

UIT 処理を施した面内ガセット継手の疲労特性に及ぼすガセット寸法の影響についての考察

日本製鉄 正会員 ○島貫 広志, 正会員 米澤 隆行

1. 背景と目的

HFMI¹⁾など各種溶接止端のピーニング処理は、溶接止端に圧縮残留応力を導入することで、疲労亀裂の発生を抑制する。こうしたピーニング処理では処理ツールの先端形状が止端に転写されるため、継手の主板やガセットなどの板厚に関係なく、止端形状が一定となる。多くの溶接継手では鋼板の板厚の増大によって疲労強度は低下する。これは溶接部の止端形状・寸法が一定の場合、厚手の方が相対的に構造的応力集中が大きい領域に止端応力集中が重畳するためと考えられる。しかし、主板とガセットが同厚の面内ガセット継手は二次元的な継手形状である為、主板厚が増しても、溶接部の形状が変わらず応力集中係数も変わらないと考えられる。一般に面内ガセットではガセット厚が主板より小さくなっているケースが多いものの、ガセット厚の効果についての文献は見当たらなかった。また、溶接ままのガセット継手については JSSC の疲労設計指針・同解説²⁾(以下 JSSC 指針と呼ぶ)や IIW の疲労設計指針³⁾において疲労設計線図はガセット長の影響を受けるため配慮されている。

著者らは十字継手や面外ガセット継手に対して UIT を施した場合の疲労強度に及ぼす板厚効果を実験と解析により検討してきた^{4,5, 7,10)}。本報では、それらに続き面内ガセット継手についても応力集中の影響で疲労強度の差が表れると考え、UIT を施した面内ガセット継手について止端部の応力集中を FEM 解析により計算し、板厚とガセット長の影響について考察した。

2. 試験片形状

検討を行った試験体は図 1 に示す面内ガセット継手とした。主板厚 t_m は 16~48mm, ガセット厚 t_g は主板と同厚のものと、6.9mm を中心に主板より薄いもの、またガセット長 L_g の影響についても検討した。UIT を施した角回し溶接止端部の形状は処理ツールを通常主板面に対し垂直より 10° 程度傾けて処理することが多いことを考慮してモデル化した。打撃深さについては通常 0.2~0.3mm の深さを管理値として施工することが多いことから、深さを 0.25mm とした。また、UIT 打撃ピンには直径 3mm, 先端曲率半径 3mm であって、ピン先端部から胴部にかけては実際のピンに合わせ滑らかに面取りされているものを用いることを想定した。

3. FEM による応力集中解析

図1の試験体を図 2 に示す例の様に 6 面体のソリッド要素を用いて要素分轄を行った。解析モデルは 1/4 対称モデルとし、試験片両端の面形状を保持したまま試験片長手方向に引張った場合の挙動解析を行った。解析コードには MARC®2020 を用い、ヤング率を 205800N/mm², ポアソン比を 0.3 として弾性解析にて応力集中を求めた。応力集中係数 K_t は、溶接止端部の UIT 溝内の最大主応力を、試験片平行部の中央付近で応力分布が緩やかな部位の材軸方向応力で除することで定義した。 K_t におよぼすガセット厚 t_g の影響の計算結果を図 3 に示す。主板 t_m と t_g が同じ場合は、止端部の形状が同じ弾性解析であるため、予想通り板厚によらず K_t は一定となった。プロットは省略したが、ガセット長 L_g を 270mm にした場合には K_t が 4.14 となり、ガセット長の影響が顕著であることが判った。なお、著者らが計算した同形状の UIT 溝を持つ面外ガセット継手の応力集中係数¹⁰⁾が、主板板厚 t_m 16mm, ガセット長 L_g 110mm の場合 2.6 程度であったのに対して $t_m=t_g$ の条件で K_t が約 3.5 であり、明らかに面外ガセットより面内ガセット継手の応力集中が大きい。また、 t_g を t_m に対して薄くした場合、 t_g の減少に伴い K_t が低下し、収束して行く傾向が見られた。図 4 には一部の条件について K_t に及ぼす L_g の影響について示した。これらの検討の中で応力集中に対しては L_g の影響が顕著であることが示された。

