

UIT 処理を施した面外ガセット継手の疲労特性に及ぼす板厚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。一般に、溶接継手の疲労強度は鋼板の板厚によって変化する。これは溶接部の止端形状が板厚と無関係に一定の場合、止端の応力集中は厚手材の方が大きくなるのが自明であり、溶接サイズに依存する止端部の応力集中係数と応力勾配が板厚影響の支配因子であると言える。また、溶接ままの継手については JSSC の疲労設計指針・同解説(以下 JSSC 指針と呼ぶ)²⁾や IIW の疲労設計指針³⁾において疲労強度に及ぼす板厚効果の度合いが定式化されている。

UIT を施した十字継手の疲労特性に及ぼす板厚効果は、岩田ら⁴⁾の溶接構造用鋼 SM490A で作製した荷重非伝達型十字継手を用いた疲労試験や、より強度の高い HT570 クラスの溶接構造用鋼を用いた著者らの疲労試験結果から、板厚と止端形状の関係による応力集中の差異でほぼ説明できることが示された⁵⁾。この十字継手の板厚の影響については JSSC 指針²⁾等での規定と同程度であった⁵⁾。一方、面外ガセット継手については、JSSC 指針²⁾では、主板板厚の影響は小さく補正不要、IIW³⁾でも小さい影響度が定式化されている。そこで本報では、十字継手以外の継手形式についても応力集中の影響で板厚効果が表れていると考え、面外ガセット継手について止端部の応力集中を、UIT を施した場合の現実的な溝形状を用い FEM 解析により計算し、板厚効果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 に示す完全溶け込み型の面外ガセット継手とした。これは、すみ肉溶接による継手の場合、UIT を施すとルート破壊となるケースが多い為である。主板厚 t_m は 9~50mm, ガセット厚 t_g は 12, 16mm とした。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、その様にモデル化した。打撃深さについては通常 0.2~0.3mm の深さになるように施工することが多いことから、ここでは深さを 0.25mm とした。UIT の打撃ピンには直径 3mm ϕ , 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面取りがな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1/8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 MARC2017 を用い、ヤング率を 205800N/mm^2 , 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 の計算結果を図3に示す。試験片板厚の増大に伴い K_t が増大、また、ガセットプレートの板厚が増えた場合についても、 K_t が増大する傾向が確認できた。UIT 溝内部の K_t については以前、著者らのグループで計算されたが、その際はの条件は主板・ガセット共に板厚 12mm, 打撃深さが 0.3mm で太さ 3mm の

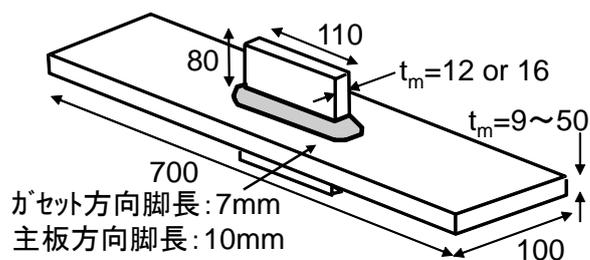


図1 試験体形状(単位 mm)

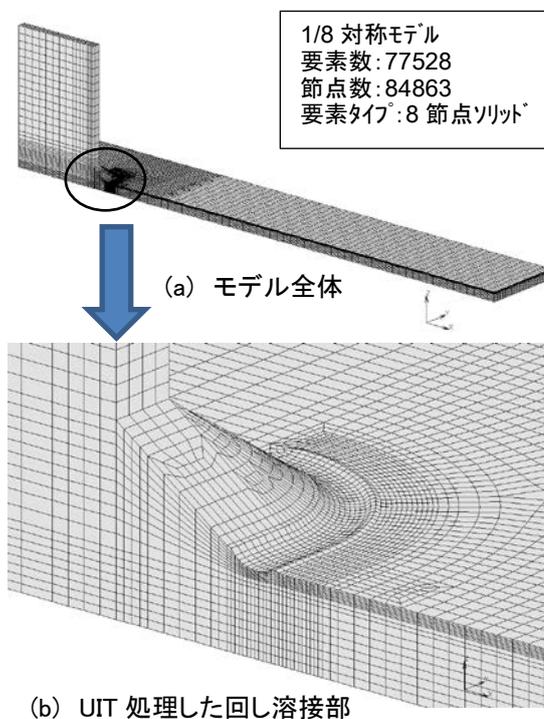


図2 面外ガセット試験片の FEM 要素分轄例

キーワード HFMI, UIT, 疲労強度, 残留応力, 応力集中, FEM 応力解析, 面外ガセット継手
連絡先 〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1 日本製鉄(株)鉄鋼研究所 厚板・形鋼・鋼管研究部

ピンを主板に対して垂直に打撃した場合の結果となっており、応力集中係数は2.83であった⁶⁾。これに対して、今回の結果は、若干小さい。

4. 試験片の疲労強度推定方法

著者らは UIT 継手の疲労限を修正グッドマン線図を、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^{7,8,9)}。この方法で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。この方法で推定する疲労限となる応力範囲 $\Delta\sigma_N$ を式1によりUIT部に導入され疲労荷重中に緩和されて最終的に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¹⁰⁾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して提案した推定式を、止端の応力集中を補正し、二つの推定式を平均した式2を用いた。なお、 σ_{RS} は負荷応力レベルで変化するため、 $\Delta\sigma_N$ の推定は収束計算によって行われる。

