力比の影響の比較

次に, 鋼材強度に関して IIW 提案の階段状の 200 万回疲労強度への依存性と著者らの疲労限推定値との関係を図 5 に示す. 著者らの提案の方が特に高強度ほど疲労限を高く推定する結果となった. この原因は著者らの線図が面外ガセット継手の結果に基づいているのに対し, IIW の線図では十字継手等異なる形状の試験片のデータが含まれていることによる可能性が考えられ, 継手形式の影響については今後検討が必要である. また, IIW の HFMI 用 S-N 線図<sup>6)</sup>の傾き  $m$  は 5 であることから, 図 3(b) の  $2 \times 10^6$  回以下のプロットの中央に  $m=5$  ラインを書き入れたところ, 著者らの推定法で補正したプロット群の傾きとほぼ一致する結果となった.

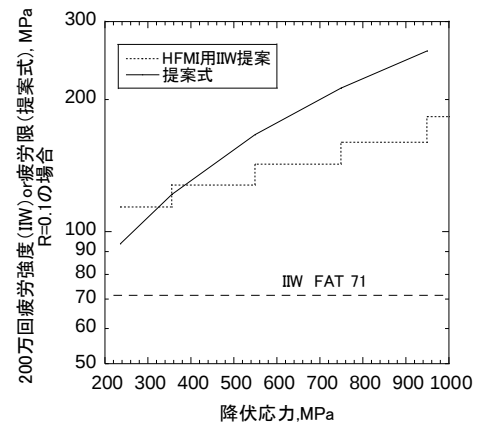


図 5 強度の影響の比較

5. まとめ : 著者らが既報で提案した UIT 継手の S-N 線図推定方法について疲労試験結果を追加して検証し, その妥当性を確認した. また IIW 第 XIII 委員会にて提案され検証中の S-N 線図と著者らの方法を比較し, S-N 線図の傾きや応力比の影響の見積もりについてはほぼ同等であるが, 鋼材強度の影響については IIW の方法の方が鈍感である傾向が得られた. 今後, より詳細な比較検討を実施する予定である.

参考文献 : 1) 例えば野瀬: 溶接学会誌, Vol.77, No.3, pp.4-7, 2008. 2) 島貫, 木下, 森, 田中: 第 68 回 JSCE 年講, I-543, 2013. 3) 島貫, 米澤, 森, 田中: 溶接構造シンポジウム 2014. 4) 島貫, 米澤, 田中, 森: 第 70 回 JSCE 年講, I-366, 2015. 5) Hobbacher :IIW recommendations, 2009. 6) G. Marquis, et.al: IIW Doc. IIW-2393, 2013. 7) 島貫, 森, 田中: 第 69 回 JSCE 年講, I-454, 2014. 8) Weidner, et.al: IIW Document XIII-2341-10, 2010.