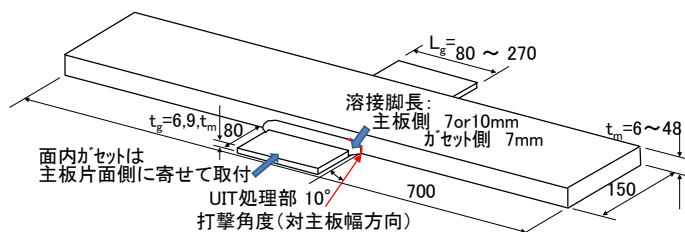
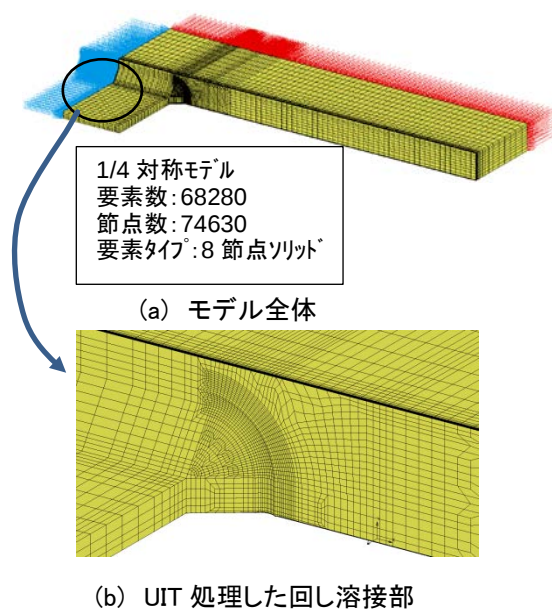


図1 試験体形状(単位 mm)

図2 面内ガセット試験片の FEM 要素分轄例 ($t_m=24$ mm, $t_g=6$ mm, $L_g=110$ mm)

4. 溶接止端部の残留応力

試験片の残留応力を検討するに当たり、 $t_m=19\text{mm}$ 、 $t_g=9\text{mm}$ 、 $L_g=270\text{mm}$ の SS400 (YS=288MPa, TS=445MPa) の面内ガセット継手の疲労試験体を作製し、X 線残留応力測定装置 μ -360N を用いて止端部付近の残留応力を測定した。この結果を図5に示す。参考のために溶接まま(AW)の結果も合わせてプロットした。UIT 止端部(打撃溝内部、約 $\pm 1\text{mm}$ 程度の領域)の材軸方向では 400~570MPa のばらつきを持つ圧縮残留応力値を示した。そこで同様に作製した継手の 4 止端部に $GL=2\text{mm}$ の 1 軸ひずみゲージを添付、初回負荷時の止端部の降伏条件を確認した。この結果を Fig.6 に示す。止端によりばらつきはあるが公称応力で大凡 125~185MPa から止端部の塑性化が起こっており、 K_t の計算結果と YS に基づき止端部の残留応力を逆算すると 187~415MPa と実測データよりも小さめであった。ただし、この値は打撃によるひずみ硬化は考慮していない為、厳密なものではない。

4. 試験片の疲労強度推定

著者らは UIT 継手の疲労限を修正グットマン線図を、UIT 溝内の応力状態に局所的に適用することで予想できることを示している^{6,7,8)}。この方法は鋼材の強度情報や UIT 溝内部の残留応力と応力集中を考慮した溝内部の応力範囲や平均応力から疲労限を推定するもので、疲労限となる公称応力範囲 $\Delta\sigma_N$ を疲労負荷中に緩和されて最終的に UIT 処理止端に残る残留応力 σ_{RS} を用いて推定する。UIT 溝内部の繰り返し負荷後の σ_{RS} については、米澤ら⁹⁾が面外ガセット継手の疲労試験片の残留応力測定結果を基に鋼材の降伏強度と引張強度に対する残留応力推定式を提案している。ここでは面内ガセット用ではないがこの式⁹⁾を用いて残留応力推定、前報¹⁰⁾同様、止端の応力集中を今回の面内ガセット応力集中係数で補正して疲労強度を推定した。その他、推定条件の係数も前報¹⁰⁾同様とした。

上記方法によって推定した面内ガセット継手の疲労強度を、応力集中係数を示した図3、図4に合わせてプロットした。推定疲労強度は応力集中の増大に合わせて低下する傾向を示している。

5. 疲労特性に及ぼす面内ガセット寸法の影響の考察

JSSC 指針や、IIW の指針では面内ガセット継手の主板とガセットの板厚比の影響は述べられていないが、今回の解析検討の結果、面内ガセットの疲労特性については、ガセットの板厚よりも板厚比やガセット長の影響が大きいと推察されこれらを考慮する必要があると考えられる。また、実験によるこれらの因子の影響度の検証は道半ばであり、今後実験データと合わせて確認していく。