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

$$\sigma_{RS} = (-0.338\sigma_Y - 123 + 230\sigma_{Nmax}/\sigma_Y \cdot K_t/K_{tG} - 0.403\sigma_B - 51 + 261\sigma_{Nmax}/\sigma_B \cdot K_t/K_{tG})/2 \quad \dots\dots 2$$

ここで K_t : 当該継手の応力集中係数, K_{tG} : 基準面外ガセット継手の応力集中係数(主板厚 12mm), σ_{RS} : 止端部残留応力, σ_m : 平均応力, σ_W : 平滑材の両振り(R=-1)の疲労限= σ_B/α , σ_B : 主板引張強度, σ_{Nmax} : 最大公称応力, σ_{Nmin} : 最小公称応力, R : 公称応力比, σ_Y : 主板の降伏応力, 応力単位: N/mm²

また、FEM 解析では打撃痕部は断面形状がそのまま連続するものとしてモデル化し応力集中係数を求めたが、実際にはピンの先端の球面による打撃痕の重なりで多少凸凹が生じる為、疲労限と引張強度の関係から考えると疲労限が低めになる可能性を考慮し、 $\alpha=3$ とした。この方法によって著者らが以前行った板厚 12mm の SBHS500 の試験片の疲労試験結果⁷⁾を推定した疲労限となる疲労強度を図4にプロットした。図中には比較の為、実験した際の疲労試験結果⁷⁾と当該継手の JSSC 疲労等級²⁾と合わせて示した。実測した疲労限は前述した推定式による予測結果と良く対応した。

5. 面外ガセット継手試験片の疲労特性に及ぼす板厚の影響の考察

十字継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響は JSSC 指針では板厚 25mm を基準に係数 C_t は $C_t=(25/t)^{1/4}$ である(1/4 乗式)が、面外ガセット継手では効果なし、IIW の指針では $C_t=(25/t)^{1/10}$ である(1/10 乗式)ことから、今回推定した疲労限に対応する疲労強度の板厚の影響について板厚 25mm を基準に図5にプロットした。この結果、UIT を施した面外ガセット継手の止端応力集中係数を基に検討した主板の板厚効果の係数については 1/10 乗式が板厚 20mm 以上ではほぼ対応しており、それ以下では若干過小評価となると考えられる。また、ガセットの板厚 t_g の影響についても増厚が疲労強度の低下につながる可能性がある。

参考文献 : 1) G. B. Marquis 著: 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 著: 溶接学会論文集, No.34, Vol.4, pp249-259, 2016. 5) 島貫 著: 第 73 回 JSCE 年講, I-142, 2018. 6) 森 著: 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), No.2, pp.210-, 2014. 7) 島貫 著: 溶接構造シンポジウム 2014 講演論文集, 2014. 8) 島貫 著: 溶接構造シンポジウム 2019 講演論文集, 2019. 9) 島貫 著: 新日鉄住金技報, 第 400 号, pp100-, 10) 米澤 著: 溶接学会論文集, No.37, Vol.1, pp44-, 2019.

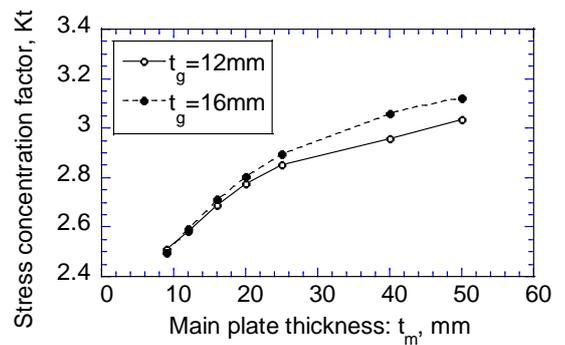


図3 UIT 処理止端の応力集中係数

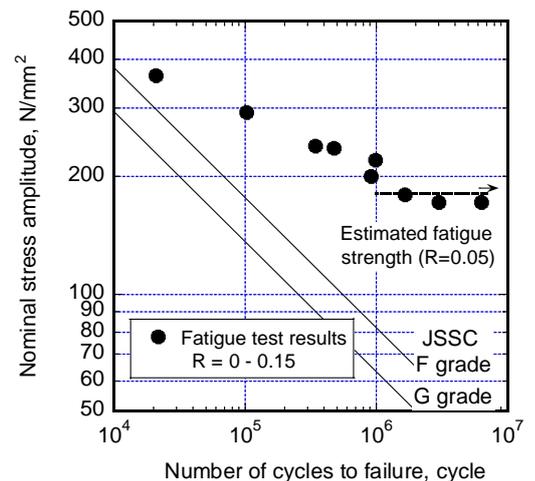


図4 面外ガセット継手の疲労試験結果例の疲労強度推定結果

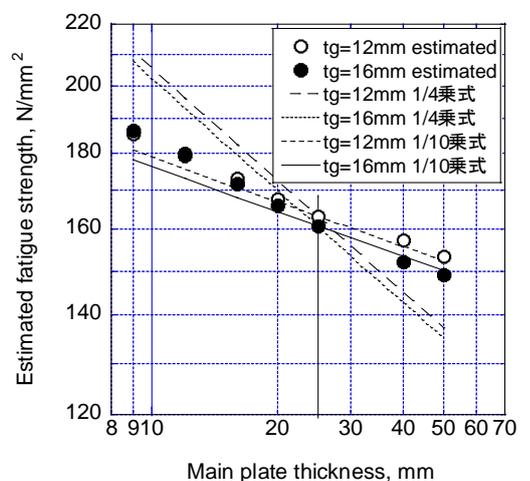


図5 UIT を施した面外ガセット継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響の推定値