参考文献：

- 1) G. B. Marquis ら: IIW Collection, Springer, DOI 10.1007/ 978-981-10-2504-4, 2016. 2) JSSC 編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 2012 年度改定版, 2012. 3) A. F. Hobbacher: IIW Collection, Springer, DOI 10.1007/978-3-319- 23757-2, 2016. 4) T. Iwata ら: 溶接学会論文集, No.34, Vol.4, pp249-259, 2016. 5) 島貫ら: 第 73 回 JSCE 年講, I-142, 2018. 6) 島貫ら: 溶接構造シンポジウム 2014 講演論文集, 2014. 7) 島貫ら: 溶接構造シンポジウム 2019 講演論文集, 2019. 8) 島貫ら: 新日鉄住金技報, 第 400 号, pp100-, 9) 米澤ら: 溶接学会論文集, No.37, Vol.1, pp44-, 2019. 10) 島貫ら: 第 75 回 JSCE 年講, I-49, 2020.

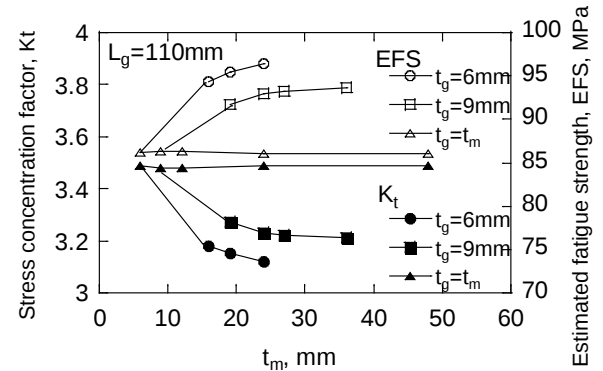


図3 面内ガセット厚みの止端応力集中と疲労試験疲労強度推定結果に及ぼす影響

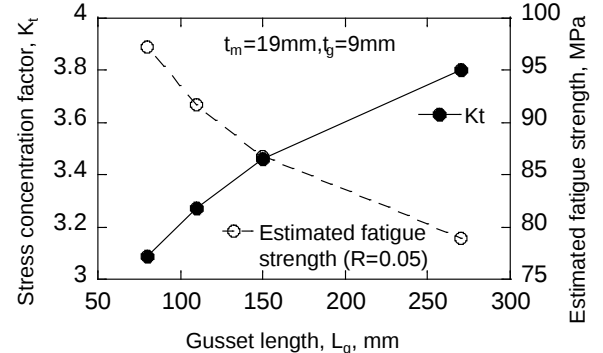


図4 面内ガセット長の止端応力集中と疲労試験疲労強度推定結果に及ぼす影響

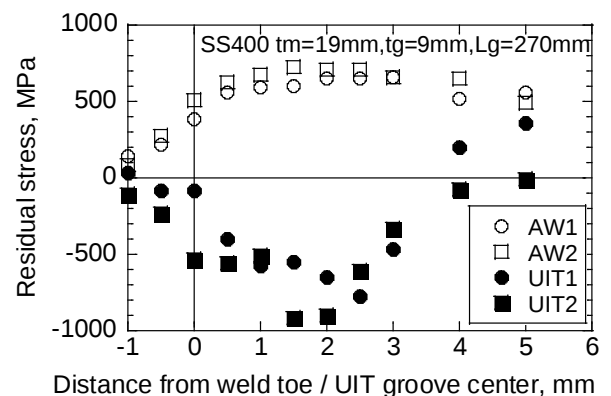


図5 面内ガセット止端の残留応力測定結果

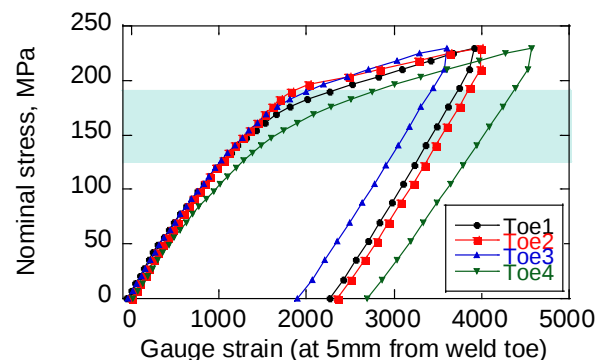


図6 UIT を施した面内ガセット継手の初期負荷時の止端ひずみと公称応力の関係